

Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özelliklerine Etkisinin
Analizi ve Modellenmesi

Özgün Ateşin

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2017

Analyzing and Modeling the Effect of High Dosage Admixture Usage on Micro
Concrete Properties

Özgün Ateşin

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

June 2017

Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özelliklerine Etkisinin
Analizi ve Modellenmesi

Özgün Ateşin

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

“Bu Tez Eskişehir Osmangazi Üniversitesi tarafından 2014-359 no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.”

Haziran 2017

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Özgün Ateşin'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özelliklerine Etkisinin Analizi ve Modellenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

İkinci Danışman : ---

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye : Doç. Dr. Tayfun Uygunoğlu

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Üye : Doç. Dr. Cenk Karakurt

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Raif Boğa

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. İlker Bekir Topçu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özelliklerine Etkisinin Analizi ve Modellenmesi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 01/06/2017

Özgün Ateşin

İmza

ÖZET

Beton teknolojisinin gelişmesiyle beton sektörünü destekleyen yan sektörlerde de aynı paralellikte gelişmeler yaşanmaktadır. 90'lı yıllarda hazır beton sektöründe dünya genelinde kimyasal katkı kullanımını % 20'yi geçmezken bugün hazır beton üretiminde katkı kullanımını vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir. Betonun içerisinde katılan kimyasal katkı maddesi, çimentonun ağırlıkça küçük bir oranı için (örneğin normal akışkanlaştırıcı için % 0.5-1 civarı) kullanıldığından gerek üretimi yapan personel gerekse cihazların hassasiyetinden kaynaklanan nedenlerden dolayı hesaplanandan fazla miktarda katkının karışıma girmesi beton üretimi için oluşması beklenen risklerden biridir. Bu gibi durumlarda betonun çökme değeri aşırı artmakta, beton kararlılığını kaybederek ayrışabilmekte, hava sürüklenme etkisinde değişiklikler olabilmektedir. Bazı kimyasal katkıların aşırı dozajda kullanımı ise betonda kararlılık kaybına neden olmamakta, fakat betonun priz almasını aşırı geciktirerek kalıp alma süresini haftalarca uzatabilmektedir. Bu çalışmada sabit harç bileşenleri kullanılarak (aynı tip çimento, sabit su/çimento oranı, standart kum) çeşitli kimyasal katkıların (akışkanlaştırıcı, süper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıların) değişik oranlarda kullanımının harç özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla her bir katkı için ayrı ayrı belirlenen 5 farklı dozajdaki numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim ağırlık, yayılma, ultrases geçiş süresi, su emme, viskozite, priz süresi ve içyapı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kimyasal katkıların yüksek dozajda kullanımı durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayıplar yaşanacağı ve bu nedenle kimyasal katkı kullanımında hassasiyet gösterilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca elde edilen basınç dayanımı sonuçları kullanılarak yapay sinir ağları modeli oluşturulmuş ve modele katkı dozajı girilerek istenilen yaştaki basınç dayanımı sonucunun yüksek başarı düzeyi ile deney yapmadan tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal katkı, aşırı dozaj, mikro beton, mikro yapı, modelleme

SUMMARY

With the improvement of concrete technology, there are some parallel improvements in the sub-sectors that support concrete industry. In 90's, chemical admixture usage was not higher than 20% in concrete industry in the world, but today chemical admixture usage become an essential component of ready-mixed concrete production. In concrete production, because of chemical admixtures are used for a small percentage by weight of cement (for example, for plasticizers, it is about 0.5-1 %), there is a possible risk adding more admixture in concrete than calculated from personnel or equipments sensitivity errors. In this situation, concrete slump values increase excessively, concrete loses its stability and decompose and there are changes in the effect of air entrainment. Some chemical admixtures don't affect the concrete stability, but they extend the setting time extremely that cause unable to de-mold concrete. In this work, it was investigated the use of various chemical admixtures (plasticizer, superplasticizer, accelerator, retarder and air entraining admixtures) in different ratios on mortar properties with the use of constant mortar components (same cement type, constant water/cement ratio, standard sand). For this purpose, it was realized compressive strength, flexural strength, unit weight, flow, ultrasonic pulse velocity, water absorption, viscosity, setting time and internal structure tests on specimens which were produced in 5 different dosages for each admixture. As a result of experiments, in case of using admixtures with overdose, there would be loss of quality of physical and mechanical properties of concrete, for this reason it is concluded that, there would be a sensitive usage of chemical admixtures. Also, in scope of this work, with the use of compressive strength values it was created a model with application of Artificial Neural Networks and it was concluded that compressive strength values can be estimated without conducting experiment with high precision at desired age.

Keywords: Chemical admixture, overdose, micro concrete, micro structure, modelling

TEŞEKKÜR

Akademik alıŐmalarımnda, gerek ders aşamasında, gerek yeterlilik aşamasında, gerekse tez alıŐmalarımnda bana danıŐmanlık ederek, beni yÖnlendiren ve ufkumu aan danıŐmanım Sayın Prof. Dr. İlker Bekir Topçu'ya, tez izleme komitesinde bulunan ve çalıŐmalarım ile ilgili bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Doç. Dr. Tayfun Uygunoğlu'na ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz'a, laboratuvar çalıŐmalarında yardımını esirgemeyen İnŐ. Tek. Sevgin Yılmaz'a, maddi olarak tezimi proje fonu ile "Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özeliklerine Etkisinin Analizi ve Modellenmesi" adı altında destekleyen Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine, malzeme desteğinde beklediğimden fazla ilgi göstererek beni ŐaŐırtan ve akademik çalışmaları sonsuz destekleyen Grace firması yetkililerine ve son olarak doktora tezimin hazırlanması aşamasında gösterdiği sabır ve destek için eŐim Didem Ateşin'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Akışkanlaştırıcı Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	7
2.2. Süperakışkanlaştırıcı Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	11
2.3. Priz Hızlandırıcı Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	13
2.4. Priz Geciktirici Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	16
2.5. Hava Sürükleyici Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1. Kullanılan Malzemeler	27
3.1.1. Çimento.....	27
3.1.2. Su	28
3.1.3. Standart kum	28
3.1.4. Kimyasal katkılar.....	29
3.2. Karışım Oranları	30
3.3. Numune Üretimi	30
3.4. Yapılan Deneyler	31
3.4.1. Taze halde yapılan deneyler	31
3.4.1.1. Taze birim ağırlık deneyi	32
3.4.1.2. Yayılma deneyi	32
3.4.1.3. Priz süresi deneyi	33
3.4.1.4. Hava içeriği deneyi.....	34

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.4.1.5. Viskozite deneyleri.....	35
3.4.2. Sertleşmiş halde yapılan deneyler	39
3.4.2.1. Sertleşmiş birim ağırlık deneyi	39
3.4.2.2. Ultrases geçiş süresi deneyi.....	40
3.4.2.3. Kılcal su emme deneyi	41
3.4.2.4. Eğilme dayanımı deneyi.....	42
3.4.2.5. Basınç dayanımı deneyi	43
3.4.3. İÇyapı İncelemesi	44
3.4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD)	44
3.4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu incelemesi (SEM)	45
3.4.3.3. Yüksek çöz. yüzey alanı ve mikro gözenek boyutu analizi (BET)	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
4.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	48
4.1.1. Taze birim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi.....	48
4.1.2. Yayılma sonuçlarının değerlendirilmesi	51
4.1.3. Priz süresi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	52
4.1.4. Hava içeriği deney sonuçlarının değerlendirilmesi	54
4.1.5. Viskozite ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi	55
4.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	57
4.2.1. Sertleşmiş birim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi.....	58
4.2.2. Ultrases geçiş hızı sonuçlarının değerlendirilmesi	60
4.2.3. Kılcal su emme sonuçlarının değerlendirilmesi	61
4.2.4. Eğilme dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi	63
4.2.5. Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi.....	65
4.3. İÇyapı Analizlerinin Değerlendirilmesi	75
4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD) sonuçlarının değerlendirilmesi.....	76
4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçlarının değerlendirilmesi	81

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3.3. Yüksek çözünürlüklü yüzey alanı ve mikro gözenek boyutu analizi (BET) sonuçlarının değerlendirilmesi	98
5. HARÇ ÖZELİK İLİŞKİLERİNİN İRDELENMESİ VE MODELLEME	104
5.1. Harç Özellikleri Birbiri Arasındaki İlişkilerin İrdelenmesi	104
5.1.1. Yayılma ile viskozite arasındaki ilişki.....	104
5.1.2. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki.....	105
5.1.3. Basınç dayanımı ile taze hava içeriği arasındaki ilişki.....	107
5.1.4. Basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık arasındaki ilişki	109
5.1.5. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....	110
5.1.6. Basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki	112
5.1.7. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki	113
5.2. Basınç Dayanım Sonuçlarının Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Modellenmesi	115
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	121
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	126
ÖZGEÇMİŞ	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Akışkanlaştırıcı katkıların elektrostatik dağıtma etkisi.....	2
1.2. Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların stearik etkisi	3
3.1. Yayılma deney düzeneği.	32
3.2. Priz süresi deney düzeneği (Vicat iğnesi)	33
3.3. Harç içerisindeki hava miktarını ölçen cihaz.	34
3.4. Newton viskozite modeli.....	35
3.5. Newtonian sıvıların reolojik özellikleri.....	36
3.6. Pseudoplastik akış reogramları.	37
3.7. Dilatant akış reogramları.....	37
3.8. Plastik akış reogramları.....	38
3.9. Brookfield DV2TRV modeli viskozimetre.....	39
3.10. Ultrases geçiş süresi deney düzeneği.	40
3.11. Kılcal su emme deney düzeneği.....	42
3.12. Eğilme dayanımı deney düzeneği.	42
3.13. XRD analizlerinin yapıldığı Panalytical marka Empyrean model cihaz.	45
3.14. SEM analizi. (a) Numuneler, (b) Quorum Q150R ES marka cihaz, (c) Numunelerin cihaza yerleşimi, (d) Zeiss Supra 40VP model SEM cihazı.....	46
3.15. Micromeritics Asap 2020 BET cihazı.....	47
4.1. Taze birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi (hava sürükleyici hariç).	49
4.2. Hava sürükleyici katkı için taze birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi.	49
4.3. Yayılma değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.	51
4.4. Priz başlangıç sürelerinin katkı dozajı ile değişimi.....	52
4.5. Priz bitiş sürelerinin katkı dozajı ile değişimi.....	53
4.6. Hava içeriğinin katkı dozajı ile değişimi.	54
4.7. Akışkanlaştırıcı katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.	55
4.8. Süperakışkanlaştırıcı katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.	56
4.9. Hava sürükleyici katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.10. Sertleşmiş birim ağırlığın katkı dozajına göre değişimi (hava sürükleyici hariç).	59
4.11. Hava sürükleyici katkı için sertleşmiş birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi.....	59
4.12. Ultrases geçiş hızının katkı dozajı ile değişimi.....	61
4.13. Kılcal su emme değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	63
4.14. 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	64
4.15. 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	66
4.16. 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	68
4.17. 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	70
4.18. 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.....	71
4.19. Akışkanlaştırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	73
4.20. Süperakışkanlaştırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	73
4.21. Priz hızlandırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	74
4.22. Priz geciktirici katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	74
4.23. Hava sürükleyici katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.....	75
4.24. Akışkanlaştırıcı katkı X-ışını difraktometresi.....	77
4.25. Süperakışkanlaştırıcı katkı X-ışını difraktometresi.....	78
4.26. Priz hızlandırıcı katkı X-ışını difraktometresi.....	79
4.27. Priz geciktirici katkı X-ışını difraktometresi.....	80
4.28. Hava sürükleyici katkı X-ışını difraktometresi.....	81
4.29. Kontrol numunesinin 500x büyütme mikroskop yapısı.....	82
4.30. %1 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikroskop yapısı.....	83
4.31. %1 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütme mikroskop yapısı.....	83
4.32. %1 akışkanlaştırıcı katkı numune EDX analizi.....	84
4.33. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikroskop yapısı.....	84
4.34. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütme mikroskop yapısı.....	85
4.35. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunede yapılan EDX analizi.....	86
4.36. %3 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 5000x büyütme mikroskop yapısı.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.37. %3 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütme mikro yapısı.....	87
4.38. %4 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.....	87
4.39. %1 süperakışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.....	88
4.40. %1 süperakışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 1000x büyütme mikro yapısı.....	89
4.41. %2 süperakışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	89
4.42. %3 süperakışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	90
4.43. %4 süperakışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 2000x büyütme mikro yapısı.....	90
4.44. %4 süperakışkanlaştırıcı katkı numune EDX analizi.....	91
4.45. (a) %1.5, (b) %3, (c) %4, (d) %5 priz hızlandırıcı katkı harçların x500 büyütme mikro yapıları.....	92
4.46. % 0.5 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 2000x büyütme mikro yapısı.....	93
4.47. % 2 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.....	93
4.48. % 3 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.....	94
4.49. % 5 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 5000x büyütme mikro yapısı.....	94
4.50. % 0.1 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	95
4.51. % 0.5 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	96
4.52. % 1.5 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	96
4.53. % 2 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.....	97
4.54. % 1 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 1000x büyütme mikro yapısı.....	97
4.55. Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.	101
4.56. Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.	102
4.57. Hava sürükleyici katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.	102
5.1. Yayılma ile Viskozite arasındaki ilişki.	105
5.2. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki. (Hava sür. hariç).	106
5.3. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki. (Hava sürükleyici).	107
5.4. Basınç dayanımı ile taze hava içeriği arasındaki ilişki.	108
5.5. Basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık arasındaki ilişki.	110

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....	111
5.7. Basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki.....	113
5.8. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki.....	114
5.9. Yapay sinir hücresi yapısı.....	116
5.10. Yapay sinir ağları yapısı.....	117
5.11. Basınç dayanımlarının yapay sinir ağı modellenmesinde kullanılan sistem.....	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. CEM I 42.5R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	27
3.2. Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi.	28
3.3. CEN standart kumu elek analiz sonuçları.	28
3.4. Katkı maddelerinin özellikleri.....	29
3.5. Uygulanan katkı maddesi oranları ve kodları.	30
4.1. BET analizi gözenek hacmi sonuçları.....	99
5.1. Basınç dayanımı için model parametreleri.....	119
5.2. Yapay sinir ağı model sonuçları.....	120

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
b	Numune genişliği, cm.
C ₃ S	Trikalsiyum silikat (Alite)
C ₂ S	Dikalsiyum silikat (Belite)
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat (Celite)
C _A	Kılcal su emme değeri, g/mm ²
cP	Centipoise
F	Numunenin kırılma anındaki yük, kgf.
h	Numune yüksekliği, cm.
l	Mesnetler arası uzaklık, cm.
m ₁	Kabın boş kütlesi, kg
m ₂	Kabın, içerisindeki numune ile birlikte toplam kütlesi, kg
mPas	milipaskalsaniye
M	En yüksek moment
M ₀	90 gün süreyle küre bırakıldıktan sonraki numune kütlesi, g
M _j	28 gün süreyle suya temas sonrası ölçülen numune kütlesi, g
N	Sodyum hidroksit (NaOH)
P	Portlandite (CH)
P _f	Kırılma yükü, kgf
R	Regresyon
Q	Kuvars
T	Tobermorite (CSH)
V	Kabın hacmi, dm ³
W	Dayanım momenti
σ _f	Eğilme dayanımı, kgf/cm
τ	Kayma gerilmesi
γ	Kayma hızı oranı
Δ	Taze betonun yoğunluğu, kg/dm ³

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJH	Barett, Jonyer, Halenda (BJH) yöntemi
BET	Brunauer-Emmett-Teller Yüzey Alanı Analizi
CGS	Centimeter, gram, second (santimetre, gram, saniye)
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy (Enerji dağılımlı x-ışınları analizi)
MSE	Mean squared error (Ortalama karesel hata)
SEM	Scanning electron microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SI	Système international (Uluslararası birim sistemi)
TS EN	Türk Standartları European Norm
XRD	X-ray diffraction (X ışını difraksiyonu)
YSA	Yapay sinir ağları

1. GİRİŞ VE AMAÇ

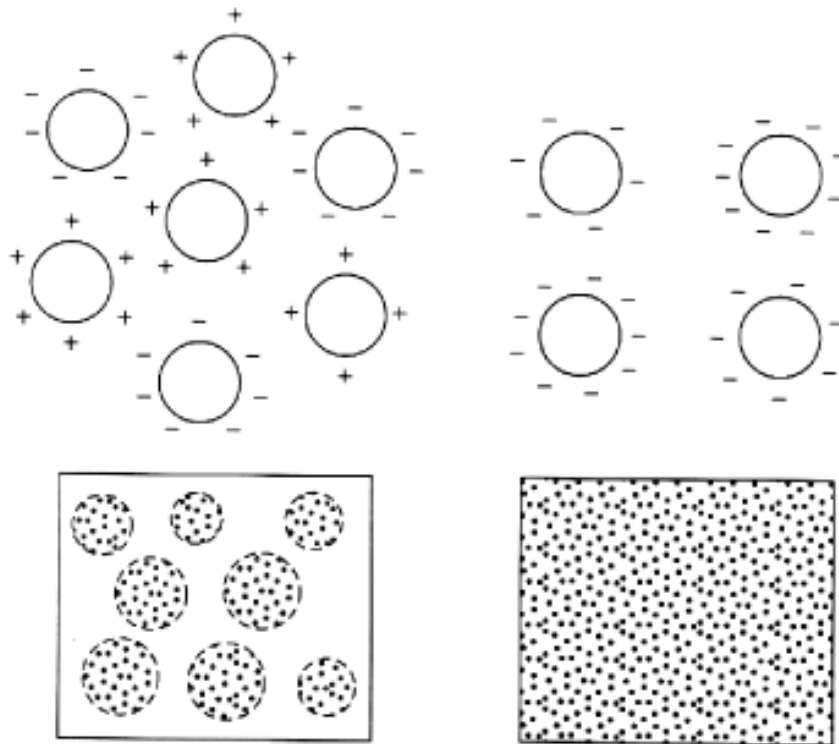
Günümüzde bilim ve teknolojide yaşanan ilerlemeler yaşamın her alanında ve her sektörde gelişmelere neden olduğu gibi inşaat sektöründe de yeniliklere ve ilerlemelere ışık tutmaktadır. Portland çimentosunun 1800'lü yılların başında üretilmeye başlamasından günümüze kadar geçen süreçte beton teknolojisinde birçok gelişme yaşanmıştır. Özellikle inşaat sektöründeki en düşük maliyet ile en kaliteli betonu üretme anlayışı, kimyasal katkıları üzerindeki ilgiyi ve dolayısıyla bu konuda yapılan çalışmaları arttırmıştır.

Kimyasal katkıların tarihi sanılanın aksine çok yeni değildir. Tarihte ilk kullanılan kimyasal katkı kalsiyum klorid bazlı bir priz hızlandırıcı olup ilk kullanımın 1873 yılına dayandığı ve ilk patentin ise 1885 yılında alındığı bilinmektedir (Ramachandran, 1996).Günümüzde özellikle hazır beton sektöründe akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. 90'ların başında hazır beton sektöründe kimyasal katkı kullanım oranı % 20'yi bulmazken (Ramachandran ve Malhotra, 1984) bugün hazır betonda katkı kullanımı vazgeçilmez bir öge olarak kabul edilmektedir.

Kimyasal katkıları betonun akışkanlığının artırılması, erken ve yüksek dayanıma ulaşılması, geçirimsizliğin ve donatı dayanımının sağlanması yanında priz sürelerini değiştirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Uysal ve Yılmaz, 2012). Katkı miktarları betonun diğer bileşenlerinin yanında çok küçük mertebelerde olduğundan beton üretimi sırasında insan ve ekipman faktörlerinden kaynaklanan hatalardan dolayı hesaplanandan fazla miktarda katkıların karışıma girmesi uygulamada zaman zaman karşılaşılan bir problemdir. Bu gibi durumlarda betonun çökme değeri aşırı artmakta, beton kararlılığını kaybederek ayrışabilmekte, hava sürüklenme etkisinde değişiklikler olmaktadır (Ramachandran ve Malhotra, 1984). Bazı kimyasal katkıların aşırı dozajda kullanımı ise betonda kararlılık kaybına neden olmamakla birlikte, betonun priz almasını aşırı geciktirerek kalıp alma süresini haftalarca uzatabilmektedir. Öte yandan katkı oranı değişimiyle karakter değiştiren katkılarda rapor edilmiştir. Örneğin, CaCl_2 düşük dozajlarda (çimento ağırlığının % 0.1'i ile 0.3'ü) priz geciktirici, yüksek dozajlarda ise priz hızlandırıcı etki göstermektedir (Mehta ve Monteiro, 2001). Yüksek dozajda katkı kullanımı halinde önlem olarak stabilizatör bir kimyasal katkıdan yararlanılabilir. Bir diğer çözüm de mümkünse karışıma

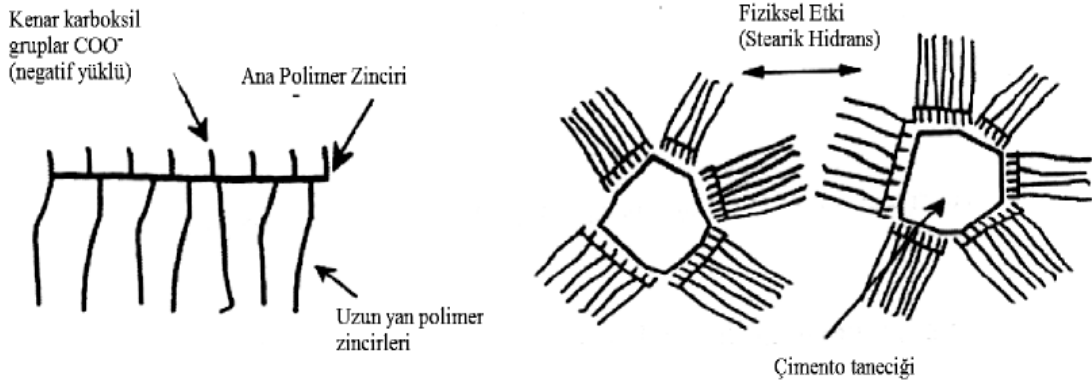
çimento ilavesi yapılmasıdır. Yüksek oranda kimyasal katkı betonda iç kanamaya yol açarak kireç, kalsiyum sülfat ve kalsiyum karbonat gibi maddeleri su ile dolu boşluklara sürükler. Bu olaya kimyasal ayrışma denilmektedir (Ramachandran ve Malhotra, 1984). Kimyasal ayrışma betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyerek servis ömrünü kısaltır.

Kimyasal katkı maddeleri, çimento ile fiziksel, elektriksel ya da fizikokimyasal bir etkileşime girip çimentonun hidrasyon hızını ve oranını değiştirebilmektedir. Ancak kimyasal katkıların temel etkisi fizikseldir. Kimyasal katkılar, çimento hamuruyla kimyasal bir reaksiyona girmemekte fakat dolaylı yoldan çimento hamurunun hidrasyonunda hızlandırıcı veya yavaşlatıcı etki göstermektedir. Bu etkiler çeşitli araştırmacılar tarafından çökelme, iyon konsantrasyon değişimi, kümeleştirme ya da ayrıştırma gibi değişik mekanizmalarla açıklanmaktadır. Topaklaşma eğilimi gösteren çimento tanecikleri kimyasal katkının ayırıcı etkisiyle dağılmakta ve su ile temas eden yüzeyler artmaktadır. Bu etki elektrostatik etki olarak adlandırılmaktadır ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların etki mekanizması olarak bilinmektedir. Elektrostatik dağılma etkisinin şematik gösterimi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Akışkanlaştırıcı katkıların elektrostatik dağıtma etkisi

Polimer esaslı katkılarda ise elektrostatik etkinin yerini daha değişik ayırıcı etkiler almaktadır. Özellikle polimer bazlı katkılarda elektrostatik etkinin yanında polimer zincirlerinin çimento tanesinin üzerine yapışarak oluşturduğu fiziksel etki daha baskın olmakta ve bu etki Şekil 1.2’de görüldüğü üzere stearik etki olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1.2. Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların stearik etkisi

Priz geciktiriciler su ile çimento arasında oluşan hidrasyona müdahale ederek, reaksiyonu yavaşlatırlar, böylece priz ötelenmiş olur. Priz geciktirici katkıları, C_3A ve C_3S 'in su içinde çözünmelerini kısıtlayarak veya çimentoda ilk çözünen bileşik olan $Ca(OH)_2$ 'nin Ca^{++} iyonları üzerine geçirimsiz bir tabak oluşturarak etkinlik sağlarlar. Portland çimentolu betonlarda, çimento tanesinin çözünmesi sonunda oluşan kalsiyum iyonları çözelti içinde hareket ederek gittikçe yoğunlaşırlar. Çözelti doymun hale gelince meydana gelen çökeltme sonunda kalsiyum iyonları çimento bileşenlerinin hidrate elemanlarını oluştururlar. Böylece betonda priz başlamış olur. Hidrasyonu kontrol eden beton katkıları çimento taneleri üzerine çökelen kalsiyum iyonlarını bağlayarak hidrat oluşumunu kontrol altına alır ve aynı zamanda çimento taneleri etrafında koruyucu bir tabaka oluşturarak hidrasyonu durdurur.

Priz hızlandırıcıların etki mekanizması ise diğer katkılara göre daha basittir. Priz hızlandırıcı katkıları çimento minerallerinden C_3S ve C_3A 'nın hidrasyonunu hızlandırır, bu şekilde soğuk iklim şartlarında üretilen betonlarda ısı açığa çıkartan çimento hidrasyonu nedeniyle betonun sıcaklığı artar ve erken yaşlarda dayanım artışı sağlanır. Kalsiyum klorür ($CaCl_2$), kalsiyum nitrat ($Ca(NO_3)_2$), sodyum sülfat (Na_2SO_4) vb. içeren kimyasal katkıları, içerdikleri kation (Ca^{+2}) ve anyon (Cl^-) ile C_3S hidrasyonunu hızlandırır (Ramachandran, 1996).

Hava sürükleyici katkıların etki mekanizmasında ise bilim insanları arasında bir ortak görüş bulunmamakta, bu katkının etki mekanizmasına yönelik iki farklı görüş bulunmaktadır. Birinci görüşe göre; kapiler boşluklarda bulunan suyun tamamı bir anda donmamaktadır. Donmuş olan su henüz donmamış olan suyu kapiler boşluk dışına çıkmaya zorlamakta ve bu da beton içerisinde çok büyük gerilmelere neden olmaktadır. Beton içerisinde sürüklenmiş hava bulunması durumunda bu donmamış su beton içerisinde bulunan düzenli aralıktaki milyonlarca hava boşluğu vasıtası ile kendine beton içerisinde yer bulabilmekte bu durumda gerilmeler azaltılmaktadır. Bu görüş halen birçok araştırmacı tarafından kabul gören bir hipotezdir. İkinci görüşe göre ise; çimento hamuru içerisindeki su, süper soğuma göstermekte ve görece büyük kapiler boşlukların içerisinde buz kristalleri oluşmaya başlamaktadır. Böyle bir durum, henüz donmamış durumda bulunan suyun alkali miktarını arttırmakta ve ortaya çıkan osmotik basınç nedeniyle boşluk içerisindeki henüz donmamış durumda bulunan suyun buz oluşmuş kısımlara difüzyonuna neden olmaktadır. Birinci görüşte suyun boşluk dışına itilmesi söz konusu iken ikinci görüşte bunun tam tersi, yani henüz donmamış suyun buzlanmanın başladığı boşluk içerisine doğru çekilmesi söz konusu olmaktadır. Sürüklenmiş hava kabarcıkları ile buzlanmaya başlayan boşluk içerisine doğru akma gösteren sular bu boşluklar tarafından tutulmakta ve böylece buzlanma başlayan boşluklar tamamen dolarak buz haline dönüşmemekte gerilmeler önlenmektedir.

Kimyasal katkıların tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, uygulamada karşılaşılan sorunların ve bu sorunlara aranan çözüm yollarının katkıların gelişmesinde itici güç olduğu görülmektedir. Örneğin ilk akışkanlaştırıcılardan olan lignosülfonat bazlı katkılar yüksek oranda şeker içerdikleri için priz gecikmesine neden olmuştur. Öte yandan, özellikle lignosülfonatların sürüklediği hava kabarcıklarının çapı donma çözülme direnci için etkili çaptan (0.2 mm) çok daha büyüktür. Bu nedenle lignosülfonatlar betonun bünyesinde sürüklenmiş hava boşluğundan çok daha fazla miktarda hapsolmuş hava boşluğu oluşturarak dayanım ve dayanıklılık kaybına neden olurlar (Parlak ve Akman, 2002).

Bir katkının etkinliği kullanım amacına göre değişir. Katkı kullanımı için beton özellikleri (istenilen işlenebilirlik derecesi, dayanım ölçütü için su kesme oranı) ve ortam koşulları (hava sıcaklığı ve bağıl nem) tam olarak belirlenmelidir (Türkel ve Felekoğlu, 2004). Etkinin olumlu olup olmadığı kullanım amacına göre de değiştiği için, her katkı kendi özelliklerinin en yüksek yarar getireceği şekilde kullanılmalıdır. Örneğin, priz geciktirici

katkılarının kış aylarında kullanımı sorun yaratırken, yaz aylarında beton dökümünün sorunsuz yapılmasını sağlayarak yarar sağlamaktadır. Uygun kimyasal katkıının uygun miktarda kullanımıyla olumsuz hava koşullarına karşı önlem alınabilir. Bu optimum değerlerin belirlenmesinde her katkıının özellikle çimento ile uyumluluğu ve hava sıcaklığının etkileri laboratuvar deneyleriyle belirlenmelidir (Yamada vd., 1999). Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılan kimyasal katkılar için belli işlenebilirliği sağlamada hangi katkıının hangi sıcaklıkta ne kadar kullanılması gerektiği ve sıcaklık yükselmesi ve düşüşü ile her derece için ne kadar katkı ilave edilmesi veya azaltılması gerektiği bir rapor halinde kamuoyuna sunulmaktadır.

Dünyada en çok kullanılan taşıyıcı inşaat malzemesi betondur. Ancak bu yüksek kullanımının yanında betonun bileşenleri bilinçsizce ve/veya yeterli ilgi göstermeden kullanılırsa, betonun dayanım ve dayanıklılığında ciddi kayıplar yaşanmakta, bu durumda kimi zaman masum insanların canına mal olabilmekte, kimi zamanda ekonomik anlamda kayıplar yaşanmaktadır. Betonun basınç dayanımının tayinine yönelik olarak günümüze kadar birçok araştırmacı su/çimento oranı üzerine çalışmalar yapmış ve bu çalışmalar sonucunda beton endüstrisinde çalışan veya betonu kullanan birçok insan bilinçlenmiştir. Ancak günümüz betonunun önemli bir bileşeni olan kimyasal katkıının dozajına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Kimyasal katkıının yüksek dozajda kullanımının da betonun özelliklerini etkileyeceği yapılan deneyler sonucu belirlenmiştir. Kimyasal katkıların yüksek dozajda kullanımına yönelik olarak literatürde az sayıda çalışma bulunsa da bu çalışmalar genelde betonun basınç dayanımı ile sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın amacı; yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımının betonun dayanım özelliklerine etkilerinin genel bir perspektiften incelenmesidir. Bu amaçla 5 farklı katkı (akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici) için farklı dozajlarda harç numuneleri üretilmiştir. Tüm numunelerde katkı dozajı hariç diğer harç bileşenleri sabit tutulmuştur. Taze harç özelliklerini belirlemek amacıyla; taze birim ağırlık, yayılma, priz süresi, hava içeriği ve viskozite deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş harç özelliklerini belirlemek amacıyla ise; sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş süresi, kılcal su emme, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen numunelerin içyapıları incelenmiş olup, bu kapsamda; X-ışını difraktometresi (XRD), Taramalı elektron

mikroskobu incelemesi (SEM) ve yüksek çözünürlüklü yüzey alanı ve mikro gözenek boyutu analizi (BET) yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen basınç dayanımı sonuçları kullanılarak yapay sinir ağları modeli oluşturulmuş ve modele katkı dozajı girilerek istenilen yaştaki basınç dayanımı sonucunun elde edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmayla hem günümüzde yoğun şekilde kullanılan kimyasal katkıların dozajına yönelik deneysel bir çalışma yapılmış olacak, hem de elde edilen veriler Yapay Sinir Ağlarına uygulanacaktır. Yapay sinir ağları insan sinir sisteminden esinlenerek bulunmuş bilimsel bir problem çözme sistematiği olup, inşaat mühendisliği dışındaki diğer alanlarda da yoğun şekilde kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında İnşaat mühendisliği alanında bir probleme çözüm bulunmaya çalışılırken, Yapay Sinir Ağları İnşaat Mühendisliği alanına uygulanmaya çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kimyasal katkıları, günümüzde betonun vazgeçilmez bir bileşeni olması nedeniyle literatürde geniş yer bulmaktadır. İnşaat Mühendisliğinin yanında kimya bölümü gibi diğer bilim dalları da bu alanda çalışmalar ve araştırmalar yapmaktadır. Bu çalışma kapsamında 2 kitap, 4 doktora tezi, 20 yüksek lisans tezi ve 122 bilimsel makale incelenmiştir.

2.1. Akışkanlaştırıcı Katkıları ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Akışkanlaştırıcıları ve süperakışkanlaştırıcıları kimyasal katkıları arasında en fazla tüketilen katkı olmaları (Anonim, 2016) nedeniyle kimyasal katkıları arasında en fazla araştırma yapılan katkı özeliğine sahiptirler.

Bekem (2014) tarafından hazırlanan “Kimyasal katkı maddelerinin betonun yüksek sıcaklığa dayanıklılığı üzerine etkileri” konulu doktora tezi kapsamında, akışkanlaştırıcı ve antifriz katkıları kullanılarak aynı çökme değerlerine sahip olan katkısız, akışkanlaştırıcı katkılı, antifriz katkılı ve akışkanlaştırıcı+antifriz katkılı olmak üzere C30/37 sınıfı dört farklı tip beton üretilmiş, üretilen numuneler yüksek sıcaklık fırınında 3 saat süresince 20 (Referans), 200, 400, 550 ve 700 C sıcaklığa bırakılarak, havada ve su püskürtme yoluyla soğutulmuştur. Soğutulan numuneler üzerinde; su emme, ultrases geçiş süresi ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; katkısız, akışkanlaştırıcı katkılı, antifriz katkılı, akışkanlaştırıcı+antifriz katkılı betonların sıcaklık arttıkça su emme oranlarının arttığı, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. 400 C'ye kadar havada soğutulan numunelerin kalan fiziksel ve mekanik özelliklerinin su ile püskürtülerek soğutulan numunelere göre daha iyi olduğu, ancak bu durumun 550 ve 700 C'de tersine döndüğü belirlenmiştir. XRD çekimlerinde tüm beton türlerinde 20 C'de görülen portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pikinin 700 C'de azaldığı belirlenmiştir.

Dedeoğlu (2010) tarafından hazırlanan “Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin beton üzerine etkilerinin incelenmesi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri betona katılarak betonun dayanımı üzerine etkileri, su emme oranları ve bunların aralarındaki farklılıklar incelenmiştir. Kontrol

(katkısız) betonu, normal akışkanlaştırıcı beton, süper akışkanlaştırıcı beton ve hiper akışkanlaştırıcı beton olmak üzere 4 grupta deneyler yapılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin betona katılmasıyla birlikte, kontrol (katkısız) betonuna göre daha az su oranı ile beton dayanımında yüksek bir artış görülmüştür.

Serinoğlu (2011) tarafından hazırlanan “Normal ve süper akışkanlaştırıcı katkı miktarının taze beton ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri” konulu yüksek lisans tezi kapsamında üretici firmalar tarafından önerilen dozajlarda veya bu dozajlardan daha fazla ve az miktarda (% 0.5, % 1, % 2) kullanılması halinde betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla naftalin sülfonat esaslı normal akışkanlaştırıcı (NA) ve modifiye polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA) katkılar kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Çalışma sonucunda katkıların kullanılan oranlarındaki değişimlerine (% 0.5, % 1, % 2) bağlı olarak betonda kıvamda artış görülmüştür. NA katkıların oranının artmasıyla betonda gözenek artışı olduğu görülmüş, belli bir orandan fazla normal akışkanlaştırıcı kullanıldığında, oluşan boşluklar nedeniyle dayanım düşüşleri belirlenmiştir. SA tipi katkılarda belli oran aşıldığında, işlenebilme ve ayrışma problemleri gözlemlenmiştir.

Aras (2013) tarafından hazırlanan “Pomza tozu ve akışkanlaştırıcı kullanımının çimentolu yonga levhaların bazı özelliklerine etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında pomza tozu ve akışkanlaştırıcı kullanımının çimentolu yonga levhaların bazı özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla % 0, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında pomza tozu ve % 0, % 0.4, % 0.8 ve % 1.2 oranlarında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Numuneler üzerinde; nem miktarı, yoğunluk, su alma ve kalınlık artımı, ısı iletkenlik katsayısı, eğilme direnci ve eğilmede elastisite modülü ve yüzeye dik çekme direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda % 0.4 ve % 0.8 akışkanlaştırıcı kullanımının levhaların, boyutsal kararlılık, eğilme, eğilmede elastisite modülü, çekme direnci ve ısı yalıtım özelliklerine olumlu etki yaptığı, % 1.2 akışkanlaştırıcı kullanımının ise dayanım özelliklerini düşürdüğü, ısı yalıtım özelliklerini arttırdığı görülmüştür.

Moralıoğlu (2015) tarafından hazırlanan “Kimyasal katkı-biyopolimer uyumunun çimento harcı özelliklerine etkisinin kitin özelinde incelenmesi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında kitin biyopolimeri, farklı kökene sahip üç tip akışkanlaştırıcı kimyasalla belirli

oranlarda karıştırılarak hazırlanan çimento harcı numunelerinin yayılma, dayanım gibi mekanik özellikleri ile donma-çözünme gibi dayanıklılık (durabilite) özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan harçlara kitin, harçlara katılacak olan bağlayıcı malzemenin ağırlığına % 0.3 ve % 1.0'i olacak şekilde ilave edilmiştir. Bununla birlikte akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları da bağlayıcı malzeme ağırlığının % 0.4, % 0.8 ve % 1.0'i olacak şekilde ilave edilmiştir. Aynı zamanda yalın ve sadece akışkanlaştırıcı ilave edilmiş harçlar da hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda; kitin biyopolimerinin, beton imalatında yaygın olarak kullanılan farklı kökene sahip akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılması pozitif ve negatif olmak üzere etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

Demir (2001) tarafından hazırlanan “Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin su/çimento oranı ve beton performansına etkileri” konulu yüksek lisans tezi kapsamında 4 grup deney yapılmıştır. Bunlardan ilk grupta; aynı katkıdan değişik oranlarda 5 seri beton numunesi elde edilmiş, bu numuneler kırılarak basınç dayanımları arasındaki ilişki belirlenmiş, ikinci ve üçüncü grup deneylerde aynı firmaya ait değişik akışkanlaştırıcılık özelliğine sahip katkıları farklı oranlarda numunelere katılmış olup, beşer seriden oluşan bu numuneler kırılarak basınç dayanımları arasındaki ilişki ortaya çıkartılmıştır. Dördüncü grup deneyde ise farklı bir firmaya ait katkı kullanılarak oluşturulan beton numunesi ile katkısız beton numunesinin basınç dayanımları belirlenerek, iki farklı numune arasındaki maliyet değişimi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanarak betondaki su/çimento oranını azaltıp, aynı işlenebilirlikte daha yüksek dayanımlı beton elde edilebileceği, bu katkıları sayesinde çimento miktarındaki azalma (az da olsa) ile ekonomik beton üretilebileceği, yüksek basınç dayanımlı, geçirimsizliği az, daha düzgün yüzeyli, dış etkilere dayanıklı beton üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Nagrokiene vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada linyosülfonat (LS), polikarboksilat asit (P) ve polikarboksilat ester (SP) içerikli akışkanlaştırıcıların çeşitli dozajlarda (% 0 - % 1.2 arası) kullanılmaları durumunda viskozitedeki değişimler incelenmiştir. Çalışma sonunda; akışkanlaştırıcı tipi ve dozajının beton tasarımında kilit rol oynadığı, SP tipi akışkanlaştırıcının viskozite düşürmede en etkili tip olduğu, bunun yanında SP tipi akışkanlaştırıcının normal portland çimentosunda yüksek dozajlarda kullanılmasının hidratasyonu yavaşlatması nedeniyle uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Benzer bir çalışmada Ng ve Justnes (2015) tarafından yapılmış olup, bu çalışmada da sodyum lignosülfonat (LS) esaslı bir akışkanlaştırıcı, naftalin sülfonat (NSF) esaslı bir akışkanlaştırıcı ve polikarboksilat ester (PCEs) esaslı üç farklı akışkanlaştırıcı kullanılarak, akışkanlaştırıcıların uçucu kül içeren çimentolardaki dağıtma özeliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında hem elle ilave edilen (% 20, % 40 ve % 60 oranlarında) uçucu küllü çimentolar hem de ticari olarak satılan CEM II/A-V sınıfı çimento kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde reoloji analizleri ve hidrasyon ısı analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda; akışkanlaştırıcı ilavesi ile tüm numunelerin işlenebilirliğinin arttığı ancak PCEs ve % 60 uçucu kül bulunan numunelerde kuma olduğu, işlenebilirlik açısından en etkili katkı grubunun PCEs olduğu, bunu NSF ve daha sonra LS'nin geldiği sonucuna varılmıştır.

Literatürde ticari olarak satılan akışkanlaştırıcıların yanında çeşitli atıkların da akışkanlaştırıcı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Agarwal ve Masood (1995) tarafından yapılan çalışmada kömür katranı atığının akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak kullanılmasına yönelik olarak araştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında kömür katranı atığı % 0 ile % 1.2 dozajlarda kullanılarak harç numunelerinin basınç dayanımı ve yayılma değerleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda kömür katranı atığı kullanılan numunelerin basınç dayanımlarının kontrol karışımının 28 günlük dayanımına benzer sonuçlar verdiği, farklı dozajlarda atık kullanımının ise yayılma değerlerini arttırdığı görülmüştür.

Başka bir çalışmada pirinç kabuğu hamurundan elde edilen siyah likörün akışkanlaştırıcı katkı olarak kullanımı araştırılmıştır. El-Mekkawi vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada siyah likör, iki farklı dozajda kullanılarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda siyah likörün betonun işlenebilme ve yerleşme özelliklerini geliştirdiği, bunun yanında priz başlama ve bitiş sürelerini uzattığı sonucuna varılmıştır.

Benzer başka bir çalışmada esparto linyininden elde edilen sülfone linyinin akışkanlaştırıcılık özellikleri Kamoun vd., (2003) tarafından incelenmiştir. Katkı, çimentonun ağırlıkça % 0.1 ile % 0.8 arasında değişen oranlarda karışıma dâhil edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonunda, optimum dozajın %0.4 olduğu, çökme kaybının ticari diğer ürünlere göre düştüğü, linyosülfonatlarla yaşanan priz gecikmesinin bu katkıda da gerçekleştiği ve basınç dayanımı sonuçlarında artışlar olduğu sonucuna varılmıştır.

Diğer bir çalışmada ise mikroorganizma esaslı bio-akışkanlaştırıcıların çimento hamuru ve harçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bio-akışkanlaştırıcılar, mikroorganizmaların fermantasyonu ile elde edilmektedir. Çalışma sonunda; bio-akışkanlaştırıcının beton teknolojisinde kullanılabileceği ancak formülasyonunda içerdiği yüksek su miktarı nedeniyle “seyreltme” etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Akışkanlaştırıcılar ayrıca kendiliğinden yerleşen şaplarda da kullanılmaktadır. Akışkanlaştırıcıların, kendiliğinden yerleşen şapların işlenebilirlik, reoloji ve hidrasyon süreçlerine etkileri Emoto ve Bier (2007) tarafından incelenmiştir. Çalışma sonucunda; akışkanlığın seçilen akışkanlaştırıcı tipinden etkilendiği, akışkanlaştırıcı kullanımı ile hidrasyon süreçlerinin uzadığı ve diğer çimentolu sistemlerde olduğu gibi kendiliğinden yerleşen şaplarda da ana hidrasyon ürünleri oluştuğunda viskozitenin arttığı belirlenmiştir.

2.2. Süperakışkanlaştırıcı Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Gürsoy (2003) tarafından hazırlanan “Farklı Akışkanlaştırıcı Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştiren farklı özelliklerdeki süperakışkanlaştırıcı ve hiper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin beton performansına etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki katkı maddeleri % 0.3, % 0.5 ve % 1 oranlarında kullanılarak betonlar üretilmiştir. Çalışma sonucunda genel olarak sabit su/çimento oranlarındaki katkılı betonlar katkısız beton ile karşılaştırıldığında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımında çökme miktarı ve birim ağırlık değerlerinin arttığı, Vebe değerleri ve hava yüzdesinin azaldığı görülmüştür.

Aytaç (2006) tarafından hazırlanan “Portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında çeşitli çimento fabrikalarından temin edilen 18 adet CEMI 42.5, 1 adet SDCÇ 32.5 ve 1 adet BPCÇ 42.5 tipi çimento ve farklı firmalarca üretilmiş 4 adet naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak çimento hamurları üretilmiş ve bu numuneler üzerinde “Marsh Hunisi” ve “Mini Çökme” deneyleri yapılarak akış süresi ve yayılma değerleri elde edilmiştir. Beton karışımları tek katkı ile hazırlanmış; taze karışımlarda çökme, çökme kaybı ve hava içeriği; sertleşmiş betonda ise farklı yaşlardaki basınç dayanımı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda süperakışkanlaştırıcı özelliklerinin başlangıç

akışkanlığı üzerindeki etkisinin, çimento kaynaklı etkilere göre çok önemsiz mertebede olduğu görülmüştür. Kıvam kaybı ise hem çimento hem de süperakışkanlaştırıcıların özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Ayrıca, çimento hamuru ve beton deneyi verileri arasında, başlangıç akışkanlığı açısından çok iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür.

Kıvanç (2006) tarafından hazırlanan “Süper akışkanlaştırıcı katkıların sualtı betonu özelliklerine etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında süper akışkanlaştırıcı katkının taze ve sertleşmiş haldeki sualtı betonu özelliklerine etkisi incelenmiştir. Araştırmada çimento tipi sabit seçilmiş olup bütün deneylerde normal Portland çimentosu (PÇ 42.5) kullanılmıştır. 350, 400, 450 kg/m³ dozajlı birer seri katkısız ve ikişer seri katkılı beton üretimi yapılmıştır. Katkılı olarak üretilen betonlarda % 0.8 ve % 1.3 oranında süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Üretilen tüm beton karışımlarında işlenebilirlik sabit tutulup, karışımın su/çimento oranı bu sabit işlenebilirlik değerine göre bulunmuştur. Üretimi yapılan karışımlar üzerinde taze halde; birim ağırlık, çökme yayılması, viskozimetre ve yıkanma kaybı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, sabit işlenebilirlikte süper akışkanlaştırıcı katkının kullanılması ile su-çimento oranında elde edilen düşüş sonucunda betonların viskozite değerlerinde artış oluşmasına rağmen yıkanma kaybı değerlerinin artması ilginç bir sonuçtur. Aynı süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ile üretilen betonlarda dozaj artışı ile viskozite değerleri artmış ve yıkanma kaybı değerleri azalmıştır. Bütün dozajlarda ve bütün yaşlarda süper akışkanlaştırıcı katkının havada ve su içerisinde alınan numunelerin basınç dayanımını, eğilme dayanımını, ultrases hızı ve su emme değerlerini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir.

Yücesoy (1993) tarafından hazırlanan “Süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin portland çimento harçlarının rötresine etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında 400, 450 ve 500 kg/m³ dozajlı olarak üretilen harçlarda katkı maddesi olarak; modifiye edilmiş linyosülfonat, melamin ve naftalin olmak üzere üç farklı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak harç numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük rötre ve ağırlık kaybı değerleriyle 7 ve 28 günlük ultrases hızı, basınç ve eğilme dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda süperakışkanlaştırıcı katkılardan linyosülfonat ve naftalin kökenli katkı maddeleri her dozaj ve katkı oranında harçların rötresini arttırırken, melamin kökenli katkı tipinde ise çimento dozajına ve kullanılan katkı oranına bağlı olarak rötreyi azaltıcı ya da arttırıcı etkisi belirlenmiştir.

Chang vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada süperakışkanlaştırıcı ve akışkanlaştırıcı katkı maddeleri birlikte kullanılarak kombine bir yüksek miktarda su azaltıcı elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda; elde edilen yeni süperakışkanlaştırıcı hem çökme kaybı değerlerini azaltmış, hem karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı ile benzer su azaltma özellikleri sergilemiş, hem de katkı maliyetini azaltmıştır.

Süperakışkanlaştırıcıların reolojik özellikleri Papo ve Piani (2004) tarafından yapılan bir çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışmada melamin reçenesi, modifiye linyosülfonat ve modifiye poliakrilik reçine esaslı olmak üzere üç farklı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak çimento hamurları hazırlanmıştır. Çalışma sonunda, modifiye poliakrilik reçinenin en düşük viskozite ile işlenebilirlik açısından en uygun süperakışkanlaştırıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada modifiye linyosülfonat (PLS), polikarboksilat (PCE) ve polinaftalin (PNS) içerikli 3 çeşit süperakışkanlaştırıcı çökme kaybı ve priz süresi özellikleri yönünden birbiri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, PLS'nin hidratasyonu PCE ve PNS ile karşılaştırıldığında daha fazla geciktirdiği, bu nedenle PLS'nin işlenebilirlik açısından kullanıcıya daha fazla zaman verdiği belirlenmiştir.

