DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN LİF TAKVİYELİ HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI İLE ADERANS ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Vedat SARUHAN

Nisan, 2022

İZMİR

EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN LİF TAKVİYELİ HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI İLE ADERANS ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı

Vedat SARUHAN

Nisan, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

VEDAT SARUHAN, tarafından **PROF.DR. BURAK FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan **"EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN LİF TAKVİYELİ HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI İLE ADERANS ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Burak FELEKOĞLU

Yönetici

Doç. Dr. Ali MARDANİ	Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Bahadır KESKİN
Jüri Üyesi	Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek bilgisi gerek pozitif bakış açısıyla her türlü deneyimlerini paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Burak Felekoğlu'na,

Yüksek lisans tezim ve proje kapsamında hiçbir desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu'na,

Yüksek lisans tezim ve proje kapsamında gerek bilgisiyle gerek laboratuvardaki çalışmalarımda hiçbir desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Muhammer Keskinateş'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma 2021.KB.FEN.036 numaralı ve 'Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilen Lif Takviyeli Harçların Reolojik Davranışı ile Aderans Özellikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi' konusu ile Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Daire başkanlığı tarafından finanse edilmektedir. Yüksek lisans tezi kapsamında desteklerini esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Vedat SARUHAN

EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN LİF TAKVİYELİ HARÇLARIN REOLOJİK DAVRANIŞI İLE ADERANS ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Geleneksel beton dökümüyle kıyaslandığında ekstrüzyon yöntemi; kalıp kullanılmaması, hızlı imalata olanak sağlaması, ekonomik olması, karmaşık mimari şekillerde üretim potansiyeli kazandırması gibi nedenlerle üreticiye avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle ekstrüzyon yöntemi ile ilgili akademik çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Yapısal performansın geliştirilmesi açısından özellikle lifli karışım tasarımları son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Tez kapsamında hem ikili hem de üçlü bağlayıcılı sistemlerde HTPP (yüksek dayanımlı polipropilen) lif kullanılarak çimento esaslı ekstrüde/inşa edilebilir kompozit tasarımları yapılmıştır. Literatür bilgileri ışığında ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterleri tanımlanmış ve söz konusu şartları sağlayan harç karışımları için taze halde yayılma çapları belirlenmiştir. Bu karışımların hem rotasyonel reometre hem de Vicat cihazının sonda aparatıyla ile taze hal reolojik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, ekstrüzyon tabancası boyunca harcın maruz kaldığı kayma hızı ve harcın tepkisi reometre ile simüle edilmiştir. Ekstrüde edilmiş örneklerin sertleşmiş halde birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin 7. ve 28. günde basınç, eğilme ve tabakalar arası aderans dayanımları belirlenmiştir. Tabakalar arası aderans dayanımları üç farklı "tabakalar arası bekleme süresi (0 dk, 30 dk. ve 1 gün)" uygulanarak ayrı ayrı belirlenmiştir. Ayrıca tabakalar arası aderans dayanımları hem çekme-koparma (pull-off) hem de doğrudan çekme yöntemiyle belirlenmiş ve bu iki metod arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: 3B ekstrüzyon yöntemi, ekstrüde/inşa edilebilirlik, taze hal reolojik özellikler, mekanik özellikler, kompozit

THE RELATİONSHİP BETWEEN RHEOLOGİCAL BEHAVİOR AND ADHERENCE PROPERTİES OF FİBER-REİNFORCED MORTARS PRODUCED BY EXTRUSİON METHOD

ABSTRACT

The extrusion method, compared to conventional concrete casting, provide advantages to the manufacturer due to reasons such as mold free applicability, fast production possibility, being economical, and providing production potential in complex architectural shapes. The number of academic studies on the extrusion method is increasing day by day due to this reason. In terms of improving structural performance, fiber reinforced mixture designs become popular in recent years. Within the scope of the project, extrudable/buildable composite designs were produced by using HTPP (high tenacity polypropylene) fiber in both binary and ternary binder systems. In the light of the literature knowledge, extrudability criteria were defined and slump-flow values were determined for mortar mixtures meeting these requirements. The fresh state rheological properties of these mixtures were investigated with both a rotational rheometer and a probe apparatus of Vicat device. In addition, the shear rate and the response of the mortar throughout the extruder have been simulated with a rheometer. The hardened unit volume weights of extruded specimens were measured. The compressive, flexural and interlayer bond strengths of specimens were determined at 7th and 28th days. The interlayer bond strengths between the layers were individually determined by applying three different "interlayer waiting times (0 min, 30 min. and 1 day)". In addition, the bond strengths between layers were determined by both pull-off and uniaxial direct test methods, and the relationship between these two methods was investigated.

Keywords: 3D extrusion method, extrudability/buildability, fresh state rheological properties, mechanical properties, composite

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xiii

BÖLÜM BİR-GİRİŞ 1

1.1 Tarihçe 2
1.2 Avantajları/Dezavantajları 3
1.3 Harçların Taze Hal Reolojik Özellikleri ve Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özellikleri Arasındaki İlişki 4
1.3.1 Malzemelerin, Harçların Taze Hal Reolojik Özellikleri ile Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerine Etkisi: 5
1.3.1.1 Çimento Etkisi 5
1.3.1.2 Puzolan Etkisi 10
1.3.1.3 Agrega Etkisi 12
1.3.1.4 Lif Etkisi 16
1.3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Etkisi 19
1.3.1.6 Viskozite Düzenleyici Katkı Etkisi 21
1.4 Sertleşmiş Hal Özellikleri 27
1.4.1 Basınç ve Eğilme Dayanımları 28
1.4.2 Tabakalar Arası Aderans Dayanımları 32

BÖLÜM İKİ-MALZEME, METOD VE KAPSAM 35

2.1 Kullanılan Malzemeler 35
2.2 Karışımların Hazırlanması ve Örnek Alımı 35
2.3 Metod 38
2.3.1 Taze Hal Deneyleri 39

2.3.1.1 Karışımların Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi ……..39
2.3.1.2 Mini Yayılma Deneyleri 40
2.3.1.3 Reolojik Parametrelerin Ölçümü. 40
2.3.1.3.1 Rotasyonel Reometre Deneyleri..... 40
2.3.1.3.2 Vicat Sonda Aparatı Yardımıyla Penetrasyon Derinliği ve Hızının Ölçümü. 42
2.3.1.4 Ekstrüzyon Tabancası Boyunca Akışın Reometre Tabanlı Simülasyon ……...43
2.3.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri 44
2.3.2.1 Birim Hacim Ağırlık Deneyleri 44
2.3.2.2 Basınç ve Eğilme Deneyleri..... 45
2.3.2.3 Çekme Koparma Dayanımı (Tabakalar Arası Aderans) Deneyleri . 46
2.3.2.4 Tabakalar Arası Doğrudan Çekme Aderans Dayanımı 47
2.4 Kapsam..... 48
BÖLÜM ÜÇ-DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 49
3.1 İkili Sistemler ile Üretilen Karışımların Taze Hal Özellikleri 49
3.2 Üçlü Sistemler ile Üretilen Karışımların Taze Hal Özellikleri 51
3.2.1 Karışımların Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi 51
3.2.2 Mini Çökme Yayılma Çapları 53
3.2.3 Reolojik Parametreler..... 57
3.2.3.1 Rotasyonel reometre Yardımıyla Belirlenen Reolojik Parametreler 57
3.2.3.2 Vicat Sonda Aparatı Yardımıyla Belirlenen Reolojik Parametreler 61
3.2.3.3 Ekstrüzyon Tabancası Boyunca Akış Hareketinin Reometre Tabanlı Simülasyonu..... 63
3.2.4 Taze Hal Sonuçları Arasındaki ilişkiler..... 69
3.3 Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları..... 71
3.3.1 Birim Hacim Ağırlık deneyi 71
3.3.2 Basınç Dayanımları 72
3.3.3 Eğilme Dayanımları..... 73
3.3.4 Çekme-koparma (aderans) Dayanımları..... 79

3.3.5 Doğrudan Çekme Aderans Dayanımları 86
3.3.6 Çekme-koparma Aderans Dayanımları ile Taze Hal Özellikler Arasındaki İlişkinin İncelenmesi 89
3.3.7 Çekme-Koparma Aderans Dayanımları ile Doğrudan Çekme Aderans Dayanımları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi 93