Naftalin, harmanlanmış polimer, melamin ve linyosülfonat esaslı dört süperakışkanlaştırıcının priz süresi ve basınç dayanımı açısından karşılaştırıldığı diğer bir çalışmada ise katkıların çimento uyumları araştırılmıştır (Agarwal vd. 2000). Bu amaçla 4 farklı süper akışkanlaştırıcı % 0 ile % 2.2 arasındaki dozajlarda beş farklı çimento ile karıştırılarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, üretici tarafından önerilen dozajların her zaman en uygun dozaj olmayacağı, bu nedenle uygulama öncesi ön deneyler yapılmasının uygun olacağı, naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcıda üretici tarafından önerilen % 2 lik dozajda priz gecikmesi yaşandığı belirlenmiştir.

2.3. Priz Hızlandırıcı Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Üstüner (2009) tarafından hazırlanan “Farklı çimento tipleri ile priz hızlandırıcı katkıların etkinliği” konulu yüksek lisans tezi kapsamında 4 çeşit çimento, doğal puzolan, yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı ile iki çeşit priz hızlandırıcı katkı, trietanolamin (TEA) ve

kalsiyum format (CF), kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Priz hızlandırıcı katkı ile farklı tip çimentoların priz süresine, su gerekesinimine ve basınç dayanımına olan etkisi, ilgili deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, su gerekesinimine, prize ve dayanıma olan etkileri nedeniyle deneyde kullanılan priz hızlandırıcı katkıların miktarlarının (TEA için % 0.25, % 0.50, % 1.00 ve CF için % 1.00, % 2.00, % 3.00) uygun olduğu gözlenmiştir. Normal kıvam ve % 110 akma için su ihtiyacında CF'nin yol açtığı artış, TEA'ya göre daha fazla olduğu, priz sürelerinde TEA ve CF'nin hızlandırıcı etkisinin % 6 mineral katkı içeren çimentolarda daha belirgin olduğu görülmüştür. Priz hızlandırıcı katkıların basınç dayanımına etkisi ise numune yaşı, mineral katkıların türü ve miktarı ile değişiklik göstermektedir. Genellikle tüm çimento tipleri için erken dayanım TEA'nın artışı ile artarken uzun dönem dayanımı ise CF'nin artışı ile artmaktadır.

Han vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, bir priz hızlandırıcı olan sodyum alüminatın (SA) çimento hidratasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında sodyum alüminat katılarak üretilen harçlarda hidratasyon ısı yayılımı, hidratasyon ürünleri ve numune boşluk yapısı incelenmiştir. Çalışma sonucunda; dozaja bağlı olarak sodyum alüminat ilavesi ile hidratasyonun 200 dakikadan birkaç dakikaya kadar düştüğü, % 4 dozajdan sonra priz süresinde değişim yaşanmadığı, bu nedenle bu dozajdan fazla kullanımın anlam ifade etmediği, priz hızlandırıcı ilavesi ile başlangıç hidratasyonunda ısı yayılımının arttığı ancak daha sonraki aşamalarda ısı yayılımının düştüğü, priz hızlandırıcı ilavesi ile boşluk yapısının değiştiği ve 5–30 nm arasındaki gözenekler artarken 30 nm'den büyük boşlukların azaldığı, basınç dayanımı değerlerinin erken yaşlarda arttığı ancak ilerleyen yaşlarda azaldığı sonuçlarına varılmıştır.

Başka bir çalışmada; kalsiyum esaslı hızlandırıcı kullanılan beton numunelerinin dayanım kazanımı araştırılmıştır (Min vd. 2014). Çalışma kapsamında buhar kücü uygulanmadan 6 saatte 10 MPa dayanıma ulaşan beton üretilmeye çalışılmıştır. Dayanım deneylerinin yanında TG/DTA, XRD, SEM ve MIP (civa porozimetresi) analizlerini de içeren mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaya göre, % 3 hızlandırıcı kullanımı ve oda koşullarında kür sonrasında basınç dayanımı 9 saat sonra 10 MPa'nın üzerine çıktığı, hızlandırıcı kullanımı ile ısı yayılım oranının arttığı, SEM ve XRD sonuçlarına göre kalsiyum hidroksit ve etrenjit miktarlarının arttığı sonuçlarına varılmıştır.

Sathya Narayanan ve Ramamurthy (2012) tarafından yapılan çalışmada 3 farklı hızlandırıcı (kalsiyum klorit, kalsiyum nitrat ve triethanolamine) katkının köpük beton üretimindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda, kalsiyum klorit'in kararsız köpük beton üretimine neden olduğu ve prizın 4,5 saat sonra başladığı, ancak triethanolamine ve kalsiyum nitrat esaslı katkılarda kararlı köpük beton üretilmesine rağmen prizın sırasıyla ancak 6 ve 4'üncü saatlerde başladığı sonucuna varılmıştır.

Kalsiyum nitratın diğer katkılarla (Triethanolamine ve triisopropanolamine) uyumunun araştırılması amacıyla Aggoun vd., (2008) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında her üç katkı ayrı ayrı ve birbirleri ile karıştırılarak kullanılmış ve çimento priz alma aşamaları irdelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda; katkıların birlikte kullanılması durumunda yalnız kullanılmaları ile karşılaştırıldığında priz alma sürelerinin kısaldığı ve dayanımların arttığı, ayrıca eşit dozajda kullanıldıklarında dayanım kazanımı açısından triisopropanolamin'in triethanolamine ile karşılaştırıldığında çok daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Çeşitli hızlandırıcıların çimento ana bileşenlerinden C_2S hidratasyonuna etkisi El-Didamony vd. (1996) tarafından incelenmiştir. Araştırma kapsamında $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, $Ca(CH_3COO)_2$ and K_2CO_3 esaslı 4 farklı katkı kullanılmıştır. $CaCO_3$ 'ten sentezlenen C_2S içerisine % 1 ile % 2 dozajında katkılardan kullanılarak karışım oluşturulmuş ve hidratasyon izlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, priz hızlandırıcıların kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek hidratasyonu hızlandığı belirlenmiştir.

Tez kapsamında da priz hızlandırıcı olarak kullanılan kalsiyum nitratın priz hızlandırma özeliğinin düşük sıcaklıklarda (5-7 °C) etkisine yönelik çalışma Justnes ve Nygaard (1995) tarafından yapılmıştır. Araştırma kapsamında % 0, % 1.55, % 2.32, % 3.10, % 3.86 ve % 7.73 dozajlarında (çimentonun ağırlıkça yüzdesi) kalsiyum nitrat (CN) ve 5 farklı çimento kullanılarak çimento hamuru numuneleri hazırlanmış ve 5-7 C sıcaklığındaki ortamda priz süreleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmada, kalsiyum nitrat etkinliğinin çimento tipi ile ilişkili olduğu ancak bunun yanında çimento içeriğindeki C_3A ile herhangi bir korelasyon bulunmadığı, CN etkinliğinin daha çok çimento içindeki belite (C_2S) miktarının artışı ile birlikte arttığı sonucuna varılmıştır.

2.4. Priz Geciktirici Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Marwat (2000) tarafından hazırlanan “Şekerin farklı çimento priz süresine etkisi” konulu doktora tezi kapsamında değişik kökenli şekerlerin (şeker pancarı ve şeker kamışı) çimento hamurunun priz sürelerine ve basınç dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Priz sürelerinin belirlenmesinde; farklı şeker oranları, üç tip çimento ve üç değişik kür koşulu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; normal kür koşullarında (sıcaklık = 22°C ve % 60 bağıl nem) şekerin priz üzerine geciktirici etkisinin şeker oranlarının artması ile belirli bir değere kadar artış gösterdiği, ancak şeker içeriğinin daha da artırılmasıyla geciktirici etkinin azaldığı ve belirli bir değerden sonra ters etki ortaya çıktığı (değer bir deyişle, çimento prizini hızlandırdığı), yüksek sıcaklıklarda ve düşük bağıl nemde geciktirici etkinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, belirli bir şeker miktarına kadar basınç dayanımlarında (2. 7. 14. ve 28 günlük) artışlar elde edilmiştir.

Uludoğan (2001) tarafından hazırlanan “Uzun süre etkili priz geciktirici katkının portland çimentolu harç özelliklerine etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında, uzun süre etkili priz geciktirici katkıların taze ve sertleşmiş çimentolu harçların özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 300, 400, 500 kg/m³ dozajlı olarak üretilen harçlarda sabit işlenebilmeyi sağlamak için her dozaj için ayrı ayrı su/çimento oranı bulunmuş, bütün dozajlarda uzun süre etkili priz geciktirici katkı karışımına t=0, 30, 60, 90 ve 120 dakikalarda katılmıştır. Karışımlarda zamanla oluşan işlenebilme kaybı ve karışımların priz başlangıç süreleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; çimento dozajının artmasıyla uzun süre etkili priz geciktirici katkının taze ve sertleşmiş harç özelliklerini değiştirmede daha etkin olduğu, bütün dozajlarda ve bütün yaşlarda uzun süre etkili priz geciktirici katkının basınç dayanımı ve ultrases hızına olumlu yönde etkisi olduğu, bunun yanında, yeniden su verme işleminin harç özelliklerini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

İlkenntapar (2013) tarafından hazırlanan “Kimyasal katkı içeren alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının farklı kür koşulları altındaki özellikleri” konulu yüksek lisans tezi kapsamında; alkali ile aktive edilmiş cüruf lu bağlayıcıların uygulamalardaki kullanımına engel teşkil eden hızlı priz alma ve yüksek kuruma rötresi gibi problemlerinin çözümünde, “rötre azaltıcı” ve “süper akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici” kimyasal katkıların, sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiş çimentosuz cüruf harçlarının

işlenebilirlik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kimyasal katkıları karışım içerisine % 1 oranında eklenmiştir. Çalışma sonucunda; kullanılan kimyasal katkıların, cürufu karışımların taze haldeki özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlamalarına karşın, normal Portland çimentolu karışımlardaki kadar etkili olmadıklarını, ancak, rötre deformasyonlarının azaltılmasında yararlı olduklarını göstermiştir.

Başkoca (1995) tarafından hazırlanan “Priz geciktirici katkıların uzun süre karıştırılmış beton özelliklerine etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında priz geciktirici katkıların taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla değişik katkıları ve farklı katkı yüzdeleriyle aynı çimento ve aynı beton bileşimine sahip 8 ayrı numune üretilmiş, üretilen numuneler üzerinde taze beton deneyleri (çökme, taze birim ağırlık, hava miktarı, terleme, penetrasyon direnci) yapılmış ve ileri günlerde gerçekleştirilmek üzere sertleşmiş beton deneyleri (basınç, eğilme, hidrolik rötre permabilite) için numuneler alınmıştır. Betonun işlenebilir değeri düşük seviyelere indiğinde yeniden su verilerek işlenebilir baştaki değerine getirilmiş ve tekrar numuneler alınmıştır. Deneyler sonucunda kullanılan katkıların ve miktarlarının beton özelliklerini değiştirmede etkin olduğu belirlenmiştir. Priz geciktiriciler, su indirgeyici kullanarak üretilen betonlara eklendiğinde etkilerinin daha da belirginleştiği görülmüştür. Yeniden su verme işleminin beton özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

Nocuń-Wczelik ve Czapik (2013) tarafından yapılan çalışmada fosfat esaslı iki farklı priz geciktirici polikarboksilat bazlı iki farklı süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılarak hidrasyon süreçleri incelenmiştir. Bu amaçla 0.3 ve 0.5 su/çimento oranında hazırlanan çimento hamurlarına % 2 oranında katkı ilavesi yapılmış ve çimento hamurlarının ısı yayılımı, priz süreleri ve mikro yapıları incelenmiştir. Deneysel çalışmada, erken yaşlarda siperakışkanlaştırıcı ve priz geciktiricinin hidrasyonu yavaşlattığı, % 2 oranında süperakışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde açığa çıkan ısı miktarının değişmediği, ancak indüksiyon (başlama) periyodunun uzadığı, ilk 10 saatlik zaman aralığında betonun iletkenliğinin azaldığı, mikro yapının ise katkı ilavesi ile değişmediği sonucuna varılmıştır.

Priz geciktirici katkıların alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül harçlarına etkisi Lee ve Lee (2013) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla alkali ile aktive edilmiş harç numunelerine % 0 ile % 2.25 arasında değişen oranlarda % 85 fosforik asit solüsyonu içeren priz geciktirici

katılarak harçların çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, harçların priz sürelerinin uzadığı ve basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür.

Beyaz şeker içeren süper geciktirici katkının beton özelliklerine etkisi Han ve Han (2010) tarafından incelenmiştir. Beyaz şeker içeren betonlarda kuma ve hava içeriği kaybı yaşanması nedeniyle süper geciktirici katkı (SRA) ile birlikte viskozite düzenleyici ve hava sürükleyici katkı kullanarak çeşitli beton numuneleri üretilmiştir. SRA karışımlarda % 0 ile % 0.6 arasında kullanılırken viskozite düzenleyici SRA ile aynı oranda, hava sürükleyici ise % 0.5 oranında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, SRA kullanılan ve düşük sıcaklıkta kür edilen betonların priz başlama ve bitiş sürelerinin uzadığı, en yüksek dozaj olan % 0.6 oranında SRA kullanılması ve oda sıcaklığında kür durumunda priz bitiş süresinin 10 güne uzadığı, düşük sıcaklıklarda kürde ise iki haftada bile prizin tamamlanmadığı sonucuna varılmıştır.

Şeker endüstrisinin atığı olan melas, betonda geciktirici ve su azaltıcı katkı olarak kullanılmaktadır. Jumadurdiyev vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada Türkiye’de bulunan 3 farklı şeker fabrikasından elde edilen melas, beton ve harç numunelerinin içerisine % 0.20 ile % 0.70 arasında değişen oranlarda katılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla linyosülfonat (LS) bazlı bir akışkanlaştırıcıda kullanılarak numuneler üretilmiştir. Çalışma sonucunda, melas ilavesi ile priz sürelerinin uzadığı, yayılma özeliğinin LS bazlı akışkanlaştırıcı ile benzer nitelikte olduğu, kusmanın LS ile karşılaştırıldığında melasta daha fazla olduğu, basınç dayanımlarının erken yaşlarda LS’e göre daha fazla olduğu, karbonatlaşma anlamında LS ile benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

2.5. Hava Sürükleyici Katkılar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Şahin (2013) tarafından hazırlanan “Hava sürükleyici katkıların karakterizasyonu ve deney koşullarının betonun donma-çözülme hasarına etkisi” konulu doktora tezi kapsamında hava sürükleyici kimyasal katkıların, kimyasal esaslarının hava boşluğu oluşumuna, kararlılığına ve hava sürükleyici katkıların betonlarda kullanılmadan önce performanslarının belirlenmesine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Taze ve sertleşmiş halde yapılan hava boşluğu sistemi analizleri sonucu reçine esaslı hava sürükleyici katkıların daha büyük boyutlu hava boşlukları oluşturduğu, bununla beraber yüzey gerilimi ölçümleri sonucu bu

katkıların yüzey gerilimini diğer katkıları ile karşılaştırıldığında daha az düşürdüğü belirlenmiştir. Reçine esaslı katkıların diğer katkıları ile karşılaştırıldığında daha kararlı boşluklar oluşturdukları, köpük drenajı deneyi ve zamana bağlı yapılan hava miktarı ölçümleri ile belirlenmiştir. Bununla beraber, hava boşluğu kararlılığının katkı kimyasından önce çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumu ve beton kıvamı gibi diğer etkenlere bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, hava sürükleyici katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan deneylerin, süperakışkanlaştırıcı içeren betonlarda, çimento-katkı uyumsuzluğu nedeniyle yanıltıcı sonuçlar verebildiği görülmüştür. Bazı hava sürükleyici katkıların yeterli hava miktarına sahip betonlar oluşturmalarına karşın bu betonların yeterli donma-çözülme performansı sağlamaması sorununa yönelik olarak, 6 farklı kimyasal esasa sahip hava sürükleyici katkının ikişer farklı dozajda kullanılmasıyla betonlar üretilmiş ve bu betonlara EN 12390-9 standardında yer alan CDF (Capillary suction, Deicing salts and Freeze/thaw test) deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda yeterli hava boşluğu sistemine sahip olan betonlar donma-çözülme dayanıklılığı göstermiş, hava boşluğu sistemi yetersiz olan betonlar ise gösterememiştir. Çalışma sonucunda, betonların donma-çözülme performanslarının değerlendirilmesinde sadece hava miktarının yeterli olmadığı görülmüş ve nedenleri belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında deney koşullarının etkileri, sıcaklık-zaman çevrimlerinin ayarlanabildiği bir deney cihazında ve gerçek ortam koşullarına daha uygun bir donma-çözülme deneyi olan CDF deneyine uygun olarak incelenmiştir. Deney koşullarının, iki farklı su/çimento oranı ve farklı hava miktarlarına sahip betonlarda oluşan hasar ve hasarın türü üzerine etkileri ortaya konmuştur. Buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı baskın olmuş, pullanmaya dayanıklı betonlarda içsel hasar oluşmamıştır. Betonların en düşük sıcaklıkta bekletilmesinin pullanma hasarının artmasında en etkili deney koşulu olduğu, bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Donma hızının yavaş olmasının pullanma hasarını arttırdığı ve en şiddetli pullanma deneyinin düşük donma hızında ve betonların en düşük sıcaklıkta bekletilmesi ile oluşturulabileceği görülmüştür. Ayrıca, farklı hava sürükleyicilerin kullanıldığı ve farklı hava boşluğu sistemine sahip hava sürüklenmiş betonlar tüm deney koşullarında yeterli donma-çözülme performansı sergilemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda hava sürükleyici katkıların kimyasal esasının hava boşluğu sistemi oluşumu üzerindeki etkisi ve bir katkının betonlarda kullanılmadan önce performans deneyleri ile nasıl değerlendirilebileceği, sıkça kullanılan köpük deneylerinin yanında çalışma kapsamında uygulanan yüzey gerilimi ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Hava

boşluklarının boyut dağılımlarının araştırılmasında civalı porozimetre deneyinin uygulanabilirliği, taze halde yapılan boşluk sistemi analizleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Hava boşluğu sisteminin kararlılığı üzerinde belli başlı etkenler araştırılmış ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasının etkisi belirlenmiştir. Farklı hava sürükleyici katkıları kullanılarak oluşturulan hava boşluğu sistemlerinin, betonların mekanik özellikleri (basınç ve yarma-çekme dayanımları, elastisite modülü), iletkenlik özellikleri (elektriksel iletkenlik ve ultrases geçiş hızı) ve geçirimsizlik özellikleri (kılcal su geçirimsizliği - ASTM C 1585 (2013) ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi - ASTM C 1202 (2012)) üzerindeki etkileri yapılan deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca, betonların donma-çözülme dayanıklılıkları üzerinde farklı kimyasal esasa sahip hava sürükleyici katkılarıyla oluşturulan hava boşluğu sistemlerinin etkisi ve deney koşullarının hasar oluşumu ve hasarın türü üzerine etkileri belirlenmiştir.

Karakoç (2010) tarafından hazırlanan “Hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin yüksek dayanımlı betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisinin incelenmesi ve modellenmesi” konulu doktora tezi kapsamında; hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı (HSK) maddesinin yüksek dayanımlı betonun (YDB) donma-çözülme dayanıklılığına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, beton karışımında ince agreganın 0-2 mm’lik kısmının yerine, toplam agrega hacminin % 10, % 20 ve % 30 oranlarında geliştirilmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA) kullanılmıştır. Su/bağlayıcı (w/b) oranları 0.25, 0.30 ve 0.35 olarak belirlenmiştir. Ayrıca her w/b oranı için HSK’lı bir grup hazırlanmıştır. Numunelerin 0, 100, 200, 300 ve 1500 donma-çözülme çevrimi sonunda basınç dayanımları, ultrasonik hızları (UPV), ağırlık ve boy değişimleri, gözenekliliği, bağıl dinamik elastisite modülleri (BDEM), BET analizleri ve SEM mikrografları belirlenmiştir. Donma-çözülme dayanıklılığı açısından, HSK’lı grupların ve % 10 hafif agregalı grupların, kontrol gruplarına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak daha yüksek hafif agrega oranlarında donma-çözülme dayanıklılığının azaldığı gözlenmiştir. Ağırlık ve boy değişimlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Donma-çözülme sonrası içyapı ve gözeneklilik göz önüne alındığında içyapıda hasarların oluştuğu belirlenmiştir. Üçyüz çevrim sonunda; basınç dayanımı, UPV, BDEM, gözenek değerlerinden elde edilen sonuçlar ve genetik algoritma ile elde edilen optimum değerler ve yapay sinir ağları ile elde edilen modeller incelendiğinde hafif agregaların yaklaşık olarak % 10 oranında kullanılmasının donma-çözülme dayanıklılığı için uygun

olduğu belirlenmiştir. Ancak 1500 çevrim sonunda doygun numuneler üzerinde ölçülen değerlere göre w/b oranı 0.35 olan numunelerin zarar gördüğü, 0.25 olan numunelerin ise BDEM değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür.

Akca (2011) tarafından hazırlanan “The effects of polypropylene fiber and air entraining admixture addition on high performance concrete exposed to elevated temperatures – Polipropilen lif ve hava sürükleyici katkı kullanımının yüksek sıcaklık etkisinde yüksek performanslı betona etkileri” konulu yüksek lisans tezi kapsamında; su/bağlayıcı oranı 0.24 olan ve farklı oranlarda PP (polipropilen) lif ve HS (hava sürükleyici) içeren dokuz YPB (yüksek performanslı beton) karışımı üretilmiş ve 18 farklı seri elde edilmiştir. Bu seriler 10 C/dak hızla ısıtılarak 300 C, 600 C ve 900 C’de sıcaklık etkisine bırakılmış ve havada soğutmadan sonra basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Isıtılan numuneler farklı sıcaklıklarda YPB’un renk değişimi, çatlaklarını ve parçalanmasını araştırmak amacıyla makro ve mikro ölçekte incelenmiştir. Ayrıca, dokuz karışımdan toz numuneler üzerinde termogravimetrik analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda HSK kullanımının kalan dayanımlardaki düşüşü azalttığı fakat bu etkinin 300 C’den sonra düzensizleştiği görülmüştür. PP lifler ise kalan dayanımları düşürmüştür. HSK ve PP lifin birlikte kullanılması parçalanma riskini azaltmış, numune boyutlarının YPB’un zarar görmesinde önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

Ataş (2013) tarafından hazırlanan “Hava sürükleyici ve lif katkısı içeren çimento harçlarının donma-çözülme etkisi altında mekanik davranışlarının incelenmesi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında; betonun donma-çözülme döngüsü etkisinde kalması halinde ortaya çıkan zararlı etkileri azaltmak için hava sürükleyici katkı maddeleri ile lif katkılarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla çalışmanın birinci kısmında, üç farklı türdeki (HS1, HS2, HS3) hava sürükleyici katkı, dört farklı oranda (% 0.00, % 0.45, % 0.55, % 0.65) çimento harcına katılarak beş farklı donma-çözülme döngüsüne (0, 7, 14, 28, 56) bırakılmıştır. İkinci kısımda ise birinci kısımda belirlenen hava sürükleyici katkı türü ve oranı ile birlikte beş farklı lif türü (PP, CF, AR, GF ve PVA) dört farklı oranda (% 0.0, % 0.4, % 0.8, % 1.2) çimento harcına ilave edilerek hazırlanan numuneler, beş farklı donma – çözülme döngüsüne (0, 25, 50, 75, 100) bırakılmış ve donma-çözülme etkisi altında mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre; hava sürükleyici katkıları betonun donma-çözülme direncini artırırken mekanik özelliklerini de düşürebilmektedir.

Donma-çözülme etkisine karşı en iyi başarımı bu çalışmada kullanılan HS3 (özel inorganik maddeler karışımı toz) türü hava sürükleyici katkı, % 0.65 ilave oranı ile sağlamıştır. Tekrarlı donma-çözülme döngüleri etkisinde kalan numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde ise; hava sürükleyici katkılı, lif katkılı ve katkısız bütün numunelerin basınç dayanımlarında, eğilme dayanımlarında ve dinamik elastisite modüllerinde belli oranlarda azalmalar görülmüştür. Ancak aynı anda hem hava sürükleyici hem de lif katkı içeren numuneler donma-çözülme hasarına karşı daha iyi performans göstermişlerdir.

Gül (2011) tarafından hazırlanan “Cam elyaf ve hava sürükleyici katkı kullanılarak geliştirilmiş kerpiç” konulu yüksek lisans tezi kapsamında geleneksel kerpiç üretiminde farklı malzemeler kullanılarak kerpicingin özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çalışmanın birinci kısmında kerpiç harcına cam elyaf ve hava sürükleyici katkı katılarak katkıların etkisinin araştırılması için farklı karışımlara sahip numuneler üretilmiştir. Numuneler üzerinde 28. ve 56. günlerde basınç ve suya dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümünde ise kerpicingin sağladığı finansal kâr incelenmiştir. Bunun için kerpiç duvar ile günümüzde yaygın kullanıma sahip tuğla duvarın maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma sonucunda cam lifi ve hava sürükleyici oranının artması ile basınç dayanım değerinin de arttığı görülmüştür. Suda dağılma deneyi sonuçları incelendiğinde; hava sürükleyici katkı bulunan numunelerde kılcal kanalların sürekliliğini engellendiği, böylece suyun iç kısımlara ilerlemesinin önüne geçildiği görülmüştür. Çalışmanın diğer bir ayağı olan maliyet araştırmasında ise kerpiç duvar kullanılmasının tuğla duvar kullanılmasına göre % 17,02 oranında bir maliyet kârına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonunda diğer araştırmalarda da belirtildiği gibi kerpicingin ilave katkı ile geliştirilebildiği görülmüştür.

Polat (2007) tarafından hazırlanan “Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında; genleştirilmiş perlit agregası (GPA), pomza agregası (PA) ve hava sürükleyici katkı maddesi (HSK) kullanılarak elde edilen beton numunelere; 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında, betondaki kılcal geçirimsizliğin, birim ağırlıklarının ve basınç dayanımının üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışıma (0-2) ince agrega yerine % 10, % 20 ve % 30 oranlarında GPA ve PA ve % 0.1 oranında HSK eklenerek beton numuneler üretilmiştir. Çalışma sonucunda GPA ve PA

oranları arttıkça basınç dayanımı ve birim ağırlığın azaldığı; kılcal geçirimliliğin arttığı ve 100 donma-çözülme çevrimi sonucunda betonun, basınç dayanımı ve birim ağırlığı değerlerinin azaldığı; kılcal geçirimliliğin arttığı görülmüştür. Ayrıca deneylerde, % 0.1 HSK içeren numunelerin donma-çözülme çevrimleri sonucu basınç dayanımlarının düştüğü, kılcal geçirimlilik katsayısında ise çok önemli düşüşler gözlemlenmiştir.

Seçer (2008) tarafından hazırlanan “Yüksek sıcaklık etkisinden hasar görmüş lifli, hava sürükleyici katkılı ve perlit agregalı betonların dayanım özellikleri ve GFRP ile onarımı ve güçlendirilmesi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında hacimce % 0.7 oranında farklı uzunluklarda (6, 20 ve 35 mm) polipropilen (PP) lif, betonda % 4, % 6 ve % 8 boşluk oluşturacak miktarda hava sürükleyici (HS) katkı ve ince agrega yerine (0–2 mm) yerine % 30, % 70 ve % 100 oranlarında genleştirilmiş perlit agregası (GPA) betona eklenmiş ve 9 grup beton numune üretilmiştir. Üretilen bu betonlar ve kontrol numuneleri 23, 300, 500 ve 700 C sıcaklık etkisinde kaldıktan sonra birim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımları, kılcal geçirimlilik ve su emme gibi özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda numunelerin artan sıcaklıkla birlikte basınç ve eğilme dayanımlarında % 82’ye varan azalmalar olduğu, kullanılan HS katkı maddesi ve GPA oranları arttıkça, betonun yüksek sıcaklıklardaki dayanım düşüşlerinde azalmalar olduğu, eğilme dayanımlarında da basınç dayanımlarına benzer eğilimler bulunduğu belirlenmiştir.

Yaşar (2008) tarafından hazırlanan “Polipropilen lifli, hava sürükleyici katkılı ve yöresel hafif agregalarla üretilen yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklıklar altında bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında ince agrega (0-2 mm) yerine ağırlıkça % 25, % 50, % 75 ve % 100 oranlarında genleşmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA), beton hacminin % 0,15, % 0,25, % 0,35 ve % 0,50 oranlarında polipropilen lif (PPF) ve hacimce % 4, % 6 hava sürüklenmiş beton (HSB) ile toplam olarak 16 grup betonun yüksek sıcaklık (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 C) öncesi ve sonrası, basınç dayanımı, birim ağırlık ve kılcal geçirimlilik özellikleri incelenerek analiz edilmiştir. Numuneler, 28 günlük kür sonunda 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 C gibi 7 farklı sıcaklıkta üç saat bekletilmiş ve daha sonra laboratuvar ortamında kendi kendine soğumaları sağlanmıştır. Çalışma sonucunda ince agrega yerine % 25, % 50, % 75 ve % 100 PA ve GPA kullanıldığında basınç dayanımlarının ve kuru birim ağırlık değerlerinin hem yüksek sıcaklık öncesi ve hem de sonrasında azaldığı görülmüştür. Ancak

basınç dayanımlarındaki azalmaların PA, EPA, PPF ve hava boşluklu numunelerde kontrol numunelerine oranla bütün sıcaklıklarda daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kontrol numuneleriyle diğer numuneler arasındaki farkın 300 C sıcaklıktan sonra sıcaklığın artmasıyla azaldığı belirlenmiş, 600 C'den sonra kontrol numuneleriyle diğer numuneler arasında belirgin bir farkın olmadığı belirlenmiştir. Artan sıcaklıklarla birlikte kuru birim ağırlıklarda azalma oluşmuştur. Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı, etki altında kalınan sıcaklık paralelinde artmıştır. Hava sürükleyici katkı, betonun kılcal geçirimsizliğine bütün sıcaklık seviyelerinde olumlu etkide bulunmuştur.

Yegün (2009) tarafından hazırlanan “Donma-çözülme hasarına hafif agreganın, hava sürükleyici katkının ve donma-çözülme yönteminin etkisi” konulu yüksek lisans tezi kapsamında özellikle sıcaklık farkının çok fazla olduğu yerlerde betonun uğramış olduğu önemli etkilerden birisi olan donma-çözülme hasarına karşı dayanıklılığının iyileştirilmesine yönelik araştırma yapılmıştır. Betona hafif agrega olarak ince agreganın (0-2 mm) yerine tüm agrega hacminin % 10, % 20 ve % 30'u oranında genişletilmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA) katılmıştır. Ayrıca bir gruba da toplam hacmin % 0,01'i oranında hava sürükleyici katkı (HSK) katılmıştır. Tüm karışımların su/bağlayıcı (w/b) oranı 0.25, 0.30 ve 0.35 olacak şekilde numune üretilmiştir. Donma-çözülme çevrimi olarak ASTM C 666 (2008) standardında belirtilen yöntem A ve yöntem B için 200 donma-çözülme çevrimi yapılmıştır. Çalışma sonucunda %10 hafif agregalı ve HSK'lı karışımların donma-çözülme hasarına karşı daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Donma-çözülme yöntemleri birbirleri ile karşılaştırıldığında yöntem A'nın yöntem B'den daha fazla donma-çözülme hasarına neden olduğu da gözlemlenmiştir.

Hava sürükleyici katkı kullanılan, kendiliğinden yerleşen betonların hava içeriği ve donma-çözülme dayanımı Łazniewska-Piekarczyk (2013) tarafından incelenmiştir. Çalışmada sentetik sürfaktan (yüzey aktif) içeren hava sürükleyici ile sabunlaşmış asit reçinesi içeren başka bir hava sürükleyici kullanılarak betonlar üretilmiş ve bu beton numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, seçilen hava sürükleyici tipinin kendiliğinden yerleşen beton içerisindeki hava miktarı açısından önemli olduğu, sentetik sürfaktan içerikli katkının diğeri ile karşılaştırıldığında daha küçük ve birbirine daha yakın hava sürüklediği belirlenmiştir.

Akca ve Zihnioğlu (2013) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonda kullanılan hava sürükleyici ve poliporpilen liflerin yüksek sıcaklığa etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında amonyum tuzu içeren hava sürükleyici katkı %0.05 ve %0.1 oranlarında kullanılmış ve hazırlanan betonlar 900 C'ye kadar sıcaklığa bırakılmış ve numuneler üzerinde basınç dayanımı, kütle kaybı ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ışığında, hava sürükleyici kullanılmayan numunelerde patlama şeklinde parçalanma oluştuğu ancak hava sürükleyici kullanılan numunelerde böyle bir durum oluşmadığu, hava sürükleyici katkı kullanımı ile kalıcı (residual) dayanımın (yüksek sıcaklık uygulaması sonrası dayanım) arttığu, ancak katkı dozajı arttıkça bu etkinin tersine alıştığu (diğer bir değişle dayanımın azaldığu) ve tüm veriler ışığında polipropilen lif ve hava sürükleyici katkı kullanımının yüksek sıcaklıklarda betonda görülen patlama şeklindeki parçalanmayı engelleyeceği sonucuna varılmıştır.

Hava sürükleyici katkı maddelerinin mekanizmasının incelendiğu çalışmada Corr vd. (2002) retilen imento hamurlarına Sodyum oleate ve sodyum dodecyl benzene sülfonat esaslı iki farklı hava sürükleyici katılarak köpük indeks deneyi ve SEM analizi yapılmıştır. Köpük indeks deneyi, beton içerisindeki sürüklenmiş havanın kararlılığını ve imento-hava sürükleyici uyumunu anlamaya yarayan bir deneydir. Bu amaçla bir kabın içerisine 20 g imento ve 50 ml deiyonize su eklenerek kap 1 dakika boyunca çalkalanır, ardından su içerisinde seyreltilmiş katkı maddesi (1'e 20 oranında), kabın içine 20 mL'lik partiler halinde eklenir ve her ekleme sonrası kap 15 saniye çalkalanır. İşlem sonrası kap yan yatırılarak köpük kararlılığı ölçülür. Ayrıca kararlı köpük üretmek için gerekli seyreltilmiş sıvı miktarı (milimetre cinsinden) köpük indeksini vermektedir. Yapılan alışma sonucunda, özellikle sodyum oleate kullanıldığında sürüklenmiş hava ile imento hamuru arasındaki geçiş tabakasının 5 dakikalık bir hidratasyon süresinde bile grlebildiğu, likit haldeki kalsiyum iyonlarının hava sürükleme etkisini azalttığu belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında uygulamada en çok kullanılan kimyasal katkı maddeleri olan akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıların farklı dozajlarda kullanımının harç özelliklerine etkisi incelenmiştir. Her bir katkı için farklı dozaj seviyeleri belirlenerek üretilecek harçların çeşitli özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada kimyasal katkı dışındaki tüm değişkenler (çimento tipi, su/çimento oranı, standart kum) sabit tutularak kimyasal katkı dozajının değişimi ile harcın ve dolayısıyla betonun davranışı irdelenmiştir. Her bir kimyasal katkı için farklı dozaj belirlenmesinin ana nedeni, her katkının kendi iç dinamikleri nedeniyle farklı optimum dozajlarda kullanılması gerekliliğidir. Örneğin normal akışkanlaştırıcı için üreticiler tarafından önerilen optimum dozaj çimentonun ağırlıkça %0.5 ile %1 arasında iken, hava sürükleyici katkılarda dozajın %0.5'i geçmemesi önerilmektedir. Ön deneylerle belirlenen dozajlar sonucunda üretilen harçlar üzerinde, ilk olarak taze beton deneyleri yapılmış olup, bu deneyler; taze birim ağırlık, yayılma, priz süresi, hava içeriği ve viskozite deneylerini kapsamaktadır. Ardından standartların uygun gördüğü koşullarda saklanan numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri yapılmış olup, bu deneyler; sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş süresi, su emme, eğilme dayanımı, basınç dayanımı deneyleri ile içyapı incelemesini kapsamaktadır. Basınç ve eğilme dayanımları 7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler üzerinde yapılmış olup, 4x4x16 cm ölçülerindeki numunelerde ilk olarak eğilme deneyi gerçekleştirilmiş, ardından elde edilen 2 adet 4x4xyaklaşık 8 cm ölçülerindeki numunelerde basınç dayanımı belirlenmiştir. Her bir katkı için 5 farklı dozaj ve istatistiksel yönden inceleme yapılabilmesi amacıyla her bir dozajdan 3 adet numune alındığından ve bu numunelerin 7, 28, 56 ve 90 günlük dayanımları için ayrı ayrı numune hazırlanması gerektiğinden, her bir katkı için $5 \times 3 \times 4 = 60$ adet numune üretilmesi gerekmektedir. Toplam 5 farklı katkı için $5 \times 60 = 300$ adet numune üzerinde inceleme yapılmıştır.

Ayrıca elde edilen veriler “Yapay Sinir Ağları” kullanılarak modellenmiş, böylece konu hakkında bir genelleme yapılmaya çalışılmıştır. Yapay sinir ağları sayesinde bundan sonraki uygulamalarda deney yapmadan sonuçlar elde edilebilecek, deneysel çalışmalara katkı sağlanarak ortaya çıkabilecek hataların önüne geçilecektir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Harç üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimento, su, standart kum ve kimyasal katkı maddeleri (akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıları) kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmalarda Eskişehir Çimento Fabrikası'nın (ÇİMSA) ürettiği TS EN 197-1 (2012) standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42.5R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

KİMYASAL KOMPOZİSYON			FİZİKSEL ÖZELİKLER	
Kızdırma Kaybı (%)	4.18		Özgül Ağırlık	3.06
Silisyum dioksit (SiO ₂) (%)	19.42		Özgül Yüzey (cm ² /g)	3455
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃) (%)	4.47		0,090 mm Elek Kalıntısı (%)	0.4
Demir oksit (Fe ₂ O ₃) (%)	2.70		0,045 mm Elek Kalıntısı (%)	4.6
Kalsiyum oksit (CaO) (%)	63.80		Standart Kıvam Su Mik. (%)	27.0
Magnezyum oksit (MgO) (%)	1.21		Priz Başlama Süresi (Dk.)	185
Potasyum oksit (K ₂ O) (%)	0.59		Priz Sona Erme Süresi (Dk.)	285
Sodyum oksit (Na ₂ O) (%)	0.28		Genleşme (Le Chatelier)	0
Kükürt trioksit (SO ₃) (%)	2.89		DAYANIMLAR	
Klorür (Cl ⁻) (%)	0.014		1 Gün	MPa
			2 Gün	MPa
KARMA BİLEŞENLER			7 Gün	MPa
C ₃ S (3CaO.SiO ₂) (%)	61.36		28 Gün	MPa
C ₂ S (2CaO.SiO ₂) (%)	10.39			
C ₃ A (3CaO.Al ₂ O ₃) (%)	7.28			
C ₄ AF (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃) (%)	8.22			

3.1.2. Su

Beton karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Şebeke suyunun yapılan kimyasal analizinde, suyun TS 1247’deki (1984) karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.2. Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi.

Parametreler	Ölçü Birimi	Değer
pH	-	7.49 (20 °C)
Klorür (Cl ⁻)	mg/L	6.53
Sülfat (SO ₄)	mg/L	91.5
Magnezyum (Mg)	mg/L	41.5
Kalsiyum (Ca)	mg/L	63.8
Çinko (Zn)	mg/L	0.375
Bakır (Cu)	mg/L	0.092
Demir (Fe)	mg/L	0.074
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	4.35
Serbest Klor (ClO ₂)	mg/L	< 0.05
Toplam Klor (ClO ₂)	mg/L	< 0.09

3.1.3. Standart kum

Kum olarak, TS EN 196-1 (2016) standardına uygun, 1350±5 gr ağırlığında, yüksek silikalı (SiO₂ oranı % 99,28) kuvars standart CEN kumu kullanılmıştır. CEN kumu, 2 saat boyunca 110 C sıcaklıkta kurutulduktan sonra nem kaybı % 0,2’den düşüktür. CEN kumunun elek analiz sonuçları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. CEN standart kumu elek analiz sonuçları.

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0
1,60	8
1,00	35
0,50	65
0,16	86
0,08	99

3.1.4. Kimyasal katkılar

Deneysel çalışmada GRACE firmasından temin edilen 5 farklı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Deneylede akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak lignosülfonat bazlı WRDA 35, süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak naftalin sülfanat bazlı DARACEM 120, priz hızlandırıcı katkı maddesi olarak kalsiyum nitrat bazlı DARASET 580, priz geciktirici olarak sodyum glukonat içerikli DARATARD 77 ve hava sürükleyici katkı maddesi olarak Sodyum tuzları karışımı içeren DAREX AE3 kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddelerinin özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Katkı maddelerinin özellikleri.

Katkı Tipi ve Özellikleri	Normal akışkanlaştırıcı, su azaltıcı beton katkısı	Süper akışkanlaştırıcı, yüksek oranda su azaltıcı beton katkısı	Priz hızlandırıcı beton katkısı	Priz geciktirici beton katkısı	Hava sürükleyici beton katkısı
İçeriği	Lignosülfonat	Naftalin Sülfanat	Kalsiyum Nitrat	Sodyum Glükonat	Sodyum Tuzları karışımı
Renk	Koyu kahverengi	Koyu kahverengi	Kahverengi	Koyu kahverengi	Kahverengi
Yoğunluk (20°C) (g/cm ³)	1.136	1.188	1.162	1.119	1.009
pH (20°C)	10.3	10.1	8.4	7.7	6.6
Toplam Klorür Miktarı (%)	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10
Suda Çözünen Klorür Miktarı (%)	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10
Alkali Miktarı (%)	< 7.0	~ 4.0	~ 2.0	~ 4.0	~ 2.0
Katı Madde İçeriği (%)	19.9	35.2	24.8	21.9	3.6

3.2. Karışım Oranları

Katkı maddelerinin kullanım oranının değişmesi durumunda betonda oluşacak değişimlerin incelenmesi amacıyla tüm karışımlarda çimento ve kum miktarı sabit tutulmuştur. Su ise kullanılan katkı maddesinin su içeriği miktarı kadar azaltılmıştır. Her bir katkı maddesi için uygulanan oranlar ve kullanılan kod listesi Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Çizelgede verilen değerler referans değerler olup, bazı deneylerde gereksinim olması durumunda ilave dozajlar da uygulanmıştır.

Çizelge 3.5. Uygulanan katkı maddesi oranları ve kodları.

Katkı türü	Optimum Dozaj*	Uygulanan Dozajlar ve Kodları				
Akışkanlaştırıcı	%0.3 - %1.0	% 0 A-0 (Kontrol)	% 1.0	% 3.0	% 4.0	% 5.0
			A-1	A-3	A-4	A-5
Süperakışkanlaştırıcı	%0.8 - %1.5		% 1.0	% 3.0	% 4.0	% 5.0
			S-1	S-3	S-4	S-5
Priz hızlandırıcı	%0.5 - %3.0		% 1.5	% 3.0	% 4.0	% 5.0
			H-1.5	H-3	H-4	H-5
Priz geciktirici	%0.2 - %0.5		% 0.5	% 1.0	% 3.0	% 5.0
			G-0.5	G-1	G-3	G-5
Hava sürükleyici	%0.06 - %0.2	% 0.1	% 0.5	% 1.0	% 2.0	
		HS-0.1	HS-0.5	HS-1	HS-2	

* Üretici tarafından önerilen dozaj aralığını ifade etmektedir. Optimum dozaj, kullanıcı tarafından uyulması düşünülen standartlar ve kullanılacak malzemelere göre değişeceğinden bir aralığı ifade etmektedir.

3.3. Numune Üretimi

Harç üretimi amacıyla 450 gr ağırlığındaki CEM I 42.5 R çimento ve Çizelge 3.5'teki dozajlara göre kimyasal katkı maddeleri tartılmıştır. İlk olarak kimyasal katkılardaki katı madde içeriği hesaba katılarak su/çimento oranı 0,50 olacak şekilde kaba su ve kimyasal katkı karışımı konulmuş ve ardından çimento eklenmiştir. Bileşenlerin kaba

alınmasından sonra derhal karıştırıcı düşük hızda (62.5 dev/dk, yörüngesel dönme hızında) çalıştırılmaya başlanmış ve 30'uncu saniyede kum dökülmeye başlanılarak 30 saniye içerisinde kumun tamamının karışıma girmesi (başlangıçtan itibaren 60'ıncı saniyede tamamlanacak şekilde) sağlanmıştır. Karışım 30 saniye daha düşük hızda çalıştırıldıktan sonra yüksek hıza alınmış (125 dev/dk, yörüngesel dönme hızında) ve bu hızda da 60 saniye daha karıştırıldıktan sonra karıştırıcı durdurulmuştur.

Harcın hazırlanması sonrasında karışım hemen kalıba alınmıştır. Bu amaçla 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara harç iki tabaka halinde doldurulmuştur. Her bir tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılmış ve ikinci tabaka sonrasında kalıp üzerinde kalan harç testere hareketi ile kalıp üzerinden alınmış ve metal master ile numunelerin üzeri düzgün bir yüzey elde edilecek şekilde masterlanmıştır. Her bir numune Çizelge 3.5'te verilen kodlar kullanılarak işaretlenmiştir. Tüm işlemlerin tamamlanması sonrasında kalıpların üzerine 210x185 mm boyutlarında cam plaka konulmuş ve numuneler 20 °C sıcaklıkta ve % 90 bağıl neme sahip odada bekletilmeye alınmıştır. Kür süresi olan 24 saat sonunda numunelerin kalıptan çıkarılmasına yönelik inceleme yapılmış ve uygun olanlar kalıptan çıkarılarak 20±1 °C sıcaklıktaki havuza bırakılmıştır. Katkı maddesinin etkisinden dolayı 24 saat sonunda kalıptan çıkarılmayacak durumda olanlar kür odasında bekletilmeye devam edilmiş ve 6 saat aralıklarla kontrol edilerek numunelerin hasarsız bir şekilde kalıptan alma koşullarının olduğu anda numuneler kalıptan alınarak havuza yerleştirilmiştir.

3.4. Yapılan Deneyler

Üretilen numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Ayrıca üretilen numunelerin içyapıları da incelenmiştir.

3.4.1. Taze halde yapılan deneyler

Üretilen harç numunelerinin taze haldeki özelliklerini belirlemek amacıyla taze birim ağırlık, yayılma, priz süresi, hava içeriği ve viskozite deneyleri yapılmıştır. Deneylerde elde edilen veriler not edilip, tablo ve grafik programında derlenmiş ve elde edilen sonuçlarında daha iyi anlaşılması maksadıyla şekiller hazırlanmıştır.

3.4.1.1. Taze birim ağırlık deneyi

Hazırlanan numunelerin taze birim ağırlığını belirlemek amacıyla TS EN 12350-6 (2010) standardı kullanılmıştır. Yoğunluk, bağıntı (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

Δ : Taze betonun yoğunluğu, kg/dm³,

m_1 : Kabın boş kütlesi, kg,

m_2 : Kabın, içerisindeki beton numune ile birlikte toplam kütlesi, kg,

V : Kabın hacmi, dm³, ifade etmektedir.

3.4.1.2. Yayılma deneyi

Taze haldeki harç numunelerinin yayılma değerleri TS EN 1015-3 (2010) standardına uygun olarak bulunmuştur. Standarda uygun kalıp, yayılma tablasının dairesel levhası üzerine merkezlenerek yerleştirilmiş ve harç, kalıp içerisine iki tabaka halinde her harç tabakasına tokmak ile harç yüzeyine düzgün şekilde dağılan en az 10 kısa vuruş yapılarak sıkıştırılmış ve bu şekilde kalıp doldurulmuştur. Kalıp üst yüzünden taşan fazla harç, tesviye bıçağı ile sıyrılmış ve dairesel levhanın boş kısmı silinerek temizlenmiştir. Kalıp düşey olarak yukarıya doğru yavaşça çekilerek alınmış ve dairesel levha üzerinde kalan harç kütlesi, yayılma tablası yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere, sabit sıklıkta 15 defa düşürülerek levhaya yayılmıştır. Yayılan harç kütlesinin çapı, birbirine dik iki doğrultuda pergel ile ölçülmüştür. Ölçme sonuçları mm olarak ve en yakın milimetreye yuvarlanarak kaydedilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yayılma deney düzeneği.

3.4.1.3. Priz süresi deneyi

Tüm katkı maddeleri için önemli bir parametre olan priz süreleri TS EN 480-2 (2008) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Priz süresi TS EN 480-2 (2008) standardına göre, kontrol harcı içine batırılan bir iğnenin belirlenmiş bir derinlik değerine eriştiğinin gözlenmesi ile belirlenmektedir. Deneyler Şekil 3.2’de görülen standart bir Vicat aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak iğne olarak korozyona dirençli paslanmaz çelikten yapılmış ve etkili uzunluğu (50 ± 1) mm, çapı (1.13 ± 0.05) mm olan iğne kullanılmıştır.

Priz başlama süresinin tayini için öncelikle Vicat cihazının iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilmiş ve gösterge çizelgesi sıfırlanmıştır. İğne harcın üst yüzeyine değene kadar dikkatlice indirilmiş ve ardından iğne hızla serbest bırakılmıştır. İğne ile cam plaka arasındaki uzaklık ve harcın hazırlanışından bu ana kadar geçen süre kaydedilmiştir. Karışımın tamamlanmasından itibaren plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki uzaklığın 4 mm olduğu ana kadar geçen süre harcın priz başlangıcı olarak esas alınmıştır. Priz bitiş süresinin belirlenmesi için, numune kalıp üstüne kapatılan diğer bir cam plaka üzerine ters çevrilmiştir. Karışımın tamamlanmasından itibaren iğne ucunun en çok 2.5 mm battığı ana kadar geçen süre harcın priz sonu olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.2. Priz süresi deney düzeneği (Vicat iğnesi)

3.4.1.4. Hava içeriği deneyi

Hazırlanan harç numunelerinin hava içeriğini belirlemek amacıyla Şekil 3.3'te görülen cihaz kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Cihazın çalışma prensibi sızdırmaz bir kabın içerisine basınçlı hava pompalanması ve ardından basınçlı kaptan sızdırmazlığın kontrollü bir şekilde kaldırılması ve kontrollü şekilde çıkan havanın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır.

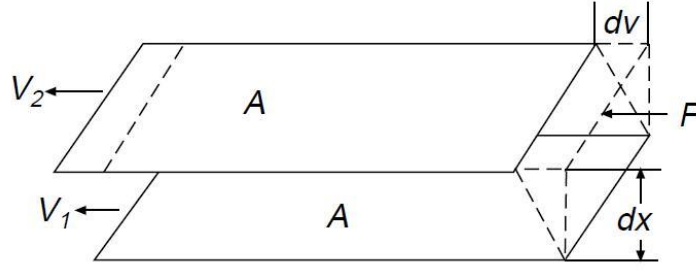


Şekil 3.3. Harç içerisindeki hava miktarını ölçen cihaz.

Numune ilk olarak cihazın alüminyum kabına doldurulmuş, ardından fazla malzeme testere hareketi ile temizlendikten sonra kapağın üstü kapatılmıştır. Tüm vanalar kapatıldıktan sonra kabın içine hava pompalanmaya başlanılmış ve cihaz için önceden belirlenmiş başlangıç noktasına gelinceye kadar pompalanmaya devam edilmiştir. Ardından manometre altında bulunan kol vasıtasıyla cihaz içindeki hava boşaltılmış ve boşalan hava miktarı manometre vasıtasıyla yüzde olarak okunmuştur. Her bir katkı için farklı oranlarda deney ayrı ayrı yapıp değerler % 0.1 doğrulukla kaydedilmiştir.

3.4.1.5. Viskozite deneyleri

Viskozite genel anlamda; “moleküler etkiye bağılı olarak, akışkanların içsel sürtünmelerinden kaynaklı akmaya karşı gösterdikleri direnç” olarak tanımlanmaktadır. Bu sürtünme, bir akışkan katmanının (layer) diğer bir akışkan katmanı ile etkileşime geçmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu etkileşim sürecinde, sürtünme ne kadar çok artarsa, katmanların birbiri üzerinden geçişini sağlamak için gerekli olan kuvvette o kadar büyümektedir. Katmanların birbiri üzerinden geçişini sağlayamaya yarayan bu kuvvet kesme kuvveti (shear force) olarak ifade edilmektedir. Isaac Newton viskoziteyi, Şekil 3.4’te gösterilen model ile tanımlamıştır.



Şekil 3.4. Newton viskozite modeli

Bu modele göre, “A” alanına sahip aynı boyuttaki iki paralel akışkan yüzeyi, birbirinden “dx” uzaklıkta bulunmakta olup, aynı doğrultuda birbirlerinden V_1 ve V_2 hızlarıyla hareket etmektedirler. Newton’a göre, hızlardaki bu farklılığa neden olan kuvvet, hızların farklılığıyla orantılıdır. Bunu ifade etmek için Newton (3.2) formülünü yazmıştır.

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (3.2)$$

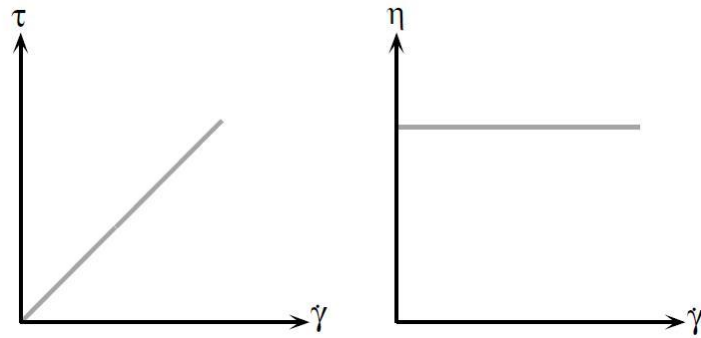
Burada η sabiti söz konusu akışkanın viskozitesini tariflemektedir. $\frac{dv}{dx}$, hız gradyeni ise, bir katmanın diğer katmana göre hareket etmesi için gerekli hız farklılığının ölçüsüdür. Bu oran (shear rate) literatürde kayma hızı, kayma hızı oranı veya kayma deformasyonunun değişme hızı olarak ifade edilmektedir ve birimi saniye⁻¹ dir. $\frac{F}{A}$ ise birim alanda kesme hareketini sağlamak için gerekli kuvveti tanımlamaktadır. Bu gerilme (shear stress)

literatürde kesme gerilmesi veya kayma gerilmesi olarak tanımlanmakta ve her gerilme birimi gibi MPa veya dynes/cm² olarak ifade edilmektedir. Bu temel terminolojiyi tanımladıktan sonra viskoziteyi bağıntı (3.3) ile ifade edebiliriz.

$$\eta = \text{Viskozite} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\text{kayma gerilmesi (shear stress)}}{\text{kayma hızı oranı (shear rate)}} \quad (3.3)$$

Viskozitenin temel birimi CGS sisteminde “poise” dur. Bunun yüzde biri olan centipoise (cP) daha çok kullanılmaktadır. Uluslararası birim sisteminde (SI) ise, Newton/metrekare (Pascalsaniye=Pas)'dır, ancak daha çok mili Pascalsaniye (mPas) tercih edilmektedir.

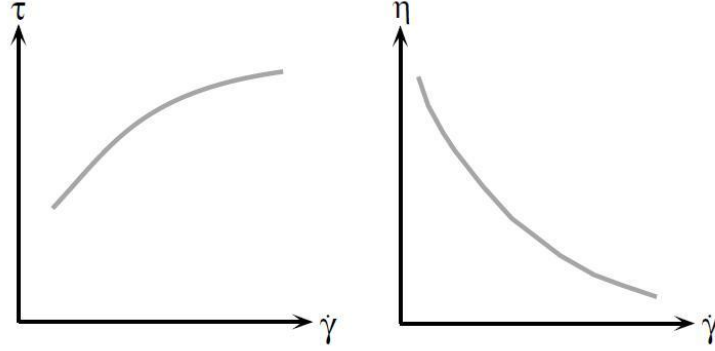
Newton sıvıları iki gruba ayırmıştır. Bunlar Newtonian ve Non-newtoinan sıvılardır. Newtonian sıvılarda, belirli bir sıcaklıkta, viskozite kayma hızı oranından bağımsızdır. Diğer bir deyişle kuvvet iki kat arttırılırsa, akışkan iki kat hızlı akar. Bu akışkanlara su ve ince motor yağları örnek gösterilebilir. Şekil 3.5 Newtonian sıvıların reolojik özelliklerini özetlemektedir. Şekil 3.5'e bakıldığında kayma gerilmesi ile kayma hızı oranının doğru orantılı olduğu ve kayma hızı oranı değişse bile viskozitenin değişmediği görülmektedir.



Şekil 3.5. Newtonian sıvıların reolojik özellikleri.

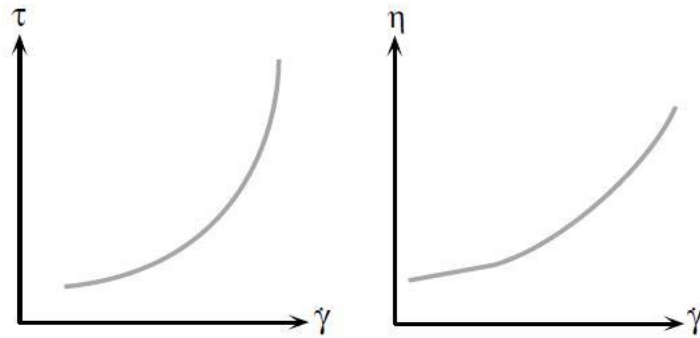
Her ne kadar Newtonian sıvılar ile çalışmak basit olsa da, uygulamada Newtonian sıvı sayısı çok azdır. Newtonian olmayan sıvılarda, kayma gerilmesi ile kayma hızı oranı doğru orantılı değildir. Diğer bir deyişle kayma hızı oranı değiştiğinde kayma gerilmesi aynı oranda değişmemektedir. Newtonian olmayan sıvılar ise üçe ayrılmaktadır. Bunlar; pseudoplastik akış, dilatant akış ve plastik akıştır.

Pseudoplastik akış, artan kayma hızı oranı değişiminde azalan bir viskozite özelliği göstermektedir. Bu tür sıvılara doğal ve sentetik zamlar ve çeşitli emülsiyonlar örnek gösterilebilir. Şekil 3.6'da pseudoplastik davranışa ait akış reogramı gösterilmiştir.



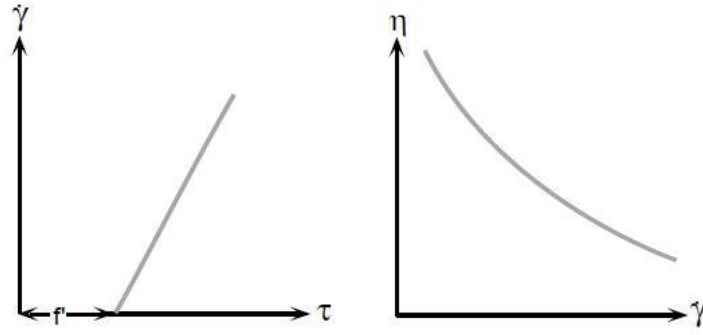
Şekil 3.6. Pseudoplastik akış reogramları.

Dilatant akış, Pseudoplastik akışın tersi olup artan kayma hızı oranı değişiminde artan bir viskozite özelliği göstermektedir. Artan hız gradyanı ile akışa karşı dirençte artar, diğer bir deyişle akışkan karıştırıldıkça koyulaşır. Özellikle %50 konsantrasyondan fazla defloküle katı partikülleri bulunan süspansiyonlarda bu davranışa örnek gösterilebilir. Şekil 3.7'de dilatant davranışa ait akış reogramı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Dilatant akış reogramları.

Plastik akış davranışında akışkan belli bir kuvvet uygulanıncaya kadar katı gibi davranır. Belli bir gerilme uygulandıktan sonra sıvı akmaya başlar. Bu gerilmeye akma gerilmesi (yield stress) denir. Plastik akışa yönelik reogram Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Plastik akış reogramları.

Bu tip davranışa gösterilen ilk örnek ketçaptır. Ketçapı bulunduğu kaptan çıkarabilmeniz için bulunduğu kabı ters çevirmek yetmez, ketçapın akmaya başlaması için kaba bir kuvvet uygulayarak akışın sağlanması gerekmektedir. Bu tür davranışın en basit tipi Bingham modelidir ve 1919 yılında E.C. Bingham'ın boyaları bu davranışla modellenmesi ile bu adı almıştır (Wallevik vd., 2015).

Birçok çalışmada çimento bazlı malzemeler Bingham modeli ile tanımlanmıştır. Ayırışma yapmayan ve yayılma (slump) değeri 8'in üzerindeki geleneksel betonlar, büyük bir doğrulukla, Bingham akışkanı olarak kabul edilir (Faleschini vd., 2014). Bingham modelinin dışında çimento bazlı malzemeleri tanımlayan Herschel–Bulkley modeli de bulunmaktadır. Bu model doğrusal olmayan özellik gösterir ve kendiliğinden yerleşen betonları en iyi bu model tanımlamaktadır (Faleschini vd., 2014).

Bu çalışmada Şekil 3.9'da görülen Brookfield marka DV2TRV model viskozimetre kullanılmıştır. Ölçümler V73 vane spindle [kanat uzunluğu:0.998 inch (25.35 mm), kanat çapı:0.499 inch (12.67 mm)] kullanılarak 5, 10 ve 20 rpm hızlarında her bir katkı için ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışmada 20 rpm'in üzerindeki hızlarda da ölçümler yapılmaya çalışılmış, ancak ölçülen numunelerde yüksek hızlarda burgaç etkisi oluşmuştur. Spindle'in dönmeye başlamasından kısa bir süre sonra yüksek hız nedeniyle numune spindleden uzaklaşmış, bu nedenle sağlıklı ölçüm alınamamıştır. Ölçümler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de laboratuvar ortamında yapılmıştır. Yapılan ölçümler cihazın üreticisi tarafından geliştirilen "Rheocalc T" programına kaydedilmiş ve her bir katkı için belirli kayma hızı değişim oranları için (5, 10 ve 20 rpm dönüş hızlarına göre) viskozite-katkı oranı değişim grafiği hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Brookfield DV2TRV modeli viskozimetre.

3.4.2. Sertleşmiş halde yapılan deneyler

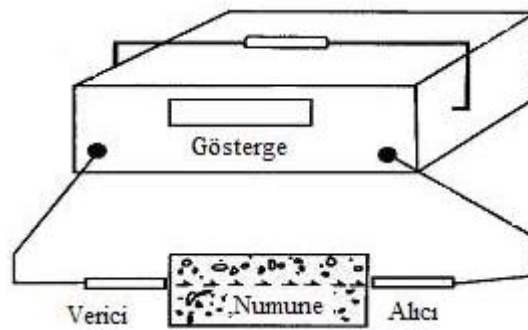
Üretilen harç numunelerinin sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek amacıyla sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, kılcal su emme, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.4.2.1. Sertleşmiş birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde yapılmıştır. Birim ağırlığı TS EN 12390-7'ye (2010) göre belirlemek amacı ile tüm numuneler kür edildikten sonra 30 kg kapasiteli terazide tartılmıştır. Ardından tüm numunelerin en, boy ve yükseklikleri kumpas kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Boyutları belirlenen numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Ağırlığın hacme oranı ile tüm numunelerin birim ağırlıkları (kg/dm^3) belirlenmiştir.

3.4.2.2. Ultrases geçiş süresi deneyi

Ultrases geçiş süresi deneyi hasarsız deneyler kapsamında olup, beton teknolojisinde sıklıkla kullanılmaktadır (Aggelis ve Paipetis, 2012). Bu yöntem, beton numunesine zarar vermemesi nedeniyle tercih edilen deney yöntemlerinden birisidir. Ultrases geçiş süresi deney düzeneğinin basit şematik gösterimi Şekil 3.10’da ifade edilmiştir. Bu deney yönteminde üretilen ses dalgalarının verici aracılığıyla sadece numune ortamında yol alarak kontrollü bir şekilde alıcıya ulaşması ve bu ses dalgalarının verici ile alıcı arasındaki geçiş süresinin ölçümü amaçlanmaktadır. Numunenin boyutları bilindiğinden, geçilen uzaklığın zamana oranlanmasıyla ses dalgasının hızına ulaşılmaktadır. Bu deneyde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, ses dalgalarının sadece numune ortamında hareket etmesini sağlayacak önlemleri alarak verici ve alıcının numune yüzeyi ile tam temasının sağlanması gerekmektedir. Ses dalgaları katı ortamda daha hızlı hareket etmektedir, bunun aksine gaz ortamında, diğeri bir değışle beton içindeki boşluklarda daha yavaş hareket etmektedir. Ses dalgaları numune içerisinde ne kadar yavaş hareket ederse numunede o kadar fazla boşluk bulunmakta ve bu nedenle numunenin dayanımının daha düşük çıkması beklenmektedir.



Şekil 3.10. Ultrases geçiş süresi deney düzeneğı.

Deneysel çalışma kapsamında sertleşmiş birim ağırlık deneyi sonrası tüm numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi deneyi yapılmıştır. Ultrases deneyinde frekansı 55 kHz, modeli ASTM 597-02 (2002)’ye uygun ultrases aleti kullanılmıştır. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi ultrases geçiş süresinde ölçümler direkt iletim yöntemi uygulanarak, okumalar 2 kez tekrarlanılarak yapılmış, ses geçiş süresi mikro saniye (10^{-6} saniye) duyarlılıkta okunmuştur. Ölçüm yapılan numune boyutuna (harç numunesinin 160 mm’lik boyutu), geçiş süresinin oranlanması ile ses geçiş hızları hesaplanmıştır.

3.4.2.3. Kılcal su emme deneyi

Kimyasal katkılarda kılcal su emme tayini TS EN 480-5 (2008) standardına göre yapılmaktadır. Bu standart, katkı maddelerinin, harçların kılcal (kapiler) su emmesi üzerindeki etkilerinin tayini için uygulanan deney yöntemini içermektedir. Deneyde prensip olarak, belirtilen koşullarda harç deney numunesi tarafından emilen suyun kütlesi ölçülür.

Deney kapsamında ilk olarak TS EN 480-1 (2014) standardına uygun harç numunesi hazırlanmıştır. Ardından her bir karışım için ayrı ayrı belirlenen oranlarda katkı kullanılarak her bir katkı oranından 3 numune olacak şekilde 40x40x160 cm boyutlarındaki numuneler üretilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 90 gün boyunca 20±2 C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem oranına sahip ortamda küre bırakılmışlardır. Numuneler 90'nci gün sonunda tartılmış ve bu değer M_0 olarak kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler içerisinde sabit düzeyde su bulunan hazneye dik olarak, alt tarafından suyun içerisine 3±1 mm girecek şekilde yerleştirilmiştir. Özellikle numunelerin birbirine temas etmemesine özen gösterilmiştir. Kılcal su emme deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

Düzenek içerisinde 28 gün boyunca suya temas eden numuneler 28'inci günün sonunda kaptan alınmış ve hafifçe silinerek üzerindeki fazla su alınarak tartılmıştır (M_j).

Gerekli süreyle suya temas sonrası ölçülen kılcal su emme (C_A), g/mm² biriminde bağıntı (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır:

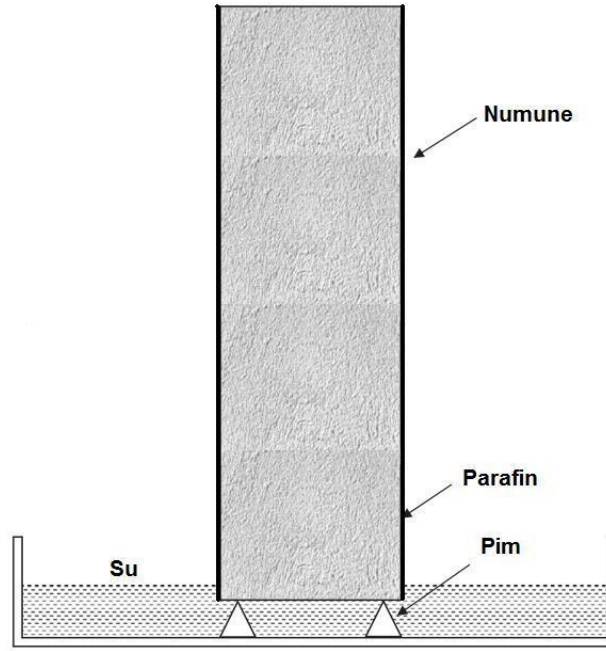
$$C_A = \frac{M_j - M_0}{1600} \quad (3.4)$$

Burada;

M_0 : 90 gün süreyle küre bırakıldıktan sonraki numune kütlesi, g,

M_j : 28 gün süreyle suya temas sonrası ölçülen numune kütlesi, g

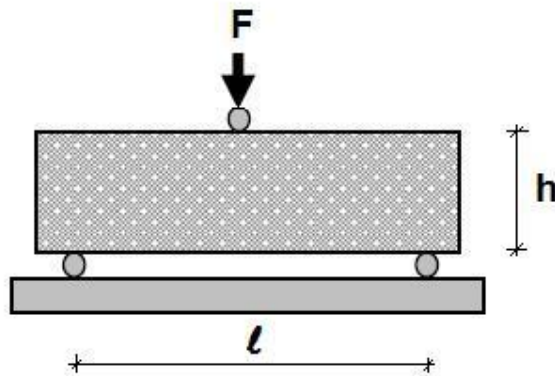
1600 ise 40x40x160 mm boyutlarındaki numunenin suya temas eden yüzeyinin (40x40) alanıdır.



Şekil 3.11. Kılcal su emme deney düzeneği.

3.4.2.4. Eğilme dayanımı deneyi

Harç numuneleri üzerinde eğilme deneyi, üretilen harçların 28'inci gününde beton basma makinesinin eğilme aparatı ile yapılmıştır. Düzenek, iki mesnet arasında ve orta noktada bulunan tek noktadan yükleme prensibine dayanmaktadır. Eğilme dayanımına yönelik deney düzeneği şematik gösterimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir. İstatistiksel açıdan bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla 3 adet numunenin eğilme dayanımının ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.12. Eğilme dayanımı deney düzeneği.

Eğilme deneyinde, 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma harç numunesine deneye uygun olarak düzenlenmiş olan 100 mm açıklıklı tablanın iki mesnedi üzerine yerleştirildikten sonra tam ortadaki tek noktadan 0.05 MPa/sn yükleme hızıyla yükleme yapılmıştır. Kirişin ortasından uygulanan F kuvveti preste kirişin kırıldığı an için belirlenmiştir. Eğilme dayanımı için ise aşağıdaki (3.5) formülü kullanılmıştır.

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F * l}{4}}{\frac{b * h^2}{6}} = \frac{1,5 * F * l}{b * h^2} \quad (3.5)$$

Burada;

σ_f : Eğilme dayanımı, MPa,

M : En yüksek moment,

W : Dayanım momenti,

F : Numunenin kırılma anındaki yük, N.,

l : Mesnetler arası uzaklık, mm.,

h : Numune yüksekliği, mm.,

b : Numune genişliği, mm. ifade etmektedir.

3.4.2.5. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, üretilen harçların 7, 28, 56 ve 90'nc günlerinde beton eğilme dayanımı deneyleri sonrası oluşan 40x40xyaklaşık 80 mm boyutlarındaki harç numuneleri üzerinde TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak yapılmıştır.

Basınç deneyinde 2000 kN kapasiteli beton basma makinesi kullanılmıştır. Deneyde numuneler yan yatırılarak pürüzsüz yüzeylerinin makinenin iki çelik sıkıştırma tablası arasına gelmesi sağlanmıştır. Harç numunelerinin her birinin boyutlarının farklı olması nedeniyle belirli yüzey oluşturmak amacıyla harç yüzeyleri ile makine yüzeyleri arasına 4x4 cm boyutlarında çelik levha yerleştirilmiştir. Makine tablaları arasına yerleştirilmiş numuneler 0.3 MPa/sn'lik sabit hızla yüklenmiş ve kırılma yükleri (P_f) belirlenmiştir. Numenin kırıldığı P_f kuvvetin yüzey alanına (40x40 mm) bölünmesi ile basınç dayanımı hesaplanmıştır.

Her bir katkı ve her bir dozaj için eğilme dayanımına yönelik 3 farklı numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin her birinden 2 adet numune elde edilmesi nedeniyle basınç dayanımı için her bir katkı dozajı için 6 adet basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak o dozaj için karakteristik basınç dayanımı belirlenmiştir. Tüm katkı ve dozaj oranları için basınç dayanımları 7, 28, 56 ve 90'ıncı günlerde belirlenmiştir.

3.4.3. İçyapı İncelemesi

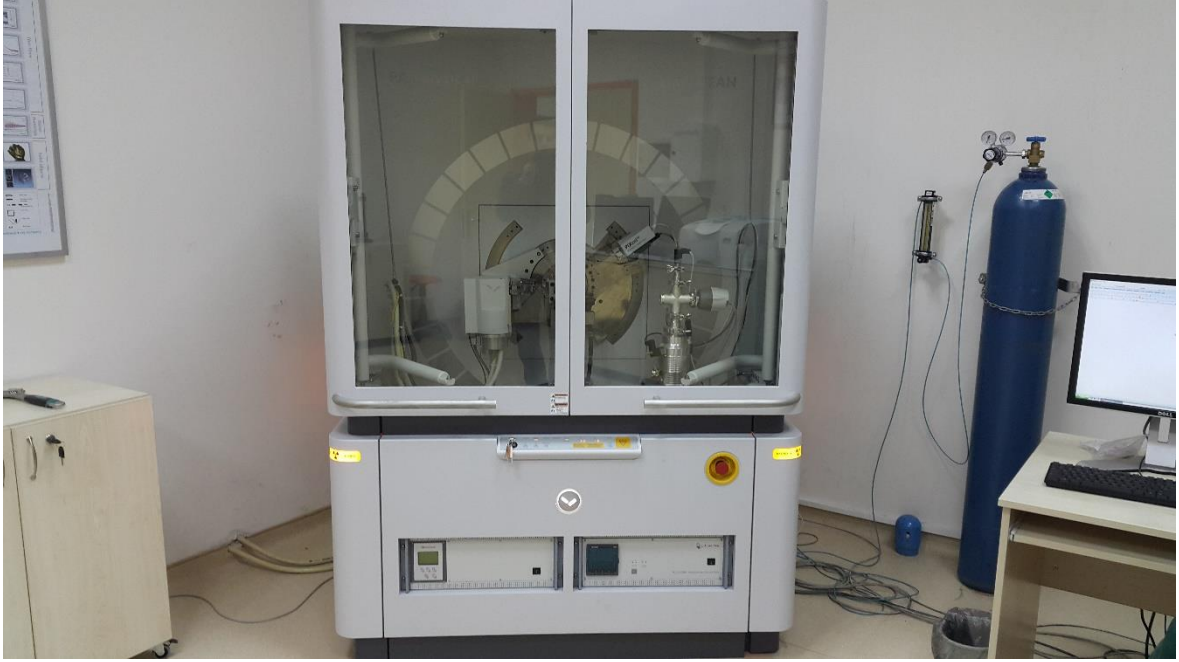
Kimyasal katkıların betonun içyapısında ne gibi değişikliklere neden olduğunu saptamak amacıyla içyapı incelemeleri yapılmıştır. Bu kapsamda X-Işını Kırınım incelemesi (XRD), Taramalı Elektron Mikroskopu incelemesi (SEM) ile Yüksek Çözünürlüklü Yüzey Alanı ve Mikro Gözenek Boyutu Analizi (BET) yapılmıştır. Tüm içyapı incelemeleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. İncelemeler esnasında XRD ve BET Analizine yönelik sonuçlardan elde edilen veriler bilgisayar programında derlenmiş ve sonuçlar grafik ve çizelgeler halinde yorumlanmıştır. SEM analizine yönelik fotoğraflar ise incelenerek üzerlerinde gerekli işaretlemeler yapılarak fotoğraflar anlamlandırılmaya çalışılmıştır.

3.4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD)

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını kırınım analiz yöntemi, analiz sırasında numuneye zarar vermez ve çok az miktardaki numunelerin dahi (sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki) analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını kırınım cihazıyla kayaların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin incelemeleri yapılabilir.

Çalışma kapsamında tüm katkı ve dozajlar için (26 adet) analiz yapılmıştır. Analizler, Cu K α radyasyonu kullanılarak, 45 kV, 40 mA ve 10-80 derece aralığında, 0.08 adım hızında ve 2 θ pozisyonunda, Şekil 3.13'te görülen Panalytical marka Epyrean model cihazla yapılmıştır. Bu kapsamda numuneler ilk

olarak öğütülerek toz hale getirilmiştir. Ardından toz haldeki numune cihaza konularak her bir numune için yaklaşık 5 dakika ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerin tamamlanması sonrasında, ölçümler bilgisayara aktarılmış ve HighScore Plus™ bilgisayar programı ile kütüphane taraması yapılarak fazlar elde edilmiş ve grafikleri çizilmiştir.



Şekil 3.13. XRD analizlerinin yapıldığı Panalytical marka Empyrean model cihaz.

3.4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu incelemesi (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu, yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltiren elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme olanağı sunar. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımalar veya ikincil elektronlar sayılarak oluşturulur. İkincil elektronların yanında geri saçılan elektronlar, karakteristik X-ışınları, ışık (katot ışını), numune akımı ve aktarılan elektronlarla da numuneden çeşitli sinyaller elde edilerek amaca uygun topografi ve kompozisyon analizleri yapılır.

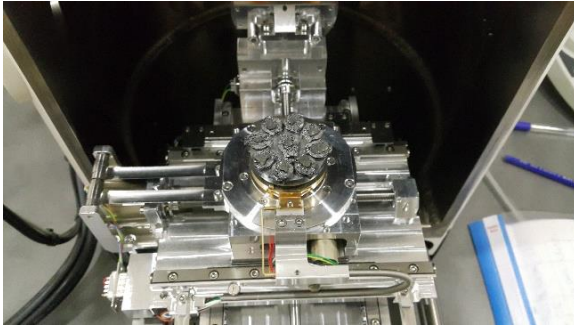
SEM analizi yapılmasına yönelik, ilk olarak Şekil 3.14 (a)'da görüldüğü gibi cihazın numune tutucusuna sığacak şekilde eldeki harç numunelerinden yaklaşık 0.5cmx0.5cm boyutlarında bulk (bütün) numuneler alınmıştır. Numuneler karbon bant ile numune tutucuya yapıştırıldıktan sonra Şekil 3.14 (b)'de görülen Quorum Q150R ES marka cihazla numuneler platin kaplanmıştır. Numuneler ardından Şekil 3.14 (c)'de görüldüğü şekilde numune odasına yerleştirilerek cihazın kapağı kapatılmış ve numune odasına inert (numune ile etkileşime girmeyen) azot gazı verilerek vakumlu ortam oluşturulmuştur. İnceleme ortamının oluşturulması sonrasında numuneler incelenerek çeşitli yakınlaştırma oranlarında fotoğraflar elde edilmiştir. Analizler Şekil 3.14 (d)'de görülen Zeiss marka ve Supra 40VP model cihazla yapılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca uygun görülen yerlerde EDX analizi ise Brooker detektör ile yapılmıştır.



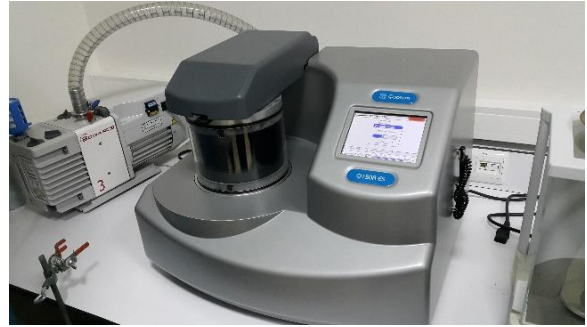
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.14. SEM analizi. (a) Numuneler, (b) Quorum Q150R ES marka cihaz, (c) Numunelerin cihaza yerleşimi, (d) Zeiss Supra 40VP model SEM cihazı

3.4.3.3. Yüksek çözünürlüklü yüzey alanı ve mikro gözenek boyutu analizi (BET)

BET cihazı katı veya toz numunelerde fiziksel adsorpsiyon yöntemiyle yüzey alanı ölçümleri, mikro ve mezo gözenek boyutunu ve gözenek boyut dağılımını düşük basınçlarda ve yüksek çözünürlükte belirlenebilmektedir. Cihaz numune yüzeyini tek bir moleküler tabaka ile kaplamak için gerekli gaz miktarını tayin etmekte ve Brunauer Emmett ve Teller teorisini kullanarak yüzey alanını hesaplamaktadır. Cihaz ile ölçülebilir gözenek çapı aralığı 3.5 ile 5000 Å (Angstrom) arasındadır.

Çalışma kapsamında her bir katkının optimum ve en yüksek dozajı ile kontrol karışımı olmak üzere 11 adet (A-1, A-5, S-1, S-5, H-1,5, H-5, G-0.5, G-5, HS-0.1, HS-2 ve A-0) inceleme Şekil 3.15'te görülen Micromeritics marka ve Asap 2020 model cihazla yapılmıştır. Bu amaçla inceleme kapsamındaki örneklerden 1 - 2,5 g aralığında numune alınarak cihaza yerleştirilmiştir. Numunelerde ölçme işlemi yapılmadan önce, de-gas işlemi uygulanarak numunelerin içerisindeki nemin çıkarılması sağlanmıştır.



Şekil 3.15. Micromeritics Asap 2020 BET cihazı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

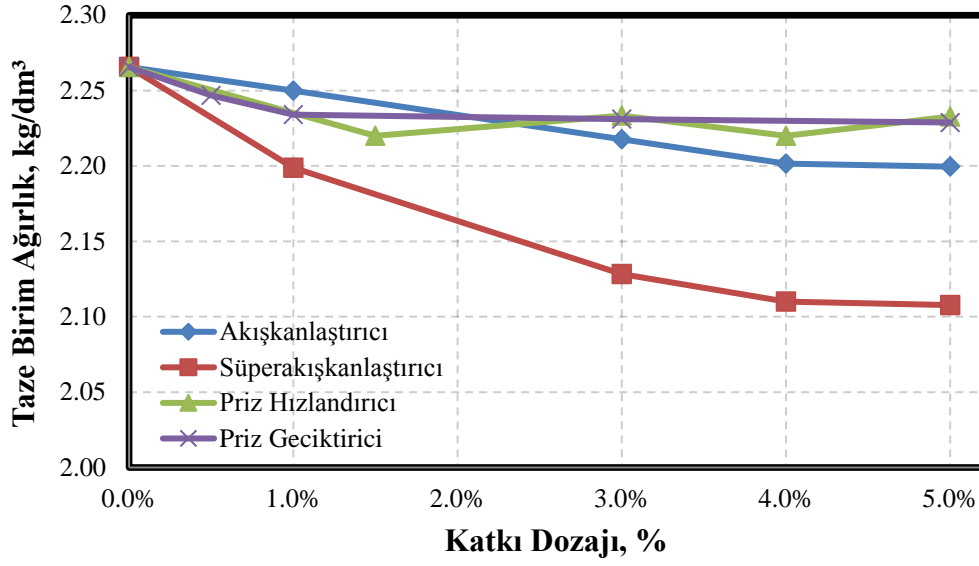
Yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımının mikro betonun (harç) taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada öncelikle deneylerden alınan veriler ile gerekli hesaplamalar yapılmış ve grafikler çizilmiştir. Ayrıca içyapı kapsamında gerekli resimler elde edilmiş ve grafikler çizilmiştir. Elde edilen tüm bulgular, dozaj değişimine bağlı olarak değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

4.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

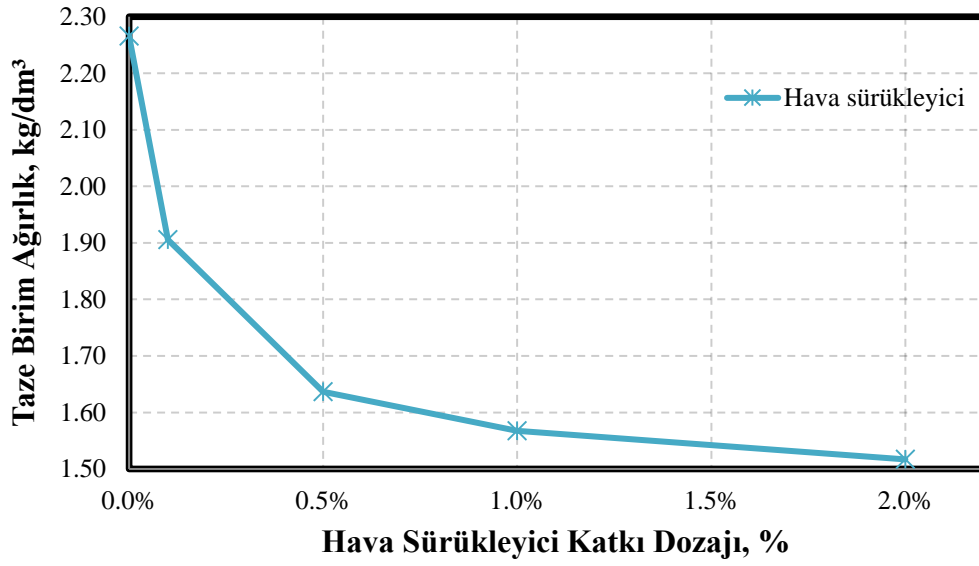
Üretilen harç numunelerinin taze haldeki özelliklerinin incelenmesi kapsamında yapılan taze birim ağırlık, yayılma, priz süresi, hava içeriği ve viskozite deneyleri sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1.1. Taze birim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi

Taze haldeki birim ağırlık değerleri, basınç dayanımını belirlemek için hazırlanan numuneler kullanılarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı için 7, 28, 56 ve 90 günlük olmak üzere 4 farklı numune hazırlandığından, taze birim ağırlık için de her bir katkı dozajı için 4 takım numune elde edilmiştir. Her bir takım numunenin 3 adetten oluştuğu göz önüne alındığında her bir birim ağırlık değerinin 12 adet numuneyi temsil ettiği ortaya çıkmaktadır. Elde edilen 12 adet verinin ortalaması alınarak taze birim ağırlığın katkı dozajına göre değişimi grafikte toplanmıştır. Diğer katkılarla karşılaştırıldığında hava sürükleyici katkılı betonlarda yoğun miktarda hava bulunması nedeniyle taze birim ağırlığın dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle şekillerin daha kolay okunabilmesi ve farklılıkların net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla hava sürükleyici katkı diğer katkılardan ayrılarak irdelenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Diğer katkılarda ise değerlerin aynı seviyelerde bulunduğu belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkı dozajının değişimi ile taze haldeki harcın birim hacim ağırlığının değişimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Hava sürükleyici katkı dozajının değişimi ile taze haldeki harcın birim hacim ağırlığının değişimi ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Taze birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi (hava sürükleyici hariç).



Şekil 4.2. Hava sürükleyici katkı için taze birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi.

Grafikler incelendiğinde yatay ve düşey eksen aralıklarının birbirinden farklı olduğu görülecektir. Hava sürükleyici katkı hariç olmak üzere diğer tüm katkılarda dozaj olarak TS EN 934-2' de (2013) de belirtildiği üzere en yüksek % 5 oranı uygulanmıştır. Ancak hava sürükleyici katkıda % 0.5'lik oranda bile harç numunesinde ciddi değişimler gözlemlenmiştir. Üretici tarafından önerilen katkı dozajının % 0.06-% 0.2 aralığı olduğu düşünüldüğünde, hava sürükleyici katkı için % 5'lik bir oranın anlamsız olacağı açıktır.

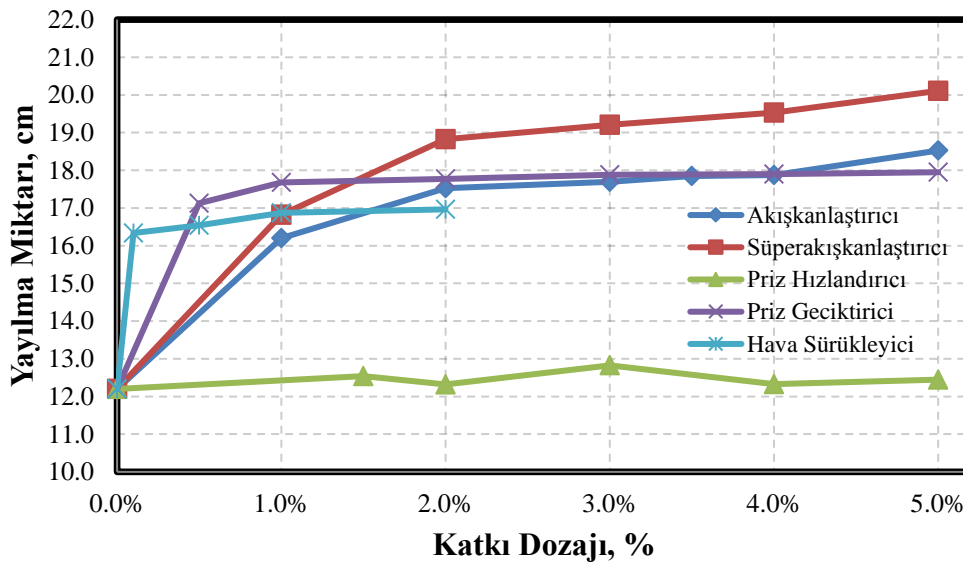
Ayrıca yapılan deneylerde de hava sürükleyici katkı ile üretilen numunelerde % 2'lik katkı kullanımında dahi numunenin beton olma özelliğini kaybettiği, sıva benzeri bir malzeme haline dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle katkı dozajı bu katkı için % 2 ile sınırlandırılmış olup, bu nedenle yatay eksen değerleri diğer katkılar için farklılık göstermektedir. Ayrıca diğer katkılarla karşılaştırıldığında hava sürükleyici katkılarda, hava içeriğinden kaynaklı olmak üzere taze birim ağırlığın 2.27 kg/dm^3 seviyelerinden 1.50 kg/dm^3 seviyelerine düştüğü gözlemlenmektedir. Diğer katkılarda ise en düşük değer 2.10 kg/dm^3 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Grafiklerin daha kolay okunması ve farklılıkların detaylı bir şekilde görülebilmesi amacıyla hava sürükleyici katkılarda ordinat değeri $1.5 - 2.3 \text{ kg/dm}^3$ aralığında, diğer katkılarda ise $2.0 - 2.3 \text{ kg/dm}^3$ aralığında seçilmiştir.

Taze birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi incelendiğinde; priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkılarda hemen hemen herhangi bir değişim yaşanmadığı, akışkanlaştırıcı için ise bir miktar düşüş yaşandığı ancak süperakışkanlaştırıcıda ise belirgin bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu düşüşün kullanılan katkı maddesinin beton içerisine hava sürüklemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Topçu ve Ateşin, 2016). Ramachandran'ın (1996) da belirttiği üzere akışkanlaştırıcı kullanımında beton içerisine yaklaşık % 2-3 civarında hava sürüklenmektedir. Bu deneysel çalışmada görüldüğü üzere süperakışkanlaştırıcı katkıda normal akışkanlaştırıcıya göre daha fazla hava sürüklemiştir.

Hava sürükleyici katkılar, özelliğinden dolayı betonların birim ağırlığını düşürmektedir, bu durum Şekil 4.2'de de açıkça görülmektedir. Grafikte en önemli nokta üretici tarafından önerilen dozajlarda (% 0.06-% 0.2) kullanılması durumunda dahi birim ağırlıkta ciddi düşüşler yaşanmasıdır. Özellikle % 0.1 oranındaki katkıda dahi birim ağırlığın 1.90 kg/dm^3 seviyesine düşmesi betonda ciddi değişimlerin olduğunu göstermektedir. Grafikte dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise hava içeriğindeki artım hızının yavaşlamasıdır. Yaklaşık %0.5 lik dozajdan sonra katkı miktarı arttıkça hava içeriği artım hızının azaldığı gözlemlenmektedir.

4.1.2. Yayılma sonuçlarının değerlendirilmesi

Yayılma tablasında kullanılan yağın numune içerisine girmesi, bu nedenle harç özelliklerini değiştirmesi ve standartların öngördüğü sıkıştırma işleminden başka bir şekilde sıkıştırma süreci gerçekleştiğinden dolayı yayılma tablası için kullanılan numuneler diğer deneylerde kullanılamamıştır. Bu nedenle yayılma deneyleri için ayrı numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda katkı dozajının değişimi ile yayılma değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



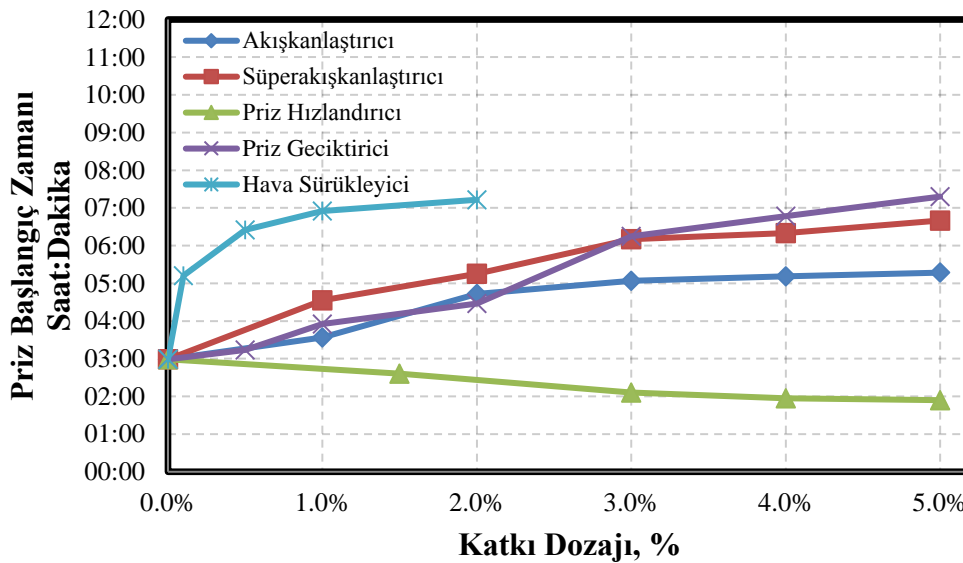
Şekil 4.3. Yayılma değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Yayılma değerleri incelendiğinde yayılma değerlerinin 12 ile 20 cm arasında değiştiği görülmektedir. Beklendiği gibi akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcılarda yayılma değerleri katkı dozajı arttıkça artmaktadır. Ancak yayılma değerlerinin artım hızı her iki katkı tipi içinde %2 oranından sonra yavaşlamaktadır. Priz hızlandırıcı katkı için dozaj değişiminin yayılma özeliğine etki etmediği belirlenmiştir. Katkı ne kadar artarsa artsın harç numunesinin bu özeliğinde bir değişim gözlemlenmemiştir. Priz geciktirici katkıda ise içerdiği malzemenin (Sodyum Glükonat) aynı zamanda akışkanlaştırıcı özellik taşımasından dolayı harç numunesinin yayılma değerini arttırdığı, ancak bu akışkanlığın % 1 seviyesinden sonra değişmediği, hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. Literatürde akışkanlaştırıcılar (water reducers) ile priz geciktiriciler

(retarders) iç içe geçmiş mekanizmaları nedeniyle aynı başlık altında incelenebilmektedirler. Buna en iyi örnek Ramachandran (1996) tarafından yazılan “Concrete Admixtures Handbook” kitabıdır. Hava sürükleyici katkıda da priz geciktirici katkıya benzer bir sonuç gözlemlenmektedir. %0.1’lik katkı kullanımında dahi yayılma değerinin ciddi bir şekilde arttığı ancak bu değerden sonra yayılma değerlerinde ufak artışlar gözlemlendiği, hatta %1’lik orandan sonra yayılma değerlerinin değişmediği gözlemlenmektedir.

4.1.3. Priz süresi sonuçlarının değerlendirilmesi

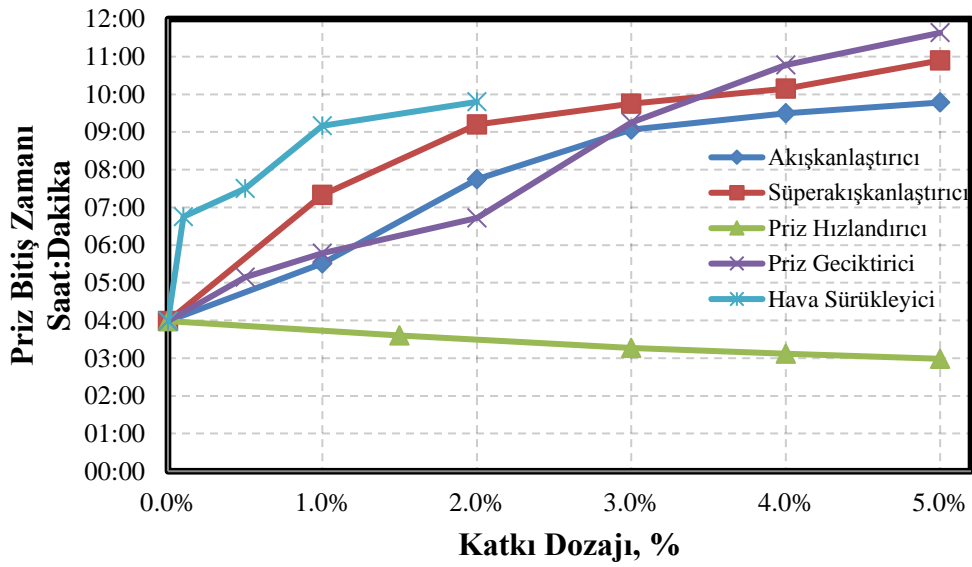
Yayılma deneyinde olduğu gibi bu deneyde de numunelerin deney sonrasında kullanılmayacak olmasından dolayı priz süresi deneyi için ayrı numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, katkı dozajının değişimi ile priz başlangıç sürelerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.4’te, priz bitim sürelerinin değişimini gösteren grafik ise Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Priz başlangıç sürelerinin katkı dozajı ile değişimi.

Priz başlangıç süreleri incelendiğinde; priz başlangıç sürelerinin 1:54 ile 7:18 dakika arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkıda, katkı miktarı arttıkça priz süresinin de arttığı görülmüştür. Aynı şekilde priz geciktirici katkıda da beklendiği gibi priz başlama süresi kontrol karışımına göre artmıştır. Priz geciktirici katkı için priz başlama süresi, önerilen dozajda ciddi bir miktarda değişmese de

katkı oranı arttıkça priz başlama süresinin kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında (2:59) uzadığı, hatta %5'lik katkı oranında (7:18) kontrol karışımına göre 4 saat 19 dakikalık bir fark oluştuğu görülmüştür. Priz hızlandırıcı katkıda ise artan katkı oranı ile doğru orantılı olarak priz süresinin de kısaldığı görülmektedir. En radikal değişimler hava sürükleyici katkıda gözlemlenmektedir. Önerilen katkı dozajında bile (5:12) prizin kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında (2:59) 3 saat 13 dakika geç başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum % 2'lik katkıda (7:13) ise 4 saat 14 dakikalık priz başlangıç süresi artışına denk gelmektedir.