BÖLÜM DÖRT-SONUÇLAR ve ÖNERİLER 95

KAYNAKÇA 100

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 a) Contour crafting yöntemiyle ilk duvar üretimi, b) ilk ofis üretimi c) köprü üretimi d) 5 katlı bina üretimi, e) BatıPrint şirketi, f) Cobod şirketi, g) Cybe Construction, h) SQ4D şirketlerine ait robotik yazıcılarla yapı üretimi 3
Şekil 1.2 Ekstrüzyon (D1, D2, D3) ve geleneksel yöntemle (T1, T2, T3) üretilen karışımların a) küresel ısınma (CO_2 salınımı); b) asitleştirme (SO_2 salınımı); c) fotokimyasal (C_2H_4 salınımı); d) ötrofikasyon (NOx (azot) salınımı) olayına çimento oranı etkisi 6
Şekil 1.3 a) KAÇ içermeyen; b) %7 KAÇ içeren karışımın inşa edilebilirlik testi 7
Şekil 1.4 Farklı karışımların priz süreleri ölçümü) 8
Şekil 1.5 a) çökme ve çökme-yayılma değerleri, b) viskozite geri dönüşümü, c) M3 karışımı örneği, d) M-S-H çimentosu ve Portland çimentosu ile hazırlanan karışımların taze hal dayanımı değerleri 9
Şekil 1.6 M40U60S10-4 karışım örneği 10
Şekil 1.7 %100 PÇ içeren karışıma a) UK, b) SD eklenmesi ile üretilen karışımların inşa edilebilirlik testleri 11
Şekil 1.8 a) Çökme-yayılma çapları, b) ekstrüde karışımlar 13
Şekil 1.9 Çökme-yayılma çapları 15
Şekil 1.10 Ekstrüzyon sonrası örneklerin formları a) B karışımı, b) D karışımı 17
Şekil 1.11 Lif oranı ve lif görünüm oranına bağlı olarak inşa edilebilirlik testi 18
Şekil 1.12 %0,5 oranında bazalt lif örneği 18
Şekil 1.13 Süperakışkanlaştırıcı oranına bağlı olarak inşa edilebilirlik değişimi 19
Şekil 1.14 Ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirliğin değerlendirilmesi 20
Şekil 1.15 a) Eşik kayma gerilmesi ve görünür eşik gerilmesi, b) İnşa edilebilirlik değişimi 21
Şekil 1.16 Ekstrüzyon sonrası VDK ilavesi ile örneklerin inşa edilebilirliklerindeki değişim 22
Şekil 1.17 Ekstrüde karışım örnekleri 24
Şekil 1.18 a) Gerilme-deformasyon eğrisi, b) Ekstrüde örnekler 24
Şekil 1.19 a) Geleneksel yöntemde izotropik özellik; b) Ekstrüzyon yöntemindeki anizotropik yapı 28

Şekil 1. 20 Basınç dayanımı deney sonuçları 29
Şekil 1.21 Eğilme dayanımları deney sonuçları 29
Şekil 1.22 a) Basınç; b) Eğilme dayanımları 30
Şekil 1.23 a) Basınç, b) Eğilme dayanımları 32
Şekil 1.24 Farklı ekstrüzyon süresi aralıklarında aderans dayanımlarındaki değişim 34
Şekil 2.1 İnce agrega tane boyut dağılımı 37
Şekil 2.2 a) Ekstrüzyon tabancası ile ekstrüzyon örneği b) Şekil koruma katsayısı için alt tabaka genişliğinin ölçülmesi 39
Şekil 2.3 a) Çalışma kapsamında kullanılan reometre cihazı, b) matris (lifsiz) c) kompozit (lifli) karışımların taze hal reolojik parametrelerin ölçümü için oluşturulan reometre modelleri 41
Şekil 2.4 a) Ekstrüzyon pompası ve başlık sistemi ile ekstrüzyon pompası boyunca kayma hızı değişimi, b) bilyalı reometre ve çalışma prensibi, c) Ekstrüzyon pompası boyunca harç için hesaplanan zamana bağlı kayma hızı modeli 44
Şekil 2.5 Arşimet terazisi ile birim hacim ağırlık deneyi 45
Şekil 2.6 a) Karot makinesi ile numune alımı, b) numune kesim cihazı, c) basınç deneyi cihazı 46
Şekil 2.7 Dört noktalı eğilme deneyi 46
Şekil 2.8 a) Karot makinesi ile numunelerde iz açma, b) Piyonların yapıştırılması, c) Çekme koparma cihazı ile aderans dayanımının ölçülmesi 47
Şekil 2.9 Doğrudan çekme test cihazı 48
Şekil 3.1 İkili sistemde ekstrüde edilebilen ancak inşa edilemeyen a) K1, b) K2, c) K3, d)K4, e) K5, f) K6 karışımlarına ait ekstrüzyon örnekleri 50
Şekil 3.2 Üçlü sistemlerde üretilen a) M1; b) M2; c) M3; d) M4 için ekstrüzyon örnekleri 52
Şekil 3.3 Üçlü sistemlerde üretilen a) M5; b) M6; c) M7; d) M8 için ekstrüzyon örnekleri 52
Şekil 3.4 Uçucu küllü üçlü sisteme (M1 karışımı) ait a) Serbest yayılma, b) 15 tabla düşürme sonrası, c) 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ölçümü 54

Şekil 3.5 Yüksek fırın cüruflu üçlü sisteme (M7 karışımı) ait d) Serbest yayılma, e) 15 tabla düşürme sonrası, f) 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ölçümü 55
Şekil 3.6 Lifli ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için şekil koruma katsayısı-yayılma çapları arasındaki ilişki 56
Şekil 3.7 a) M1, b) M2, c) M5, d) M6 için reometrede taze hal reolojik parametrelerin ölçümü 58
Şekil 3.8 Matris karışımlarının a) Eşik kayma, b) Viskozite grafikleri 60
Şekil 3.9 Vicat deneyi a) Vicat çubuğu düşürme öncesi, b) düşürme sonrası 61
Şekil 3.10 Zamana bağlı reometre tabanlı simülasyon analizi a) kayma hızı modeli b) kayma gerilmesi, c) viskozite değerleri 66
Şekil 3.11 Mini çökme yayılma katsayısı- Vicat sondasının 4 mm batması için geçen süre (rölatif viskozite) arasındaki ilişki 69
Şekil 3.12 %0,4 lifli karışımların (M2, M3, M6, M7) matrislerine ait eşik kayma gerilmesi değerlerinin a) kompozit (lifli) karışımlarının Vicat sondası batma derinliği, b) kompozit (lifli) karışımlarının mini çökme yayılma katsayıları ile ilişkisi 70
Şekil 3.13 %0,4 lifli karışımların (M2, M3, M6, M7) matrislerine ait viskozite değerlerinin a) kompozit (lifli) karışımlarının Vicat sondası batma derinliği, b) kompozit (lifli) karışımlarının mini çökme yayılma katsayıları ile ilişkisi 71
Şekil 3.14 Uçucu küllü karışımlarda a) M1 (UK0,8SB0,27L1,5), b) M2 (UK0,8SB0,27L0,4), c) M3 (UK0,8SB0,4L0,4) karışımları için 7. ve 28. gün eğilme grafikleri 75
Şekil 3.15 Yüksek fırın cüruflu karışımlarda a) M5 (YFC0,8SB0,27L1,5), b) M6 (YFC0,8SB0,27L0,4), c) M7 (YFC0,8SB0,4L0,4) karışımları için 7. ve 28. gün eğilme grafikleri 76
Şekil 3.16 a) M1, b) M2, c) M3, d) M5, e) M6, f) M7 karışımlarına ait çatlak gelişimi görselleri 78
Şekil 3.17 Çekme koparma (pull-off) a) 7. gün, b) 28. gün aderans dayanımları 81
Şekil 3.18 Uçucu küllü a) 7. gün, b) 28. gün ve yüksek fırın cüruflu karışımlara ait c) 7.gün ve d) 28. gün aderans dayanımları 82

Şekil 3.19 a) Numunelerin hazırlanması, b-c) Çekme-koparma aderans dayanımının ölçülmesi, d-e-f-g-h) çekme-koparma sonucu ara yüzey görünümü 85
Şekil 3.20 a) M1, b) M2, c) M3 karışımlarının doğrudan çekme aderans dayanımlarının ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak değişimi 88
Şekil 3.21 M1 karışımı için a) E.S. (Ekstrüzyon süresi) =0. dk., b) E.S.=30. dk., c) E.S.= 1. gün, M2 karışımı için d) E.S.=0. dk., e) E.S.=30. dk., f) E.S.= 1. gün, M3 karışımı için g) E.S.=0. dk., h) E.S.=30. dk., ı) E.S.= 1. gün için doğrudan çekme deneyleri örnekleri 89
Şekil 3.22 Aderans dayanımı-eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişki 90
Şekil 3.23 Aderans dayanımı-rölatif viskozite arasındaki ilişki 91
Şekil 3.24 Mini yayılma katsayısı-7. gün aderans dayanımları arasındaki ilişki..... 92
Şekil 3.25 Mini yayılma katsayısı-28. gün aderans dayanımları arasındaki ilişki..... 92
Şekil 3. 26 Ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak ölçülen a) M1, b) M2, c) M3 karışımları için doğrudan çekme aderans dayanımları ile çekme-koparma aderans dayanımları arasındaki ilişki 94