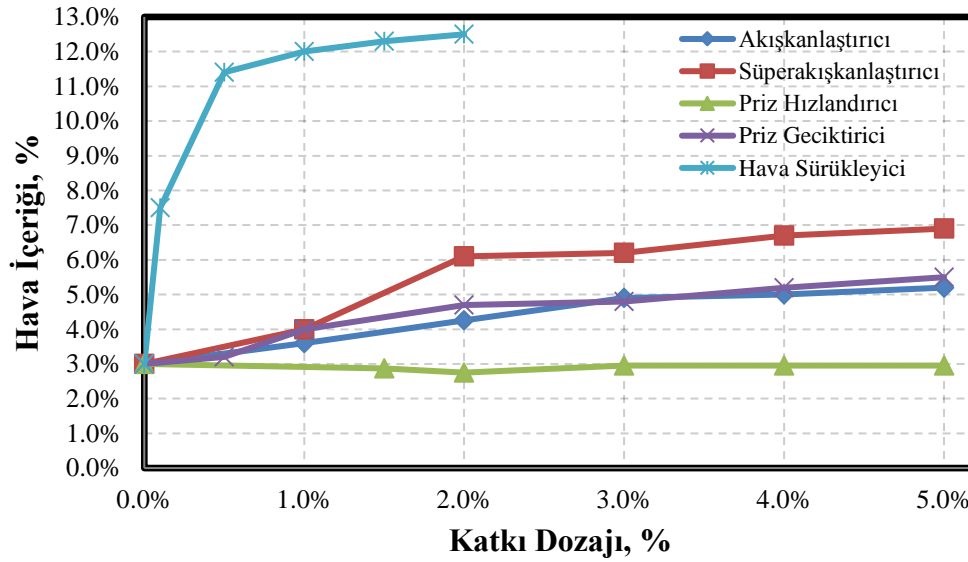
Şekil 4.5. Priz bitiş sürelerinin katkı dozajı ile değişimi.

Şekil 4.5 incelendiğinde; priz bitiş sürelerinin 3:59 ile 11:38 dakika arasında, geniş bir yelpazede değiştiği gözlemlenmektedir. Priz bitiş süreleri incelendiğinde priz başlangıç sürelerine benzer sonuçlar görülmektedir. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz geciktirici katkılarda, dozaj arttıkça priz bitiş süresinin uzadığı görülmektedir. %3 lük katkıya kadar akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların priz bitiş sürelerinin daha uzun olduğu, ancak %3'lük dozajdan sonra priz geciktirici katkının priz bitiş süresini daha fazla uzattığı görülmektedir. Priz hızlandırıcı katkıda ise beklendiği şekilde priz bitiş süresinin katkı dozajı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu değişim %1.5'lük dozajda (3:36) kontrol karışımına göre (3:59) 23 dakikalık bir azalmaya denk gelirken %5'lik dozajda (2:59) ise tam 1 saatlik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Yine benzer şekilde en radikal değişimler hava sürükleyici katkıda gözlemlenmektedir.

Önerilen katkı dozajı olan %0.1 dozajda dahi (6:45) prizın kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında (3:59) 3 saat 46 dakika geç bittiği gözlemlenmiştir. Bu durum % 2'lik katkıda (9:48) ise 5 saat 49 dakikalık priz bitiş süresi artışına karşılık gelmektedir.

4.1.4. Hava içeriği deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Katkı dozajı değişimi ile harç numunesi içerisindeki hava miktarının değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



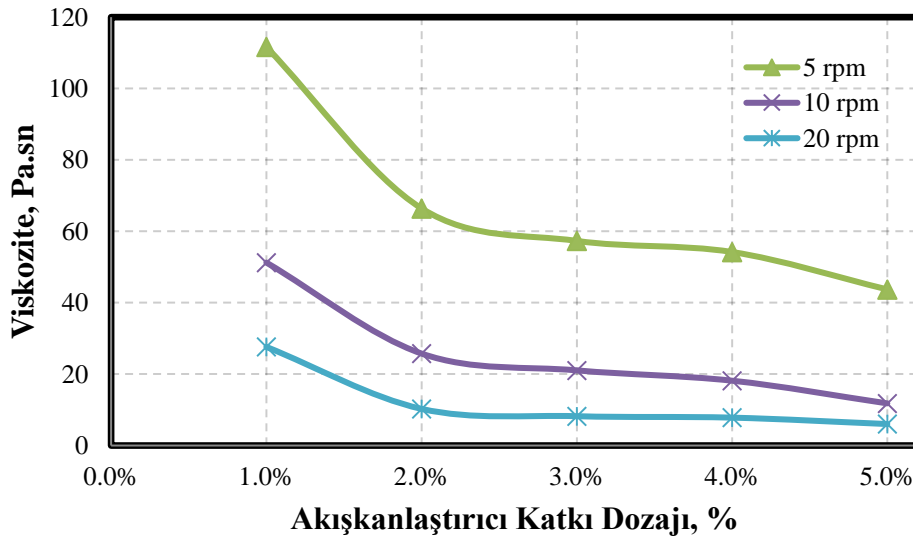
Şekil 4.6. Hava içeriğinin katkı dozajı ile değişimi.

Şekil 4.6 incelendiğinde; katkıların hava sürükleme değerlerinin % 2.75 ile % 12.5 arasında değiştiği görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkı ile priz geciktirici katkıların harç içerisine birbirine benzer miktarlarda hava sürüklediği gözlemlenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkı ise akışkanlaştırıcı katkıdan daha fazla miktarlarda olmak üzere, dozaj artımı ile doğru orantılı olarak harç içerisine hava sürüklemektedir. Deney sonuçlarına göre priz hızlandırıcı katkının hava sürükleme özeliğinin olmadığı söylenebilir. Küçük miktardaki değişikliklerin ölçümden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer taze halde yapılan deneylerde olduğu gibi en radikal değişim yine hava sürükleyici katkıda gözlemlenmiştir. Hava sürükleyici katkının taze harç içerisine % 0.1'lik oranda dahi % 7.5 oranında hava sürüklediği, bu miktarın % 2'lik katkı oranında % 12.5 seviyelerine çıktığı

görülmüştür. Ancak hava sürükleyici katkıda hava sürüklenme hızının % 0.5'lik orandan sonra ciddi şekilde azaldığı görülmektedir. Bu orandan sonra, deney sonuçlarına göre, katkı miktarını arttırmanın pratik olarak hiçbir yararı bulunmamaktadır (Topçu vd., 2017).

4.1.5. Viskozite ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

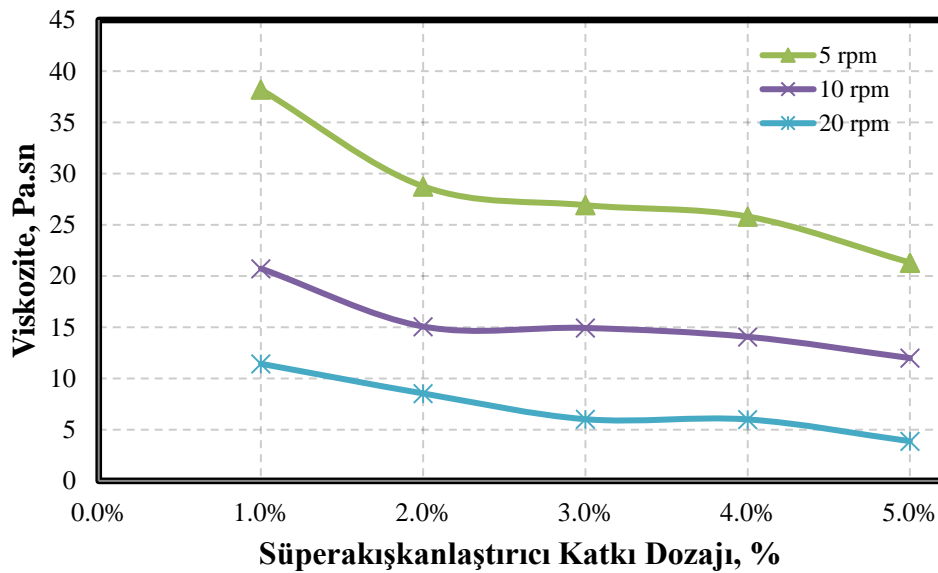
Viskozite ölçümleri akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları için yapılmış olup priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıları için akışkanlığın düşük olması nedeniyle yapılamamıştır. Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkılarda; spindle'in numune içerisine daldırılması sonrası, bu katkıları ile hazırlanan numunelerin kıvamlı olması nedeniyle viskozimetrenin tork değerleri dışına çıkmış, diğer bir deyişle cihazın gücü spindle'ı döndürmeye yetmemiştir. Cihazın tork değerleri içinde kaldığı durumlarda ise spindle'in dönüşü ile birlikte numune içerisinde oyuk şeklinde bir form oluşmuş, spindle'in çevresinde numune bulunmaması nedeniyle de viskozite değerleri alınmadığından bu katkıları için viskozite ölçümü yapılamamıştır. Ayrıca kontrol karışımının da aşırı kıvamlı olması nedeniyle viskozimetrenin tork değerleri dışına çıkmış, dolayısıyla kontrol karışımına yönelik ölçüm de yapılamamıştır. Akışkanlaştırıcı katkı için viskozite-katkı dozajı değişimini gösteren grafik Şekil 4.7'de, süperakışkanlaştırıcı katkı için Şekil 4.8'de ve hava sürükleyici için Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Akışkanlaştırıcı katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.

Akışkanlaştırıcı katkıya yönelik yapılan viskozite ölçümlerinde yayılma değerlerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. V73 spindle'ın 5 rpm hızla dönüşü durumunda % 1'lik katkıda 111.6 Pa.sn'lik viskozite ölçülmüşken bu değer, 10 rpm hızda % 1 katkı için 51.3 Pa.sn'ye, 20 rpm hızda ise yine aynı oranda katkı için 27.6 Pa.sn'ye karşılık gelmektedir. Buna karşın % 5'lik katkı oranında spindle'ın 5 rpm hızla dönüşü durumunda 43.7 Pa.sn, 10 rpm hızda 11.8 Pa.sn ve 20 rpm hızda ise 6.0 Pa.sn'lik viskozite değerleri ölçülmüştür. Tüm veriler ışığında akışkanlaştırıcı dozajı arttıkça viskozitenin de arttığı söylenebilir.

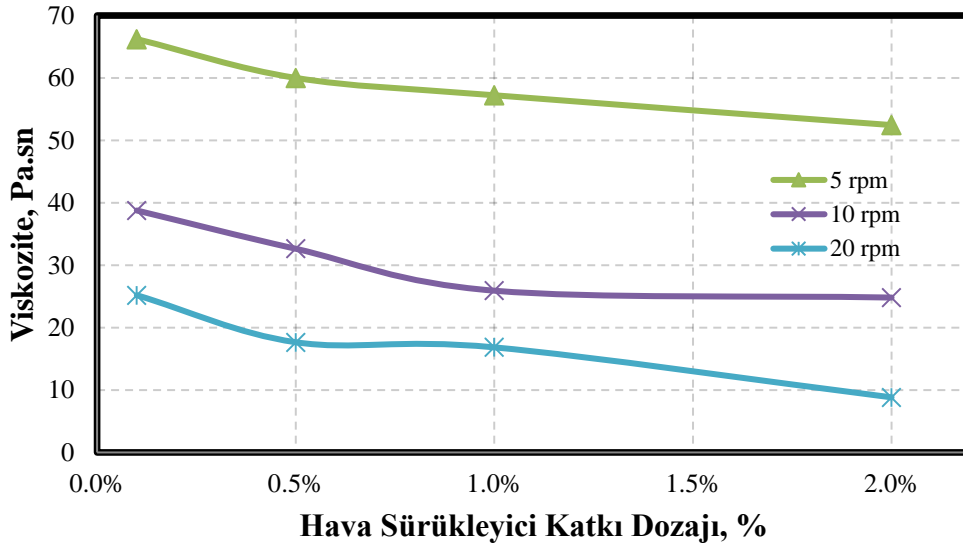
Süper akışkanlaştırıcı için yapılan ölçümler sonucu hazırlanan Şekil 4.8 incelendiğinde; spindle'ın 5 rpm hızla dönüşü durumunda % 1'lik katkıda 38.2 Pa.sn'lik viskozite ölçülmüşken bu değer, 10 rpm hızda % 1 katkı için 20.7 Pa.sn, 20 rpm hızda ise yine aynı oranda katkı için 11.4 Pa.sn'ye karşılık gelmektedir. Buna karşın % 5'lik katkı oranında spindle'ın 5 rpm hızla dönüşü durumunda 21.3 Pa.sn, 10 rpm hızda 12.0 Pa.sn ve 20 rpm hızda ise 3.9 Pa.sn'lik viskozite değerleri ölçülmüştür. Süper akışkanlaştırıcı içinde viskozite ile katkı oranı ters orantılıdır. Ancak süperakışkanlaştırıcı katkının akışkanlığa etkisinin daha fazla olması nedeniyle viskozite değerleri daha düşük olmaktadır.



Şekil 4.8. Süperakışkanlaştırıcı katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.

Hava sürükleyici katkı dozaj oranı ile viskozitenin değişimini gösteren Şekil 4.9 incelendiğinde; spindle'ın 5 rpm hızla dönüşü durumunda % 0.1'lik katkıda 66.2 Pa.sn'lik viskozite ölçülmüşken bu değer, 10 rpm hızda % 0.1 katkı için 38.8 Pa.sn'ye,

20 rpm hızda ise yine aynı oranda katkı için 25.2 Pa.sn'ye karşılık gelmektedir. Buna karşın % 2'lik katkı oranında spindle'in 5 rpm hızla dönüşü durumunda 52.4 Pa.sn, 10 rpm hızda 24.8 Pa.sn ve 20 rpm hızda ise 8.8 Pa.sn'lik viskozite değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Hava sürükleyici katkı için viskozitenin dozajı ile değişimi.

Benzer şekilde hava sürükleyici katkı içinde katkı oranı arttıkça viskozitenin düştüğü, diğer bir deyişle akışkanlığın (veya işlenebilirliğin) arttığı söylenebilir.

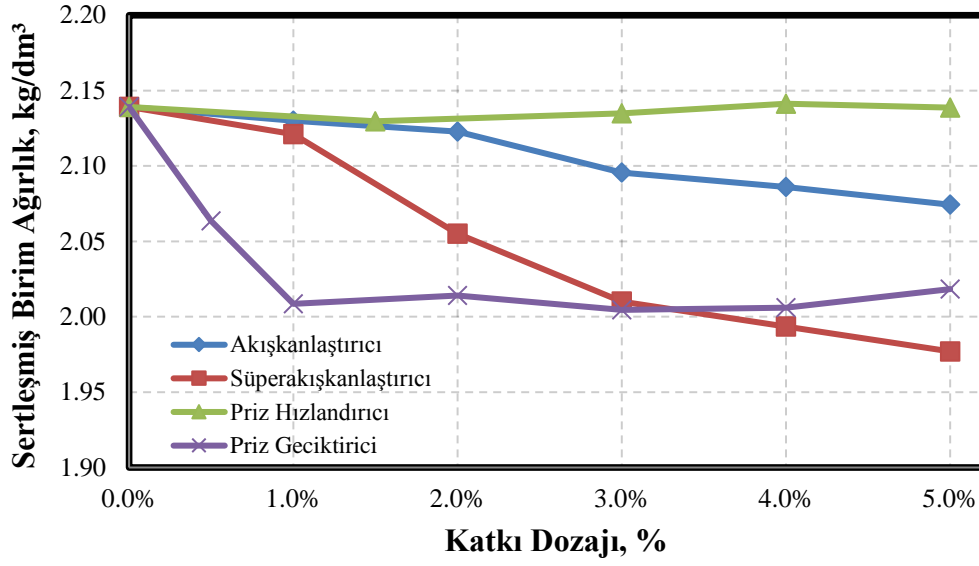
4.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Üretilen harç numunelerinin sertleşmiş haldeki özelliklerinin incelenmesi kapsamında yapılan sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş süresi, kılcal su emme, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deney sonuçları ile değerlendirmeleri aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler laboratuvar ortamında not edilmiştir. Daha sonra elde edilen veriler, derlenip yorumlanmak üzere bilgisayarda tablo ve grafik programında işlenmiştir. Şekiller genelde yorumlanması kolay olan çizgi diyagram şeklinde hazırlanmış, bazı sonuçların yorumlanması için ise çubuk diyagramlar kullanılmıştır.

4.2.1. Sertleşmiş birim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi

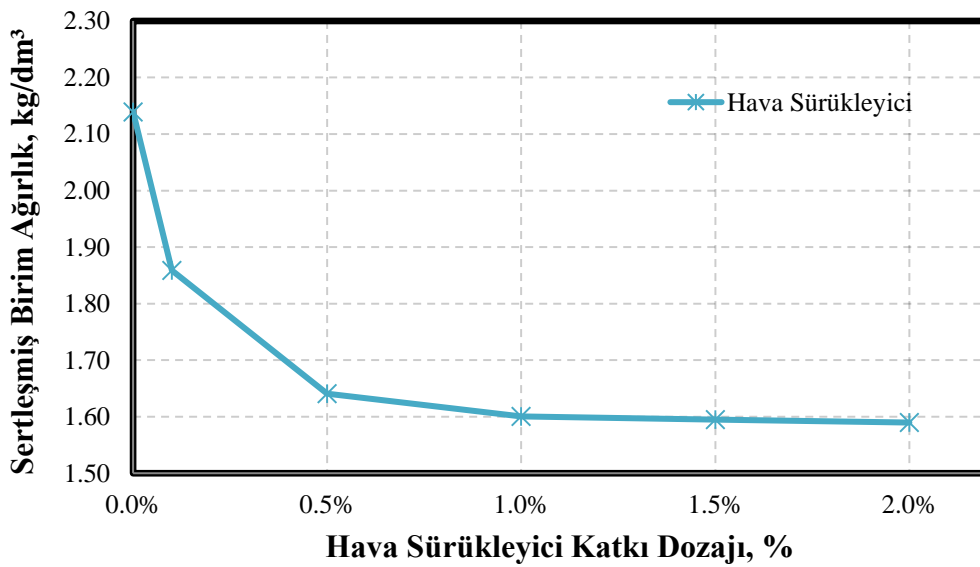
Sertleşmiş haldeki birim ağırlık değerleri, taze birim ağırlık deneyinde olduğu gibi basınç dayanımını belirlemek için hazırlanan numuneler kullanılarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı için 7, 28, 56 ve 90 günlük olmak üzere 4 farklı numune hazırlandığından, sertleşmiş birim ağırlık için de her bir katkı dozajı için 4 takım veri elde edilmiştir. Her bir takım numunenin 3 adetten oluştuğu göz önüne alındığında her bir birim ağırlık değerinin 12 adet numuneyi temsil ettiği ortaya çıkmaktadır. Diğer katkılarla karşılaştırıldığında hava sürükleyici katkılı betonlarda yoğun miktarda hava bulunması nedeniyle sertleşmiş birim ağırlığın sert bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle grafiklerin daha kolay okunabilmesi ve farklılıkların net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla hava sürükleyici katkı diğer katkılardan ayrılarak ayrı bir grafikte irdeleme ihtiyacı doğmuştur. Diğer katkılarda ise değerlerin aynı seviyelerde bulunduğu belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkı dozajının değişimi ile sertleşmiş haldeki harcın birim hacim ağırlığının değişimini gösteren grafik Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Hava sürükleyici katkı dozajının değişimi ile sertleşmiş haldeki harcın birim hacim ağırlığının değişimini gösteren grafik ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Şekil 4.10 incelendiğinde, sertleşmiş birim ağırlıkların 1.977 kg/dm^3 (süperakışkanlaştırıcı %5 katkı) ile 2.141 kg/dm^3 arasında değiştiği görülmektedir. Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkılar için katkı dozajı arttıkça sertleşmiş birim ağırlık azalmış, ancak süperakışkanlaştırıcı katkıda birim ağırlıktaki azalma daha fazla gerçekleşmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıda % 1 katkı oranında sertleşmiş birim ağırlık 2.130 kg/dm^3 iken, % 5 katkı oranında sertleşmiş birim ağırlık 2.074 kg/dm^3 seviyesine düşmüştür. Süperakışkanlaştırıcı katkıda ise % 1 katkı oranında sertleşmiş birim ağırlık 2.121 kg/dm^3 iken, % 5 katkı oranında sertleşmiş birim ağırlık 1.977 kg/dm^3 seviyesine düşmüştür. Priz hızlandırıcı dozajı ile sertleşmiş birim ağırlığın ilişkili olmadığı dozaj arttıkça sertleşmiş birim ağırlığın değişmediği görülmüştür. Priz hızlandırıcı katkı için % 1.5, % 3, % 4 ve % 5 dozajındaki katkılar için sertleşmiş birim ağırlık sırasıyla 2.130 , 2.135 , 2.141 ve 2.139 kg/dm^3 değerlerini almıştır. Priz geciktirici katkıda ise sertleşmiş birim ağırlığın % 1 seviyesine kadar düştüğü ancak bu dozajdan sonra sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin değişmediği görülmüştür. Bu durumun priz geciktirici katkının hava sürükleme potansiyelinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Sertleşmiş birim ağırlığın katkı dozajına göre değişimi (hava sürükleyici hariç).

Hava sürükleyici katkı dozaj-sertleşmiş birim ağırlık grafiği olan Şekil 4.11 incelendiğinde; % 1 katkı oranına kadar birim ağırlık değerlerinin hızlı bir şekilde düştüğü, ancak % 1 oranındaki katkıdan sonra dozaj artışının sertleşmiş birim ağırlığı hemen hemen değiştirmedeği görülmektedir. Sertleşmiş birim ağırlık değerleri % 0.1 ve % 0.5'lik dozajlarda sırasıyla 1.859 ve 1.641 kg/dm³ seviyelerinde iken bu değerlerin %1, %1.5 ve %2 katkı dozajlarında 1.600, 1.595 ve 1.590 kg/dm³ seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.11. Hava sürükleyici katkı için sertleşmiş birim ağırlığın katkı dozajı ile değişimi.

4.2.2. Ultrases geçiş hızı sonuçlarının değerlendirilmesi

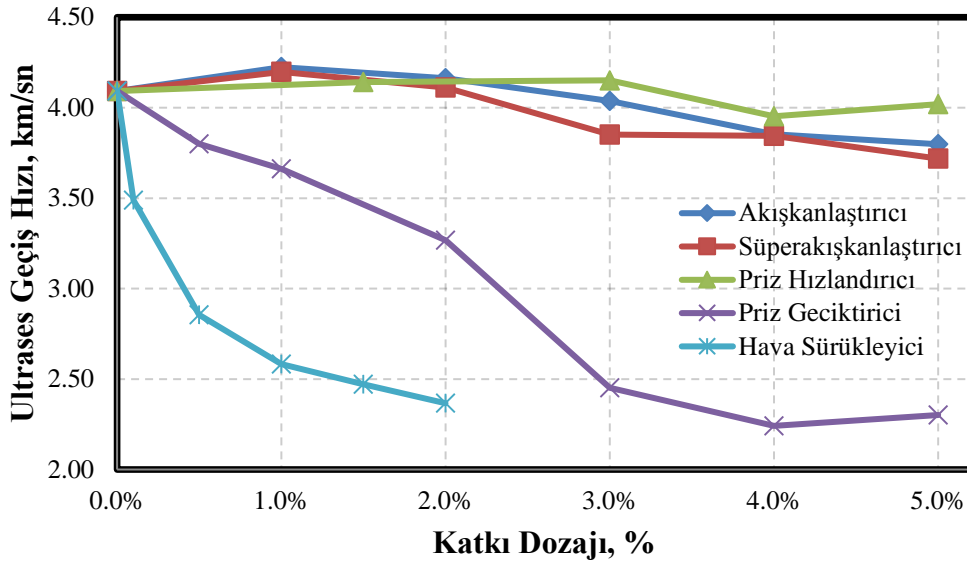
Üretilen harç numuneleri üzerinde 28'inci günde yapılan ultrases geçiş süresi deneyi sonucunda hazırlanan ultrases geçiş hızının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Priz hızlandırıcı katkıda ultrases geçiş hızı değerlerinde kayda değer bir değişim görülmezken, akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı da geçiş hızı değerlerinin az miktarda azaldığı, ancak priz geciktirici ve hava sürükleyici katkılarda ultrases geçiş hızı değerlerinin ciddi şekilde azaldığı görülmüştür.

Akışkanlaştırıcı katkıda, ultrases geçiş hızı değerleri 3.798 km/sn ile 4.224 km/sn arasında değişmektedir. % 1 ve % 2'lik dozajlarda ultrases geçiş hızı değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 3.2 ve % 1.7 oranlarında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 1.2, % 5.8 ve % 7.2 oranlarında azalmıştır.

Süperakışkanlaştırıcı katkıda, ultrases geçiş hızı değerleri 3.718 km/sn ile 4.198 km/sn arasında değişmektedir. % 1 ve % 2'lik dozajlarda ultrases geçiş hızı değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 2.5 ve % 0.5 oranlarında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 5.9, % 6.1 ve % 9.1 oranlarında azalmıştır.

Priz hızlandırıcı katkıda, ultrases geçiş hızı değerleri 3.953 km/sn ile 4.151 km/sn arasında değişmektedir. Kontrol karışımına göre yaklaşık % 1 ile % 3 arasında değişen değerlerin ölçümden kaynaklandığı ve katkı dozajı ile ultrases geçiş süresi arasında bir bağıntı olmadığı düşünölmektedir.

Priz geciktirici katkıda, ultrases geçiş hızı değerleri 2.301 km/sn ile 3.801 km/sn arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarında ultrases geçiş hızları düşmüş olup, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda ultrases geçiş hızı değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 7.1, % 10.5, % 20.1, % 40.1, % 45.2 ve % 43.7 oranlarında azalmıştır. Özellikle % 3'lük katkı oranına kadar düşüş hızlı olmuş, bu orandan sonra ise ultrases geçiş hızı değerlerindeki düşüş durmuştur. Bu durum artık harcın içerisindeki boşluk oranının çıkabileceği en yüksek değere ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu veriler basınç dayanımı sonuçlarıyla da örtüşmektedir.



şekil 4.12. Ultras ses geçiş hızının katkı dozajı ile değişimi.

Hava sürükleyici katkıda, ultras ses geçiş hızı değerleri 2.366 km/sn ile 3.488 km/sn arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarında ultras ses geçiş hızları düşmüş olup, % 0.1, % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2'lik dozajlarda ultras ses geçiş hızı değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 14.8, % 30.2, % 36.9, % 39.6 ve % 42.7 oranlarında azalmıştır. Özellikle % 1'lik katkı oranına kadar düşüş hızlı olmuş, bu orandan sonra ise ultras ses geçiş hızı değerlerindeki düşüş hızı azalmıştır. Deney sonuçları, harç içindeki sürüklenmiş kontrollü boşluk oranının dahi ultras ses geçiş hızını ne kadar değiştirdiğini net şekilde göstermektedir.

4.2.3. Kılcal su emme sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen harç numunelerinin, 90 gün kür edilerek 28 gün boyunca kılcal su emme deneyi gerçekleştirildikten sonra elde edilen kılcal su emme değerinin katkı dozajı ile değişimi şekil 4.13'te gösterilmiştir. Tüm harç numunelerinde kılcal su emme değerleri katkı dozajının artışı ile artarken bu artış en az priz hızlandırıcı katkıda, en çok ise hava sürükleyici katkıda gözlemlenmiştir.

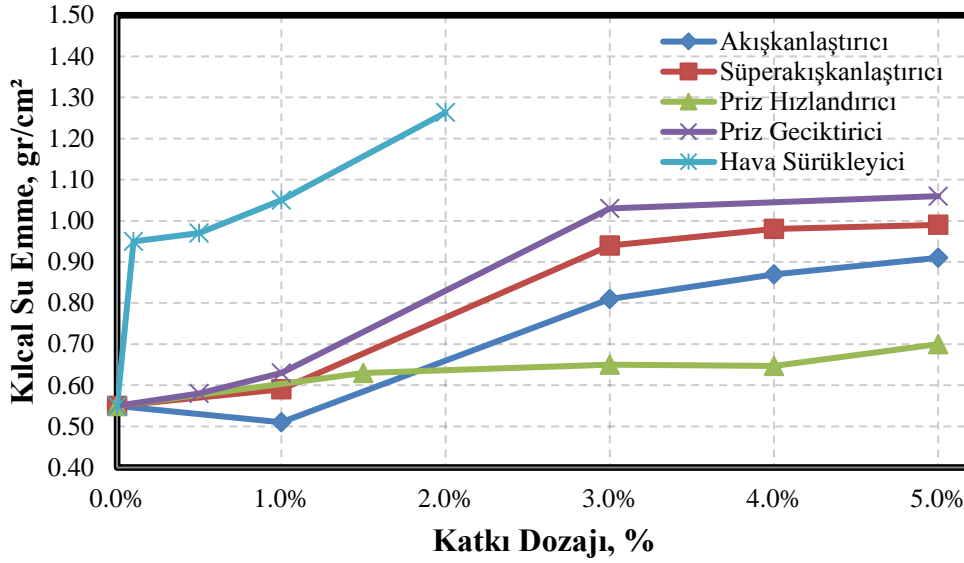
Akışkanlaştırıcı katkıda, kılcal su emme değerleri 0.51 gr/mm^2 ile 0.91 gr/mm^2 değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında kılcal su emme değeri kontrol karışımına göre % 7.3 oranında azalmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 47.3, % 58.2 ve % 65.4 oranlarında

artmıştır. Akışkanlaştırıcı katkının üretici tarafından önerilen optimum dozajlar dâhilinde kullanılması durumunda (örneğin % 1 oranda) işlenebilirliğin arttığı ve uygun yerleşimin sağlanarak dayanım ve dayanıklılığın arttığı görülmüştür.

Süperakışkanlaştırıcı katkıda, kılcal su emme değerleri 0.59 gr/mm² ile 0.99 gr/mm² değerleri arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarda kılcal su emme değerleri artmış olup, % 1, % 3, % 4 ve % 5'lik katkı oranlarında kılcal su emme değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 7.3, % 70.9, % 78.2 ve % 80.0 oranlarında artmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı için de akışkanlaştırıcı katkıda olduğu gibi % 1'lik katkıda kılcal su emme değerinin azalması beklenmektedir. Ancak % 7'lik bir farkın diğer oranlarla karşılaştırıldığında bu deney yöntemi için geçerli bir sapma değeri olduğu düşünülmektedir.

Priz hızlandırıcı katkıda, kılcal su emme değerleri 0.63 gr/mm² ile 0.70 gr/mm² değerleri arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarda kılcal su emme değerleri artmış olup, % 1.5, % 3, % 4 ve % 5'lik katkı oranlarında kılcal su emme değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 14.5, % 18.2, % 17.6 ve % 27.3 oranlarında artmıştır. TS EN 934-2 (2013) standardı priz hızlandırıcı katkıları için kılcal su emme değerine yönelik bir düzenleme yapmamıştır. Konu standartta kılcal su emme değerine yönelik düzenleme sadece su geçirimsizlik katkıları için yapılmış olup, 90 gün süreyle kür edilip 28 gün deney gerçekleştirilen numuneler için kılcal su emme değeri kontrol karışımına göre kütlece % 60 ile sınırlandırılmıştır. Bu değer priz hızlandırıcı katkı ile karşılaştırıldığında % 27'lik bir artışın görece düşük bir orana denk geldiği düşünülmektedir.

Priz geciktirici katkıda kılcal su emme değerleri 0.58 gr/mm² ile 1.06 gr/mm² değerleri arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarda kılcal su emme değerleri artmış olup, % 0.5, % 1, % 3 ve % 5'lik katkı oranlarında kılcal su emme değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 5.4, % 14.5, % 87.3 ve % 92.7 oranlarında artmıştır. Priz geciktirici katkıda da süperakışkanlaştırıcı katkıda olduğu gibi % 0.5'lik katkıda kılcal su emme değerinin azalması beklenmektedir. Ancak % 5'lik bir farkın diğer oranlarla karşılaştırıldığında bu deney yöntemi için geçerli bir sapma değeri olduğu düşünülmektedir.



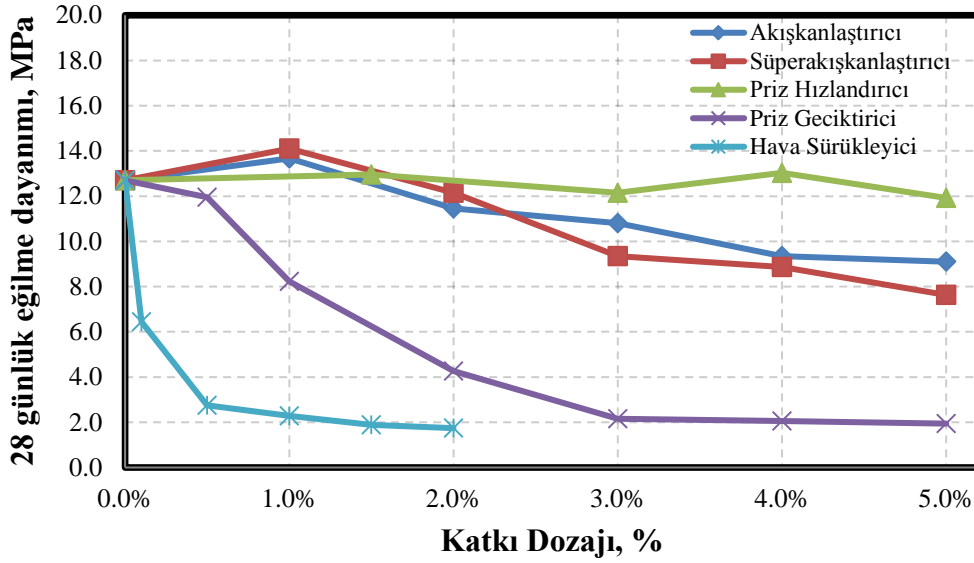
Şekil 4.13. Kılcal su emme değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Hava sürükleyici katkıda kılcal su emme değerleri 0.95 gr/mm^2 ile 1.26 gr/mm^2 değerleri arasında değişmektedir. Tüm katkı oranlarında kılcal su emme değerleri ciddi oranlarda artmış olup, % 0.1, % 0.5, % 1 ve % 2'lik katkı oranlarında kılcal su emme değerleri kontrol karışımına göre sırasıyla % 72.7, % 76.4, % 90.9 ve % 129.7 oranlarında artmıştır. Hava sürükleyici katkılı betonların içindeki boşluklu yapının betonun kılcal su emme özeliğine direkt olarak etki ettiği açıktır. Bu nedenle bu katkı kullanılarak üretilecek betonlarda kılcal su emme potansiyeli göz önünde bulunarak tasarım/hesaplama yapılmalıdır.

4.2.4. Eğilme dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen harçlar üzerinde eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımlarını Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Katkı dozajı ile 28 günlük eğilme dayanımlarının değişimi incelendiğinde; akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların eğilme dayanımlarında optimum dozajlarda az da olsa bir artış olduğu, ancak yüksek dozajlarda dayanım kayıpları olduğu, priz hızlandırıcı katkıda eğilme dayanımı ile katkı dozajı arasında bir ilişki bulunmadığı, katkı dozajı değişse de eğilme dayanımının değişmediği, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkılarda ise dayanımların her dozajda azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.14. 28 günlük eğilme dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 9.1 MPa ile 13.7 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında eğilme dayanımı kontrol karışımına göre % 7.72 oranında artmış, ancak % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 9.8, % 14.9, % 26.4 ve % 28.3 oranlarında azalmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıda dozaj artımı ile eğilme dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı belirlenmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 7.6 MPa ile 14.1 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 11.0 oranında artmış, ancak % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 4.3, % 26.3, % 30.2 ve % 39.9 oranlarında azalmıştır. Yine benzer şekilde süperakışkanlaştırıcı katkıda da dozaj artımı ile eğilme dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı olduğu görülmektedir. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı katkının eğilme dayanımındaki düşüş akışkanlaştırıcı katkıya göre daha fazla gerçekleşmiştir.

Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 11.9 MPa ile 13.0 MPa değerleri arasında değişmektedir. Priz hızlandırıcı kullanılan harçların 28 günlük eğilme dayanımlarında yaklaşık % 2 ile % 3 mertebesinde değişimler gözlemlenmiş olup, bu farklılıkların numunenin heterojen

yapısından kaynaklı sapmalar olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle priz hızlandırıcı katkı dozajı ile eğilme dayanımı arasında bir ilişki bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

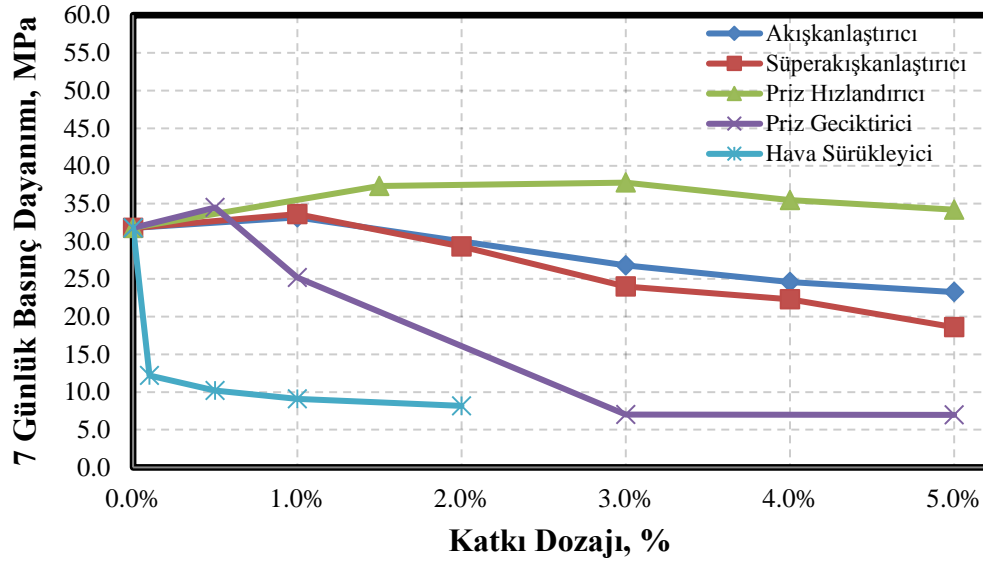
Priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 1.9 MPa ile 11.9 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 28 günlük eğilme dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.5, % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 5.9, % 35.2, % 66.4, % 83.1, % 83.8 ve % 84.7 oranlarında azalmıştır. Grafik incelendiğinde % 3'lük dozaja kadar hızlı bir eğilme dayanımı kaybı yaşandığı, bu orandan sonra ise dayanımların artık değişmeyecek kadar düşük değerlere ulaştığı görülmüştür.

Hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları 1.7 MPa ile 6.4 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 28 günlük eğilme dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.1, % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 49.3, % 78.3, % 82.9, % 85.2 ve % 86.3 oranlarında azalmıştır. Grafik incelendiğinde optimum dozajda dahi eğilme dayanımının hızlı bir şekilde düştüğü ve bu hızlı düşüşün % 0.5 orana kadar devam ettiği, bu orandan sonra da düşüşün devam ettiği ancak düşüş hızının oldukça azaldığı görülmektedir. Ayrıca % 0.1'lik optimum dozajda dahi eğilme dayanımının yarısının kaybedilmesi, bunun yanında % 2'lik dozajda ise % 86'lara varan eğilme dayanımı kayıpları, bu katkının kullanılmasında ne kadar dikkatli olunması gerektiği yönünde uyarı niteliğindedir.

4.2.5. Basınç dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen harçlar üzerinde 7, 28, 56 ve 90'ıncı günlerde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu 7 günlük basınç dayanımının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.15'te, 28 günlük basınç dayanımının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.16'da, 56 günlük basınç dayanımının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.17'de ve 90 günlük basınç dayanımının katkı dozajı ile değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Ayrıca her bir katkı için ayrı ayrı olmak üzere basınç dayanımı değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafiklerde hazırlanmıştır. Bu kapsamda; akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi

Şekil 4.19’da, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 4.20’de, priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 4.21’de, priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 4.22’de ve hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin basınç dayanımlarının zamanla değişimini Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Katkı dozajı ile 7 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.15 incelendiğinde; priz hızlandırıcı katkı hariç olmak üzere diğer tüm katkılarda genel olarak dozaj arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. En büyük düşüş % 78’lik basınç dayanımı kaybı ile priz geciktirici katkıda görülmektedir.

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 23.3 MPa ile 33.2 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1’lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 4.3 oranında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5’lik dozajlarda değerler sırasıyla % 15.7, % 22.6 ve % 26.8 oranlarında azalmıştır. Akışkanlaştırıcı katkının üretici tarafından önerilen optimum dozajlar dâhilinde kullanılması durumunda (örneğin % 1 oranda) işlenebilirliğin arttığı ve uygun yerleşimin sağlanarak dayanımın arttığı görülmüştür.

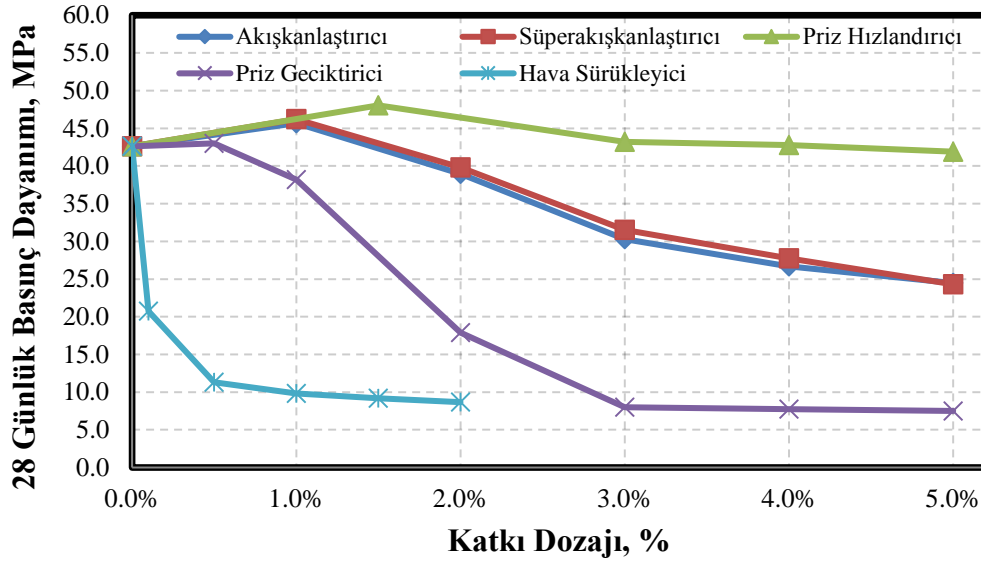
Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 18.6 MPa ile 33.6 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 5.7 oranında artmış, ancak % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 7.8, % 24.5, % 29.9 ve % 41.5 oranlarında azalmıştır.

Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 34.2 MPa ile 37.3 MPa değerleri arasında değişmektedir. Priz hızlandırıcı kullanılan harçlarının tamamının 7 günlük basınç dayanımlarında artış görülmekte olup, % 1.5, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 17.4, % 18.8, % 11.6 ve % 7.6 oranlarında artmıştır.

Priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 7.0 MPa ile 34.5 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 0.5'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 8.4 oranında artmış, ancak % 1, % 3 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 20.7, % 77.9 ve % 78.0 oranlarında azalmıştır.

Hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 8.2 MPa ile 12.2 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 7 günlük basınç dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.1, % 0.5, % 1 ve % 2'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 61.6, % 67.9, % 71.5 ve % 74.3 oranlarında azalmıştır.

Katkı dozajı ile 28 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.16 incelendiğinde hava sürükleyici katkı hariç olmak üzere tüm katkılarda optimum dozajda basınç dayanımlarında iyileşmeler görüldüğü ancak dozaj arttıkça dayanımlarda düşüş yaşandığı görülmüştür. Hava sürükleyici katkıda ise katkı dozajı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımlarında bir diğer dikkat çekici husus, akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların basınç dayanımı değerlerinin birbirine çok benzer olmasıdır.



Şekil 4.16. 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 24.5 MPa ile 45.7 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 7.2 oranında artmış, ancak % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 8.6, % 28.9, % 37.3 ve % 42.6 oranlarında azalmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıda dozaj artımı ile basınç dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı belirlenmiştir. Statik hesaplamalarda referans değer olarak kullanılan 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre % 5'lik katkı kullanımında dayanımın yarısına yakınının kaybedilmiş olması kayda değer bir durumdur.

Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 24.3 MPa ile 46.2 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 8.5 oranında artmış, ancak % 2, % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 6.5, % 26.0, % 34.9 ve % 43.0 oranlarında azalmıştır. Yine benzer şekilde süperakışkanlaştırıcı katkıda da dozaj artımı ile basınç dayanımı arasında doğrusala yakın bir ters orantı olduğu görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkıya benzer şekilde 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre % 5'lik katkı kullanımında dayanımın yarısına yakınının kaybedilmiş olması kayda değer bir durumdur.

Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 41.9 MPa ile 48.0 MPa değerleri arasında değişmektedir.

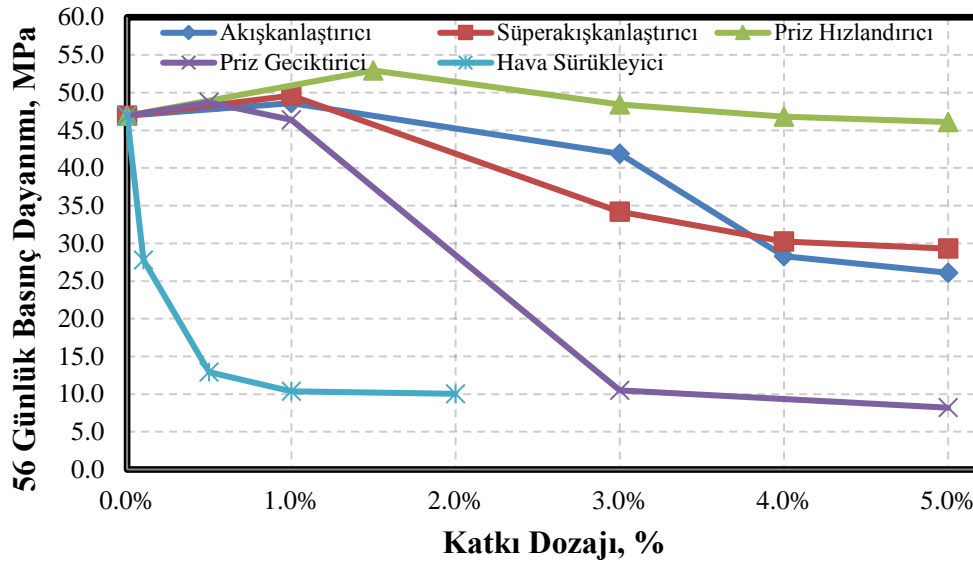
Priz hızlandırıcı kullanılan harçların 28 günlük basınç dayanımlarında sadece % 1.5'lük dozajda % 12.8 ye karşılık gelen bir artış bulunmaktadır. Bunun dışındaki dozajlarda katkı dozajının basınç dayanımına etki etmediği görülmektedir.

Priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 7.5 MPa ile 43.0 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 0.5'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 1.0 oranında artmış, ancak % 1, % 2, % 3, % 4 ve %5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 10.3, % 58.0, % 81.2, % 81.9 ve % 82.4 oranlarında azalmıştır. Grafik incelendiğinde, optimum dozajda çok az bir artış olduğu, ancak bu dozajdan sonra dayanım değerlerinin % 3 oranına kadar hızlı bir şekilde düştüğü ve bu orandan sonra katkı miktarı artsa da dayanımın değişmediği görülmektedir.

Hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 8.7 MPa ile 20.7 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 28 günlük basınç dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.1, % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 51.3, % 73.5, % 76.9, % 78.4 ve % 79.7 oranlarında azalmıştır. Grafik incelendiğinde optimum dozajda dahi basınç dayanımının hızlı bir şekilde düştüğü ve bu hızlı düşüşün % 0.5'lik orana kadar devam ettiği, bu orandan sonra da düşüşün devam ettiği ancak düşüş hızının oldukça azaldığı görülmektedir.

Katkı dozajı ile 56 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.17 incelendiğinde 28 günlük dayanımlara benzer bir sonuç ortaya çıkmaktadır.

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları 26.1 MPa ile 48.6 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 3.5 oranında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 10.9, % 39.7 ve % 44.6 oranlarında azalmıştır.