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Penetrasyon test cihazına bağlı olarak eşik kayma gerilmesi değerleri ölçümü 7
Tablo 1.2 Karışım tasarımları 9
Tablo 1.3 1 m^3 için karışım tasarımı 14
Tablo 1.4 Farklı agrega türleri için çevresel etkiler 14
Tablo 1.5 Karışım tasarımı 15
Tablo 1.6 Karışım oranları 17
Tablo 1.7 Karışım oranları 20
Tablo 1.8 Reolojik parametrelerin ölçümü 22
Tablo 1.9 Reolojik parametreler 23
Tablo 1.10 3B ekstrüde edilebilir harç örnekleri için taze hal reolojik parametreler 26
Tablo 1.11 Aderans dayanımı sonuçları 33
Tablo 2.1 Portland çimentosunun (CEM I 42,5 R), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (YFC), uçucu külün (UK) ve Metakaolinin (MK) kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri…. ……..36
Tablo 2.2 Viskozite düzenleyici katkı özellikleri 37
Tablo 2.3 Lif özellikleri 37
Tablo 2.4 Karışım oranları (Ağırlıkça) 38
Tablo 3.1 İkili sistemde hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik ve şekil koruma katsayıları……..49
Tablo 3.2 Üçlü sistemde üretilen karışımlara ait ekstrüde/inşa edilebilirlik ve şekil koruma katsayısı değerleri (karışım oranları Tablo 2.4'te görülebilir. 53
Tablo 3.3 Mini çökme yayılma çapları 54
Tablo 3.4 Lifsiz (matris) karışımlara ait yayılma çapları 56
Tablo 3.5 Matris karışımlarına ait reolojik parametreler 60
Tablo 3.6 Vicat batma derinliği ile elde edilen eşik kayma gerilmesi değerleri 63
Tablo 3.7 Ekstrüzyon borusu boyunca kritik noktalar için kayma gerilmesi ve viskozite değerleri ve bu çalışmada önerilen ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik katsayılarının belirlenmesi yöntemi 67

Tablo 3.8 Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlarda mini çökme yayılma katsayısı-rölatif viskozite arasındaki ilişki 69
Tablo 3.9 Ekstrüde/inşa edilebilir kompozit karışımların birim hacim ağırlıkları..... 72
Tablo 3.10 Basınç dayanımı değerleri 73
Tablo 3.11 Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait eğilme deneyi sonuçları 77
Tablo 3.12 Ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak doğrudan çekme aderans dayanımları değerleri..... 87

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Ekstrüzyon veya 3B (üç boyut) yöntemiyle yapı üretimi, malzemelerin bilgisayar destekli proje tasarımı programlarıyla üç boyutlu olarak imalatı prensibine dayanır. Üretim aşamasında kalıp kullanımına gerek kalmadan malzemeler üst üste bindirilen tabakalar şeklinde üretilir. Büyük ölçekli yapı üretiminde bilgisayar programında oluşturulan projelerin 3B yazıcı yardımı ile üretimi yapılabilmektedir. Böylece, karışımlar yazıcı yardımı ile programda belirlenen şekil ve boyutlarını koruyarak üretilebilir (Buswell, Soar, Gibb, ve Thorpe, 2007; Hague, Campbell ve Dickens, 2003). Söz konusu teorik yaklaşım, ekstrüde edilen malzemenin oluşturacağı tabakanın ilk andaki boyutlarının ön görülen değerlerde olduğu ve bu boyutlarını imalat sırasında sonraki tabakalar da eklendikçe koruyacağı ön kabulüne dayanır. Ancak pratikte, üretimde kullanılan kompozitin başlangıçtaki ve imalat süresi boyunca reolojik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler ön görülen boyutlarını koruyup koruyamaması hususunda kritik rol oynayacaktır.

Yapı sektöründe yeni bir uygulama alanı olan ekstrüzyon yöntemine uygun harç üretimi için, gerekli olan ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerinin aynı anda sağlanması gerekmektedir. Ekstrüde edilebilirlik, harç karışımının herhangi bir tıkanma, süreksizlik olmadan yazıcı pompa başlığından düzgün bir şekilde çıkmasıdır. İnşa edilebilirlik ise üretilen karışımların ekstrüzyon sonrasında herhangi bir çökme, düzensizlik vs. olmadan şeklini koruyabilmesidir. Bu bağlamda, kalıp kullanılmayacak olmasından dolayı, ekstrüzyon yönteminde taze haldeki karışımlar için ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerinin sağlanması temel ihtiyaç olmaktadır (Lu vd., 2019; Malaeb vd., 2015; Roussel, 2018).

1.1 Tarihçe

3B ekstrüzyon yöntemi; şu ana kadar uzay, otomotiv, yiyecek, biyomedikal, elektrik-elektronik vs. gibi endüstrilerde kullanılan, yapı endüstrisinde de gelişmekte olan bir uygulama alanıdır (Shahrubudin, Lee, Ramlan, 2019). Çimentolu sistemlerin kullanımı ile tabakalı döküm yöntemi ilk olarak Pegna (1997) tarafından incelenmiştir. Kum tabakası ve çimento tabakası ince katmanlar halinde buhar uygulanarak üstüste bindirilen katmanlar şeklinde uygulanmıştır. Ancak, yapı endüstrisinde tabakalı döküm yönteminin kullanım potansiyeli Khoshnevis ve Dutton (1998) tarafından "contour crafting" adı verilen yöntemle araştırılmıştır. Hwang ve Khoshnevis (2004) tarafından "contour crafting" yöntemiyle ilk duvar üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Apis Cor (2017) şirketi tarafından 38 m^2 alanı ile dünyanın ilk konut yapısı ve Dubai'de 640 m^2 alanı ile o yıl için 3B ekstrüzyon yolu ile üretilen dünyanın en büyük binası (Boissonneault, 2019), Winsun şirketi tarafından Dubai'de ilk ofis binası (ICPMA, 2018), Hollanda'da ilk köprü üretimi (Jaime, 2017), Çin'de ilk 5 katlı bina üretimi (McHale, 2017) gerçekleştirilmiştir. Apis Cor ve Winsun şirketleri dışında robotik kollardan oluşan büyük boyutlu yazıcılarla üretim yapan farklı şirketler de mevcuttur. Başlıca robotik yazıcılar ile üretim yapan şirketler; BatiPrint, Be More 3D, Wasp, Icon, Constructions 3D, Cobod, Cybe Construction, XtreeE, SQ4D vs. olmak üzere yapı pazarındaki yerini almaktadır. GE şirketi tarafından ilk defa 3B yöntemiyle 80 m yüksekliğinde rüzgâr türbini üretilmiştir (Kruger, 2020). Mevcut yöntemde otomatik üretim yapılabilmesi nedeniyle ay ve Mars yüzeylerinde uygulanma olanakları araştırılmaktadır (Ceccanti, Dini, Kestelier, Colla, Pambaguian, 2010). Ekstrüzyon yöntemine ait bazı uygulamalar Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 a) Contour crafting yöntemiyle ilk duvar üretimi (Apis Cor, 2017), b) ilk ofis üretimi (ICPMA, 2018) c) köprü üretimi (Jaime, 2017) d) 5 katlı bina üretimi (McHale, 2017), e) BatıPrint şirketi, f) Cobod şirketi, g) Cybe Construction, h) SQ4D şirketlerine ait robotik yazıcılarla yapı üretimi (Jaime, 2020)

1.2 Avantajları/Dezavantajları

Yapı endüstrisinde çimentolu malzemelerin kullanımı sadece enerji ve maliyet açısından değil, aynı zamanda çevresel etkisinden dolayı bir sorun olmaktadır. Söz konusu sorunlar yapı endüstrisinde ekstrüzyon yönteminin kullanımına olan ilgiyi arttırmıştır (Han, Yang, Ding ve Xiao, 2021). Mevcut yöntemde kalıp kullanımına gerek duyulmaması ve geleneksel yöntemde kalıp kullanımının ve kalıp işçiliğinin yapının toplam maliyetin yaklaşık olarak %35-54'ünü oluşturmasından dolayı ekstrüzyon yöntemi geleneksel yönteme göre zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayabilmektedir. Ayrıca, ekstrüzyon yönteminin atık üretiminin azalmasından dolayı sürdürülebilir ve çevreci olması, seri imalat, işçi kazaları ve işçilik kusurlarının azalması, düşük enerji tüketimi, farklı geometrik şekillerin rahat bir şekilde üretilebilmesi, 7/24 sürekli döküm yapabilmesi vs. gibi önemli avantajlara sahip olduğu rapor edilmiştir. (Agustí-Juan ve Habert, 2017; Jha, 2012; Paul, Van Zijl, Tan, Gibson, 2018; Sakin ve Kiroğlu, 2017; Buswell vd., 2007).

Yapı endüstrisinde yeni bir yöntem olan ekstrüzyon yönteminin bazı eksiklikleri veya dezavantajları da bulunmaktadır. Malzeme ve teknolojideki sınırlandırmalardan dolayı ekstrüzyon yöntemi küçük ölçekli yapılarda kullanılabilmektedir (Camacho

vd., 2018). Büyük ölçekli yapıların üretilmesi durumunda ise büyük boyutlu yazıcılar gerekeceği için sahada uygulanması daha zor ve maliyetli olabilir (Sakin ve Kiroğlu, 2017). Bir diğer dezavantaj ise geleneksel yöntemde kullanılan donatıların ekstrüzyon yönteminde kullanılamaması ve ekstrüzyon yönteminde üretilen tabakaların zayıf arayüzey dayanımına sahip olmasıdır. Bu yüzden, donatı eksikliğinden kaynaklanacak olan düşük çekme dayanımlarını geliştirme amacıyla lif kullanımının önemi artmaktadır (Mohan, Rahul, Schutter ve Tittelboom, 2021). Bir diğer önemli sorun ise tabakalar arasında soğuk derz oluşumudur. Soğuk derz, tabakalar arasında zayıf arayüzey dayanımının oluşmasına neden olur ki bu da istenmeyen bir durumdur (Nerella, Hempel, Mechtcherine, 2019; Wangler vd., 2016). Soğuk derz riski sadece mekanik açıdan bir tehlike yaratmakla kalmaz, aynı zamanda termal konfor ve nem kontrolü gibi problemleri beraberinde getirebilir.

1.3 Harçların Taze Hal Reolojik Özellikleri ve Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özellikleri Arasındaki İlişki

Yapı endüstrisinde kullanılan harç/beton kalıplara taze halde döküldüğü için taze hal reolojik özellikleri üretilen kompozit performansını doğrudan etkilemektedir. Taze hal reolojik özellikleri incelenirken dikkate alınan en önemli iki faktör eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitedir. Eşik kayma gerilmesi, harçların akışa geçebilmesi için gerekli minimum gerilme değeri iken (ilk harekete geçiş direnci), plastik viskozite ise harçların akışa geçtikten sonra akmaya karşı gösterdikleri direnç ile ilişkilidir. Karışımların söz konusu taze hal reolojik özellikleri bir rotasyonel reometreden elde edilen ham deneysel verilerin Bingham veya Herschel-Bulkley gibi modellerle işlenmesi sonucu elde edilmektedir (Ferraris, 1999; Roussel, 2018). Ekstrüzyon yönteminde önemli faktörler olan ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri; eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerlerinden önemli derecede etkilenmektedir (Zhang vd., 2018-a). Ekstrüde edilebilirlik için; karışımlar pompa içerisindeyken düşük viskozite gerekirken, ekstrüde edildikten sonra inşa edilebilirlik için ise yüksek eşik kayma gerilmesi değerine sahip olmalıdır. Eşik kayma gerilmesi ve viskozitenin başlangıçta çok yüksek olması durumunda ise pompada tıkanma

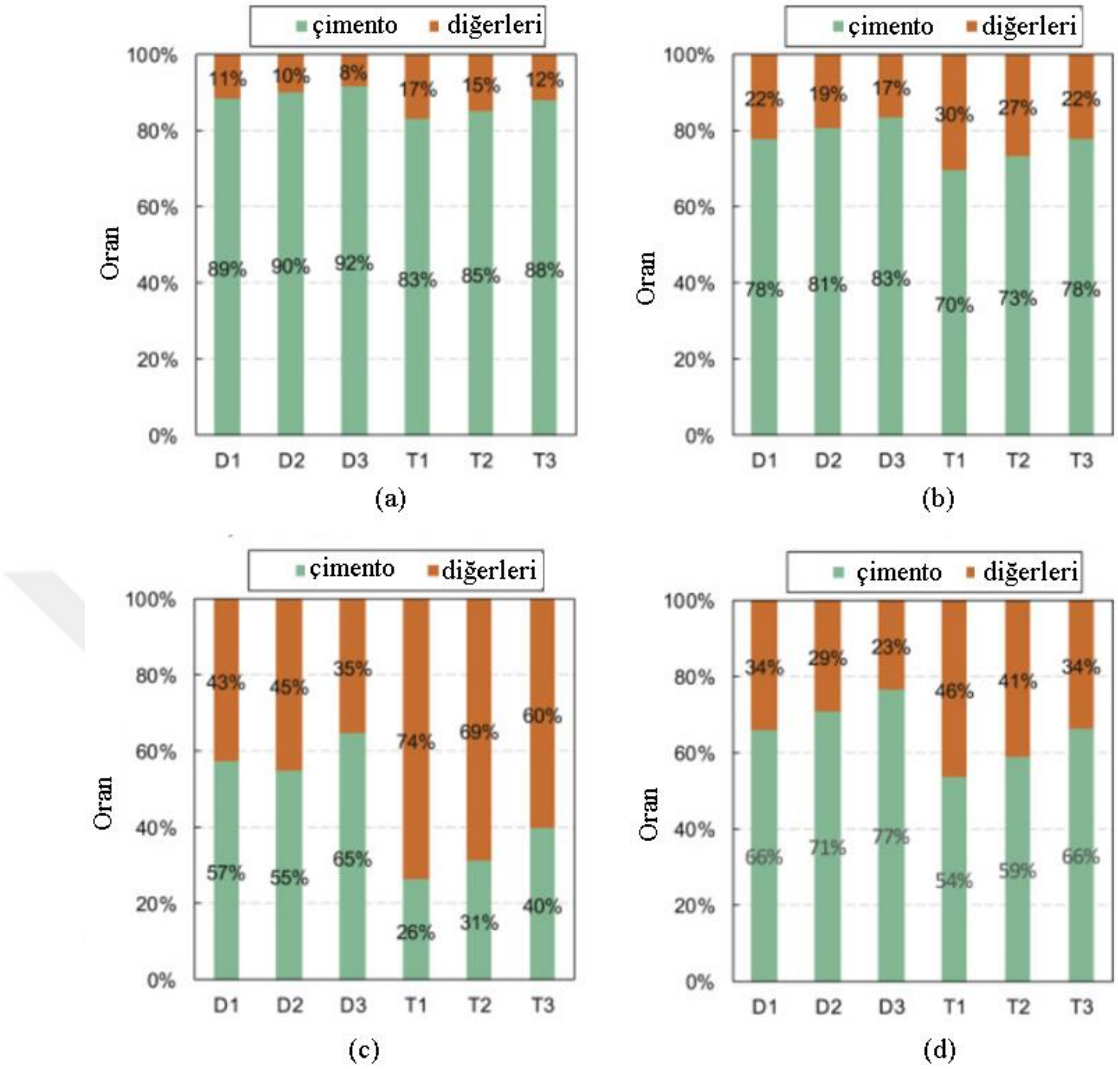
meydana gelir ve harçlar ekstrüde edilmesi güçleşir. Bu yüzden, ekstrüzyonun farklı aşamalarında, harç karışımlarının hem ekstrüde edilebilirlik hem de inşa edilebilirlik açısından uygun olduğu optimum eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerini sağlaması gerekir (Rahul, Santhanam, Meena ve Ghani, 2019).

Karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri ile bağlantılı diğer taze hal özellikleri çökme ve çökme-yayılma değerleridir. Tay, Qian ve Tan (2019)'a göre çökme değeri, statik eşik kayma gerilmesi ve dolayısıyla inşa edilebilirlik ile ilişkili iken, çökme-yayılma değeri, dinamik eşik kayma gerilmesi, viskozite ve dolayısıyla ekstrüde edilebilirlik ile bağlantılıdır. Çökme-yayılma çapı arttıkça ekstrüde edilebilirlik olumlu etkilenirken, ekstrüzyon sonrası düşük çökme değerinin elde edilmesi inşa edilebilirliği olumlu etkilenmektedir (Paul vd., 2019).