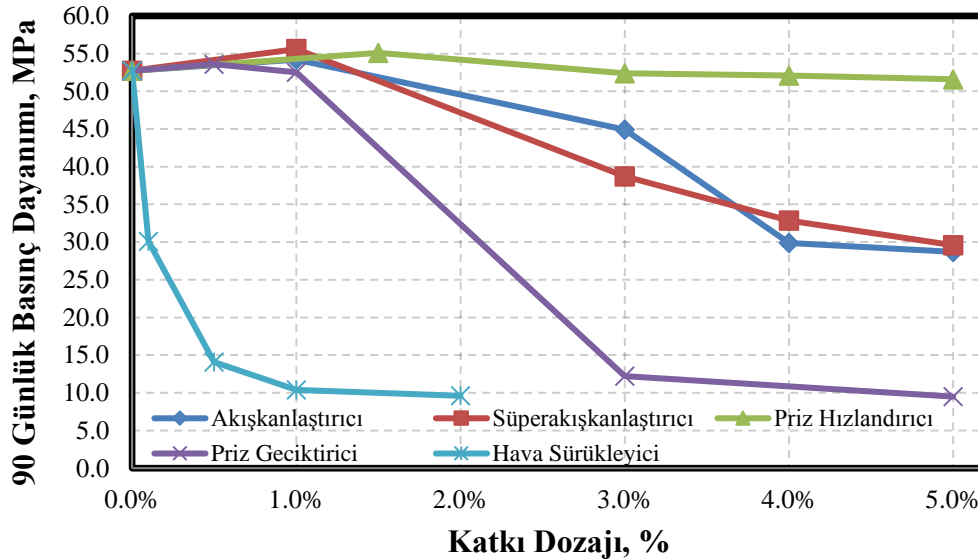
Şekil 4.17. 56 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları 29.3 MPa ile 49.6 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 5.6 oranında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 27.2, % 35.6 ve % 37.6 oranlarında azalmıştır.

Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları 46.9 MPa ile 52.9 MPa değerleri arasında değişmektedir. Priz hızlandırıcı kullanılan harçların 28 günlük basınç dayanımlarında sadece % 1.5'lük dozajda % 12.7'ye karşılık gelen bir artış bulunmaktadır. Bunun dışındaki dozajlarda katkı dozajının basınç dayanımına etki etmediği görülmektedir.

Priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları 8.7 MPa ile 48.0 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 0.5'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 3.7 oranında artmış, ancak % 1, % 3 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 1.2, % 77.6 ve % 82.5 oranlarında azalmıştır. Grafik incelendiğinde, optimum dozajda çok az bir artış olduğu ancak bu dozajdan sonra dayanım değerlerinin % 3 oranına kadar hızlı bir şekilde düştüğü ve bu orandan sonra katkı miktarı artsa da dayanımın değişmediği görülmektedir.

Hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları 9.0 MPa ile 27.8 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 56 günlük basınç dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.1, % 0.5, % 1 ve % 2'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 40.83, % 72.5, % 78.0 ve % 80.8 oranlarında azalmıştır.



Şekil 4.18. 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin katkı dozajı ile değişimi.

Katkı dozajı ile 90 günlük basınç dayanımlarının değişimine yönelik Şekil 4.18 incelendiğinde; akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıların yüksek dozajlarında ciddi dayanım kayıpları olduğu görülmüştür. Buna karşın priz hızlandırıcı katkıda dozaj miktarının dayanımı etkilemediği belirlenmiştir.

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 28.7 MPa ile 54.2 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 2.8 oranında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 14.8, % 43.3 ve % 45.6 oranlarında azalmıştır. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 29.6 MPa ile 55.6 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 1'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 5.4 oranında artmış, ancak % 3, % 4 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 26.6, % 37.7 ve % 43.9 oranlarında azalmıştır.

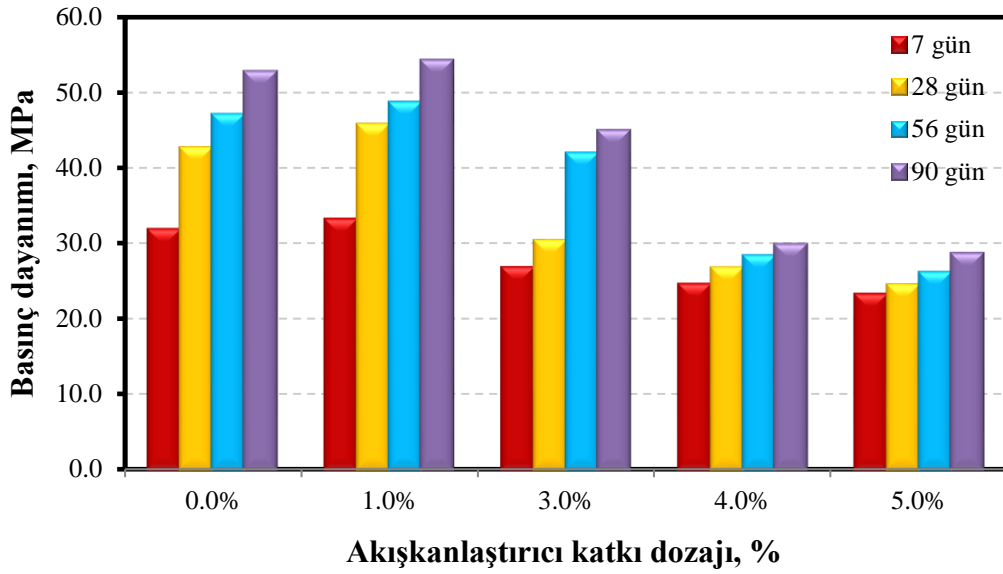
Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 51.6 MPa ile 55.1 MPa değerleri arasında değişmektedir. Priz hızlandırıcı kullanılan harçların 90 günlük basınç dayanımlarında sadece % 1.5'lik dozajda % 4.5'e karşılık gelen bir artış bulunmaktadır. Bunun dışındaki dozajlarda katkı dozajının basınç dayanımına etki etmediği görülmektedir.

Priz geciktirici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 9.5 MPa ile 53.6 MPa değerleri arasında değişmektedir. % 0.5'lik katkı oranında basınç dayanımı kontrol karışımına göre % 1.7 oranında artmış, ancak % 1, % 3 ve % 5'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 0.5, % 76.8 ve % 82.0 oranlarında azalmıştır.

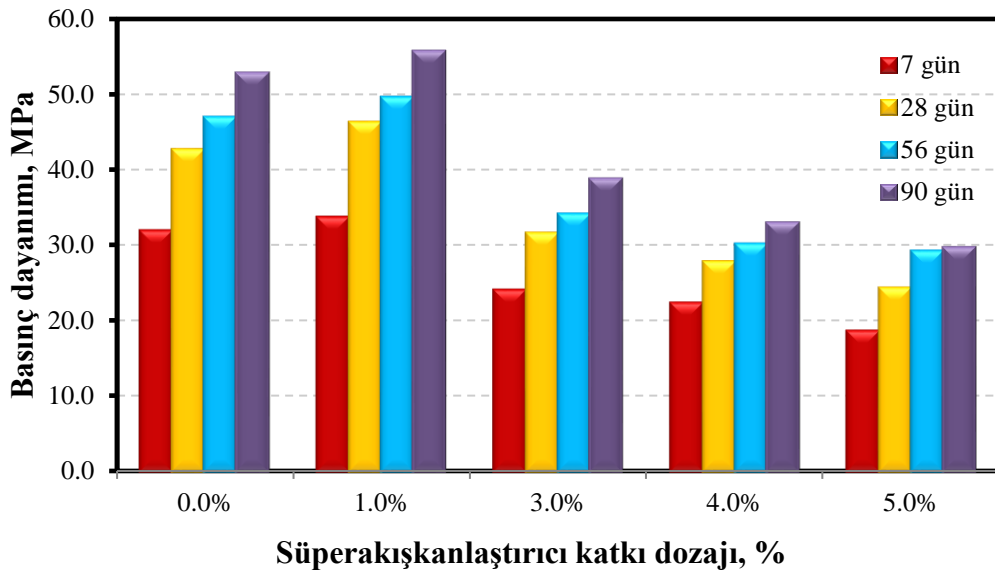
Hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları 9.76 MPa ile 30.1 MPa değerleri arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılan harçlarının tamamının 90 günlük basınç dayanımlarında azalış görülmekte olup, % 0.1, % 0.5, % 1 ve % 2'lik dozajlarda değerler sırasıyla % 42.9, % 73.3, % 80.3 ve % 81.8 oranlarında azalmıştır.

Dayanımların, katkı oranı ile değişimini gösteren grafiklerin dışında her bir katkının, her bir farklı dozajına yönelik harçların zamana bağlı dayanım kazanma grafikleri de hazırlanmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı için basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.19 incelendiğinde; % 1 oranındaki dozajda sürekli ve büyük oranlarda basınç gelişimi gözlemlendiği, % 3'lük katkı durumunda dayanım kazanma hızının düştüğü, artık % 4 ve % 5'lik oranlarda basınç dayanımını kazanma hızının iyice azaldığı gözlemlenmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkı için basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.20 incelendiğinde; % 1 oranındaki dozajda sürekli ve büyük oranlarda basınç gelişimi gözlemlendiği, buna karşılık % 3, % 4 ve % 5'lik oranlarda basınç dayanımını kazanma hızının azaldığı, hatta % 5'lik oranda 56 gün ile 90 gün arasında hemen hemen gelişim oluşmadığı gözlemlenmiştir.

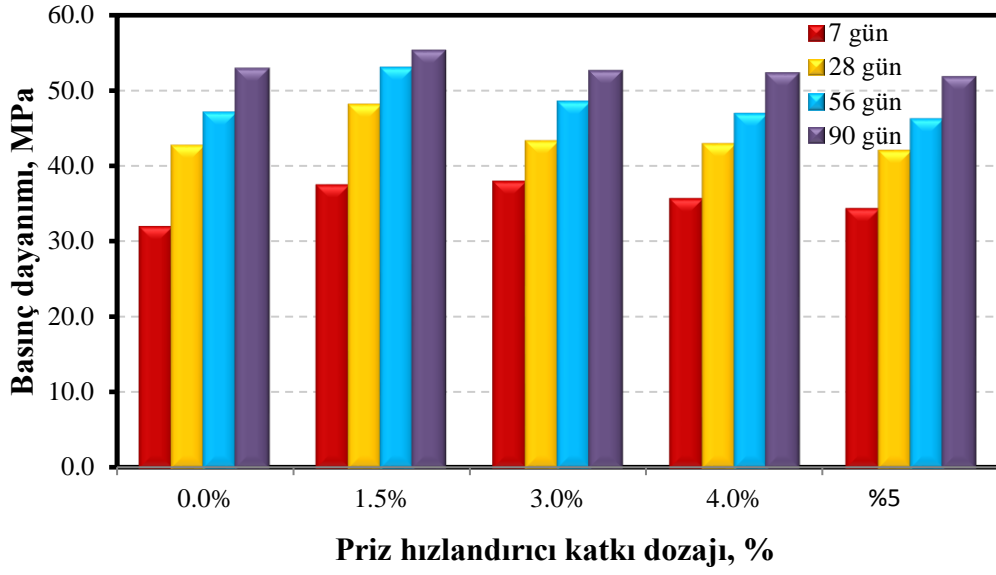


Şekil 4.19. Akışkanlaştırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.



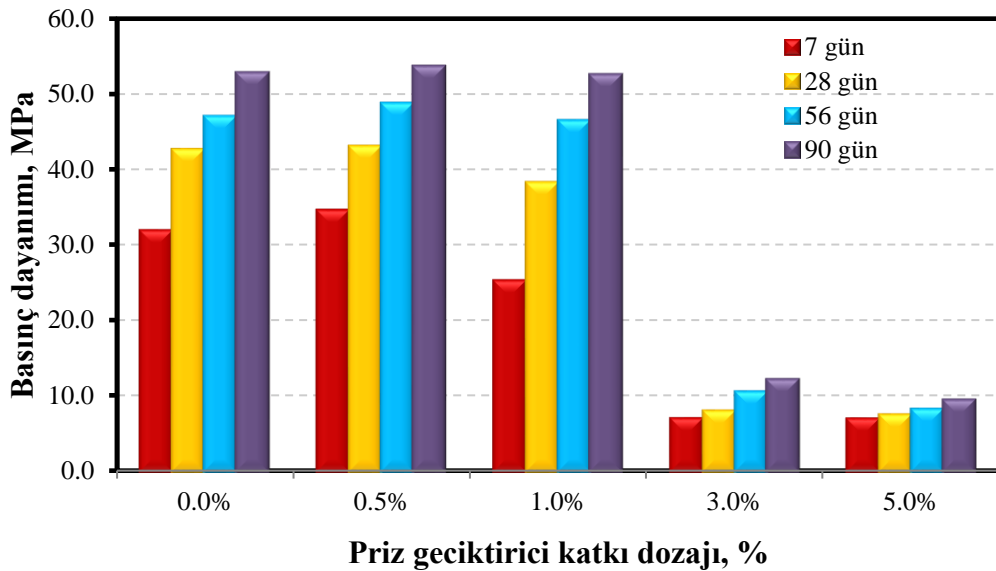
Şekil 4.20. Süperakışkanlaştırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.

Priz hızlandırıcı katkı için basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.21 incelendiğinde; tüm katkı oranlarında basınç dayanımlarının düzenli bir şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca bu grafiğe göre priz hızlandırıcı katkının erken yaşlardaki dayanımı arttırdığı, ancak buna karşın son dayanımlarda fazla bir katkısının bulunmadığı söylenebilir.



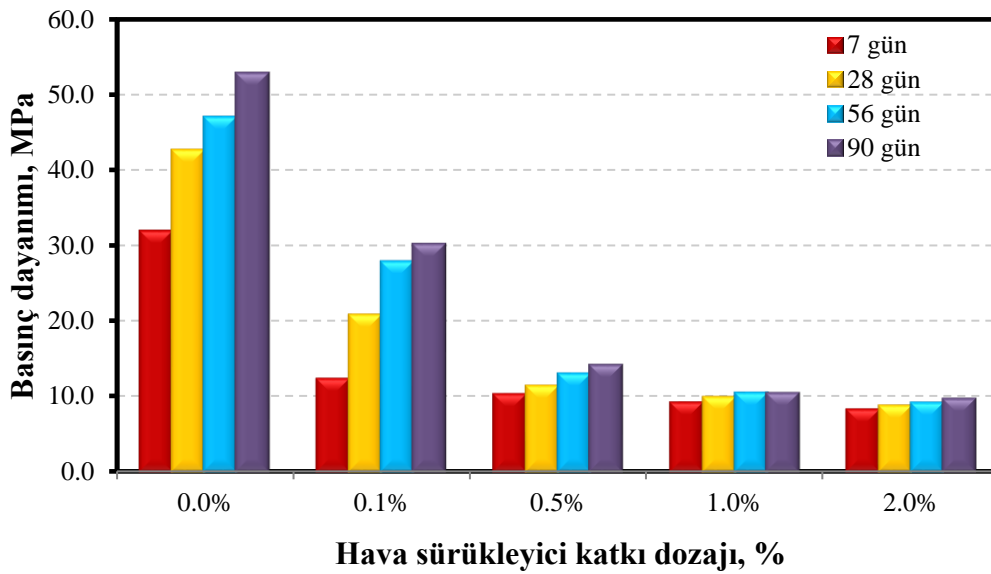
Şekil 4.21. Priz hızlandırıcı katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.

Priz geciktirici katkı için basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.22 incelendiğinde; % 0.5 ve % 1'lik dozajlarda sürekli ve büyük oranlarda basınç gelişimi gözlemlendiği, buna karşılık % 3 ve % 5'lik oranlarda basınç dayanımlarının oldukça azaldığı ve buna bağlı olarak dayanım kazanma hızının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. Priz geciktirici katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.

Hava sürükleyici katkı için basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 4.23 incelendiğinde; % 0.1 oranındaki dozajda basınç dayanımları kontrol karışımına göre düşse de sağlıklı bir dayanım kazanma süreci olduğu, buna karşılık % 0.5, % 1 ve % 2'lik oranlarda basınç dayanımının iyice düştüğü ve buna bağlı olarak dayanım kazanma hızının hemen hemen durma noktasına geldiği, ayrıca yüksek dozajlarda dayanımın tamamına yakınının 7 gün içinde kazanıldığı, bundan sonra dayanımlarda bir gelişme olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. Hava sürükleyici katkı basınç dayanımı değerlerinin zamanla değişimi.

4.3. İçyapı Analizlerinin Değerlendirilmesi

Üretilen harç numunelerinin içyapılarının incelenmesi kapsamında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılan X-ışını difraktometresi (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Yüksek Çözünürlüklü Yüzey Alanı ve Mikro Gözenek Boyutu Analizi (BET) sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD) sonuçlarının değerlendirilmesi

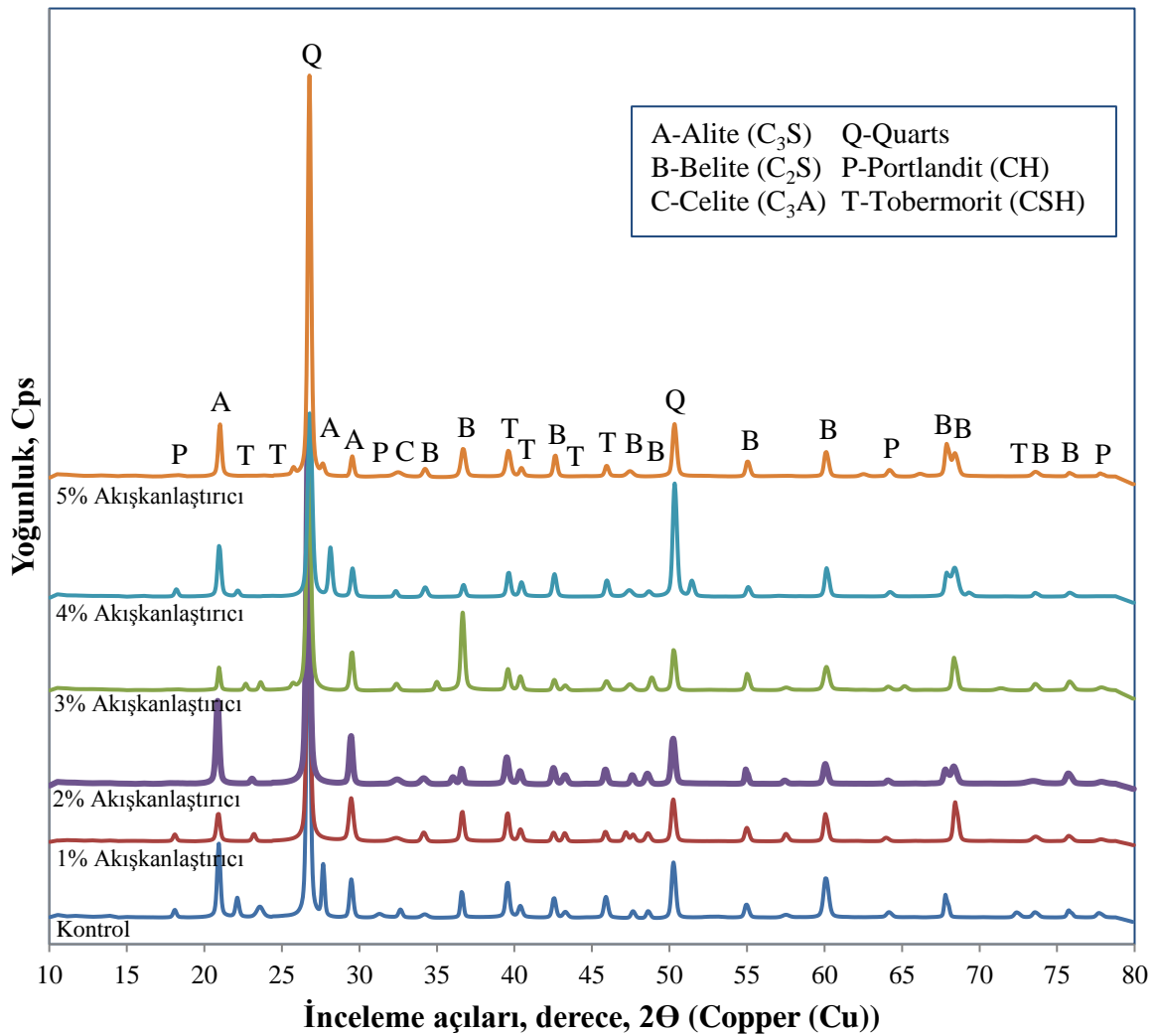
Toplam 26 adet numune için ayrı ayrı yapılan X-ışını difraktometresi analizi sonucunda her bir katkı grubunun kendi içerisinde değerlendirilebilmesi amacıyla grafikler gruplandırılarak hazırlanmıştır. Bu şekilde fazların değişimi açılara göre üst üste çakıştırılmak suretiyle kolaylıkla belirlenmiştir.

Bu kapsamda akışkanlaştırıcı katkının farklı dozajlarına yönelik X-ışını difraktometre analiz sonuçları Şekil 4.24'te, süperakışkanlaştırıcı katkının farklı dozajlarına yönelik X-ışını difraktometre analiz sonuçları Şekil 4.25'de, priz hızlandırıcı katkının farklı dozajlarına yönelik X-ışını difraktometre analiz sonuçları Şekil 4.26'da, priz geciktirici katkının farklı dozajlarına yönelik X-ışını difraktometre analiz sonuçları Şekil 4.27'de ve hava sürükleyici katkının farklı dozajlarına yönelik X-ışını difraktometre analiz sonuçları Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

Analizlerde faz olarak; alite (A) diğer bir deyişle C_3S , belite (B) diğer bir deyişle, C_2S , celite (C), diğer bir deyişle C_3A , quarts (Q), portlandit (P), diğer bir deyişle CH, tobermorit (T), diğer bir deyişle CSH ve sadece priz geciktirici katkıya özgü olarak, sodyum hidroksit (NaOH) gözlemlenmiştir.

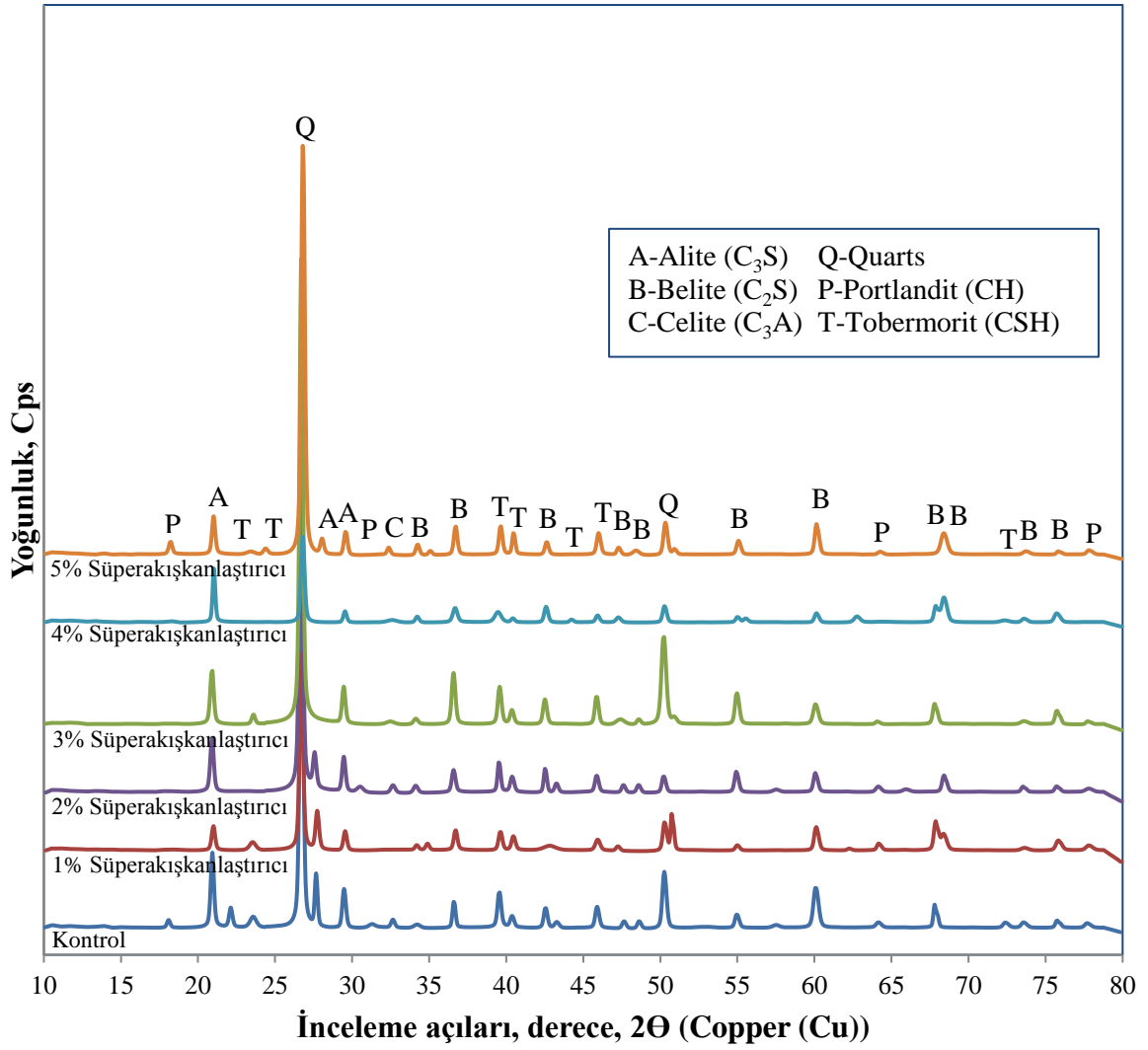
Grafiklerin elde edilebilmesi amacıyla; ilk olarak numuneler öğütülerek toz hale getirilmiştir. Toz haldeki numune cihaza ait numune tutucuya yerleştirilerek, her bir numune için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Her bir numunenin analizi yaklaşık 5 dakika sürmüştür. Yapılan analizler ölçümlerin tamamlanması sonrasında bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler, cihazın üreticisi tarafından geliştirilmiş HighScore Plus™ bilgisayar programı kullanılarak derlenmiştir. Bu amaçla, yapılan analizde çimento ve kimyasal katkı olası fazlarıyla ilgili kütüphane taraması yapılarak fazlar elde edilmiştir. Her ne kadar HighScore Plus™ programı, elde edilen sonuçlara yönelik grafikleri çizebilse de, yukarıda anlatılan gerekçeyle grafiklerin üst üste çakıştırılması amacıyla veriler bilgisayar programına aktarılmış ve grafikler çizilmiştir.

Şekil 4.24'te verilen akışkanlaştırıcı katkı mineralojik analizi ile Şekil 4.25'te gösterilen süperakışkanlaştırıcı katkı mineralojik analizleri benzerlik göstermektedir. Her iki katkıda da ana faz olarak agrega fazından (kum) gelen amorf yapıdaki Quarts belirlenmiştir. Harç numuneleri içerisinde en fazla bulunan malzemenin kum olduğu dikkate alındığında Quarts fazının en büyük piki yapması beklenen bir durumdur. Harç karışımı içerisinde çimento, su, kum ve kimyasal katkı dışında başka bir katkı (örneğin mineral katkı) ilave edilmemiş olması nedeniyle fazlarda ciddi değişiklikler gözlemlenmemiştir. Ancak ana faz olan quarts dışındaki diğer fazlar açısından bakıldığında; çimento ana oksitlerinden olan alite ve belite miktarlarının katkı miktarı arttıkça az miktarda da olsa arttığı görülmüştür.



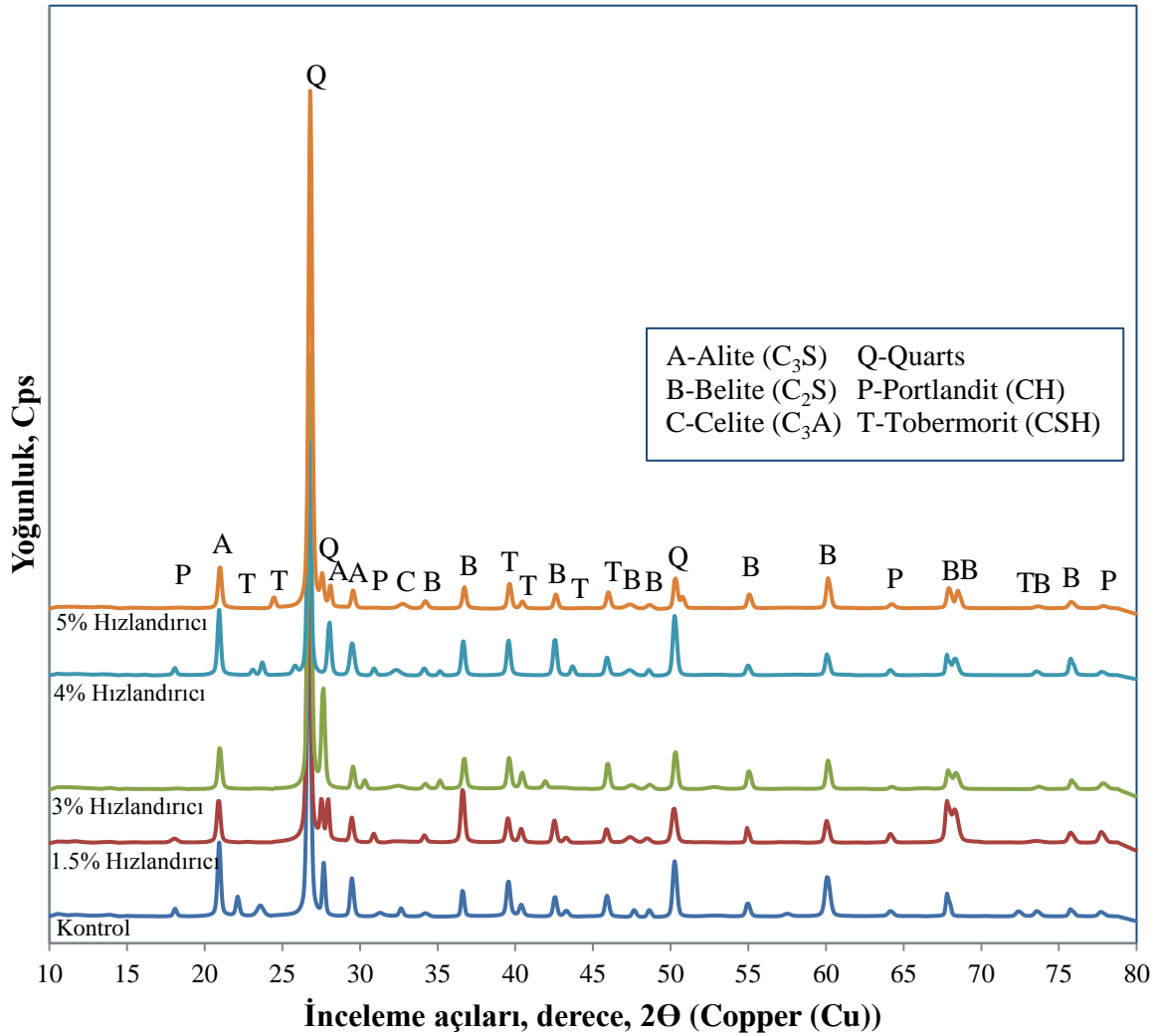
Şekil 4.24. Akışkanlaştırıcı katkı X-ışını difraktometresi.

Alite ve belite miktarının sertleşmiş harç numunesi içerisinde artması, harç içinde bulunan çimentonun olması gerektiği gibi yeterli miktarda reaksiyona giremeyip CSH jellerini oluşturamadığı ve bu nedenle dayanımın yukarıda bulunan dayanım grafiklerinden de anlaşılacağı üzere düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca diğer fazlar açısından bakıldığında hidrasyon ürünü olan tobermorite jellerinin (CSH) ve portlandite'in (CH) katkı miktarı arttıkça az miktarda da olsa azaldığı görülmüştür. Bu durum yukarıda açıklanan çimento hidrasyonu olayını doğrular niteliktedir. Alite ve belite miktarlarının artmasına benzer olarak tobermorite ve portlandite fazlarının azalması hidrasyon sürecinin katkı dozajı arttıkça sağlıklı işlemediği sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 4.25. Süperakışkanlaştırıcı katkı X-ışını difraktometresi.

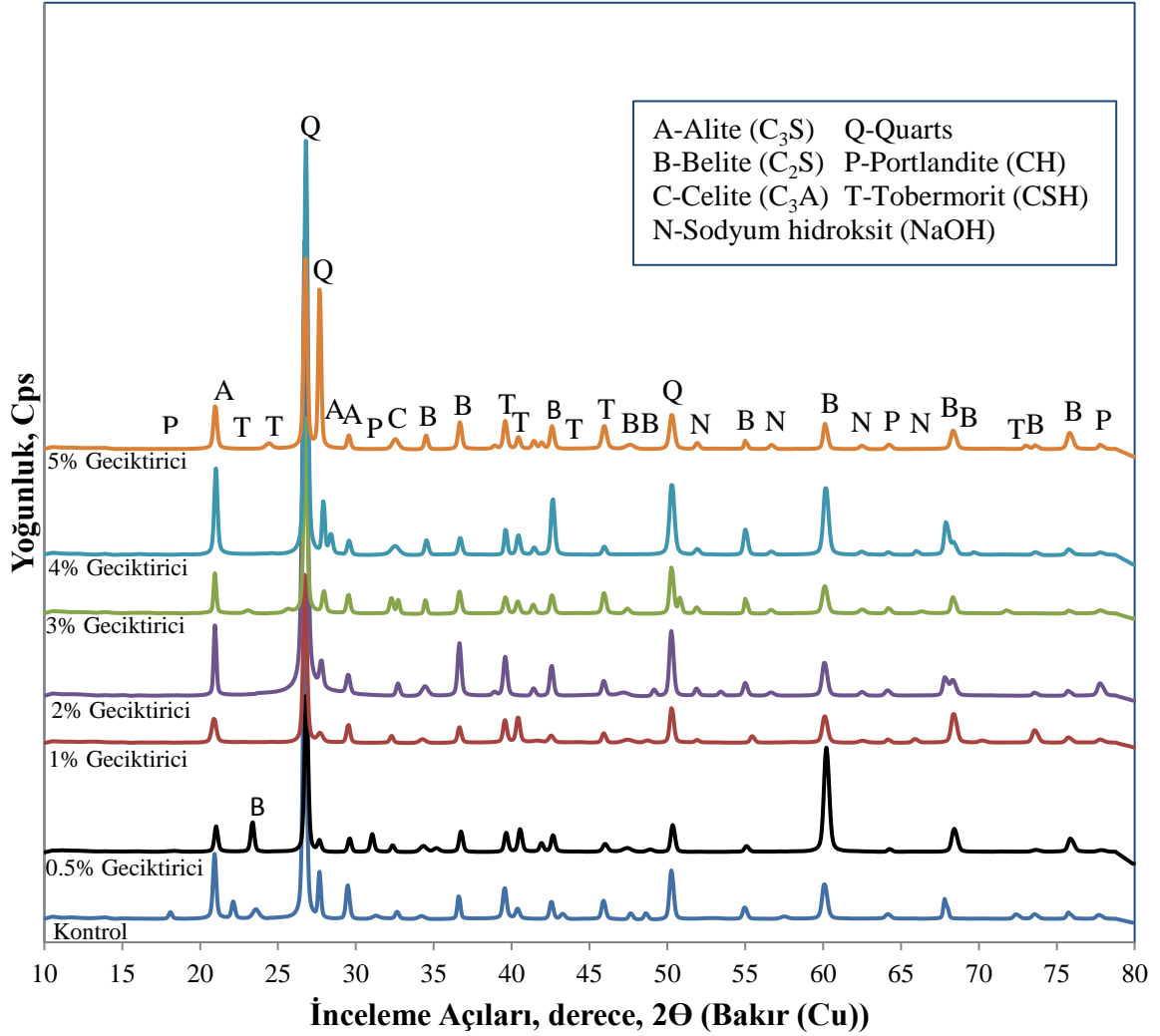
Şekil 4.26'da verilen priz hızlandırıcı katkı mineralojik analiz sonuçlarından da görüleceği üzere bu katkıda, katkı dozajı artsa da mineralojik içeriklerde ciddi değişimler gözlemlenmemektedir. Priz hızlandırıcı katkı için de ana faz quarts'tır. Ancak bu katkıda katkı miktarı arttıkça alite, belite, protlandite ve tobermorite fazlarında ciddi değişimler oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.26. Priz hızlandırıcı katkı X-ışını difraktometresi.

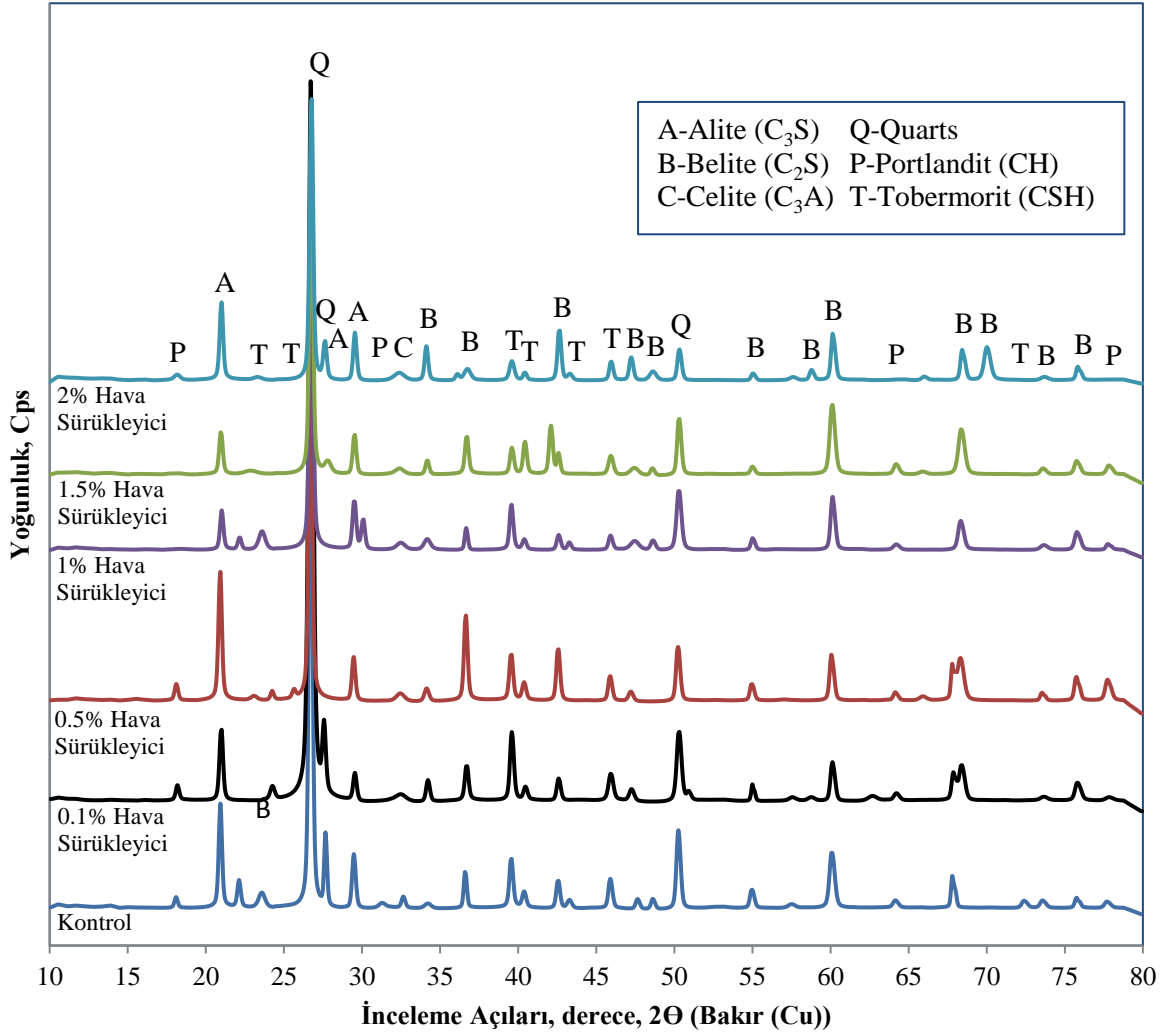
Şekil 4.27'de gösterilen priz geciktirici katkı mineralojik analiz sonuçları incelendiğinde diğer katılarda gözlemlenmeyen ilave bir fazın (Sodyum hidroksit) bulunduğu belirlenmiştir. Bu katkı ile üretilen harçlarda da beklendiği gibi yine ana faz quarts'tır. Bu katkı ile üretilen harçlarda da akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katılarda görülen çimento ana oksiti artışı ve hidrasyon ürünü azalışı olayı görülmektedir.

Ancak bu katkı ile üretilen harçlarda ayrıca Sodyum hidroksit (NaOH)'te gözlemlenmiştir. Bu fazın, priz geciktirici katkı malzemesinin içeriğini oluşturan Sodyum Glükonat'tan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sodyum ve onun ana reaksiyon ürünü sodyum hidroksitin betonu aşındırdığı, kireç taşı içinde bulunan kalsit, dolomit, silika ve alümina ile sodyum hidroksitin 15 adet ekzotermik ve 5 adet endotermik reaksiyona girerek çeşitli ürünler oluşturmak suretiyle betona zarar verdiği bilinmektedir (Das vd., 2009). Ayrıca Minocha vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada sodyum hidroksitin düşük dozajlarda yararlı olarak beton dayanımını arttırdığı, ancak yüksek dozajlarda ters etki yaparak dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir. Bu çalışmada da, priz geciktirici katkının yüksek dozajlarında kullanımı sonucunda oluşan dayanım kaybının sodyum hidroksitten kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.27. Priz geciktirici katkı X-ışını difraktometresi.

Şekil 4.28’de verilen hava sürükleyici katkı mineralojik analiz sonuçları incelendiğinde, priz hızlandırıcıya benzer şekilde, katkı dozajı artsa da mineralojik içeriklerde ciddi değişimler görülmemiştir. Hava sürükleyici katkı için de ana faz quartz’tır. Bu katkıda yüksek dozajda oluşan dayanım kayıpları içyapı faz değişimlerinden ziyade numuneler içerisindeki yoğun boşluk oranından kaynaklanmaktadır.

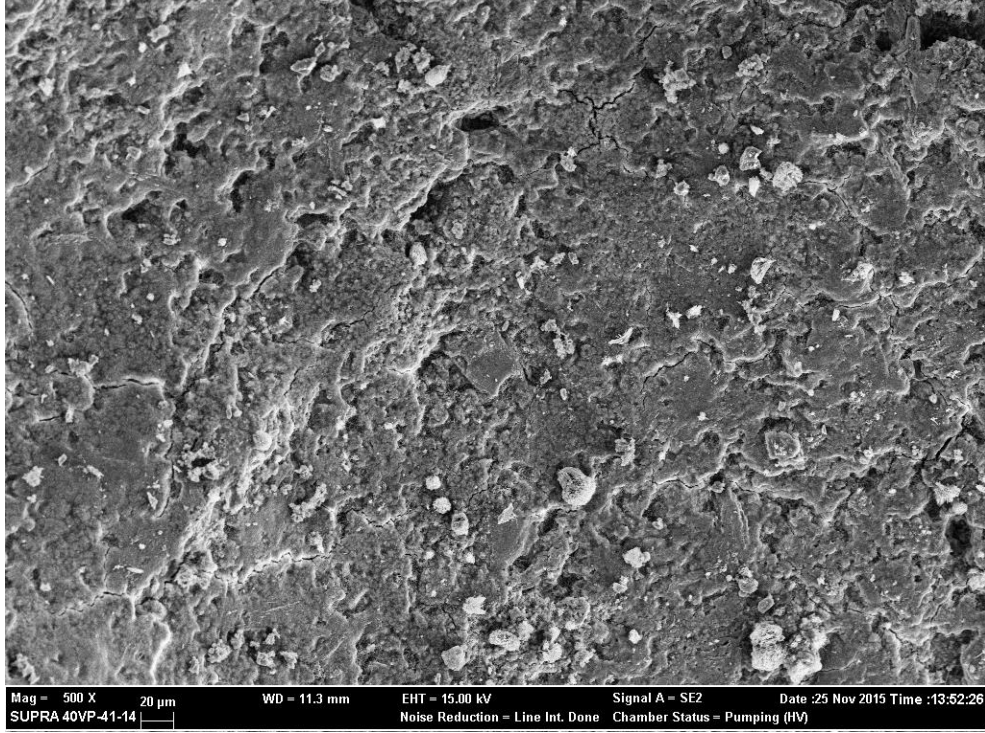


Şekil 4.28. Hava sürükleyici katkı X-ışını difraktometresi.

4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçlarının değerlendirilmesi

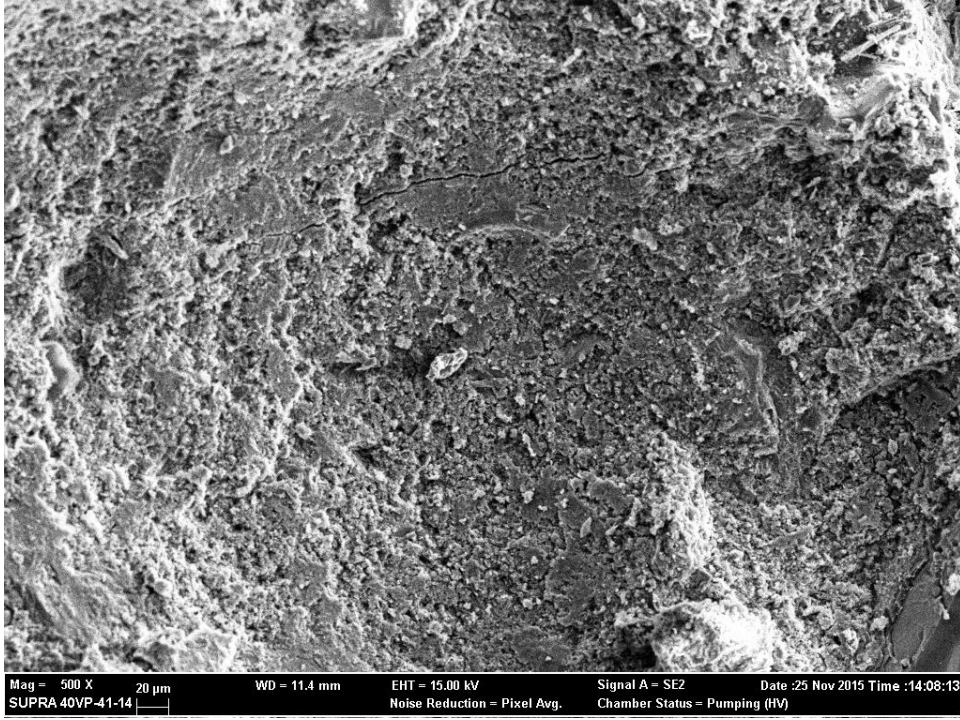
Üretilen kontrol ve kimyasal katkıli harç numunelerinden alınan kesitler üzerinde SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Harç numunelerinde değişkenin kimyasal katkı olması nedeniyle, incelemelerde ağırlıklı olarak boşluk yapısı ve

hidratasyon ürünlerinin durumu araştırılmıştır. Şekil 4.29’da kontrol numunesine ait 500 kat büyütülmüş mikro yapı görüntüsü bulunmaktadır. Görüntüden de anlaşılacağı üzere kontrol numunesi göreceli olarak boşluksuz bir yapıya sahiptir.

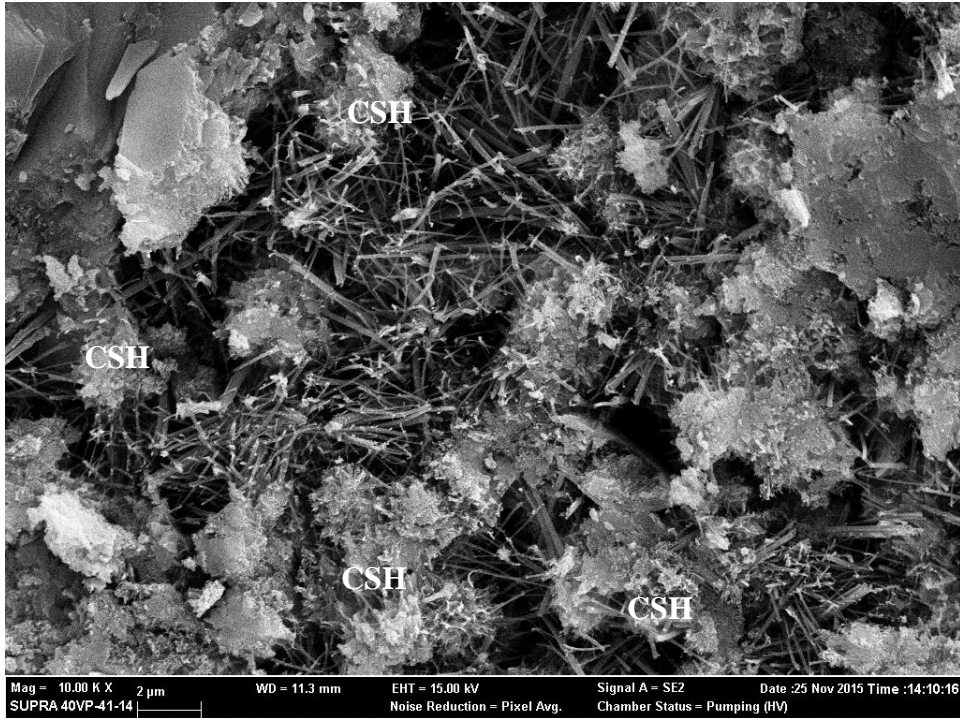


Şekil 4.29. Kontrol numunesinin 500x büyütme mikro yapısı.