1.3.1 Malzemelerin, Harçların Taze Hal Reolojik Özellikleri ile Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerine Etkisi:

1.3.1.1 Çimento Etkisi

Ekstrüzyon yönteminde en çok kullanılan bağlayıcıların başında Portland çimentosu gelmektedir. Özellikle yüksek çimento içeriğinin düşük viskozite ve yüksek inşa edilebilirliğe yol açması nedeniyle ekstrüzyon yönteminde yüksek miktarda kullanılıldığı çalışmalara rastlanmaktadır (Hambach, Rutzen ve Volkmer, 2019). Ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerinin elde edilebilmesi için geleneksel kalıplama yöntemi ile üretilen betona kıyasla çimento dozajının arttırılması ekstrüzyon yöntemiyle üretilen karışımların çevresel etkisini olumsuz etkilemektedir (Şekil 1.2). Şekilde görüldüğü gibi çimento malzemesinin çevresel etkisi diğer malzemelere göre daha fazla iken, yüksek çimento içeriğinden dolayı ekstrüzyon yönteminin çevreye verdiği zarar geleneksel yönteme göre daha fazladır (Han vd., 2021). Yüksek Portland çimentosu dozajının getireceği büzülme kaynaklı çatlama problemleri de uygulamada dikkate alınmalıdır.



Şekil 1.2 Ekstrüzyon (D1, D2, D3) ve geleneksel yöntemle (T1, T2, T3) üretilen karışımların a) küresel ısınma (CO_2 salınımı); b) asitleştirme (SO_2 salınımı); c) fotokimyasal (C_2H_4 salınımı); d) ötrofikasyon (NOx (azot) salınımı) olayına çimento oranı etkisi (Han vd., 2021)

Portland çimentosu ile hızlı priz alan çimentoların birlikte veya alternatif bağlayıcı olarak kullanılması yoluyla inşa edilebilirliğin geliştirilmesi üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır. Aşağıdaki paragraflarda bu konudaki çalışmalar kısaca özetlenmiştir:

Khalil, Aouad, El Cheikh ve Rémond (2017) Portland çimentosu (PC)/kalsiyum alumina çimentosu (KAÇ) oranları sırasıyla 100/0 ve 93/7 olan iki farklı karışımın ekstrüde/inşa edilebilirliklerini araştırmıştır. Karışım oranı 100/0 olan karışımda 5. tabakadan sonra çökme gözlenirken, Portland çimentosu yerine %7 kalsiyum alumina

çimentosu içeren karışım (93/7) ise 30 tabaka şeklinde ekstrüde edilebilmiş ve h (yükseklik)= 5mm olan başlık ile 30 tabaka için 21cm yüksekliğinde malzeme ekstrüde edilebilmiştir (Şekil 1.3). Böylece, hızlı priz yapan kalsiyum alumina çimentosunun ekstrüde edilebilirliği etkilenmeden inşa edilebilirliği arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca, her iki karışımın ise Vicat test cihazının sonda aparatı yardımı ile batma derinliği esas alınarak ampirik formüller yardımıyla eşik kayma gerilmesi değerleri 10-45. dakika arasında hesaplanmıştır (Tablo 1.1). Çalışma sonucunda %7 kalsiyum alumina çimentosu içeren karışımın eşik kayma gerilmesindeki hızlı değişimin inşa edilebilirliği olumlu etkilediği ifade edilmiştir.



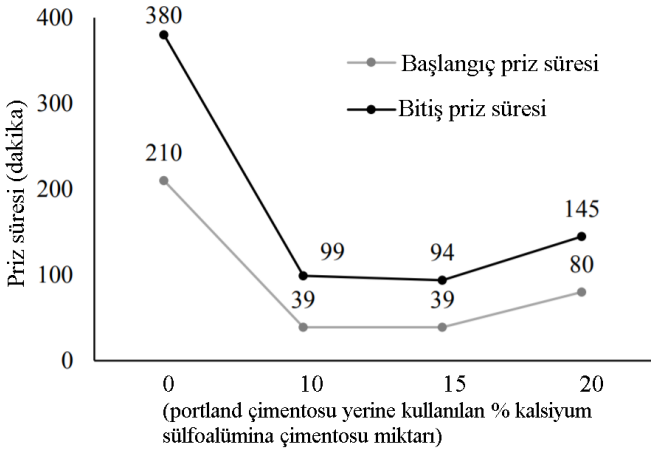
Şekil 1.3 a) KAÇ içermeyen; b) %7 KAÇ içeren karışımın inşa edilebilirlik testi (Khalil, Aouad, El Cheikh ve Rémond, 2017)

Tablo 1.1 Penetrasyon test cihazına bağlı olarak eşik kayma gerilmesi değerleri ölçümü (Khalil vd., 2017)

Zaman (dakika)	PC/KAÇ= 100/0		PC/KAÇ=93/7	
	Penetrasyon derinliği (mm)	Eşik kayma gerilmesi (Pa)	Penetrasyon derinliği (mm)	Eşik kayma gerilmesi (Pa)
10	38		35	2730
15	36.5	2618	2	47771
20	35	2730	1	95541
25	30.5	3133	1	95541
30	16	5971	1	95541
45	2.5	38217	1	95541

Van Der Putten, Azima, Lesage, Schutter ve Tittelboom (2019) tarafından %100 Portland çimentosu ve Portland çimentosu yerine %10, 15, 20 oranında kalsiyum sülfoalümina çimentosu kullanarak hazırlanan karışımların başlangıç ve bitiş priz sürelerini NF EN 480-2 standardına göre ölçmüştür (Şekil 1.4). Çalışma sonucunda, kalsiyum sülfoalümina çimentosunun eklenmesi ile karışımların başlangıç ve bitiş priz

sürelerinin kısaldığı, böylece karışımların inşa edilebilirliklerinin geliştiği ifade edilmiştir.



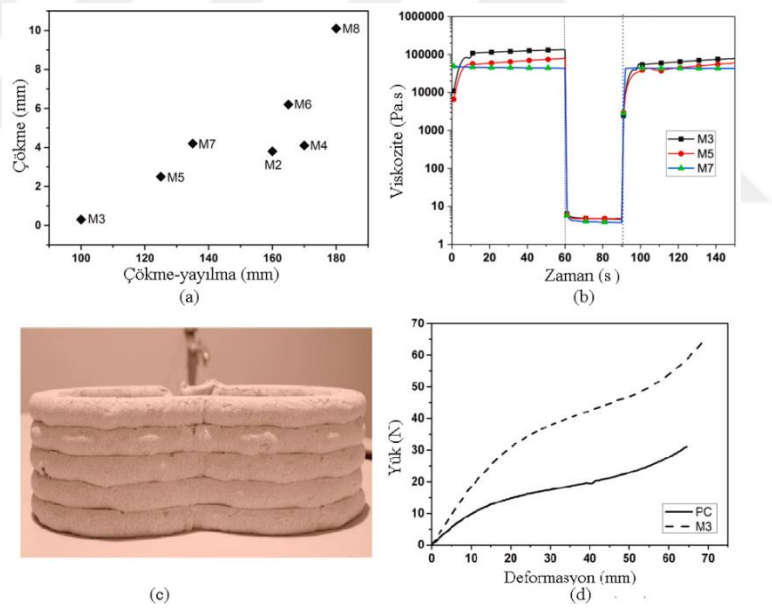
Şekil 1.4 Farklı karışımların priz süreleri ölçümü (Van Der Putten vd., 2019)

Portland çimentosu kullanımının çevresel zararlarını dikkate alan bazı araştırmacılar tarafından farklı çimento tiplerinin ekstrüde/inşa edilebilir beton üretiminde kullanım olanakları incelenmiştir. Örneğin; Panda, Sonat, Yang, Tan ve Unluer (2021) düşük kalsinasyon sıcaklığına sahip magnezyum silikat (MS) hidrat (M-S-H) çimentosu kullanarak hazırlanan farklı karışımların (Tablo 1.2) ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların çökme değerleri ve çökme-yayılma çapları ASTM C230 standardına göre ölçülmüştür (Şekil 1.5-a). Ölçüm sonucunda düşük çökme ve çökme-yayılma değerlerine sahip olan M3, M5, M7 karışımları referans alınmıştır. Geriye kalan karışımlar yüksek çökme ve çökme yayılma değerine sahiptir ve bu karışımlar inşa edilebilirlik açısından yetersiz bulunmuştur. Referans olarak alınan M3, M5 ve M7 karışımlarının i) ekstrüzyon öncesi, ii) ekstrüzyon sırasında, iii) ekstrüzyon sonrası viskozite değerindeki toparlanma (geri dönüşümü yeteneği) incelenmiştir (Şekil 1.5-b). Çalışma sonucunda M3 karışımının viskozite değerindeki toparlanmanın diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu bu nedenle ekstrüde edildikten hemen sonra inşa edilebilirlik kabiliyetinin daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda optimum karışım olan M3'e ait döküm örneği Şekil 1.5-c'de gösterilmektedir. Ayrıca, M3 karışımı ve referans olarak alınan Portland çimentolu karışımın (PC) inşa edilebilirlik yetenekleri, taze hal dayanımları (yeşil mukavemet) INSTRON 5969 cihazı ile 0.6 N/s yük hızında

ölçülerek karşılaştırılmıştır (Şekil 1.5-d). Çalışma sonucunda M3 karışımının daha fazla yük taşıma kapasitesinin olduğu, böylece inşa edilebilirlik yeteneğinin Portland çimentosu içeren referans karışıma göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 1.2 Karışım tasarımları (Panda vd., 2021)

Karışım	Bağlayıcı kompozisyonu		su/bağlayıcı	süperakışkanlaştırıcı dozajı (%)
	MgO (%)	MS (%)		
M1	50	50	0.4	1.5
M2			0.5	1.5
M3			0.4	2.5
M4			0.5	2.5
M5	70	30	0.4	1.5
M6			0.5	1.5
M7			0.4	2.5
M8			0.5	2.5



Şekil 1.5 a) çökme ve çökme-yayılma değerleri, b) viskozite geri dönüşümü, c) M3 karışımı örneği, d) M-S-H çimentosu ve Portland çimentosu ile hazırlanan karışımların taze hal dayanımı değerleri (Panda vd., 2021)

Weng vd., (2019) magnezyum potasyum fosfat çimentosu (MPFÇ) kullanarak ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından optimum karışımın tespitine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında magnezyum oksit (M), uçucu kül (U), silis dumanı (S) ve toplam magnezyum oksit ile uçucu kül miktarının %1, 4 ve 8'i oranında

boraks (priz geciktirici katkı) kullanılmıştır. Görsel inceleme sonucu, ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından optimum karışım M40U60S10-4 (% 40 magnezyum oksit, % 60 uçucu kül, bağlayıcı ağırlığının % 10'u silis dumanı ile % 4'ü oranında boraks kullanımı) seçilmiş ve bu karışımın ASTM C1611M-14, 2014 standardına göre yayılma çapı 109,6 mm olarak belirlenmiştir. Optimum karışıma ait bir prototip örnek Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



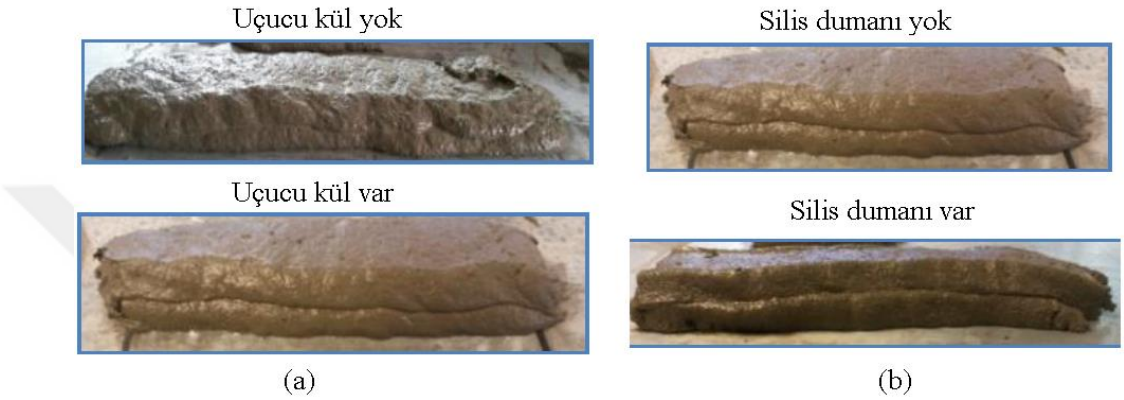
Şekil 1.6 M40U60S10-4 karışım örneği (Weng vd., 2019)

1.3.1.2 Puzolan Etkisi

Karışımların taze hal reolojik özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktör puzolanik malzemelerdir. Puzolanik malzemelerin etkisi ile karışımların eşik kayma gerilmesi, viskozite ve çökme değerleri değişerek üretilen karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri etkilenmektedir. Aşağıdaki paragraflarda konu ile ilgili önemli görülen çalışmalar özetlenmiştir:

Rubio, Sonebi ve Amziane (2017) Portland çimentosu (PÇ), uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), süperakışkanlaştırıcı katkı, polipropilen lif, kum ve viskozite düzenleyici katkı kullanarak hazırladıkları karışımların ekstrüzyon özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, %100 PÇ içeren karışım ile bu karışımda PÇ yerine %24 oranında uçucu kül içeren karışımların çökme-yayılma çapları (100x70x60 mm boyutunda koni ile) sırasıyla 280 mm ve 255 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, %100

PÇ içeren karışıma %8 SD eklenen karışımın çökme-yayılma çapı 190 mm ölçülmüştür. Böylece, karışımlara uçucu kül ve silis dumanı eklenmesiyle üretilen karışımların inşa edilebilirliğinin olumlu etkileneceği ifade edilmiştir. Bu karışımlara ait inşa edilebilirlik yetenekleri Şekil 1.7'de görselleştirilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi %100 PÇ içeren karışımlara uçucu kül ve silis dumanı eklenmesiyle oluşan karışımların inşa edilebilirlik özellikleri geliştirilmiştir.



Şekil 1.7 %100 PÇ içeren karışıma a) UK, b) SD eklenmesi ile üretilen karışımların inşa edilebilirlik testleri (Rubio, Sonebi ve Amziane, 2017)

Manikandan, Wi, Zhang, Wang ve Qin (2020) tarafından yapılan deneysel çalışma kapsamında, %100 Portland çimentosu ve bu karışımda Portland çimentosu yerine %2,5 ve 5,0 oranında silis dumanı eklenmesiyle elde edilen karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında silis dumanı içermeyen karışımda ekstrüde edilebilirlik açısından sorun olmazken, karışımın inşa edilebilirlik açısından yetersiz olduğu gözlenmiştir. Karışıma %5 silis dumanı eklenmesi ile elde edilen karışımın çok kohezif olduğu ifade edilmiştir. Karışıma %2,5 silis dumanı eklendiğinde ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından en uygun karışımın elde edildiği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda optimum karışımın eşik kayma gerilmesi, viskozite ve tiksotropi değerleri sırasıyla 27,83 Pa, 0,66 Pa.s ve 534,9 Pa/s olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Kazemian, Yuan, Cochran ve Khoshnevis (2017) hazırladıkları karışımlara silis dumanı eklenmesi ile karışımların inşa edilebilirliğinin olumlu etkilendiğini ifade etmiştir.

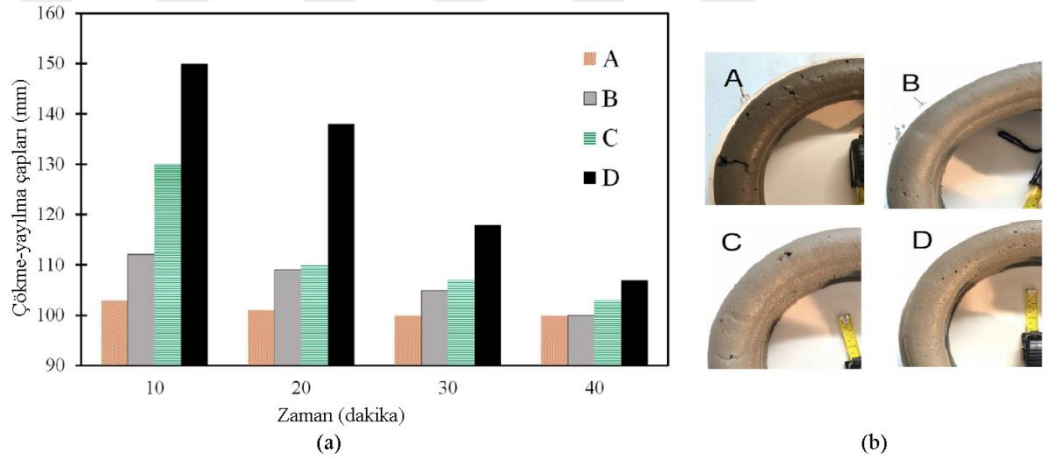
Zhang vd. (2018-b) çalışma kapsamında hazırladıkları karışımların 20 mm çaplı yazıcı başlığıyla belirgin bir deformasyon oluşmadan üretilebileceği maksimum tabaka yüksekliğini ölçmüştür. Kontrol karışımı ile üretilen tabakaların yüksekliği 72 mm olarak ölçülürken, karışıma çimentonun %2 oranında silis dumanı eklenmesi ile 156 mm tabaka yüksekliği ölçülmüştür. Böylece, karışımlara düşük oranda bile silis dumanı eklenmesi ile üretilen karışımların inşa edilebilirliğinin önemli derecede arttığı ifade edilmiştir.