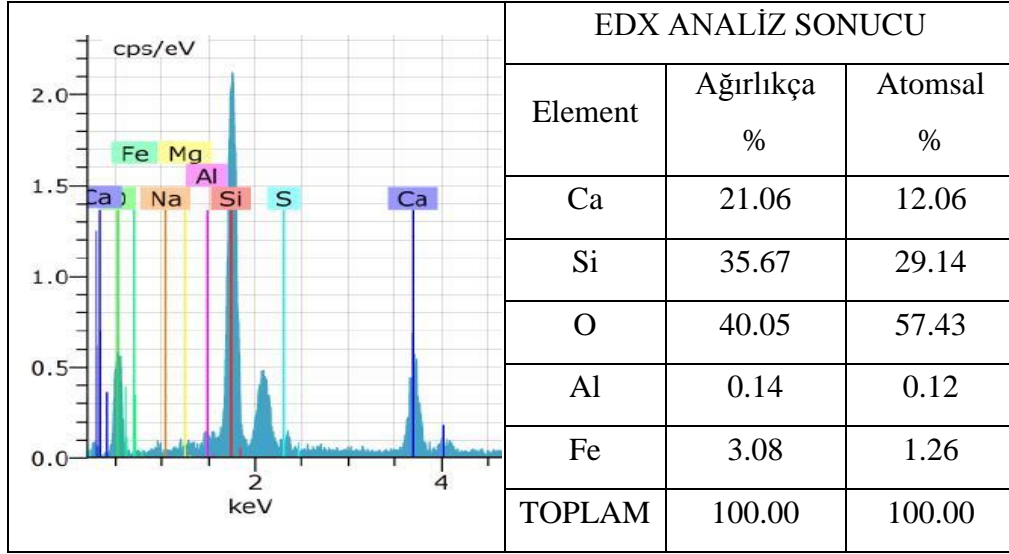
Üretilen harç numunelerinde %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda mikro yapı durumu Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 incelendiğinde göreceli boşluksuz yapı ve yoğun CSH yapısı gözlemlenmektedir. Özellikle 10000 kat büyütülmüş görüntüde agrega (kum) tanesi çevresindeki yoğun CSH yapısı gözükmektedir. SEM görüntüsü alınan kesitte yapılan EDX analiz sonucu Şekil 4.32’de verilmiştir. EDX analiz sonucundan da görüleceği üzere Ca, Si ve O zengini yapı CSH ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2$) yapısının bolluğuna işaret etmektedir. Özellikle ağırlıkça % 35.67 oranındaki Si miktarı CSH yapısının varlığını göstermektedir.



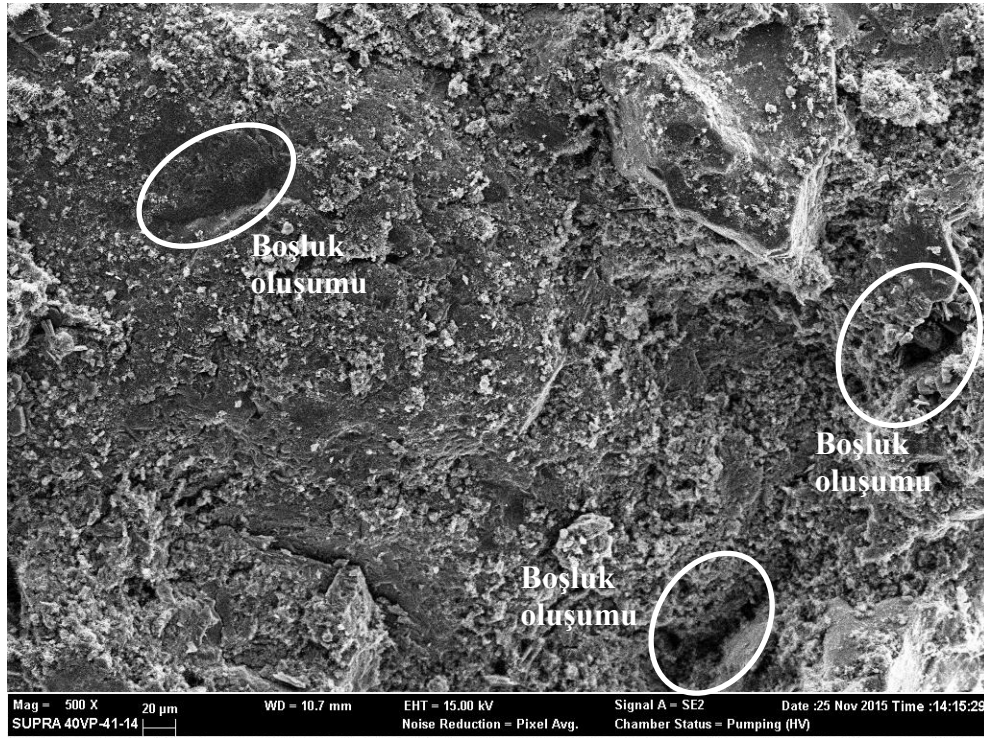
Şekil 4.30. %1 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütmeli mikro yapısı.



Şekil 4.31. %1 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütmeli mikro yapısı.



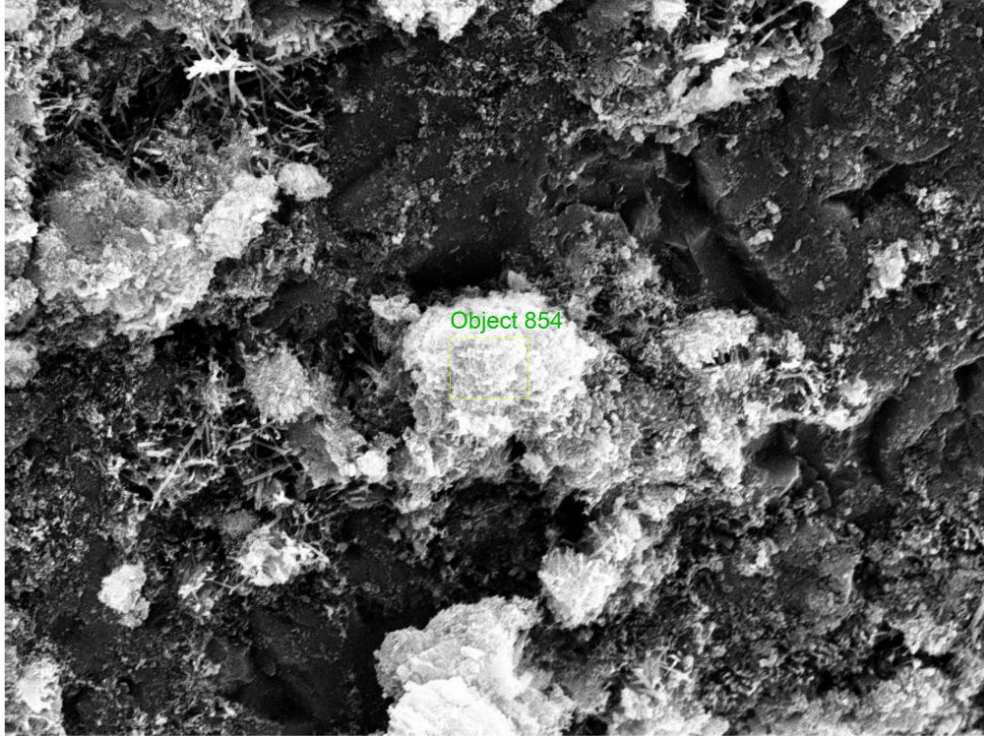
Şekil 4.32. %1 akışkanlaştırıcı katkıli numune EDX analizi.



Şekil 4.33. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikroyapısı.

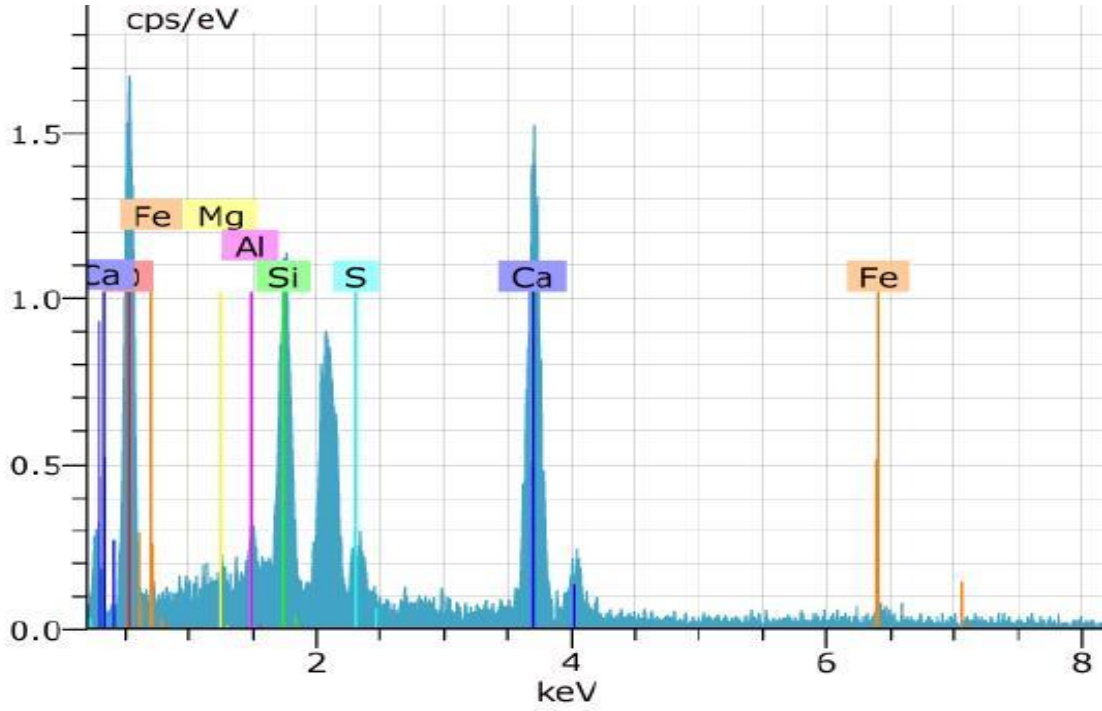
Üretilen harç numunelerinde % 2 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda mikro yapı durumu Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde boşluksuz yapının artık yavaş yavaş bozulmaya başladığı ve bir miktar havanın numune içerisine sürüklendiği görülmektedir. Boşluklar yaklaşık 20 µm ile 50 µm arasında değişmektedir. Şekil 4.34 incelendiğinde ise CSH oluşumunun devam ettiği

ancak nicelik olarak azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca SEM görüntüsü alınan kesitte Object 857 olarak görülen yapıda EDX analizi yapılmış olup, analiz sonuçları Şekil 4.35’de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde güçlü Si ve Ca pikleri ile küçük Mg, S, Fe ve Al pikleri yapının Kalsiyum Silika Hidrat (CSH) yapısı olduğunu göstermektedir. Ancak %1 oranındaki katkıya göre CSH jellerindeki azalma dikkat çekmektedir.

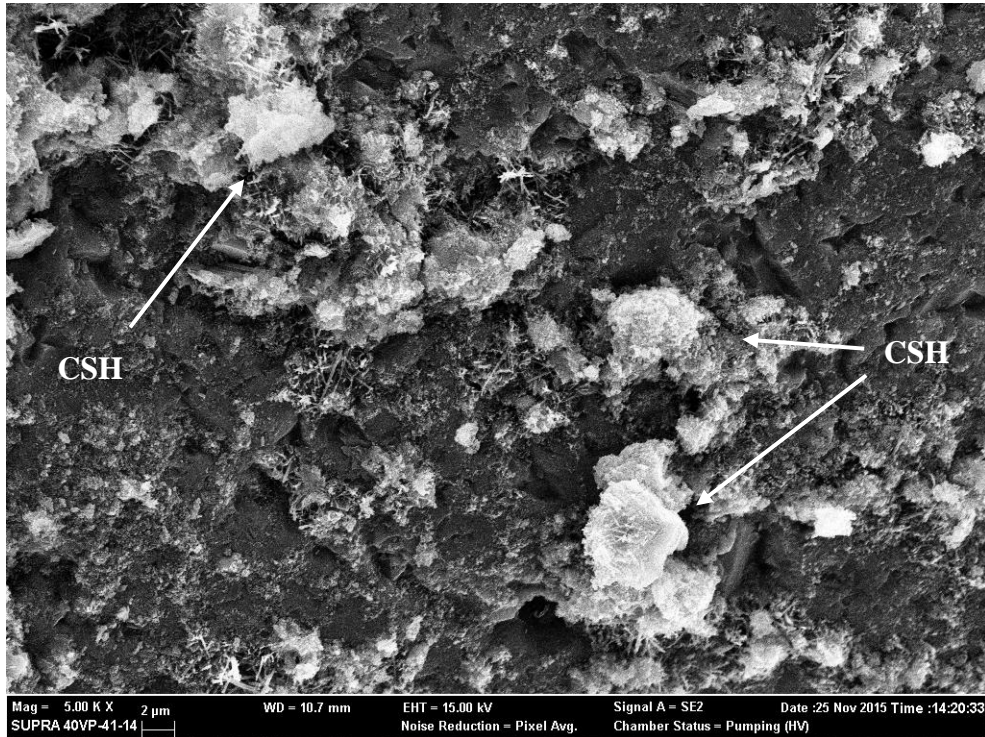


Şekil 4.34. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütme mikro yapısı.

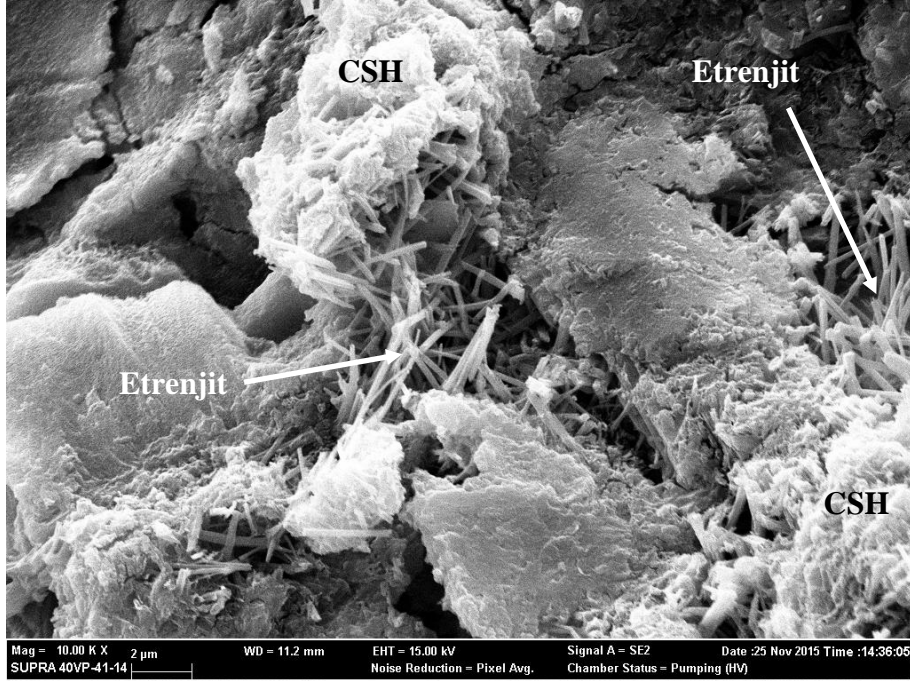
Üretilen harç numunelerinde % 3 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda mikro yapı durumu Şekil 4.36’da gösterilmiştir. Şekil 4.36, Şekil 4.34 ile birlikte incelendiğinde CSH yapısında nicelik olarak azalmaların olduğu görülmektedir. Katkı oranı arttıkça, diğer bir deyişle % 2 dozajda katkı kullanılan numune ile % 3 dozajda katkı kullanılan numuneler birbiri ile kıyaslandığında; çimento hidratasyon ürünlerinde azalma gözlemlenmektedir. Ramachandran'ın (1996) “Concrete Admixtures Handbook” kitabında derlediği çalışmalara göre de, linyosülfonat miktarının artışı ile birlikte C_3A alçıtaşı ile reaksiyona girerek etrenjit oluşturmaktadır. Şekil 4.37’de % 3 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunu gösteren 10.000 büyütme SEM görüntüsü bulunmaktadır. Görüleceği üzere CSH oluşumunu ile birlikte büyük ve kalın iğne şeklindeki etrenjit oluşumları gözlemlenmektedir.



Şekil 4.35. %2 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunede yapılan EDX analizi.

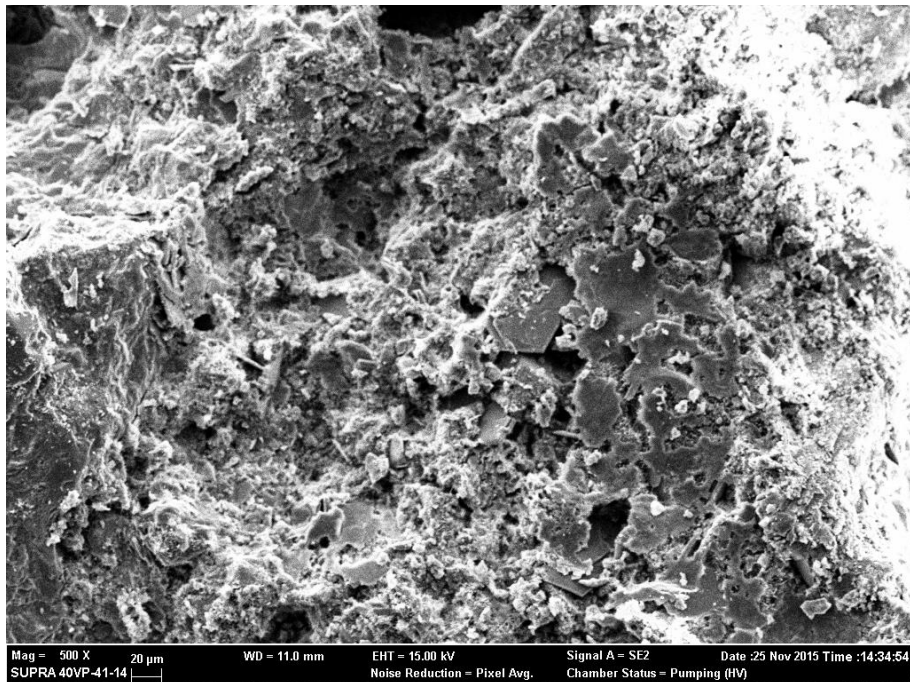


Şekil 4.36. %3 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 5000x büyütülmeli mikro yapısı.



Şekil 4.37. %3 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 10000x büyütme mikro yapısı.

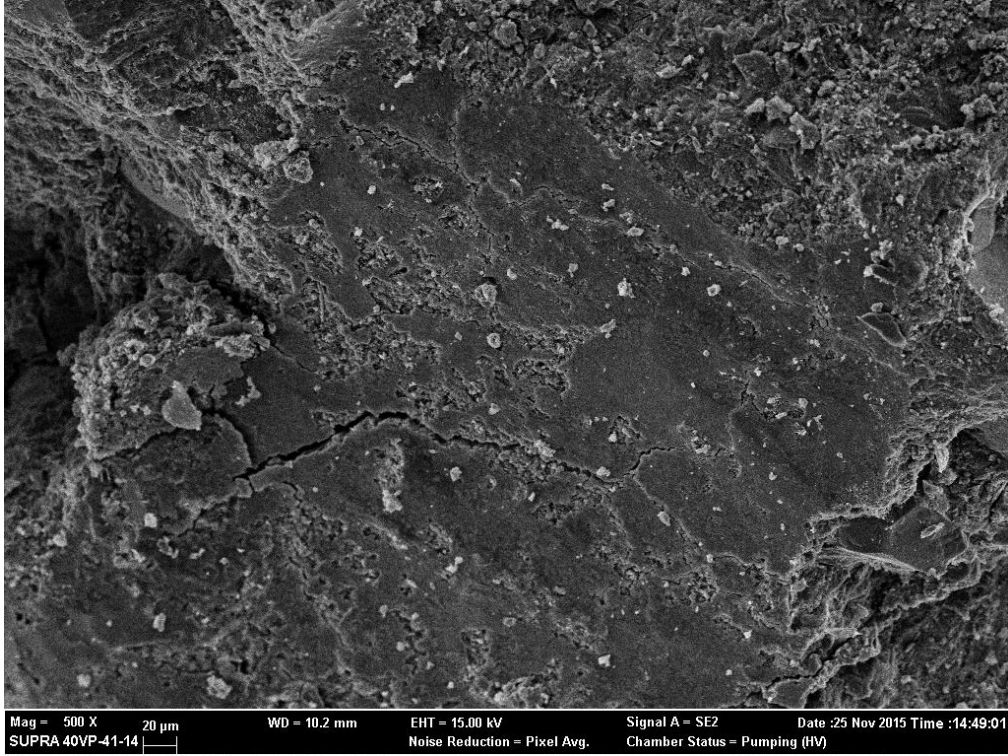
Üretilen harç numunelerinde % 4 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda mikro yapı durumu Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Mikro yapıdan da görüleceği üzere katkı miktarı arttıkça boşluklu yapı da artmaktadır. Katkı miktarı artması durumunda dayanım kaybı azalışının bu boşluklu yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.



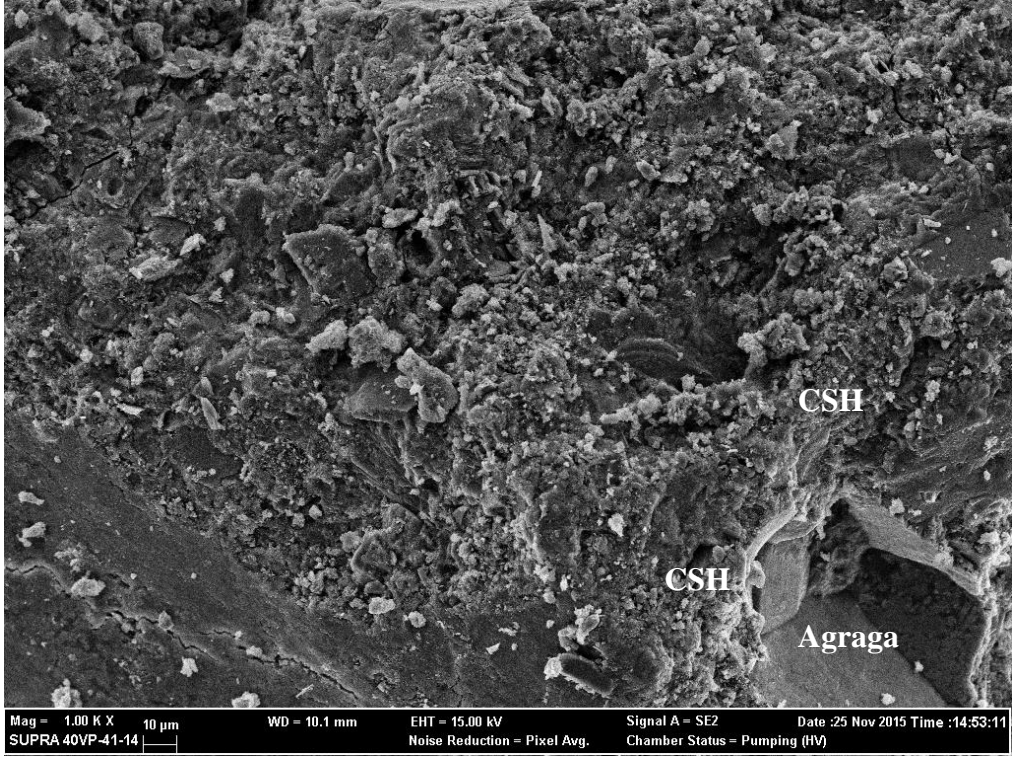
Şekil 4.38. %4 akışkanlaştırıcı katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.

Üretilen harç numunelerinde %1 oranında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı durumunda mikro yapı durumu Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Mikro yapıdan da görüleceği üzere beklendiği gibi süperakışkanlaştırıcı bu oranda kullanıldığında boşluksuz bir yapı oluşmaktadır. Ayrıca CSH jelleri yeterli miktarda oluşup agrega (kum) etrafını sararak dayanımın artmasına neden olmaktadır.

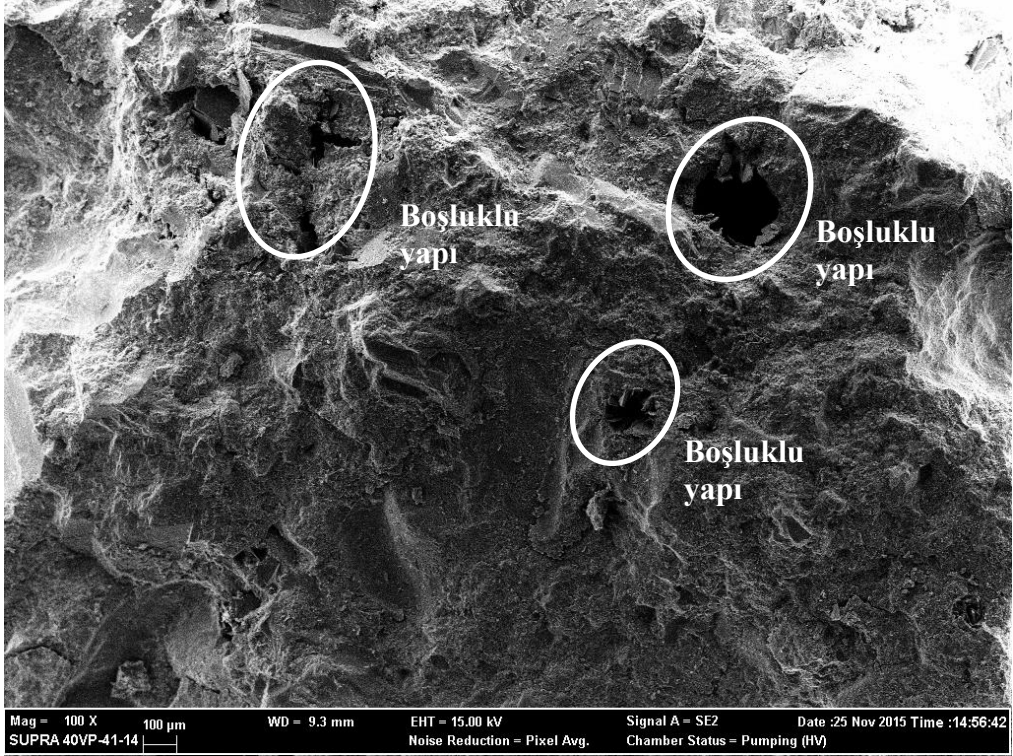
Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de sırasıyla % 2 ve % 3 oranlarında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan harç numunelerinin mikro yapıları verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere katkı miktarı arttıkça harç içerisine sürüklenen hava miktarı da artmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı arttıkça dayanım değerlerinin düşmesinin ana nedeninin harç içerisine sürüklenen havadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



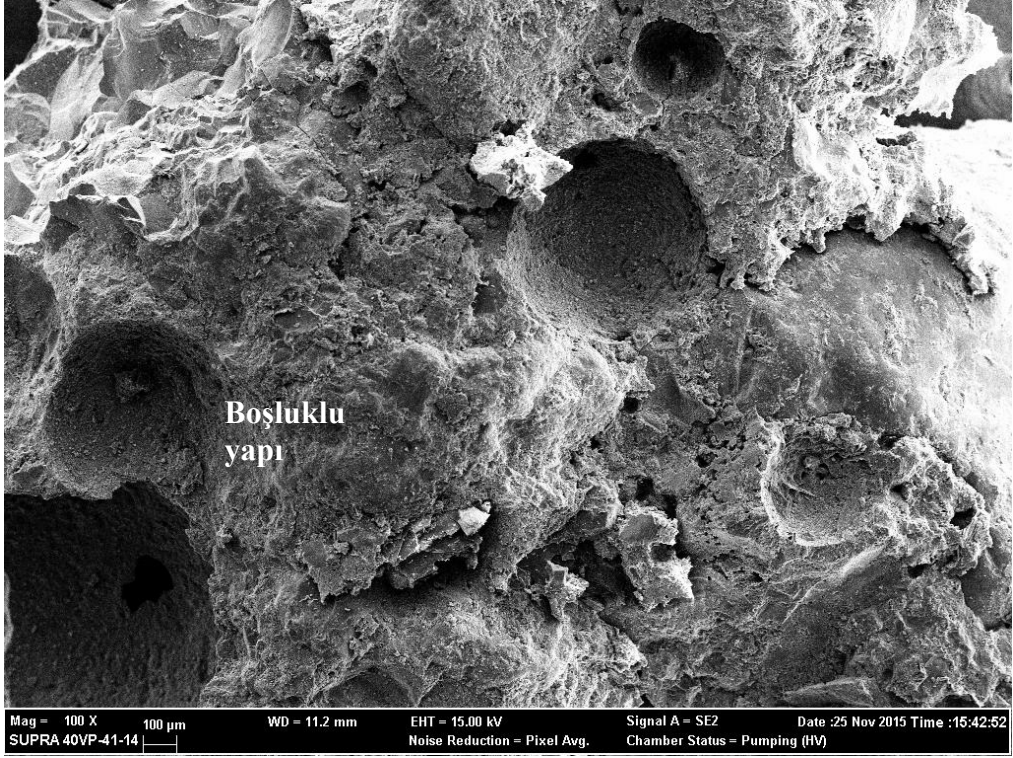
Şekil 4.39. %1 süperakışkanlaştırıcı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.



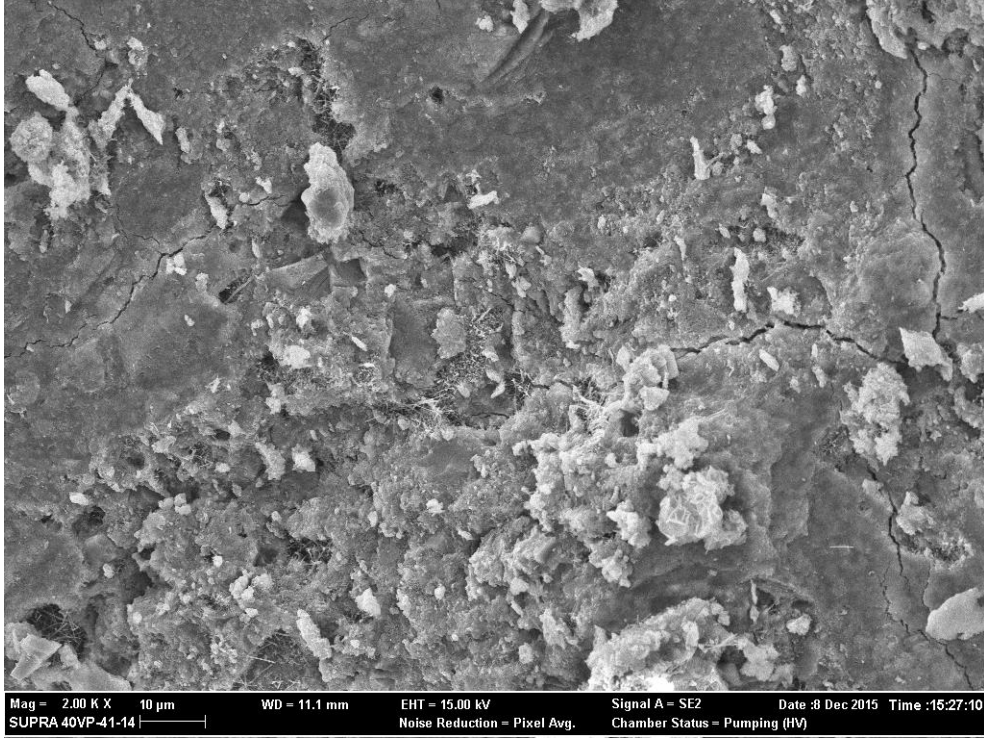
Şekil 4.40. %1 süperakışkanlaştırıcı bulunan numunenin 1000x büyütme mikro yapısı.



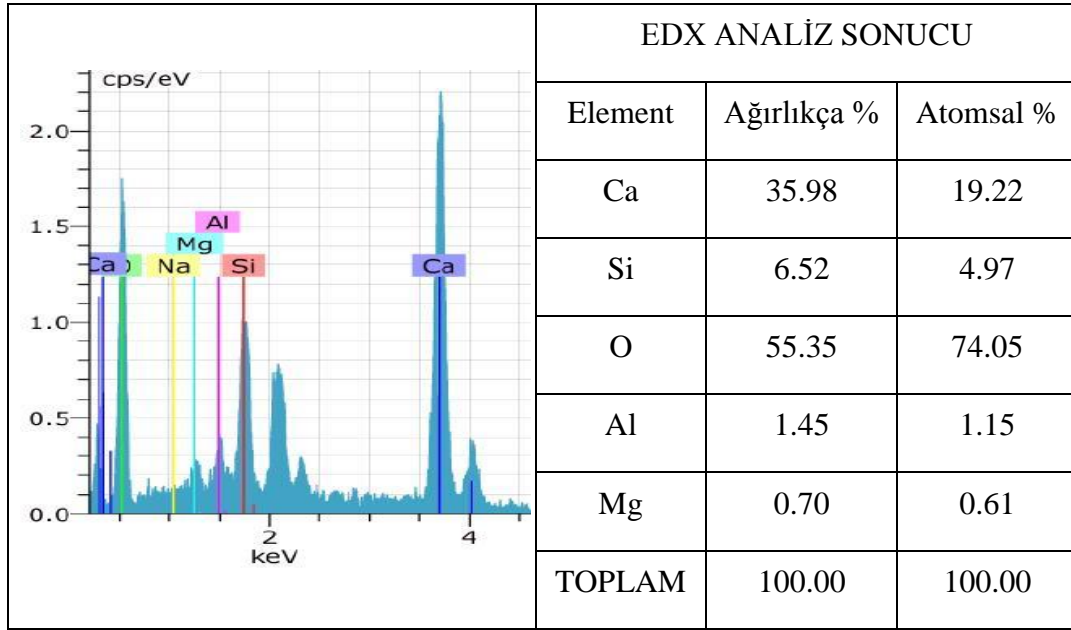
Şekil 4.41. %2 süperakışkanlaştırıcı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.



Şekil 4.42. %3 süperakışkanlaştırıcı bulunan numunenin 100x büyütme mikroyapısı.



Şekil 4.43. %4 süperakışkanlaştırıcı bulunan numunenin 2000x büyütme mikroyapısı.

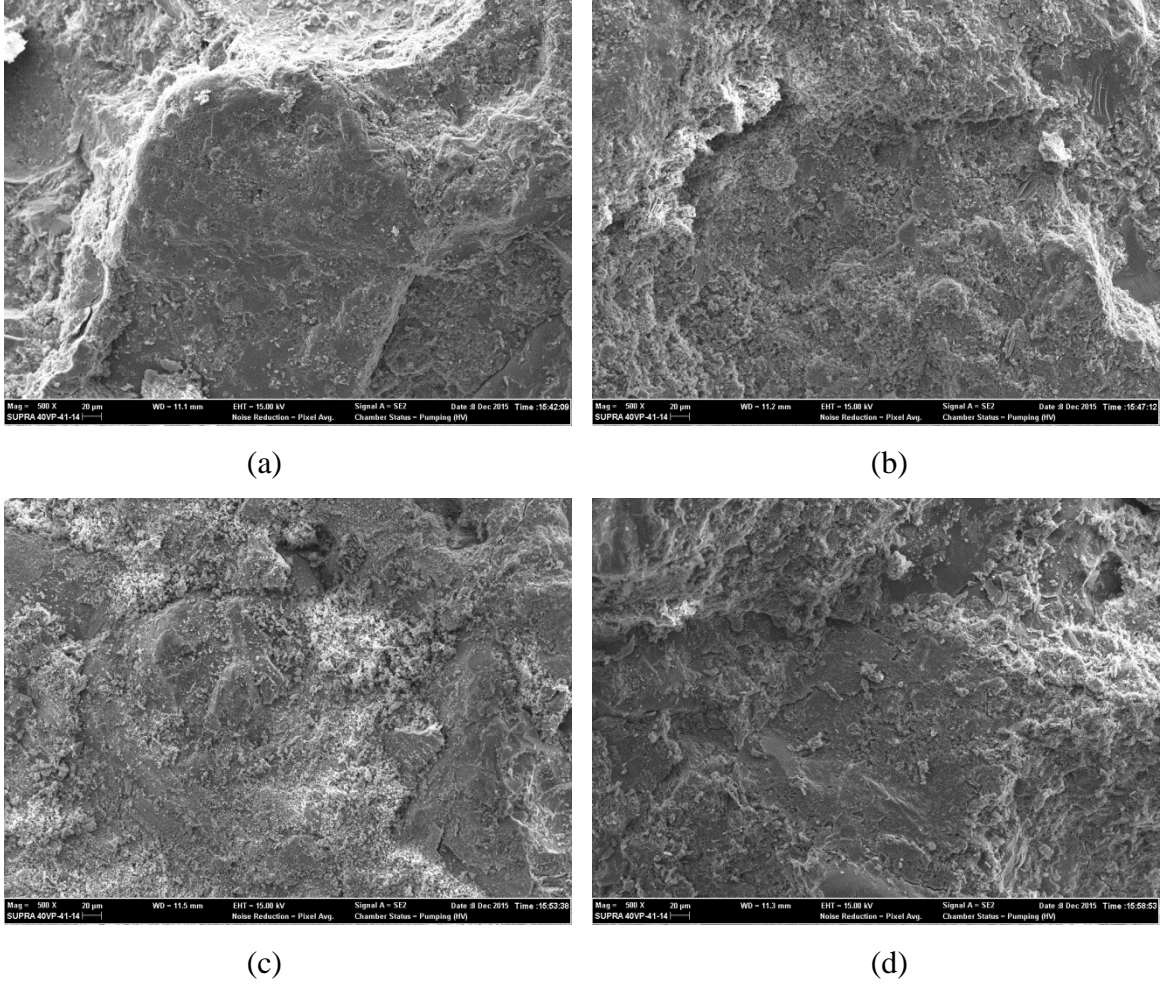


Şekil 4.44. %4 süperakışkanlaştırıcı katkılı numune EDX analizi.

Şekil 4.43'te % 4 süperakışkanlaştırıcı katkıya ait mikro yapı görüntüsü ve Şekil 4.44'te ise aynı SEM kesitine yönelik EDX analizi verilmiştir. Mikro yapı ve EDX görüntüsünden de anlaşılacağı üzere CSH oluşumunda azalma görülmektedir. Özellikle ağırlıkça % 6.52 oranındaki Si miktarı CSH oluşumunun azlığına işaret etmektedir.

Şekil 4.45'de % 1.5, % 3, % 4 ve % 5 oranlarında priz hızlandırıcı kullanılan harçların 500 kat büyütülmüş mikro yapıları verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere çekilen SEM görüntüleri birbirinin kopyası durumundadır. Bir başka deyişle katkı miktarı artsa da harç içyapısında bir değişim oluşmamaktadır. Bu durum yapılan diğer deneyleri doğrular niteliktedir.

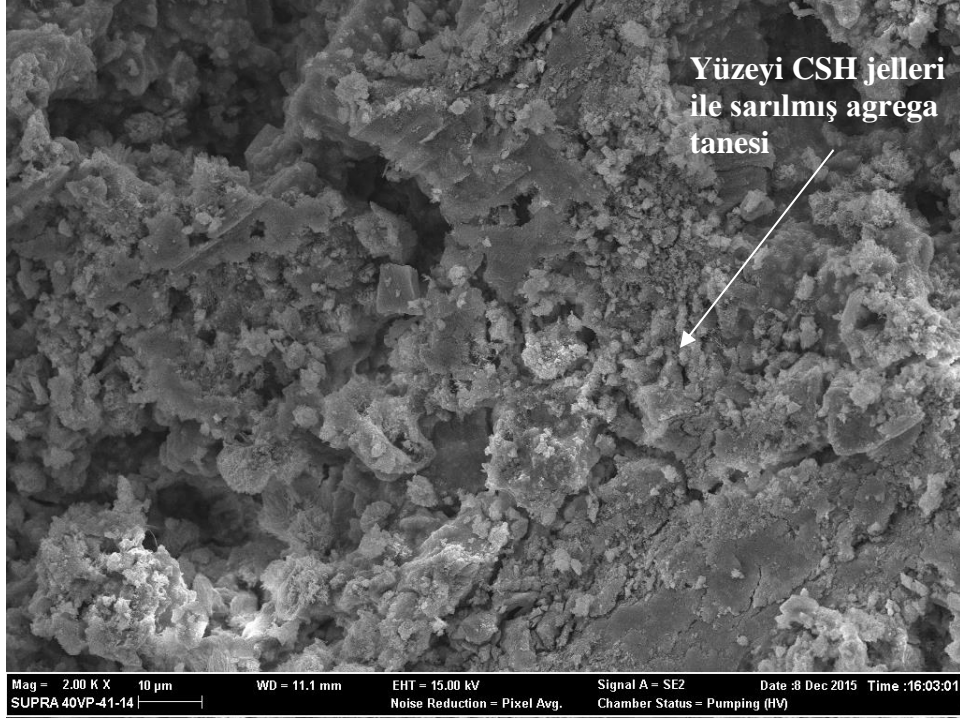
Şekil 4.46'da, % 0.5 oranında priz geciktirici kullanılarak hazırlanan harç numunesine ait mikro yapı verilmiştir. Agregata (kum) ile bağlayıcı harç yüzeyinden alınan 2000 büyütme görüntüde, agregata tanesinin CSH jelleri ile tamamen sarıldığı ve kuvvetli bir yapı oluştuğu görülmüştür. Agregata fazı ile bağlayıcı faz arasındaki kuvvetli bağın dayanıma etkisi mikro yapıdan da görülmektedir.



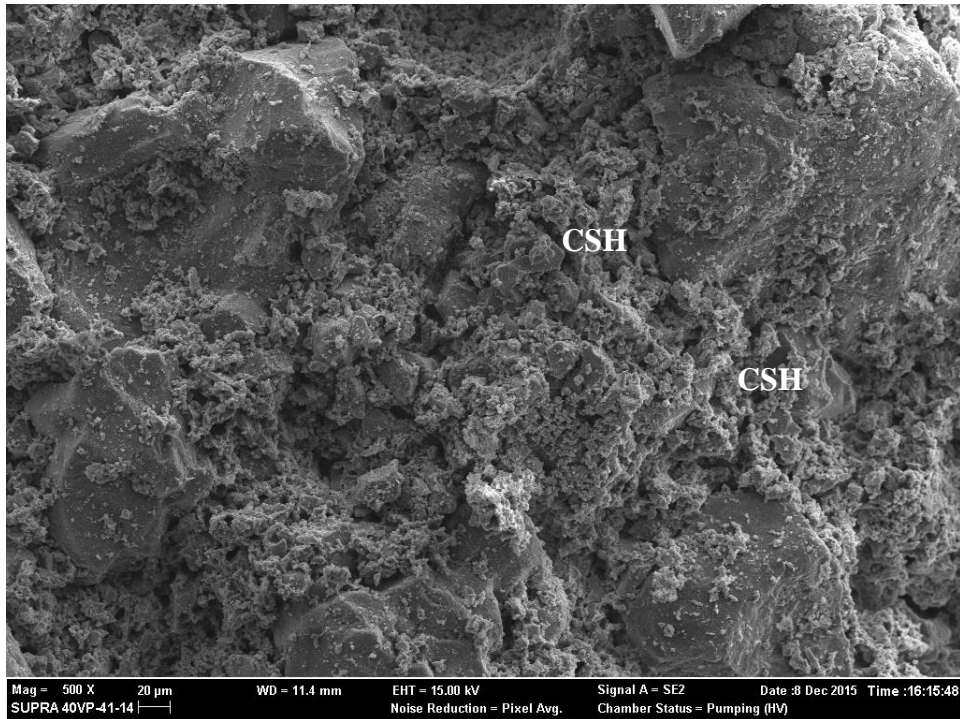
Şekil 4.45. (a) %1.5, (b) %3, (c) %4, (d) %5 priz hızlandırıcı katkıli harçların x500 büyütme mikro yapıları.

Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de sırasıyla % 2 ve % 3 oranında priz geciktirici kullanılarak üretilen harç numunelerinin mikro yapısı verilmiştir. Şekil 4.47’de CSH jelleri tarafından yeterli miktarda sarılamayan yapı görülürken, Şekil 4.48’de daha vahim bir tablo karşımıza çıkmaktadır. Yüksek oranda (% 3 oranında) priz geciktirici katkı kullanılan harçlarda yeterli miktarda CSH jeli oluşmamış ve harç numunesinde CSH jelleri agreganın üzerine serpiyen pudra şekeri kıvamında kalmıştır. Agregata fazı ile bağlayıcı faz arasındaki bu zayıf bağın mekanik özelliklere etkisi böylece mikro yapı tarafından da doğrulanmaktadır.

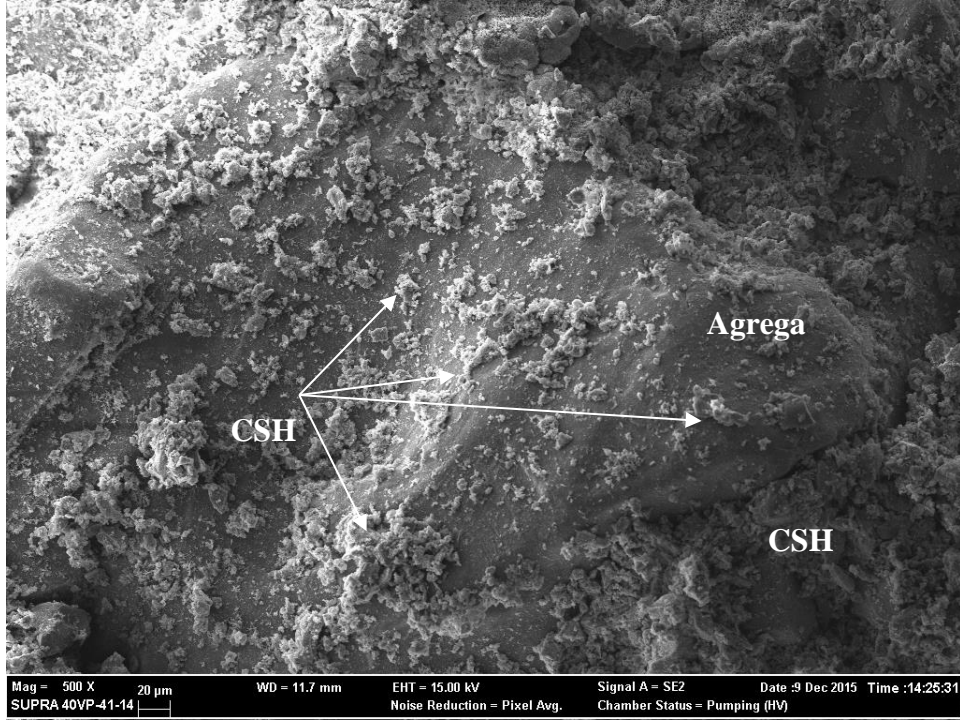
Şekil 4.49’da, % 5 oranında priz geciktirici kullanılan harç numunesinin mikro yapısı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere bu dozajda poroz, zayıf bir yapı oluşmuştur.



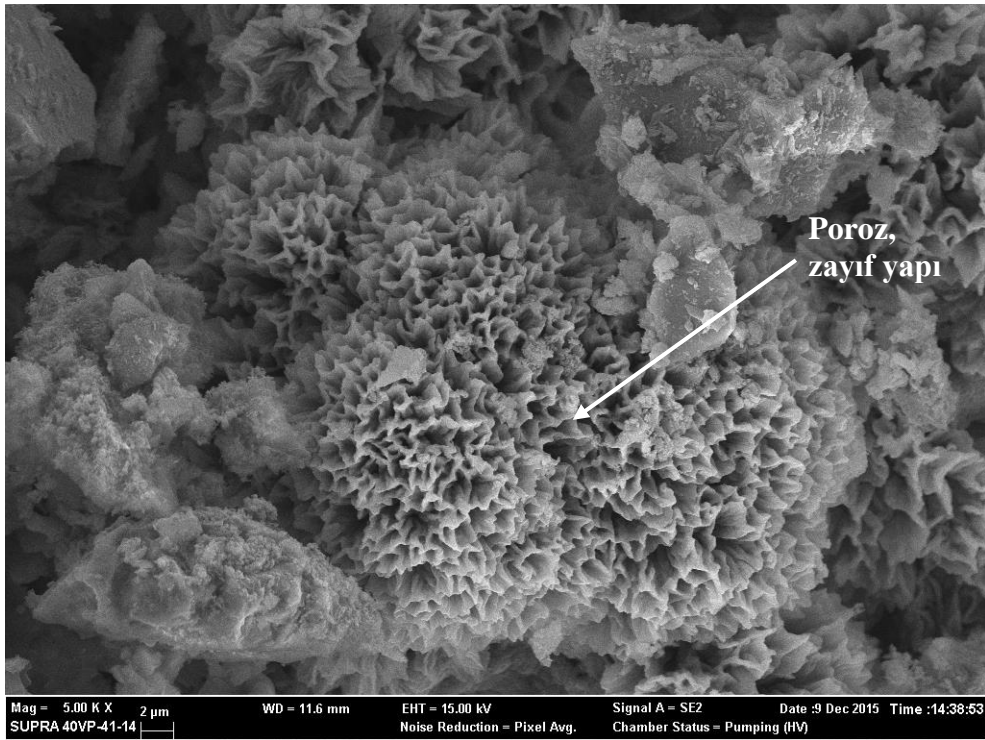
Şekil 4.46. % 0.5 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 2000x büyütme mikro yapısı.



Şekil 4.47. % 2 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikro yapısı.



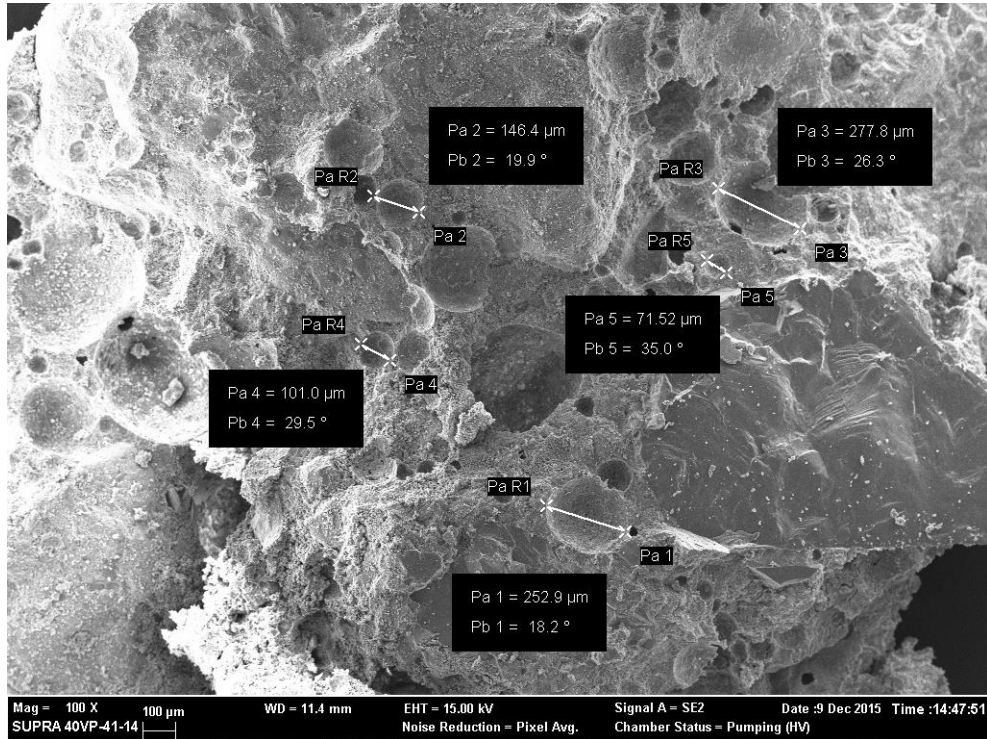
Şekil 4.48. % 3 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 500x büyütme mikroyapısı.



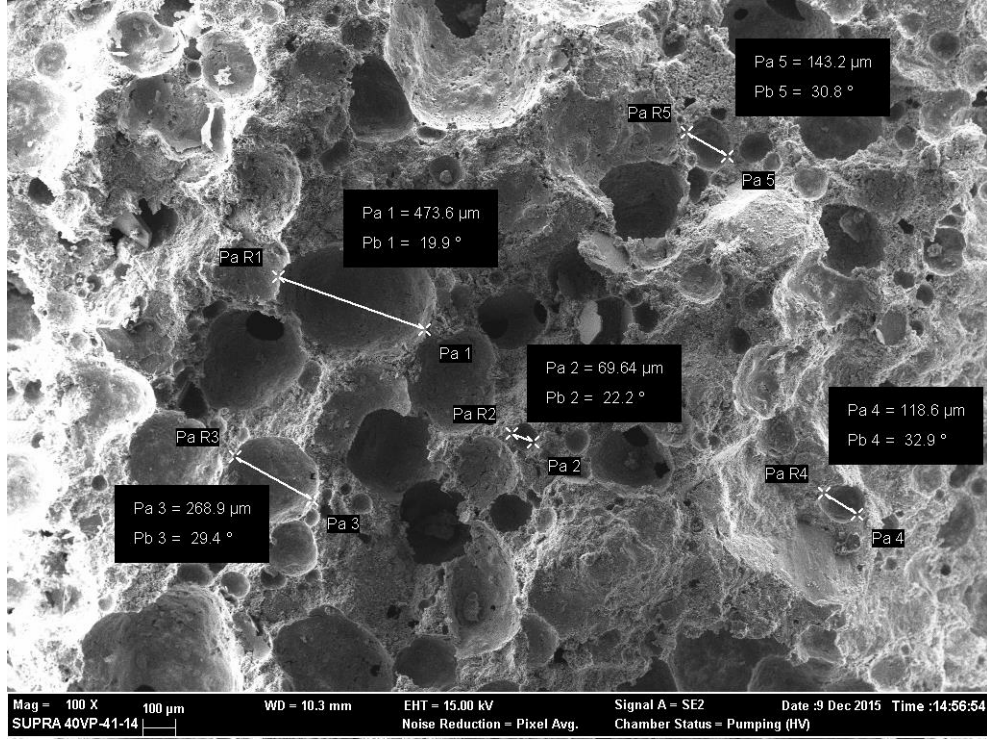
Şekil 4.49. % 5 priz geciktirici katkı bulunan numunenin 5000x büyütme mikroyapısı.

Şekil 4.50, Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te sırasıyla % 0.1, % 0.5, % 1.5 ve % 2 oranında hava sürükleyici katkı kullanılan harç numunelerinin mikro yapısı verilmiştir. Numuneler hava boşluklarının yapısının sağlıklı incelenmesi amacıyla kesme yöntemiyle değil, koparma yöntemiyle alınmıştır. Kesme yönteminde alınan kesitin hava boşluğuna denk gelerek yanlış ölçü alma olasılığı bulunmaktadır, ancak koparma yöntemiyle alınan numunelerde en zayıf kesit olan boşluğun ortasında kopma gerçekleşeceğinden bu yöntem hava boşluklarının incelenmesinde daha sağlıklı sonuç vermektedir.

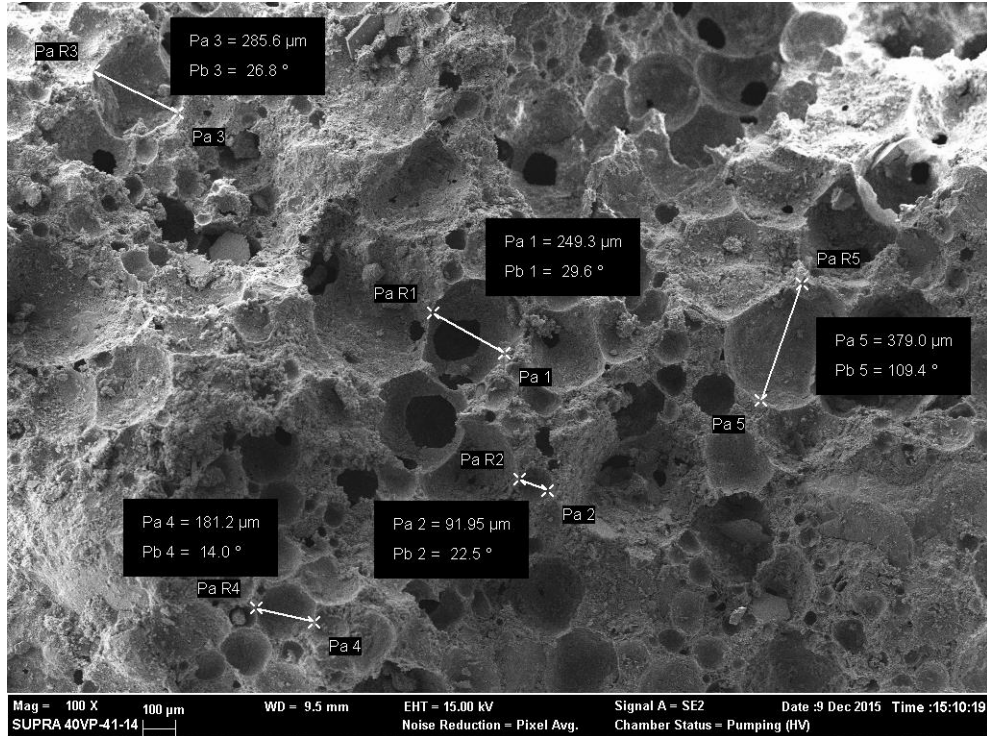
Şekiller incelendiğinde hava boşluklarının genel olarak 50 µm ile 500 µm arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Katkı miktarı arttıkça hava boşluk miktarının da arttığı resimlerden açıkça görülebilmektedir. Ramachandran'ın (1996) "Concrete Admixtures Handbook" kitabına göre hava sürükleyici katkıların çimentonun hidrasyonuna etkisi bulunmamaktadır. Bu çalışmada da aynı doğrultuda sonuca varılmış olup, yapılan SEM analizlerinde hidrasyon ürünlerinde bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu nedenle çalışma numunelerinin içerdikleri hava boşlukları ve bunların nitelikleri yönünden olmuştur.



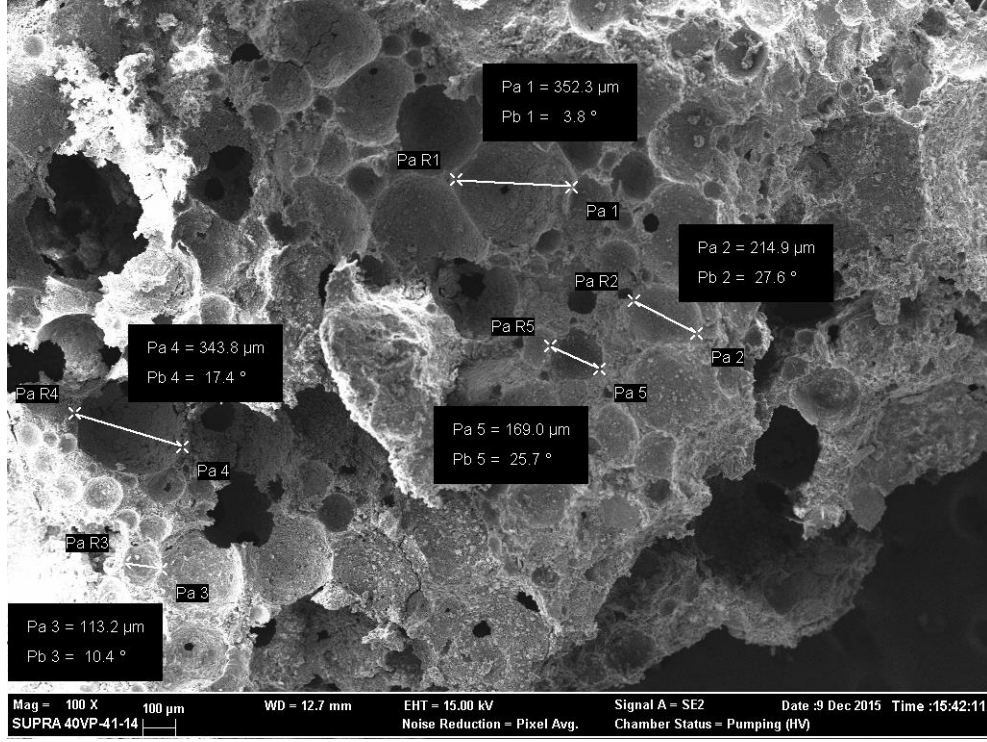
Şekil 4.50. % 0.1 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.



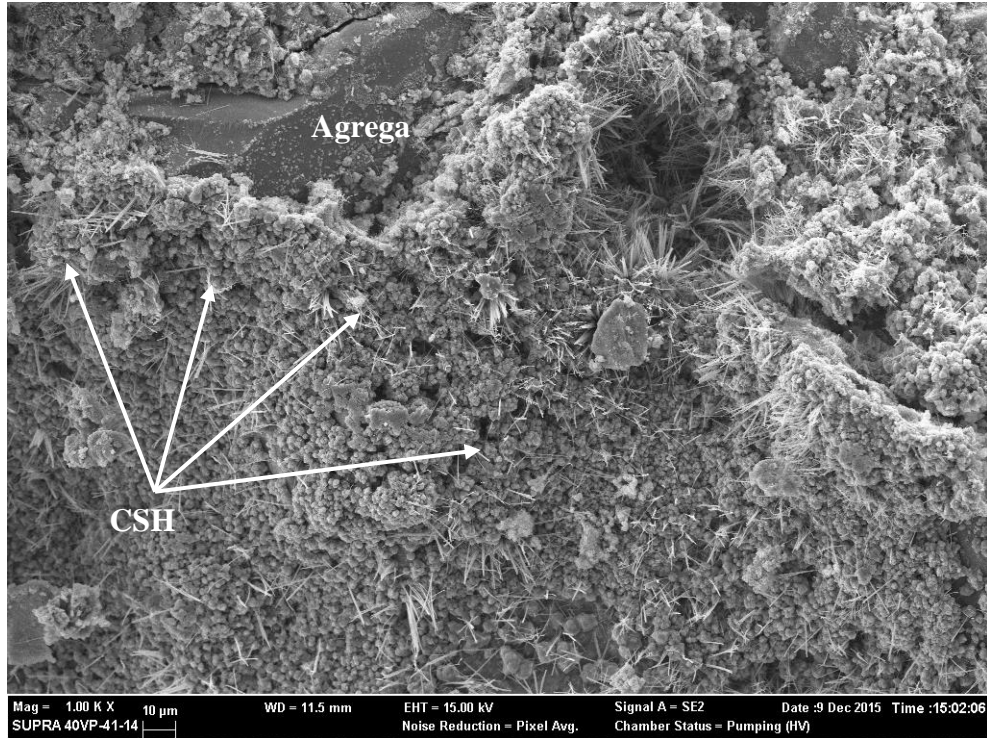
Şekil 4.51. % 0.5 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütmeli mikro yapısı.



Şekil 4.52. % 1.5 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütmeli mikro yapısı.



Şekil 4.53. % 2 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 100x büyütme mikro yapısı.



Şekil 4.54. % 1 hava sürükleyici katkı bulunan numunenin 1000x büyütme mikro yapısı.

Hava sürükleyici katkı ile üretilmiş numuneler, boşluk yapısı dışında CSH oluşumu yönünden daha mikro düzeyde incelendiklerinde CSH yönünden katkısız betonla karşılaştırıldığında bir olumsuzluk oluşmadığı görülmüştür. Şekil 4.54'te, %1 hava sürükleyici kullanılan harç numunelerinin 1000 büyütme mikroskopu yapıları verilmiştir. Şekil incelendiğinde CSH jellerinin agregayı tamamına yakın bir şekilde kapattığı görülmüştür. Ancak boşluklu yapıdan dolayı betonun mekanik özelliklerinde kayıplar yaşanmaktadır.

4.3.3. Yüksek çözünürlüklü yüzey alanı ve mikro gözenek boyutu analizi (BET) sonuçlarının değerlendirilmesi

Uygulanan BET analizi sonucunda mikro gözenek miktarları t-Plot ile, mezo gözenek miktarları ise Barrett, Jonyer and Halenda (BJH) yöntemi ile toplam gözenek miktarı ise ikisinin toplamı olarak belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre akışkanlaştırıcı katkı optimum dozajda, diğer bir deyişle % 1 oranda kullanıldığında mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre % 24.6 azalmaktadır. Ancak diğer taraftan akışkanlaştırıcı katkı % 5 oranda kullanıldığında mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında % 8.3 oranında artmaktadır.

Süperakışkanlaştırıcı katkıda ise katkı optimum dozajda, diğer bir deyişle % 1 oranda kullanıldığında ise mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre sadece % 1.1 oranında azalmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıya benzer şekilde süperakışkanlaştırıcı katkıda da katkı % 5 oranda kullanıldığında mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre % 8.9 oranında artmaktadır.

Priz hızlandırıcı katkıda ise bu katkı için yapılan diğer deney sonuçlarının aksi bir durum gözlemlenmiştir. Katkı optimum dozajda, diğer bir deyişle %1.5 oranda kullanıldığında mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre % 7.6 oranında azalmıştır. Ancak diğer yapılan deneylerde (dayanım, birim ağırlık vb) priz hızlandırıcı katkının yüksek dozajlarında normal dozaja göre belirgin bir değişim gözlemlenmediği halde mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre % 13.8 oranında artmaktadır. Bu nedenle priz hızlandırıcı katkının yüksek dozajda kullanılmasında gözenek miktarının

etkili olduğu dayanıklılık deneylerinin (dayanıklılık deneyleri bu çalışma kapsamında değildir) gelecekteki çalışmalarda yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.1. BET analizi gözenek hacmi sonuçları.

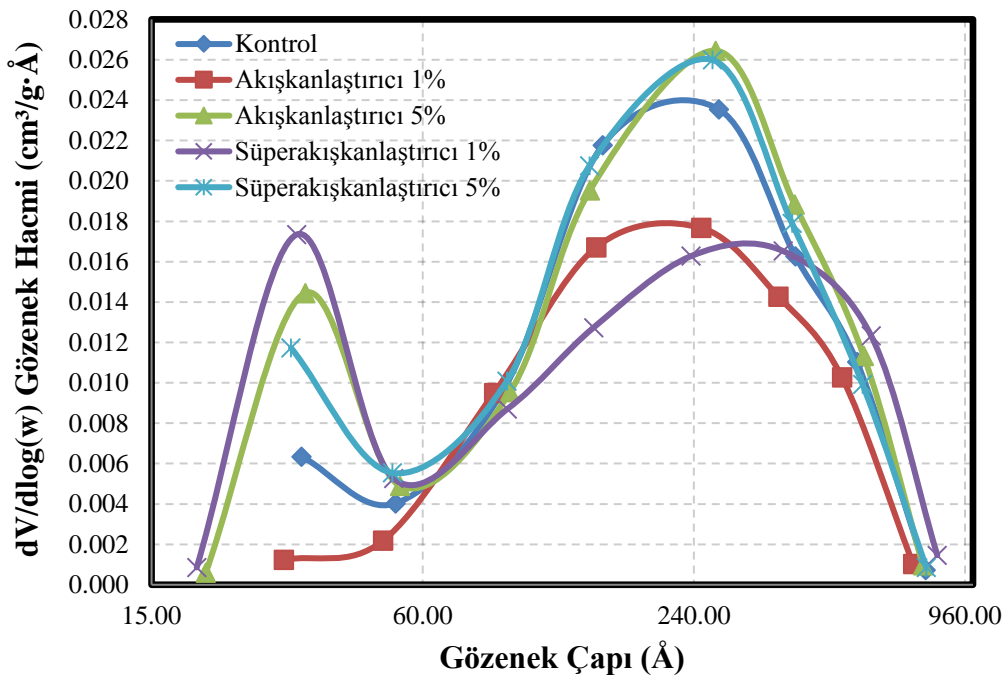
Tip	t-Plot Mikro gözenek hacmi (cm ³ /g x 10 ⁻²)	BJH Meso gözenek hacmi (cm ³ /g x 10 ⁻²)	Toplam gözenek hacmi (cm ³ /g x 10 ⁻²)
A-0 (Kontrol)	0.0436	1.8375	1.8811
A-1	0.0276	1.3906	1.4182
A-5	0.0025	2.0352	2.0377
S-1	0.0204	1.8396	1.8600
S-5	0.0207	2.0280	2.0487
H-1.5	0.0109	1.7270	1.7379
H-5	0.0766	2.0640	2.1406
G-0.5	0.0251	0.9319	0.9570
G-5	0.0037	0.1319	0.1356
HS-0.1	0.0114	1.4417	1.4531
HS-2	0.0846	2.0830	2.1676

Priz geciktirici katkı için elde edilen sonuçlar diğer katkılara yönelik sonuçlar ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir. Deneyler ikişer defa yapılmasına rağmen sonuçlar değişmemiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre priz geciktirici katkıda mikro gözenek miktarının diğer katkılar ile aynı seviyelerde olduğu, ancak meso boyutlardaki boşluk miktarının diğer katkılarla karşılaştırıldığında azaldığı görülmüştür.

Diğer deneylerde olduğu gibi hava sürükleyici katkıda yine ilgi çekici sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre hava sürükleyici katkı optimum dozajda, diğer bir deyişle % 0.1 oranda kullanıldığında mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımına göre % 22.8 azalmaktadır. Hava sürükleyici katkı yüksek dozaj olan % 2 oranda kullanıldığında ise mikro ve meso gözenek miktarı kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında % 15.2 oranında artmaktadır. IUPAC'a (International Union of Pure and Applied Chemistry - Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) göre gözenekler 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; makro gözenekler (yarıçapı 50 nm den büyük), meso gözenekler (yarıçapı 2–50 nm arasında) ve mikro gözeneklerdir (yarıçapı 2 nm den küçük) (Hemalatha vd., 2015). Bölüm 3.4.3.3.'te de bahsedildiği üzere BET cihazı ile 5000 Angstromdan (500 nanometreden) küçük boşlukların analizi yapılabilmektedir. Ancak Erdoğan'a (2003) göre hava sürükleyici katkı ile oluşturulan boşluklar 0.05-1.25 mm mertebesinde olmaktadır. Diğer bir deyişle hava sürükleyici katkıda oluşturulan boşluklar 50000 – 1250000 nanometre mertebesinde. Görüleceği üzere hava sürükleyici katkı ile oluşturulan boşluklar mikro ve hatta meso boşluk boyutlarının çok üzerinde olup, makro boşluk olarak nitelendirilmektedir. Bu nedenle BJH analizi ile elde edilen boşluklar hava sürükleyici katkı ile oluşturulan boşlukları içermemektedir. Hava sürükleyici katkının % 0.1 oranında kullanılmasında harç numunesinde akışkanlık sağlamasından dolayı yerleşimin daha sağlıklı olduğu, bu nedenle mikro ve meso düzeydeki boşluk miktarının azaldığı düşünülmektedir. Bunun yanında diğer tüm katkılarda olduğu gibi (priz geciktirici katkı hariç) hava sürükleyici katkıda da yüksek dozajda kullanımda mikro ve meso boyuttaki gözenek miktarı artmaktadır.

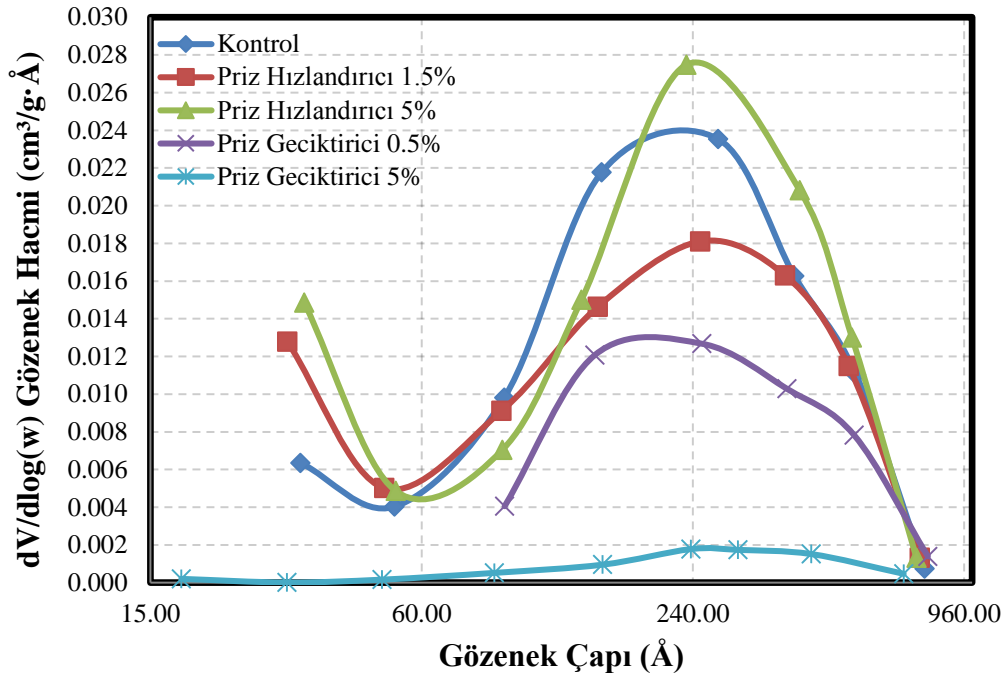
BJH analizi sonucu akışkanlaştırıcı katkı için çizilen gözenek dağılım grafiği Şekil 4.55'te verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere birincisi 30 Å boyutunda, diğeri de 210-330 Å civarında olacak şekilde iki adet pik noktası bulunmaktadır. A-1 karışımı birinci pikte kontrol karışımına göre daha az gözenek içermektedir. Diğer bir deyişle küçük gözenek miktarı kontrole göre daha az hatta yok denilebilecek miktardadır. Bunun yanında A-5 karışımı ise hem kontrol hem de A-1 karışımına göre 30 Å bölgesinde daha fazla gözenek içermektedir. Ancak süper akışkanlaştırıcı katkıda tersi bir durum söz konusudur. S-1 karışımı ilk pikte hem kontrol karışımına hem de S-5 karışımına göre daha fazla gözenek içermektedir. S-5 karışımı ise ilk pikte S-1 karışımından daha az gözenek içerirse de kontrol karışımından daha fazla gözenek içermektedir. İkinci pik noktasına gelindiğinde akışkanlaştırıcı katkı için

ilk pik noktasına benzer durum gözlemlenmektedir. A-1 karışımı yine kontrol karışımına göre daha az gözenek içermekte, A-5 karışımı ise hem kontrol hem de A-1 karışımına göre daha fazla gözenek içermektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkı için ikinci pik noktasında durum ilk pik noktasına göre farklılık arz etmektedir. İkinci pikte S-1 karışımı kontrol karışımına göre daha az gözenek içermekte, S-5 karışımı ise hem kontrol hem de S-1 karışımından fazla gözenek içermektedir.

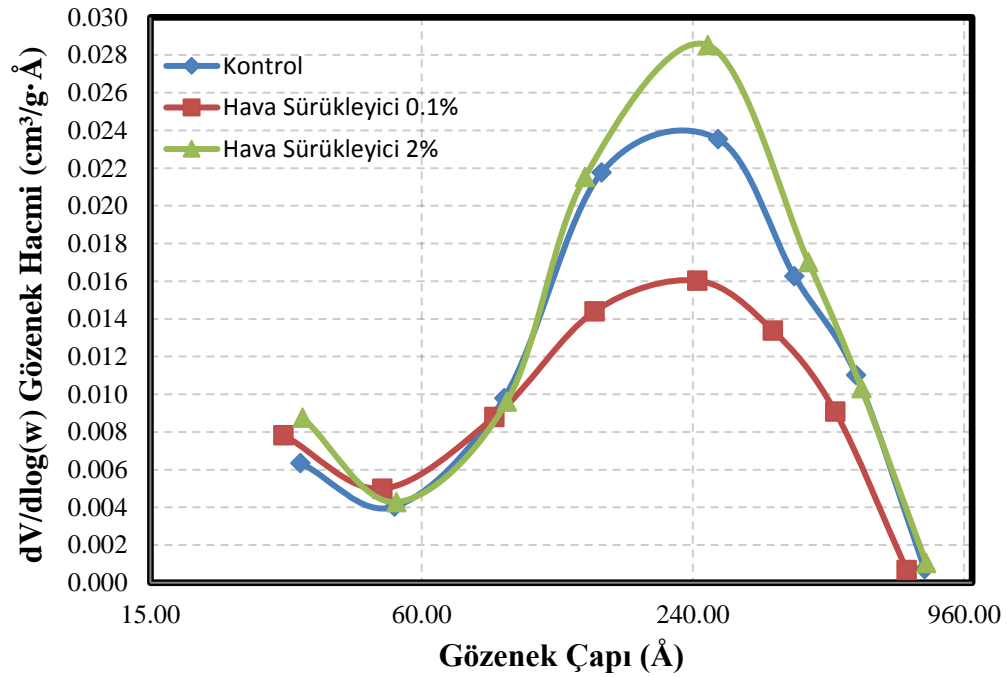


Şekil 4.55. Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.

Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıları için çizilen gözenek dağılım grafiği Şekil 4.56'da verilmiştir. Priz hızlandırıcı katkıda da akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkılarına benzer şekilde iki pik noktası oluşmuştur. H-1.5 ve H-5 karışımlarının ikisi de birinci pik noktasında kontrol karışımına göre daha fazla gözenek içermektedir. Ancak ikinci pik noktasında H-1.5 karışımı hem kontrol hem de H-5 karışımından daha az gözenek içermektedir. H-5 karışımı ise ikinci pik noktasında hem kontrol hem de H-1.5 karışımından daha fazla gözenek içermektedir.



Şekil 4.56. Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.



Şekil 4.57. Hava sürükleyici katkı gözenek boyut dağılımı grafiği.

Hava sürükleyici katkı için çizilen gözenek dağılım grafiği Şekil 4.57'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci pik noktasında kontrol karışımı dâhil

olmak üzere tüm karışımların hemen hemen aynı düzeyde gözenek içerdiği görülmektedir. İkinci pik noktasında ise HS-0.1 karışımının kontrol karışımından daha az, HS-2 karışımının ise hem kontrol hem de HS-0.1 karışımından daha fazla gözenek içerdiği görülmektedir.

Çizelge 4.1 ve grafikler incelendiğinde priz geciktirici katkı göz ardı edilerek mikro ve meso gözenek içeriği açısından en verimli katkının akışkanlaştırıcı katkı olduğu görülmektedir. Bunun yanında hava sürükleyici katkının da beklenenin aksine makro ve meso gözenekleri çok fazla etkilemediği değerlendirilmektedir.

5. HARÇ ÖZELİKLERİ İLİŞKİLERİNİN İRDELENMESİ VE MODELLEME

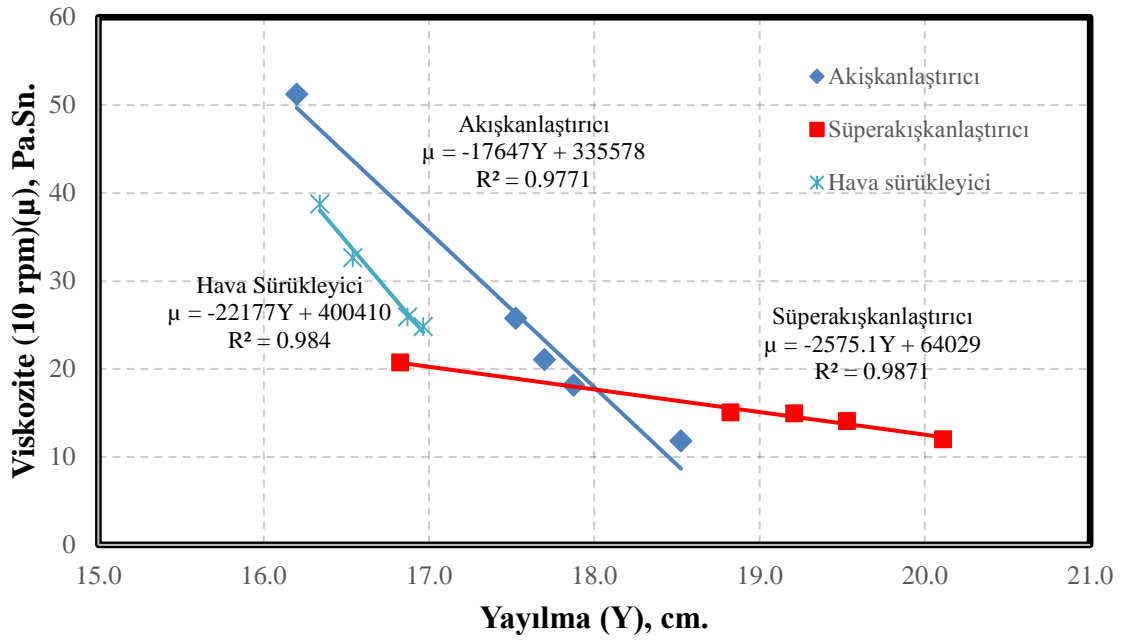
Beton teknolojisinde, imalat aşamasında, özellikle şantiye ortamında yeterli sayıda deney yapmak ve üretilen betonun tüm özelliklerini elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle belirli bir özeliği bilinen betonun, yaklaşık olarak, çeşitli istatistik yöntemlerle diğer bir özeliğinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu bölümde; betonun çeşitli özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve son bölümde de betonun en önemli özeliği olan basınç dayanımını deney yapmadan elde etmeye yarayan bir Yapay Sinir Ağı modeli oluşturulmuştur.

5.1. Harç Özellikleri Birbiri Arasındaki İlişkilerin İrdelenmesi

Çalışma kapsamında deney sonuçları elde edilen; yayılma ile viskozite, taze birim ağırlık ile taze hava içeriği, basınç dayanımı ile taze hava içeriği, basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık, basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ile kılcal su emme ve basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişkiler regresyon analizi ile incelenmiştir. Analiz sonucu regresyon denklemleri elde edilerek, ilişkiler matematiksel bağıntılar ile ifade edilmeye çalışılmıştır.

5.1.1. Yayılma ile viskozite arasındaki ilişki

Çalışma kapsamında numunelerin işlenebilirlikleri hem yayılma tablası ile hem de viskozimetre aleti ile ölçülmüş ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Üretilen akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıların yayılma ve viskozite sonuçları karşılaştırması Şekil 5.1’de yapılmıştır. Şekil 5.1 incelendiğinde tüm katkıları için yayılma değerleri ile viskozite değerleri arasında negatif korelasyon olduğu, diğer bir deyişle yayılma değerleri arttıkça viskozitenin azaldığı görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.1), süperakışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.2) ve hava sürükleyici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.3) elde edilmiş olup, tüm serilerde R^2 değerleri oldukça yüksek olan doğrusal ilişkiler belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Yayılma ile Viskozite arasındaki ilişki.

Akışkanlaştırıcı;

$$\mu = -17647Y + 335578 \quad (R^2 = 0.9771) \quad (5.1)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$\mu = -2575.1Y + 64029 \quad (R^2 = 0.9871) \quad (5.2)$$

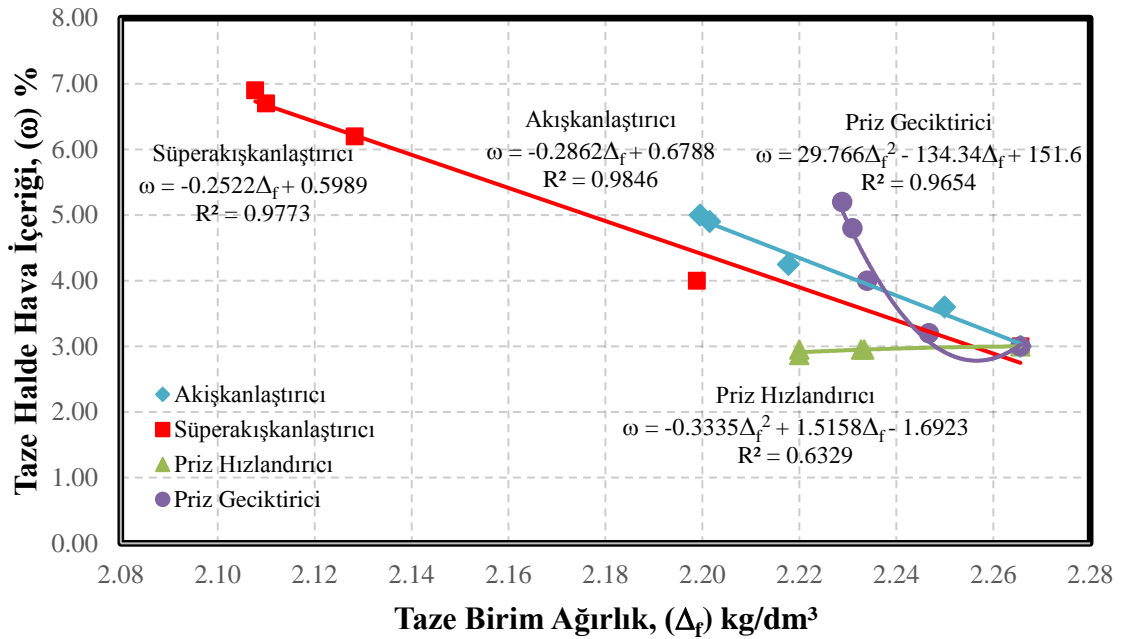
Hava sürükleyici;

$$\mu = -22177Y + 400410 \quad (R^2 = 0.984) \quad (5.3)$$

5.1.2. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki

Beton içerisindeki hava miktarı, birim ağırlığı doğrudan etkilemektedir. Üretilen tüm harç numunelerinin farklı dozajlarda kullanımında elde edilen taze birim ağırlıkları ile taze hava içeriklerinin karşılaştırılması Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te yapılmıştır. Burada amaçlanan; şantiye ortamında dahi kolayca hesaplanabilen taze birim ağırlık değerini kullanarak numunelerin içerisindeki hava miktarını belirleyebilmektir. Şekil 5.2'de akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıların karşılaştırması yapılmıştır. Görüleceği üzere hem kıvam düzenleyicilerde (akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı), hem de

priz düzenleyicilerde (priz hızlandırıcı ve priz geciktirici) taze birim ağırlık ile hava içeriği arasında negatif korelasyon olduğu, diğer bir deyişle numunelerdeki hava içeriği arttıkça taze birim ağırlığın azaldığı görülmektedir. Şekil 5.3'te ise hava sürükleyici katkı için taze birim ağırlık, hava içeriği karşılaştırması yapılmıştır. Diğer katkılarda olduğu gibi hava sürükleyici katkıda da taze birim ağırlık ile hava içeriği arasında negatif korelasyon belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.4), süperakışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.5), priz hızlandırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.6), priz geciktirici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.7) ve hava sürükleyici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.8) elde edilmiştir. Priz hızlandırıcı katkı hariç tüm serilerde R^2 değerleri oldukça yüksek olan ($R^2 > 0,95$) doğrusal (kıvam düzenleyiciler ve hava sürükleyici) ve polinomik (priz düzenleyiciler) ilişkiler belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkıda ise $R^2 = 0,63$ olup, bu değer düşük olmasının, birim ağırlık ve özellikle hava içeriği değerlerin küçük bir aralıkta sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.2. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki. (Hava sürükleyici hariç).

Akışkanlaştırıcı;

$$\omega = -0.2862\Delta_f + 0.6788 \quad (R^2 = 0.9846) \quad (5.4)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$\omega = -0.2522\Delta_f + 0.5989 \quad (R^2 = 0.9773) \quad (5.5)$$

Priz hızlandırıcı;

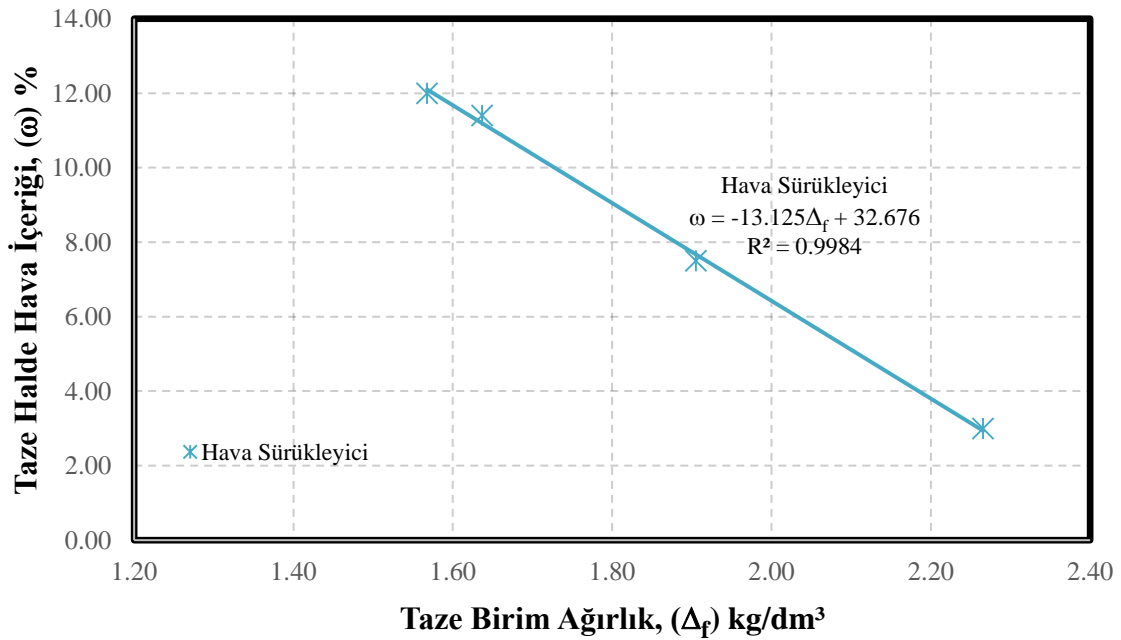
$$\omega = -0.3335\Delta_f^2 + 1.5158\Delta_f - 1.6923 \quad (R^2 = 0.6329) \quad (5.6)$$

Priz geciktirici;

$$\omega = 29.766\Delta_f^2 - 134.34\Delta_f + 151.6 \quad (R^2 = 0.9654) \quad (5.7)$$

Hava sürükleyici;

$$\omega = -13.125\Delta_f + 32.676 \quad (R^2 = 0.9984) \quad (5.8)$$

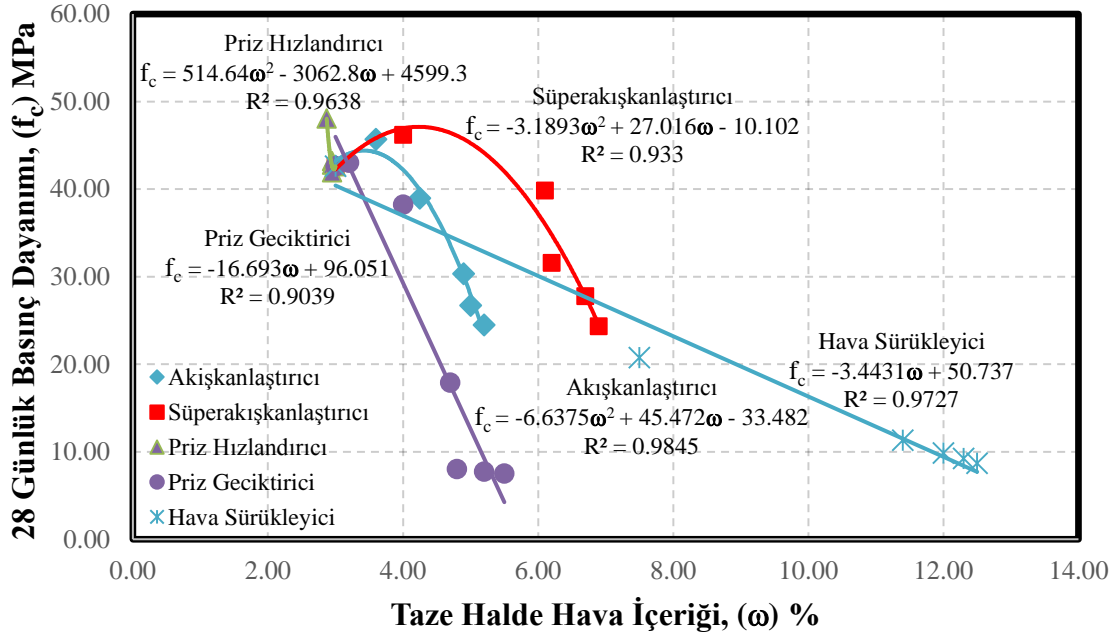


Şekil 5.3. Taze birim ağırlık ile taze hava içeriği arasındaki ilişki. (Hava sürükleyici).

5.1.3. Basınç dayanımı ile taze hava içeriği arasındaki ilişki

Beton içerisindeki hava miktarı, birim ağırlığı etkilediği gibi, beton için hesaplamalarda en önemli parametre olan basınç dayanımını da doğrudan etkilemektedir. Üretilen tüm harç numunelerinin farklı dozajlarda kullanımında elde edilen basınç dayanımları ile taze hava içeriklerinin karşılaştırılması Şekil 5.4'te yapılmıştır.

Görüldüğü gibi hava içeriği ile basınç dayanımı arasında negatif korelasyon bulunmaktadır. Betonda boşluk oranı arttıkça dayanım düştüğünden, iki değer arasında ters orantı bulunmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.9), süperakışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.10), priz hızlandırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.11), priz geciktirici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.12) ve hava sürükleyici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.13) elde edilmiştir. Tüm serilerde R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 > 0,90$) doğrusal (priz geciktirici ve hava sürükleyici) ve polinomik (kıvam düzenleyiciler ve priz hızlandırıcı) ilişkiler belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Basınç dayanımı ile taze hava içeriği arasındaki ilişki.

Akışkanlaştırıcı;

$$f_c = -6.6375\omega^2 + 45.472\omega - 33.482 \quad (R^2 = 0.9845) \quad (5.9)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$f_c = -3.1893\omega^2 + 27.016\omega - 10.102 \quad (R^2 = 0.933) \quad (5.10)$$

Priz hızlandırıcı;

$$f_c = 514.64\omega^2 - 3062.8\omega + 4599.3 \quad (R^2 = 0.9638) \quad (5.11)$$

Priz geciktirici;

$$f_c = -16.693\omega + 96.051 \quad (R^2 = 0.9039) \quad (5.12)$$

Hava sürükleyici;

$$f_c = -3.4431\omega + 50.737 \quad (R^2 = 0.9727) \quad (5.13)$$

5.1.4. Basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık arasındaki ilişki

Üretilen tüm harç numunelerinin farklı dozajlarda kullanımında elde edilen basınç dayanımları ile sertleşmiş birim ağırlıkların karşılaştırılması Şekil 5.5'te yapılmıştır. Betonda birim ağırlık arttıkça boşluk oranı azaldığından basınç dayanımı da artmaktadır, bu nedenle iki değer arasında bir pozitif korelasyon belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.14), süperakışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.15), priz hızlandırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.16), priz geciktirici katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.17) ve hava sürükleyici katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.18) elde edilmiştir. Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları ile üretilen serilerde R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 > 0,94$) doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı ile üretilen seride ise yine R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 = 0,98$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı ile üretilen seride R^2 değerleri yüksek olan ($R^2 = 0,80$) doğrusal ilişki belirlenmiştir. Priz geciktirici katkı ile üretilen serilerde ise R^2 değerleri nispeten düşük olan ($R^2 = 0,55$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz geciktirici katkılarda % 1 katkı oranına kadar birim ağırlığın düştüğü ancak bu orandan sonra katkı miktarı artsa da birim ağırlığın değişmediği Bölüm 4'te açıklanmıştır. Bu durumun, belli bir orandan sonra katkının beton içine hava sürüklenme etkinin azalmasından veya durmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akışkanlaştırıcı;

$$f_c = 326.68\Delta s - 653.85 \quad (R^2 = 0.9454) \quad (5.14)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$f_c = -1015.9\Delta_s^2 + 4307.1\Delta_s - 4520.9 \quad (R^2 = 0.9836) \quad (5.15)$$

Priz hızlandırıcı;

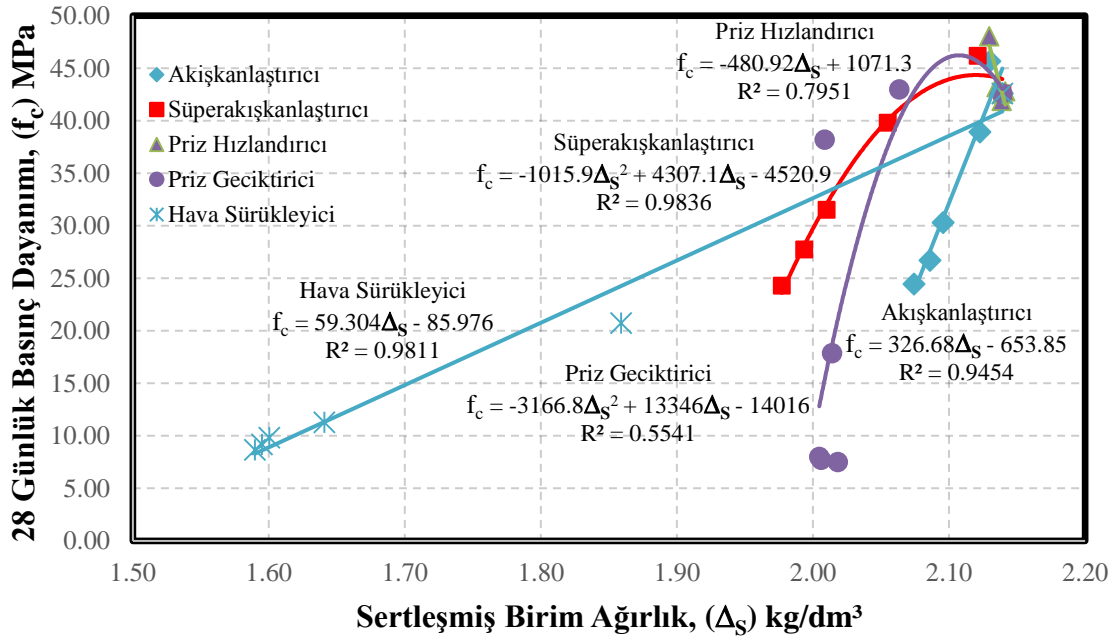
$$f_c = -480.92\Delta_s + 1071.3 \quad (R^2 = 0.7951) \quad (5.16)$$

Priz geciktirici;

$$f_c = -3166.8\Delta_s^2 + 13346\Delta_s - 14016 \quad (R^2 = 0.5541) \quad (5.17)$$

Hava sürükleyici;

$$f_c = 59.304\Delta_s - 85.976 \quad (R^2 = 0.9811) \quad (5.18)$$

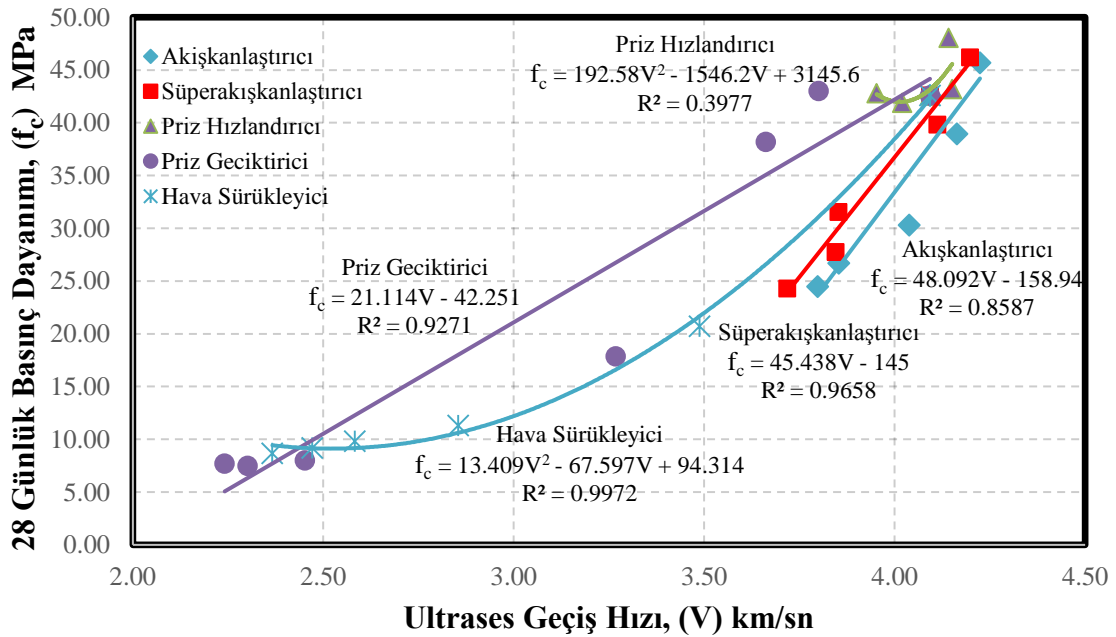


Şekil 5.5. Basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık arasındaki ilişki.