1.3.1.3 Agrega Etkisi

Karışımların taze hal reolojik özelliklerini etkileyen diğer önemli faktör agrega kullanımıdır. Ayrıca, agregalar değişik boyutlarda kullanıldığı için ekstrüzyon başlığının çapına uygun agrega çapı seçilmelidir. Literatürdeki ilgili makaleler tarandığında, ekstrüzyon sırasında herhangi bir tıkanma olmaması için genellikle 4 mm'den küçük çaplı ince agrega kullanıldığı belirlenmiştir. İri agrega kullanılması halinde ise yazıcı başlığında tıkanma meydana gelebilmektedir (El Cheikh, Rémond, Khalil ve Aouad, 2017). Zuriguel, Garcimartín, Maza, Pugnaloni ve Pastor (2005) tarafından kuru agrega taneleri ile yapılan çalışmada ekstrüzyon sırasında herhangi bir blokaj (tıkanma) durumunun olmaması için $D_{başlık}/D_{maks}$ (başlık çapı/maksimum agrega çapı) oranının 4.94'ten büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Ancak, bu durum küresel başlıklar için geçerlidir. Başlık şekli değiştiği takdirde bu kritik oran da önemli derecede değişebilmektedir.

Moein, Hosseinpoor ve Yahia (2020) maksimum agrega çapı 0,65 mm olan kuvars kumu için kum/bağlayıcı oranları sırasıyla 1 ve 0,75 olan A ve B karışımları, maksimum agrega çapı 1,0 mm için kum/bağlayıcı oranları sırasıyla 1 ve 0,75 olan C ve D karışımlarının ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan karışımların zamana bağlı çökme-yayılma çapları (ASTM C1437) Şekil 1.8-a'da gösterilmektedir. Çalışma sonucunda ince agrega kullanılan karışımların yüksek özgül yüzey alanlarından dolayı çökme-yayılma çaplarının daha düşük olduğu, agrega boyutunun agrega/bağlayıcı oranına göre daha belirleyici olduğu ifade edilmiştir.

Ayrıca, düşük çökme-yayılma çapından dolayı ince agrega kullanılan karışımların inşa edilebilirlik açısından daha avantajlı olabileceği ifade edilmiştir. Bütün karışımlarda zamana bağlı olarak kıvam kaybı meydana gelmiştir. Başlangıç çökme-yayılma çapı en yüksek olan D karışımında bile 40. dakika sonunda belirgin bir kıvam kaybı meydana gelmiştir. A, B, C, D karışımlarının viskozite değerleri sırasıyla 4.0, 1.7, 2.1, 1.9 Pa.s olarak ölçülmüştür. Hem görsel muayene sonucu hem de düşük çökme ile yüksek viskozite değerinden dolayı A karışımının inşa edilebilirlik açısından en iyi performansı gösterdiği, ekstrüde edilebilirlik açısından ise en iyi performansı D karışımının gösterdiği ifade edilmiştir (Şekil 1.8-b). Böylece, kum/bağlayıcı oranının düşmesi ve daha iri agrega seçiminin ekstrüde edilebilirliği olumlu etkilerken, inşa edilebilirliği olumsuz etkilediği ifade edilmiştir.



Şekil 1.8 a) Çökme-yayılma çapları, b) ekstrüde karışımlar (Moein, Hosseinpoor ve Yahia 2020)

Han vd. (2021) geri dönüştürülmüş agrega (GA) ve doğal agrega (DA) kullanarak geleneksel (G1, G2, G3) ve ekstrüzyon (E1, E2, E3) yöntemiyle farklı karışımlar hazırlayarak (Tablo 1.3) üretilen karışımların çevresel etkisini incelemişlerdir (Tablo 1.4). Tablo 1.3'te görüldüğü üzere birinci karışımlar (G1 ve E1) %100 doğal agrega içerirken, ikinci karışımlarda (G2 ve E2) doğal agrega yerine %50 oranında geri dönüştürülmüş agrega ve üçüncü karışımlarda (G3 ve E3) ise %100 geri dönüştürülmüş agrega kullanılmıştır. Tablo 1.4'te görüldüğü üzere hem geleneksel yöntemde hem de ekstrüzyon yönteminde doğal agrega yerine geri dönüştürülmüş agrega kullanılması durumunda üretilen karışımların küresel ısınma (CO_2 (karbondioksit) salınımı), asitleştirme (SO_2 salınımı), fotokimyasal kirlilik (C_2H_4

salınımı) ve ötrofikasyon (NO_x (azot) salınımı) olayları azalmaktadır. Böylece genel olarak, geri dönüştürülmüş agrega kullanımında çevre kirliliği etkisinin daha az olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca yazarlar tarafından geri dönüştürülmüş agrega fiyatlarının normal agregaya göre daha ucuz olmasından dolayı beton üretiminde kullanılması durumunda üretilen yapının daha ucuz olacağı ifade edilmiştir. Her ne kadar GA kullanımının çevresel etkisi bilinse de mekanik özellikler açısından farklı sonuçlar ortaya çıkarabilir (Kadiroğlu, Öz, Tezcan, Kuru, 2017). Karışım tasarımlarında GA kullanılması durumunda olası değişkenlikler de (farklı bina yıkım molozlarında farklı özellikte agregaların elde edilmesi) dikkate alınmalıdır.

Tablo 1.3 1 m^3 için karışım tasarımı (Han vd., 2021)

	Örnekler	GA	Su (kg)	Çimento (kg)	GA (kg)	DA (kg)	Kum (kg)	Katkı (kg)
Ekstrüzyon yöntemi	E1	0%	167.32	440.33	0.00	880.65	440.33	31.04
	E2	50%	154.94	442.68	442.68	442.68	442.68	31.65
	E3	100%	142.42	445.06	890.13	0.00	445.06	32.27
Geleneksel yöntem	G1	0%	160.00	320.00	0.00	1030.00	793.00	5.00
	G2	50%	160.00	332.00	540.00	540.00	768.00	5.27
	G3	100%	160.00	345.00	1080.00	0.00	734.00	5.44

Tablo 1.4 Farklı agrega türleri için çevresel etkiler (Han vd., 2021)

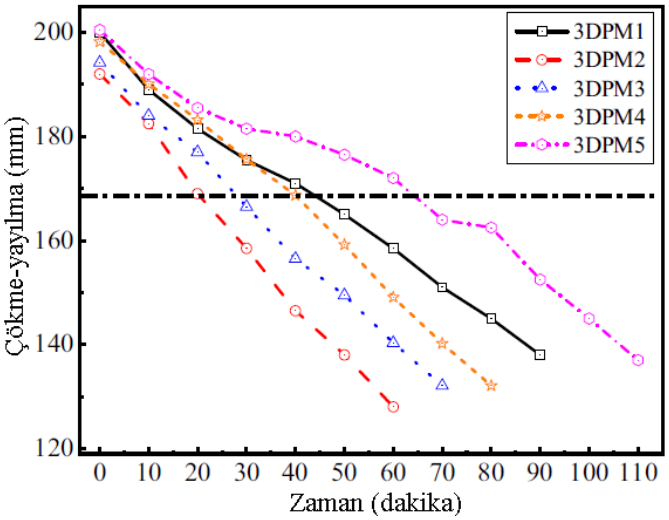
	Örnekler	Potansiyel çevresel etki			
		küresel ısınma CO_2 (kg)	asitleştirme SO_2 (kg)	fotokimyasal kirlilik C_2H_4 (kg)	ötrofikasyon NO_x (kg)
Ekstrüzyon yöntemi	E1	5737.58	27.54	0.16	17.55
	E2	5666.92	26.73	0.12	16.42
	E3	5595.50	25.92	0.10	15.27
Geleneksel yöntem	G1	4449.00	22.34	0.18	15.71
	G2	4496.90	22.06	0.15	14.85
	G3	4523.80	21.54	0.13	13.69