5.1.5. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızı karşılaştırılması Şekil 5.6'da yapılmıştır. Betonda boşluk miktarı arttıkça sesin hızı yavaşlayacağından basınç dayanımı gibi ultrases geçiş hızı da düşecektir, bu nedenle iki değer arasında bir pozitif korelasyon belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.19),

süperakışkanlaştırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.20), priz hızlandırıcı katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.21), priz geciktirici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.22) ve hava sürükleyici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.23) elde edilmiştir. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve Priz geciktirici katkılarla üretilen serilerde R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 > 0,85$) doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Hava sürükleyici katkı ile üretilen seride R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 = 0,99$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı ile üretilen serilerde ise R^2 değerleri nispeten düşük olan ($R^2 = 0,40$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı için R^2 değerinin düşük olmasının, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerin küçük bir aralıkta sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.

Akışkanlaştırıcı;

$$f_c = 48.092V - 158.94 \quad (R^2 = 0.8587) \quad (5.19)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$f_c = 45.438V - 145 \quad (R^2 = 0.9658) \quad (5.20)$$

Priz hızlandırıcı;

$$f_c = 192.58V^2 - 1546.2V + 3145.6 \quad (R^2 = 0.3977) \quad (5.21)$$

Priz geciktirici;

$$f_c = 21.114V - 42.251 \quad (R^2 = 0.9271) \quad (5.22)$$

Hava sürükleyici;

$$f_c = 13.409V^2 - 67.597V + 94.314 \quad (R^2 = 0.9972) \quad (5.23)$$

5.1.6. Basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki

Şekil 5.7’de basınç dayanımları ile kılcal su emme değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kılcal su emme değerlerinin azalması ile basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Kılcallığı düşük olan betonlar daha geçirimsiz ve boşluksuz olduğundan dolayı bu betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bu nedenle iki değer arasında bir pozitif korelasyon belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.24), süperakışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.25), priz hızlandırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.26), priz geciktirici katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.27) ve hava sürükleyici katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.28) elde edilmiştir. Priz hızlandırıcı katkı hariç diğer tüm katkılarla üretilen serilerde R^2 değerleri yüksek olan ($R^2 > 0,80$) doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı ile üretilen serilerde ise R^2 değerleri nispeten düşük olan ($R^2 = 0,40$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı için R^2 değerinin düşük olmasının, basınç dayanımı ve kılcal su emme değerlerin küçük bir aralıkta sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akışkanlaştırıcı;

$$f_c = -51.362C_A + 71.442 \quad (R^2 = 0.9978) \quad (5.24)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$f_c = -41.434C_A + 68.039 \quad (R^2 = 0.9242) \quad (5.25)$$

Priz hızlandırıcı;

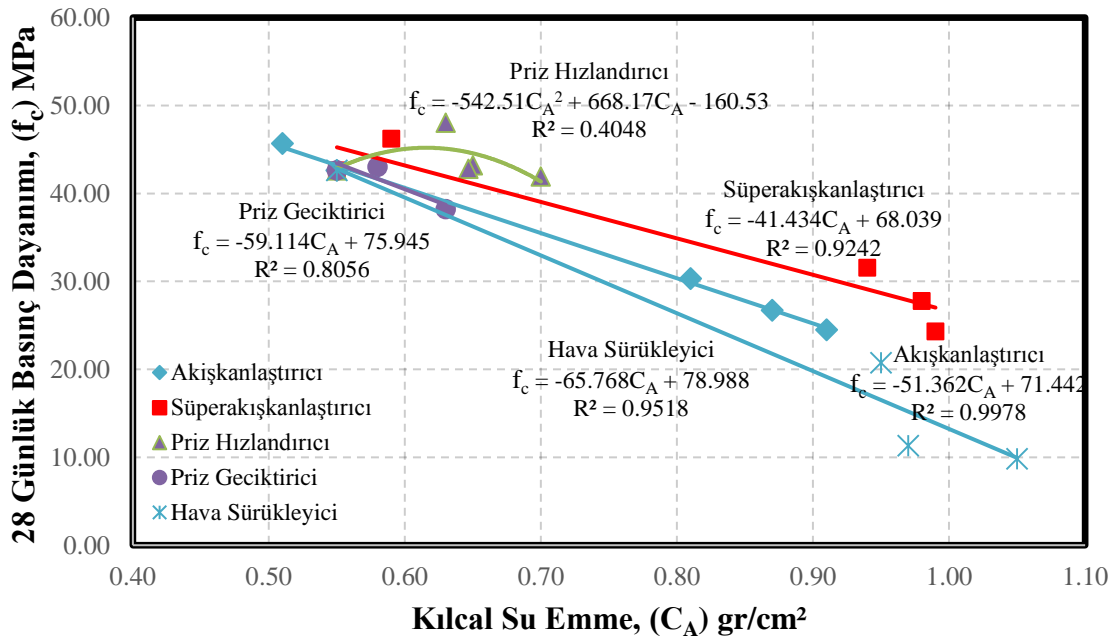
$$f_c = -542.51C_A^2 + 668.17C_A - 160.53 \quad (R^2 = 0.4048) \quad (5.26)$$

Priz geciktirici;

$$f_c = -59.114C_A + 75.945 \quad (R^2 = 0.8056) \quad (5.27)$$

Hava sürükleyici;

$$f_c = -65.768C_A + 78.988 \quad (R^2 = 0.9515) \quad (5.28)$$

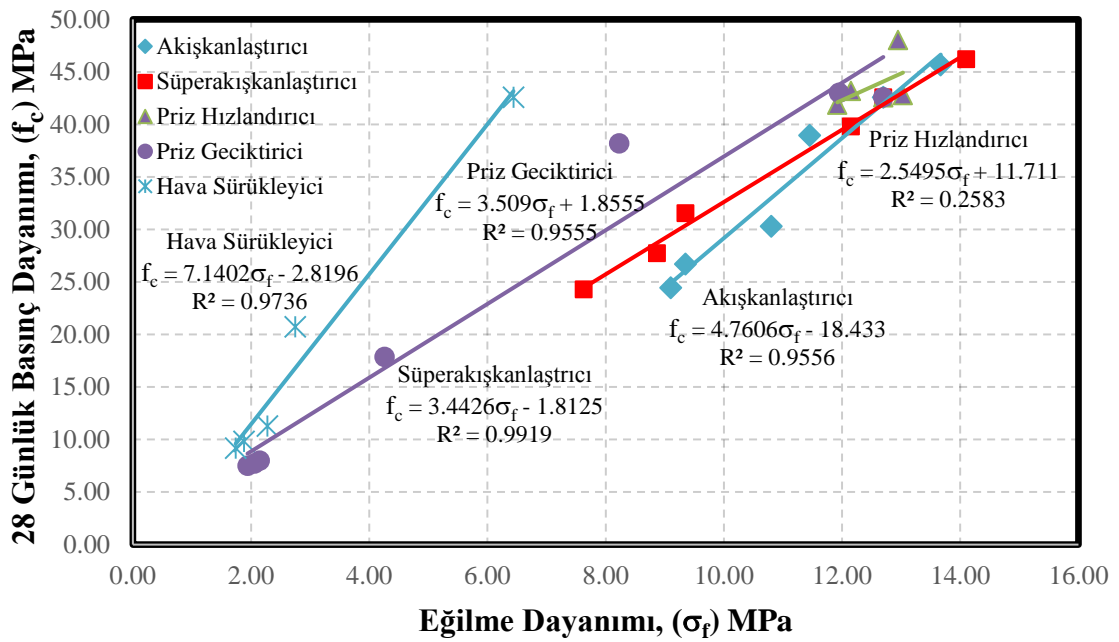


Şekil 5.7. Basınç dayanımı ile kılcıl su emme arasındaki ilişki.

5.1.7. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Üretilen tüm harç numunelerinin farklı dozajlarda kullanımında elde edilen basınç dayanımları ile basınç dayanımları karşılaştırılması Şekil 5.8'de yapılmıştır. Betonda genel olarak bir dayanım değeri arttıkça başka dayanım değerleri de artmaktadır, bu nedenle iki değer arasında bir pozitif korelasyon bulunmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.29), süperakışkanlaştırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.30), priz hızlandırıcı katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.31), priz geciktirici

katkılı serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.32) ve hava sürükleyici katkıli serilerde yapılan regresyon analizi sonucunda bağıntı (5.33) elde edilmiştir. Priz hızlandırıcı katkı hariç diğer tüm katkılarla üretilen serilerde R^2 değerleri çok yüksek olan ($R^2 > 0,95$) doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı ile üretilen serilerde ise R^2 değerleri düşük olan ($R^2 = 0,25$) polinomik ilişki belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı için R^2 değerinin düşük olmasının, dayanım değerlerin küçük bir aralıkta sıkışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.8. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki.

Akışkanlaştırıcı;

$$f_c = 4.7606\sigma_f - 18.433 \quad (R^2 = 0.9556) \quad (5.29)$$

Süperakışkanlaştırıcı;

$$f_c = 3.4426\sigma_f - 1.8125 \quad (R^2 = 0.9919) \quad (5.30)$$

Priz hızlandırıcı;

$$f_c = 2.5495\sigma_f + 11.711 \quad (R^2 = 0.2583) \quad (5.31)$$

Priz geciktirici;

$$f_c = 3.509\sigma_f + 1.8555 \quad (R^2 = 0.9555) \quad (5.32)$$

Hava sürükleyici;

$$f_c = 7.1402\sigma_f - 2.8196 \quad (R^2 = 0.9736) \quad (5.33)$$

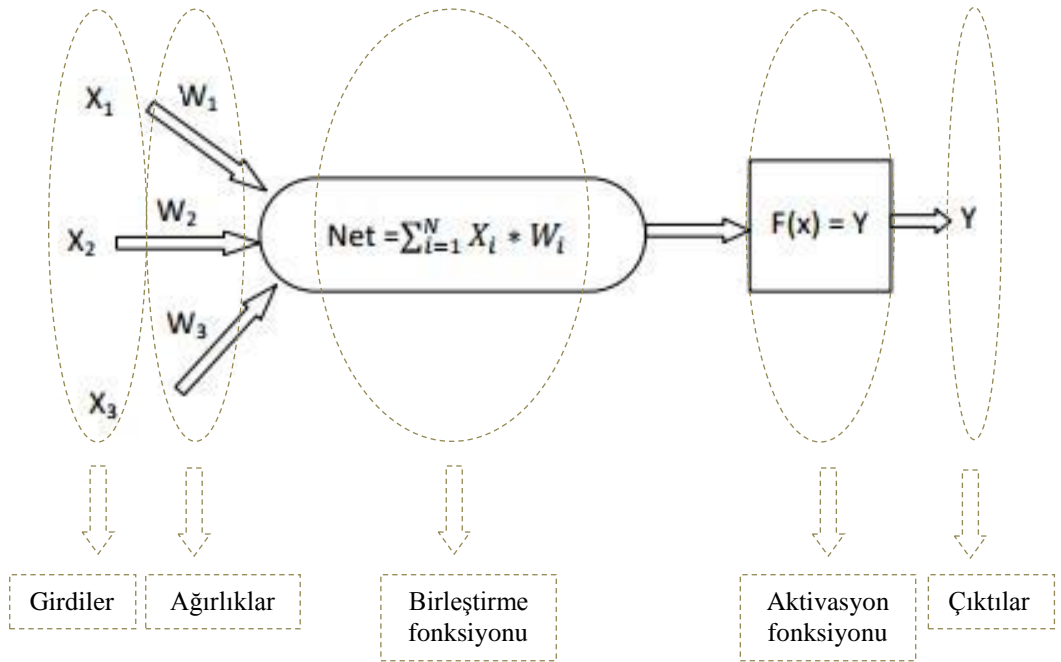
5.2. Basınç Dayanım Sonuçlarının Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Modellenmesi

Yeni milenyumla beraber bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmeler beraberinde diğer bilim alanlarında da gelişmeyi getirmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte insan veya başka bir canlı tarafından kısa sürede yapılması mümkün olmayan işlemler bilgisayarların gelişimi ile saniyeler içerisinde yapılabilmektedir. Yapay sinir ağları (YSA) da bilgisayar teknolojisinin hızı ve altyapısını kullanarak insan beyninin çalışma prensibinden esinlenen bir bilgi işleme teknolojisidir. YSA, insan beyninin özelliklerinden biri olan öğrenme yolu ile yeni bilgi/bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme gibi kabiliyetleri, otomatik olarak yerine getirebilmek amacı ile oluşturulan bilgisayar sistemleridir.

Yapay sinir ağlarına ait sinir hücreleri de biyolojik sinir hücrelerine benzerler. Yapay nöronlar yapay sinir hücreleri arasında bağ kurarak yapay sinir ağlarını oluştururlar. Tıpkı biyolojik nöronlardaki gibi, yapay nöronların da giriş sinyallerini aldıkları, bu sinyalleri toplayıp işledikleri ve çıktılarını ilettikleri bölümleri bulunmaktadır. Bir yapay sinir hücresi girdiler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere 5 bölümden oluşmakta olup hücre yapısı şematik olarak Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Girdiler diğer hücrelerden veya dış ortamdan gelen bilgilerdir. Girdiler yapay sinir hücresine başka hücreden gelebileceği gibi dış dünyadan da gelebilir. Ağırlıklar, girdi demeti veya kendinden evvel tabakadaki diğer bir işlem elemanının bu işlem elemanı üzerindeki etkisini ifade eden değerlerdir. Yapay sinir hücresine gelen bilgiler girdiler üzerinden çekirdeğe ulaşmadan önce geldikleri bağlantıların ağırlığıyla çarpılarak çekirdeğe iletilir. Bu sayede girdilerin üretilen çıktı üzerindeki etkisi ayarlanabilmektedir. Bu ağırlıkların değerleri pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Ağırlığı sıfır olan girdilerin çıktı üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır. Birleştirme Fonksiyonu, bir yapay sinir hücresine ağırlıklarla çarpılarak gelen girdileri toplayarak o hücrenin net girdisini hesaplayan bir

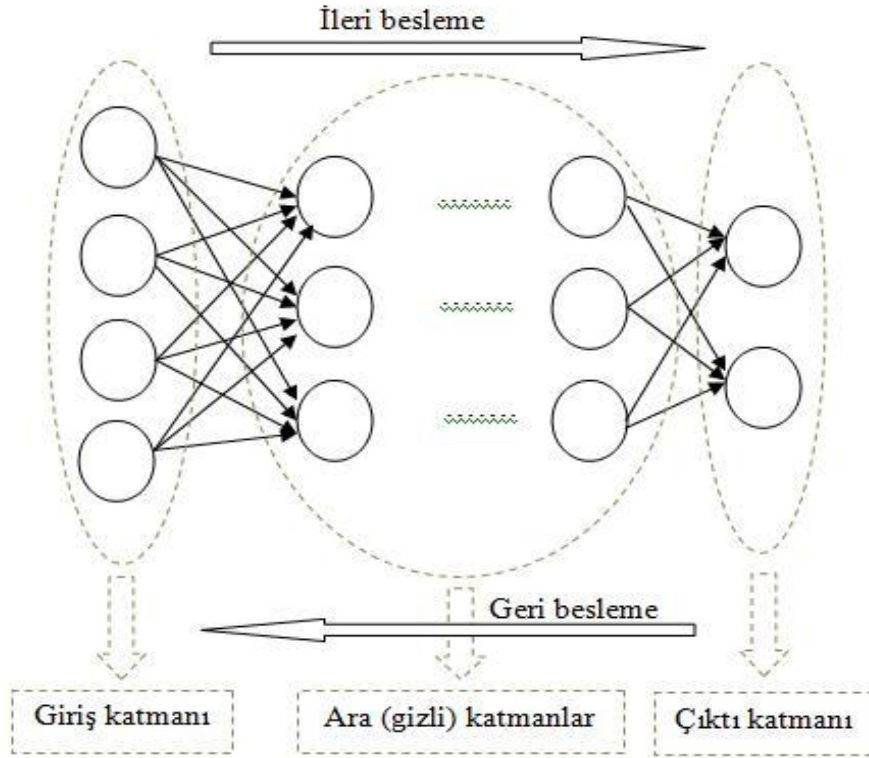
fonksiyondur. Aktivasyon Fonksiyonu, hücreye gelen girdiyi işleme olarak çıktıyı belirler. Aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmayan bir fonksiyon seçilmesi daha uygundur. Aktivasyon fonksiyonu belirlenirken fonksiyonun türevinin kolay hesaplanabilir olmasına dikkat edilir. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında aktivasyon fonksiyonunun türevi kullanılmasından dolayı sistemin yavaşlamaması için türevi kolay hesaplanabilen bir fonksiyon seçilmelidir. Yapay sinir ağlarında genel olarak aktivasyon fonksiyonu olarak bağıntı (5.34)'de verilen "Sigmoid fonksiyonu" seçilir.



Şekil 5.9. Yapay sinir hücresi yapısı.

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.34)$$

Yapay sinir ağları giriş katmanı, ara (gizli) katmanlar ve çıktı katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Yapay sinir ağlarının yapısı şematik olarak Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Yapay sinir ağı yapısı.

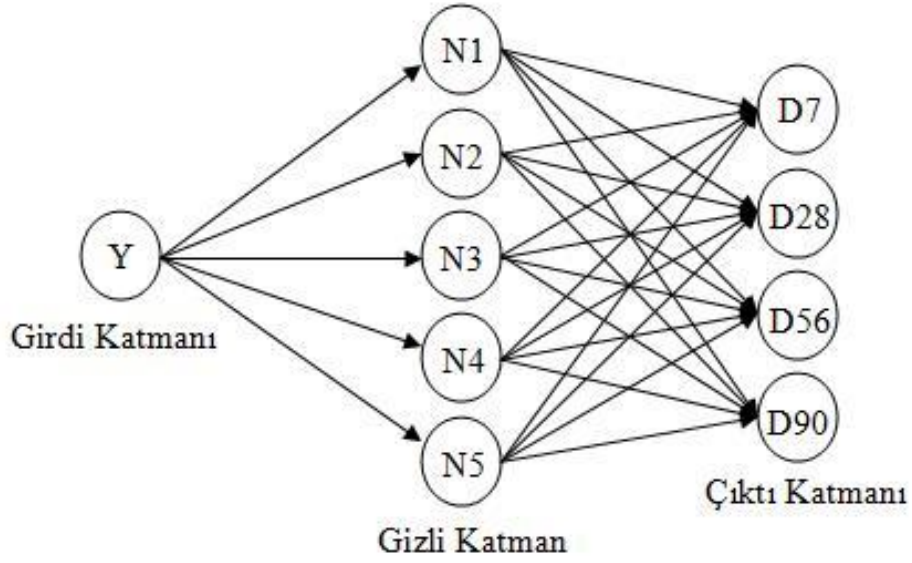
Giriş Katmanı, yapay sinir ağına girdilerin geldiği katmandır. Bu katmanda dış dünyadan gelecek giriş sayısı kadar hücrenin bulunmasına rağmen genelde girdiler herhangi bir işleme uğramadan alt katmanlara iletilmektedir. Ara katmanlar, giriş katmanından çıkan veriler bu katmana gelir. Ara katman sayısı kurulan yapıya göre değişiklik gösterir. Ara katmanlardaki nöron miktarları giriş ve çıkış katmanındaki hücre sayısından bağımsızdır. Ara katman sayısının ve bu katmanlarda bulunan nöron sayısının artması hesaplama zorluğunu ve süresini artırır ancak yapay sinir ağının karmaşık problemlerin çözümünde kullanılabilmesine olanak sağlar. Çıkış katmanı, ara katmanlardan gelen verileri işlemden geçirerek çıktıların üretilmesini sağlayan katmandır. Bu katmanda üretilen çıktılar kullanıcıya bildirilir. Geri beslemeli YSA'larda bu aşamada üretilen çıktı ve/veya çıktılar giriş katmanına geri gönderilerek YSA'nın yeni ağırlık değerleri hesaplamasını sağlar.

Yapay sinir ağı da tıpkı insanın doğumundan itibaren öğrenmeye başlaması gibi oluşumundan itibaren öğrenmeye gereksinim duyar. Öğrenmeyen yapay sinir ağı hiçbir işe yaramaz ve kullanışsızdır. Çeşitli eğitim algoritmalarıyla hata sıfıra yaklaştırılıp gerçek sonuç değerine ulaşılmaya çalışılır. Bu eğitim sürecinde yenilenen, YSA'nın ağırlıklarıdır

(W1, W2, W3...). Ağırlıklar her bir döngüde değiştirilerek (iterasyon) sonuca yaklaşılmaya çalışılır. Gerçek sonuca yaklaşmanın ölçüsü de yine kullanıcı tarafından girilen bir değerdir. Yapay sinir ağına girilen değer ile çıkış sonucu gerçek verilerle uyuyorsa ağırlık değerleri saklanır. Ağırlıkların sürekli değiştirilerek amaçlanan sonuca varılmasına kadar geçen süreye öğrenme denilir. Kurulan YSA öğrendikten sonra, daha önce sisteme girilmeyen değerler girilip, YSA çıktısı ile gerçek sonuç karşılaştırılır. Eğer deneme amacı ile girilen değerler ile yapay sinir ağı tarafından üretilen sonuç birbirine yaklaşıyorsa, yapay sinir ağı işi öğrenmiştir. Genelde kullanılacak verilerin % 80 - 85'i ağı girilip ağı eğitilir. Kalan % 15-20'lik kısım ise ağı denetlenmesi için kullanılır.

Yapılan deneyler sonucu elde edilen basınç dayanımı sonuçları Yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Bu amaçla her bir katkı tipi için ayrı modelleme yapılmıştır. Her bir katkı için 48'er adet basınç dayanımı sonucu YSA modellemesindeki işlemlerde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen 48 sonucun 34 adedi modelin eğitilmesi için, 7 adedi modelin doğrulanması için ve 7 adedi de modelin kontrol edilmesi için kullanılmıştır. Harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde, tüm bileşenlerin (kum, çimento ve su miktarı) sabit tutularak sadece katkı miktarının (oranının) değişken olması nedeniyle tek girdi olarak katkı yüzdesi (Y) girdi katmanında kullanılmış, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları (D7, D28, D56 ve D90) ise çıktı katmanında kullanılmıştır. YSA ile modellenen sistemin mimarisinde Şekil 5.11'de görüldüğü gibi bir adet gizli katman seçilmiş ve gizli katmanda 5 adet hücre belirlenmiştir. Model Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması ile eğitilmiştir. Modelde aktivasyon fonksiyonu olarak doğrusal olmayan Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır.

Eğitimi tamamlanan model yalnız girdi verileri kullanılıp kontrol edilmiş ve deney sonuçlarında elde edilen değerlere yakın sonuçlar gözlemlenmiştir. Aşırı dozajda kimyasal katkı kullanılan harçlarda basınç dayanımı için YSA ile oluşturulan modelin eğitiminde kullanılan parametre değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere, gizli katman hücre sayısı 5, çıktı katmanı hücre sayısı 4 ve öğrenme döngüsü ise 13000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.11. Basınç dayanımlarının yapay sinir ağı modellenmesinde kullanılan sistem.

Çizelge 5.1. Basınç dayanımı için model parametreleri.

Parametre	Değer
Girdi katmanı hücre sayısı	1
Gizli katman sayısı	1
Gizli katman hücre sayısı	5
Çıktı katmanı hücre sayısı	4
Öğrenme döngüsü	13000

Yapılan modellemenin performans sonuçlarını değerlendirmek için MSE (ortalama karesel hata) ve korelasyon katsayısı (R) değerleri kullanılmıştır. Her bir katkı için MSE ve R değerleri Çizelge 5.2’de ayrı ayrı verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin incelenmesinden yapay sinir ağları kullanılarak aşırı dozajda kimyasal katkı kullanılması durumunda harç numunelerin basınç dayanımlarının yüksek başarı düzeyinde tahmin edilebileceği görülmektedir.

Çizelge 5.2. Yapay sinir ağı model sonuçları

İstatistiksel Parametreler	Akışkanlaştırıcı	Süperakışkanlaştırıcı	Priz Hızlandırıcı	Priz Geciktirici	Hava Sürükleyici
MSE	2.70103	3.12002	4.11997	1.97722	2.54445
R	0.99045	0.98787	0.98045	0.99412	0.99137

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aşırı dozajda kimyasal katkı kullanılması durumunda betonda yaşanan değişimlerin ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada harç numunelerinde taze ve sertleşmiş halde yapılan deneylerden elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Kimyasal katkı dozajı arttıkça priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkılı numunelerin taze birim ağırlıklarında hemen hemen herhangi bir değişim yaşanmadığı, akışkanlaştırıcı katkılı numunelerin taze birim ağırlığında bir miktar düşüş olduğu, ancak süperakışkanlaştırıcı katkılı numuneler de ise belirgin bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu düşüşün kullanılan katkı maddesinin beton içerisine hava sürüklemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hava sürükleyici katkılar ise özelliğinden dolayı betonların birim ağırlığını düşürmektedir. Burada en önemli nokta üretici tarafından önerilen dozajlarda (% 0.06 - % 0.2) kullanılması durumunda dahi taze birim ağırlıkta ciddi düşüşler yaşanmasıdır. Özellikle % 0.1 oranındaki katkıda dahi numunelerin birim ağırlığının 1.9 ton/m³ seviyesine düşmesi, kontrol karışımının taze birim ağırlığının 2.27 ton/m³ olduğu düşünüldüğünde % 16'lık bir düşüşe tekabül etmektedir. Deneylerde dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise hava içeriğindeki artım hızının yavaşlamasıdır. Yaklaşık %0.5'lik dozajdan sonra katkı miktarı arttıkça hava içeriği artım hızının azaldığı gözlemlenmiştir.

- Beklendiği gibi akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde yayılma değerleri katkı dozajı arttıkça artmıştır, ancak yayılma değerlerinin artım hızı her iki katkı tipi içinde % 2 oranından sonra yavaşlamaktadır. Priz hızlandırıcı katkı için dozaj değişiminin yayılma özeliğine etki etmediği belirlenmiştir. Priz geciktirici katkıda ise içerdiği malzemenin (Sodyum Glükonat) aynı zamanda akışkanlaştırıcı özellik taşımasından dolayı harç numunesinin yayılma değerini arttırdığı ancak bu akışkanlığın % 1 seviyesinden sonra değişmediği hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. Hava sürükleyici katkıda da priz geciktirici katkıya benzer bir sonuç gözlemlenmiştir. % 0.1'lik katkı kullanımında yayılma değerinin ciddi bir şekilde arttığı ancak bu değerden sonra yayılma değerlerinde ufak artışlar gözlemlendiği, hatta % 1'lik orandan sonra yayılma değerlerinin değişmediği görülmüştür.

- Akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkıda katkı miktarı arttıkça priz süresinin de arttığı görülmüştür. Aynı şekilde priz geciktirici katkıda da beklendiği gibi priz başlama süresi kontrol karışımına göre artmıştır. % 5'lik katkı oranında priz başlama zamanında kontrol karışımına göre 4 saat 19 dakikalık bir gecikme yaşanmıştır. Priz hızlandırıcı katkıda ise artan katkı oranı ile doğru orantılı olarak priz süresinin de kısaldığı görülmektedir. En radikal değişimler hava sürükleyici katkıda gözlemlenmektedir. Önerilen katkı dozajı olan % 0.1'lik oranda bile (5:12) prizin kontrol karışımına ile karşılaştırıldığında (2:59) 3 saat 13 dakika geç başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum % 2'lik katkıda (7:13) ise 4 saat 14 dakikalık priz başlangıç süresi artışına denk gelmektedir.

- Priz bitiş süreleri incelendiğinde priz başlangıç sürelerine benzer sonuçlar görülmektedir. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz geciktirici katkılarda, dozaj arttıkça priz bitiş süresinin de uzadığı görülmektedir. Priz hızlandırıcı katkıda ise beklendiği şekilde priz bitiş süresinin katkı dozajı arttıkça azaldığı görülmektedir. Yine benzer şekilde en radikal değişimler hava sürükleyici katkıda gözlemlenmektedir. Önerilen katkı dozajı olan % 0.1 dozajda dahi (6:45) prizin kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında (3:59) 3 saat 46 dakika geç bittiği gözlemlenmiştir.

- Akışkanlaştırıcı katkı ve priz geciktirici katkının harç içerisine birbirine benzer miktarlarda hava sürüklediği, %5'lik katkı oranında kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında 2.5 kat daha fazla hava sürüklendiği gözlemlenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkı ise akışkanlaştırıcı katkıdan daha yüksek miktarlarda olmak üzere, dozaj artımı ile doğru orantılı olarak harç içerisine hava sürüklemektedir. Deney sonuçlarına göre priz hızlandırıcı katkının hava sürükleme özelliğinin olmadığı söylenebilir. Hava sürükleyici katkının taze harç içerisine % 0.1'lik dozajda dahi % 7.5 oranında hava sürüklediği, bu miktarın % 2'lik katkı oranında % 12.5 seviyelerine çıktığı görülmüştür. Ancak hava sürükleyici katkıda hava sürükleme hızının % 0.5'lik orandan sonra ciddi şekilde azaldığı görülmektedir. Bu orandan sonra, deney sonuçlarına göre, katkı miktarını arttırmanın pratik olarak hiçbir yararı bulunmamaktadır.

- Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkılar için katkı dozajı arttıkça sertleşmiş birim ağırlık azalmış, ancak süperakışkanlaştırıcı katkıda birim ağırlıktaki azalma daha fazla gerçekleşmiştir. Priz hızlandırıcı dozajı ile sertleşmiş

birim ağırlığın ilişkili olmadığı, dozaj arttıkça sertleşmiş birim ağırlığın değişmediği görülmüştür. Priz geciktirici katkıda ise sertleşmiş birim ağırlığın % 1 seviyesine kadar düştüğü ancak bu dozajdan sonra sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin değişmediği görülmüştür. Bu durumun priz geciktirici katkının hava sürüklenme potansiyelinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hava sürükleyici katkıda % 1 katkı oranına kadar birim ağırlık değerlerinin hızlı bir şekilde düştüğü, ancak % 1 oranından sonra dozaj artışının sertleşmiş birim ağırlığı hemen hemen değiştirmedeği görülmüştür.

- Priz hızlandırıcı katkıda ultrases geçiş hızı değerlerinde kayda değer bir değişim görülmezken, akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkıda ultrases geçiş hızı değerlerinin az miktarda azaldığı, ancak priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıda ultrases geçiş hızı değerlerinin ciddi şekilde azaldığı görülmüştür.

- Kılcal su emme deney sonuçlarına göre tüm katkı çeşitlerinde, katkı dozajı arttıkça kılcal su emme miktarlarının arttığı görülmüştür. Hava sürükleyici katkılı betonların içindeki boşluklu yapının betonun kılcal su emme özeliğine direkt olarak etki ettiği açıktır, deney sonuçlarına göre de bu katkı çeşidinin kılcal su emme yönünden en hassas katkı olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu katkı kullanılarak üretilen betonlarda kılcal su emme potansiyeli göz önünde bulunarak tasarım/hesaplama yapılmalıdır.

- Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin eğilme dayanımlarında optimum dozajlarda az da olsa bir artış olduğu, ancak yüksek dozajlarda dayanım kayıpları olduğu, priz hızlandırıcı katkı kullanılan numunelerin eğilme dayanımı ile katkı dozajı arasında bir ilişki bulunmadığı, katkı dozajı değişse de eğilme dayanımının değişmediği, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkı kullanılan numunelerde ise eğilme dayanımlarının her dozajda azaldığı görülmüştür.

- Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz geciktirici katkı kullanılan numunelerde optimum dozajda basınç dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici katkıların yüksek dozajlarında ise ciddi dayanım kayıpları olduğu görülmüştür. Tasarımlarda önemli yeri bulunan basınç dayanımı parametresinin katkı dozajı ile ciddi oranda değişmesi bu

katkılarının kullanımında ne derece dikkatli olunması gerçeğini ortaya koymaktadır. Buna karşın priz hızlandırıcı katkıda dozaj miktarının dayanımı etkilemediği belirlenmiştir.

- Basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimini incelendiğinde; tüm katkıları için optimum dozajda sürekli ve büyük oranlarda basınç gelişimi gözlemlendiği, optimum dozajdan sonra dayanım kazanma hızının düştüğü, yüksek dozajlarda ise basınç dayanımı kazanma hızının iyice azaldığı ve hatta durduğu gözlemlenmiştir.

- Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerin X-ışını difraktometre sonuçlarında; çimento ana oksitlerinden olan alite ve belite miktarlarının katkı miktarı arttıkça az miktarda da olsa arttığı, bunun ise çimentonun olması gerektiği gibi yeterli miktarda reaksiyona giremeyip CSH jellerini oluşturamamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Ayrıca diğer fazlar açısından bakıldığında, hidrasyon ürünü olan tobermorite jellerinin (CSH) ve portlandite'in (CH) katkı miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu durum yukarıda açıklanan çimento hidrasyonu olayını doğrular niteliktedir. Priz hızlandırıcı katkı için katkı miktarı arttıkça alite, belite, portlandite ve tobermorite fazlarında ciddi değişimler oluşmadığı görülmektedir. Priz geciktirici mineralojik analizinde ise diğer katkılı harçlarda bulunmayan ciddi miktarda Sodyum Hidroksit belirlenmiştir. Priz geciktirici katkılı harçların yüksek dozajdaki dayanım kaybının bu sodyum hidroksit fazından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hava sürükleyici katkı mineralojik analiz sonuçlarında ise priz hızlandırıcıya benzer şekilde, katkı dozajı artsa da mineralojik içeriklerde ciddi değişimler gözlemlenmemektedir. Bu katkıdaki dayanım kayıplarının içyapı faz değişimlerinden ziyade numuneler içindeki yoğun boşluk oranından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

- SEM incelemelerine göre akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkılarda yüksek dozajda katkı kullanılması durumunda harç numunelerinin içerisine hava sürüklendiği, numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini bu boşluklu yapının etkilediği görülmüştür. Priz hızlandırıcı katkının yüksek dozajlarında mekanik özelliklerde olduğu gibi içyapıda da herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Priz geciktirici katkıda akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkılarda olduğu gibi yüksek dozajlarda boşluklu yapı gözlemlenmiş ancak bunun yanında CSH oluşumunda da ciddi azalmalar olduğu belirlenmiştir. Hava sürükleyici katkının dozaj değişimlerinde ise

boşluklu yapı irdelenmiş ve yaklaşık % 0.5'lik katkı miktarından sonra harç numuneleri içerisindeki hava boşluğu miktarında dozaj artsa da hava boşluğunun buna paralel olarak artmadığı görülmüştür. Ayrıca yine hava sürükleyici katkılarda CSH oluşumu incelenmiş ve katkının CSH oluşumunu etkilemediği görülmüştür.

- Elde edilen basınç dayanımı sonuçları kullanılarak Yapay sinir ağları modeli oluşturulmuş ve modele katkı dozajı girilerek istenilen yaştaki basınç dayanımı sonucunun yüksek başarı düzeyi ile deney yapmadan tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde, kimyasal katkıların yüksek dozajda kullanımı durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayıplar yaşanacağı ve bu nedenle kimyasal katkı kullanımında hassasiyet gösterilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle özellikle kimyasal katkıların kontrolsüz bir şekilde şantiye ortamında kullanılmasının önüne geçilmeli ve kimyasal katkı beton üretiminde hassas bir şekilde beton santralinde kullanılmalıdır. Her ne kadar yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımının betonun özelliklerini olumsuz etkilediği, bu nedenle yüksek dozajdan kaçınılması gerektiği bu çalışmada saptanmış olsa da bundan sonraki çalışmalarda betonun dayanıklılığına (yüksek sıcaklık, donma çözülme, vb) yönelik incelemeler ile kimyasal katkıların birlikte kullanılması durumunda (katkılarının etkileşimi) betonda oluşacak etkilere yönelik araştırmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agarwal, S. K., Masood, I., 1995, Water-reducing agent from coal tar waste. *Construction and Building Materials*, 9(3), 131–133.
- Agarwal, S. K., Masood, I., Malhotra, S. K., 2000, Compatibility of superplasticizers with different cements. *Construction and Building Materials*, 14(5), 253–259.
- Aggelis, D. G., Paipetis, A. S., 2012, Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound. *Construction and Building Materials*, 26(1), 755–760.
- Aggoun, S., Cheikh-Zouaoui, M., Chikh, N., Duval, R., 2008, Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages. *Construction and Building Materials*, 22(2), 106–110.
- Akca, A. H., 2011, The effects of polypropylene fiber and air entraining admixture addition on high performance concrete exposed to elevated temperatures. M.Sc. thesis, Boğaziçi University, 135 p. (unpublished).
- Akca, A. H., Zihnioğlu, N. Ö., 2013, High performance concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 44, 317–328.
- Anonim, 2014, Concrete Admixtures Market by Type - Global Trends and Forecast to 2019. <http://www.researchandmarkets.com/research/6psp98/concrete>, erişim tarihi: 11.01.2016
- Aras, U., 2013, Pomza tozu ve akışkanlaştırıcı kullanımının çimentolu yonga levhaların bazı özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 117 s. (yayımlanmamış).
- ASTM C597, 2002, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International.
- ASTM C666, 2008, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International.
- ASTM C1202, 2012, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International.
- ASTM C1588, 2013, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International.
- Ataş, Z., 2013, Hava sürükleyici ve lif katkısı içeren çimento harçlarının donma-çözülme etkisi altında mekanik davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, 102 s. (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Aytaç, A. H., 2006, Portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisi. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 220 s. (yayımlanmamış).
- Başkoca, A., 1995, Priz geciktirici katkıların uzun süre karıştırılmış beton özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 70 s. (yayımlanmamış).
- Bekem, İ., 2014, Kimyasal katkı maddelerinin betonun yüksek sıcaklığa dayanıklılığı üzerine etkileri. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, 167 s. (yayımlanmamış).
- Chang, D. Y., Chan, S. Y. N., Zhao, R. P., 1995, The combined admixture of calcium lignosulphonate and sulphonated naphthalene formaldehyde condensates. *Construction and Building Materials*, 9(4), 205–209.
- Corr, D. J., Lebourgeois, J., Monteiro, P. J. M., Bastacky, S. J., Gartner, E. M., 2002, Air void morphology in fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1025–1031.
- Das, S. K., Sharma, A. K., Parida, F. C., Kasinathan, N., 2009, Experimental study on thermo-chemical phenomena during interaction of limestone concrete with liquid sodium under inert atmosphere. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3375–3381.
- Dedeoğlu, R. Ş., 2010, Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin beton üzerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, 65 s. (yayımlanmamış).
- Demir, M., 2001, Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin su/ çimento oranı ve beton performansına etkileri. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, 66 s. (yayımlanmamış).
- El-Didamony, H., Sharara, A. M., Helmy, I. M., El-Aleem, S. A., 1996, Hydration characteristics of β -C2S in the presence of some accelerators. *Cement and Concrete Research*, 26(8), 1179–1187.
- El-Mekkawi, S. a., Ismail, I. M., El-Attar, M. M., Fahmy, A. a., Mohammed, S. S., 2011, Utilization of black liquor as concrete admixture and set retarder aid. *Journal of Advanced Research*, 2(2), 163–169.
- Emoto, T., Bier, T., 2007, Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 647–654.
- Erdoğan, T. Y., 2003, Beton (1. Baskı). ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., s.156.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E., Pellegrino, C., 2014, Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 73, 407–416.
- Gül, T., 2011, Cam elyaf ve hava sürükleyici katkı kullanılarak geliştirilmiş kerpiç. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, 87 s. (yayımlanmamış).
- Gürsoy, G., 2003, Farklı Akışkanlaştırıcı Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, 98 s. (yayımlanmamış).
- Han, J. G., Wang, K. J., Shi, J. Y., Wang, Y., 2014, Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties. *Construction and Building Materials*, 64, 342–349.
- Han, M. C., Han, C. G., 2010, Use of maturity methods to estimate the setting time of concrete containing super retarding agents. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 164–172.
- Hemalatha, T., Gunavadhi, M., Bhuvaneshwari, B., Sasmal, S., Iyer, N. R., 2015, Characterization of micro- and nano- modified cementitious system using micro analytical techniques. *Cement and Concrete Composites*, 58, 114–128.
- İlkenntapar, S., 2013, Kimyasal katkı içeren alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının farklı kür koşulları altındaki özellikleri. Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, 68 s. (yayımlanmamış).
- Jumadurdiyev, A., Ozkul, M. H., Sağlam, A. R., Parlak, N., 2005, The utilization of beet molasses as a retarding and water-reducing admixture for concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 874–882.
- Justnes, H., Nygaard, E. C., 1995, Technical calcium nitrate as set accelerator for cement at low temperatures. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1766–1774.
- Kamoun, A., Jelidi, A., Chaabouni, M., 2003, Evaluation of the performance of sulfonated esparto grass lignin as a plasticizer–water reducer for cement. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 995–1003.
- Karakoç, M. B., 2010, Hafif agreganın ve hava sürükleyici katkı maddesinin yüksek dayanımlı betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisinin incelenmesi ve modellenmesi. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, 211 s. (yayımlanmamış).
- Kıvanç, H., 2006, Süper akışkanlaştırıcı katkıların sualtı betonu özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 98 s. (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Łaźniewska-Piekarczyk, B., 2013, The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 659–671.
- Lee, N. K., Lee, H. K., 2013, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.
- Marwat, B. K., 2000, Şekerin farklı çimento priz süresine etkisi. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 165 s. (yayımlanmamış).
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., 2001, *Microstructure , Properties and Materials*, p.112.
- Min, T.-B., Cho, I.-S., Park, W.-J., Choi, H.-K., Lee, H. -S., 2014, Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening accelerator and high early strength cement. *Construction and Building Materials*, 64, 208–214.
- Minocha, A. ., Jain, N., Verma, C., 2003, Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1695–1701.
- Moralıoğlu, O., 2015, Kimyasal katkı-biyopolimer uyumunun çimento harcı özelliklerine etkisinin kitin özelinde incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, 90 s. (yayımlanmamış).
- Nagrockiene, D., Pundienė, I., Kicaite, A., 2013, The effect of cement type and plasticizer addition on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 45, 324–331.
- Ng, S., Justnes, H., 2015, Influence of dispersing agents on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high loading of calcined marl. *Cement and Concrete Composites*, 65.
- Nocuń-Wczelik, W., Czapik, P., 2013, Use of calorimetry and other methods in the studies of water reducers and set retarders interaction with hydrating cement paste. *Construction and Building Materials*, 38, 980–986.
- Papo, A., Piani, L., 2004, Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2097–2101.
- Parlak, N., Akman, M. S., 2002, Linyosülfonatların Üretimi, Özellikleri ve Süper Akışkanlaştırıcı Olarak Geliştirilmesi. *Sika Teknik Bülten*, 1, 3–13.
- Polat, R., 2007, Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, 115 s. (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ramachandran, V. S., 1996, Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science, and Technology. Elsevier, p.112-115.
- Ramachandran, V. S., Malhotra, M., 1984, Concrete Admixtures Handbook-Part 7: Superplasticizers. Noyes Publications, p.410.
- Sathya Narayanan, J., Ramamurthy, K., 2012, Identification of set-accelerator for enhancing the productivity of foam concrete block manufacture. Construction and Building Materials, 37, 144–152.
- Seçer, O., 2008, Yüksek sıcaklık etkisinden hasar görmüş lifli, hava sürükleyici katkılı ve perlit agregalı betonların dayanım özellikleri ve GFRP ile onarımı ve güçlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, 120 s. (yayımlanmamış).
- Serinoğlu, Y. N., 2011, Normal ve süper akışkanlaştırıcı katkı miktarının taze beton ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri. Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 113 s. (yayımlanmamış).
- Şahin, Y., 2013, Hava sürükleyici katkıların karakterizasyonu ve deney koşullarının betonun donma-çözülme hasarına etkisi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 204 s. (yayımlanmamış).
- Topçu, İ. B., Ateşin, Ö., 2016, Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. Construction and Building Materials, 120, 189–197.
- Topçu İ. B., Ateşin, Ö., Uygunoğlu, T., 2017, “Effect of High Dosage Air-Entraining Admixture Usage on Micro Concrete Properties”, EJENS 2 (European Journal of Engineering and Natural Sciences) (2017), 1-11.
- Topçu, İ. B., Ateşin, Ö., Uygunoğlu, T., 2017, Effect of High Dosage Air-Entraining Admixture Usage on Micro Concrete Properties. EJENS (European Journal of Engineering and Natural Sciences), 2(1), 1–11.
- Topçu İ. B., Ateşin, Ö., Uygunoğlu, T., 2016, “Effect of High Dosage Air-Entraining Admixture Usage on Micro Concrete Properties”, 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016), Sarajevo.
- TS 1247, 1984, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (normal hava koşullarında), Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-1, 2016, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 1015-3, 2000, Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12350-6, 2010, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12390-3, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12390-7, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 480-1, 2014, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Deneyler için şahit beton ve şahit harç, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 480-2, 2008, Kimyasal katkılar-Beton, harç ve şerbet için-Deney metotları-Bölüm 2: Priz süresi tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 480-5, 2008, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - Bölüm 5: Kılcal su emme tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 934-2, 2013, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü.
- Türkel, S., Felekoğlu, B., 2004, Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 79–91.
- Uludoğan, H., 2001, Uzun süre etkili priz geciktirici katkının portland çimentolu harç özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 100 s. (yayımlanmamış).
- Uysal, M., Yılmaz, K., 2012, Aşırı dozda akışkanlaştırıcı katkı kullanımının beton özelliklerine etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, XXV(1), 19–35.
- Üstüner, D. T., 2009, Effectiveness of set accelerating admixtures with different cement types. M.Sc. thesis, Middle East Technical University, 131 p. (unpublished).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wallevik, O. H., Feys, D., Wallevik, J. E., Khayat, K. H., 2015, Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 100–109.
- Yamada, K., Yanagisawa, T., Hanehara, S., 1999, Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizers for highly fluid concrete. *First International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Rilem Publications, S.A.R.L., 437–448.
- Yaşar, S., 2008, Polipropilen lifli, hava sürükleyici katkı ve yöresel hafif agregalarla üretilen yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklıklar altında bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, 170 s. (yayımlanmamış).
- Yegün, Y., 2009, Donma-çözülme hasarına hafif agreganın, hava sürükleyici katkının ve donma-çözülme yönteminin etkisi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, 132 s. (yayımlanmamış)
- Yücesoy, S., 1993, Süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin portland çimento harçlarının rötresine etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 93 s. (yayımlanmamış)
- Zhang, M.-H., Sisomphon, K., Ng, T. S., Sun, D. J., 2010, Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1700–1707.

ÖZGEÇMİŞ

Özgün ATEŞİN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Batı Meşelik, ESKİŞEHİR
Tel : (0533) 655 99 25



ÖZGÜN ATEŞİN'İN ÖZGEÇMİŞİ

1978 yılında İzmir'de doğdu. İlk öğrenimini İzmir Zafer İlkokulunda 1985-1990, orta öğrenimini 1990-1992 yılları arasında İzmir Mustafa Kemal Lisesi orta bölümünde tamamladı. 1992 yılında İzmir Atatürk Lisesinde başladığı eğitimini 1995 yılında tamamladı. 1999'da İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1999 yılında İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Hidrolik, Hidroloji ve Su Kaynakları yüksek lisans programına başladı. Prof. Dr. Ferhat Türkman danışmanlığında "Economical Analysis of Power Generating Systems" konulu İngilizce yüksek lisans tezini hazırladı ve 2003 yılında bu programdan mezun oldu. 2011 yılında girdiği Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı Yapı Malzemesi doktora programında ders ve yeterlilik aşamasını tamamladı. Prof. Dr. İlker Bekir Topçu danışmanlığında hazırladığı doktora tez çalışmasının başlığı "Yüksek Dozajda Kimyasal Katkı Kullanımının Mikro Beton Özelliklerine Etkisinin Analizi ve Modellenmesi" dir. Danışmanı Prof. Dr. İlker Bekir Topçu ile birlikte hazırladığı, 2 yurtdışı hakemli dergi makalesi, 1 uluslararası hakemli dergi makalesi, 1 yurtiçi hakemli dergi makalesi, 2 uluslararası konferanslarda sunulmuş bildirisi ve 1 aktüel yazısı bulunmaktadır.