Zou, Xiao, Ding, Duan ve Zhang (2020) çalışma kapsamında farklı karışımlar hazırlayarak (Tablo 1.5) karışımların ekstrüde edilebilirliklerini incelemişlerdir. Karışımların ekstrüde edilebilirliklerinin karşılaştırılması için ASTM C230 standardına göre çökme-yayılma çapları ölçülmüştür (Şekil 1.9). Çökme-yayılma çapları esas alınarak incelendiğinde, nehir kumu (NK) yerine geri dönüştürülmüş agrega (GA) kullanılması durumunda yüksek su emme hızından dolayı çökme-yayılma çapları düşmüş, böylece karışımların ekstrüde edilebilirlik özelliklerinin azaldığı ifade edilmiştir. Bu yüzden karışımlara priz geciktirici katkı olarak sodyum glukonat eklenmiş ve çökme yayılma çaplarının arttırılması ile ekstrüde edilebilirlik özellikleri geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında tavsiye edilen optimum sodyum glukonat dozajı çimento kütle oranının %1,2'si olarak belirlenmiştir. Çalışma

kapsamında görsel muayene sonucu ekstrüde edilebilirlik ve yüzey pürüzsüzlüğü açısından optimum çökme-yayılma çapları 168-201 mm aralığında elde edilmiştir.

Tablo 1.5 Karışım tasarımı (Zou vd., 2020)

Karışımlar	GA oranı	Çimento	NK	GA	Viskozite katkısı	Akışkanlaştırıcı	sodyum glukonat	Su
3DPM1	0	1000	1000	0	1.28	0.83	0	350
3DPM2	100	1000	0	1000	1.28	0.83	0.0	485
3DPM3	100	1000	0	1000	1.28	0.83	0.3	485
3DPM4	100	1000	0	1000	1.28	0.83	0.6	485
3DPM5	100	1000	0	1000	1.28	0.83	1.2	485



Şekil 1.9 Çökme-yayılma çapları (Zou vd., 2020)

Papachristoforou, Mitsopoulos ve Stefanidou (2018) %100 çimento, çimento yerine %50 oranında kireçtaşı tozu agregası ve %100 oranında kireçtaşı tozu agregası olmak üzere 3 farklı karışımın ekstrüde edilebilirliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, kireçtaşı tozu agregasının özgül yüzey alanı daha fazla olduğu için hazırlanan karışımların daha hızlı priz aldığı, böylece ekstrüde edilebilirlik özelliklerinin düştüğü ifade edilmiştir.

Zhang vd. (2019) maksimum tane boyutu 1 mm olan nehir kumu kullanarak kum/bağlayıcı oranları 0,6-0,8-1,0-1,2-1,5 olan beş karışımın ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kum/bağlayıcı oranının 1,0'ın altındayken inşa edilebilirlik için ve 1,2'nin üstündeyse ekstrüde edilebilirlik için yetersiz olduğu belirlenmiştir. Optimum kum/bağlayıcı 1,0-1,2 aralığında

seçilmiştir. Bu değerler için optimum çökme-yayılma, eşik kayma gerilmesi, viskozite ve tiksotropi değerleri sırasıyla 192,5-269 mm, 178,5–359,8 Pa, 3,8-4,5 Pa.s ve 6284,5 Pa/s'dan düşük değerler olarak ölçülmüştür.

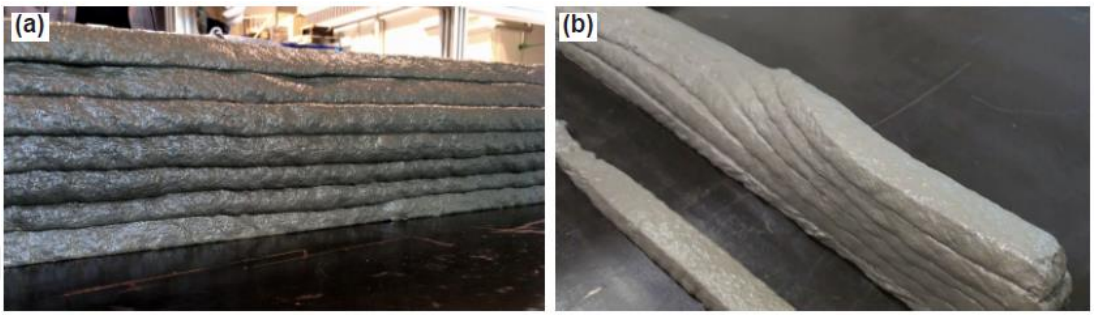
1.3.1.4 Lif Etkisi

Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktör ise lif etkisidir. Lif kullanımı ile karışımların taze hal reolojik özelliklerinde değişikler meydana gelir ve hazırlanan karışımların lif dozajına ve görünüm oranlarına bağlı olarak akışkanlık özelliklerinde sorunlar meydana gelebilmektedir (Martinie, Rossi ve Roussel, 2010).

Ogura, Nerella ve Mechtcherine (2018) farklı oranlarda yüksek yoğunluklu polietilen (PET) lif (uzunluk=6 mm, çap=0,012 mm) kullanarak hazırladıkları karışımların (Tablo 1.6) ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan karışımların DIN EN 1015-3:2007-05 standartlarına göre çökme-yayılma çapları ölçülerek inşa edilebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, A, B, C, D karışımlarının başlangıç anındaki yayılma çapları sırasıyla 119, 120, 119, 129 mm ölçülürken, harç karışımının üzerinde bulunduğu tablanın 15. düşüş sonrası çökme-yayılma çapları sırasıyla 142, 135, 133, 153 mm olarak ölçülmüştür. Yazarlar, Näther vd. (2017) tarafından belirtilen '25 düşüş sonrası 140 mm ve üzeri yayılma çapları inşa edilebilirlik için uygun değildir' çalışma sonucunu referans alarak B ve C karışımının inşa edilebilirlik için uygun olduğunu ifade etmişlerdir. B ve D örnekleri Şekil 1.10'da görsel olarak verilmiştir. B karışımı inşa edilebilirlik için yeterliyken, D karışımı kendi ağırlığı altında çökmüştür. Böylece, yazarlar tarafından ekstrüde ve inşa edilebilirliğe sahip olan B ve C karışımlarını referans alarak optimum lif oranını %1,0 ve %1,5 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, D karışımında ise %1,5 lif kullanılmasına rağmen düşük kum/bağlayıcı oranından dolayı inşa edilebilirlik açısından yetersiz kalmıştır.

Tablo 1.6 Karışım oranları (Ogura vd., 2018)

Karışımlar	su/bağlayıcı	kum/bağlayıcı	Lif hacim oranı (%)
A	0.24	1.20	0.3
B	0.22	0.50	1.0
C	0.22	0.20	1.5
D	0.24	0.20	1.5

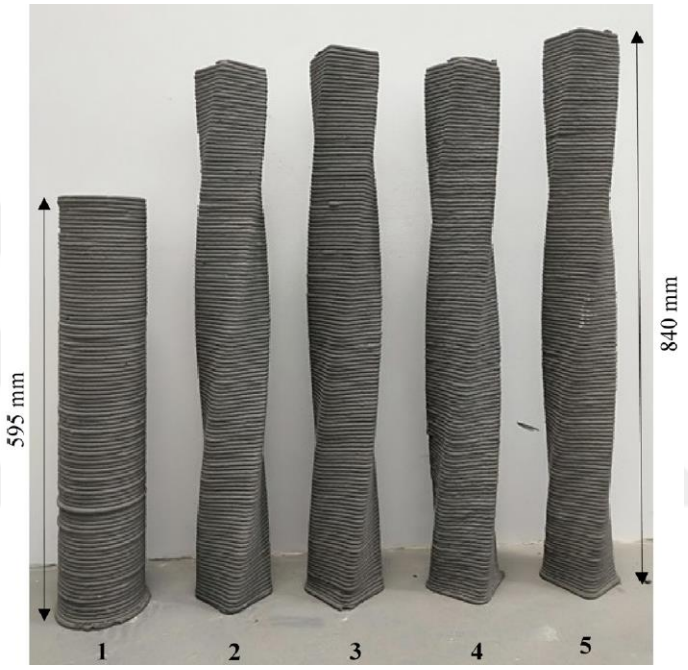


Şekil 1.10 Ekstrüzyon sonrası örneklerin formları a) B karışımı, b) D karışımı (Ogura vd., 2018)

Chu, Li ve Kwan (2020) %0,5 hacim oranında karbon (6 mm uzunluk ve 0,007 mm çap), cam (12 mm uzunluk ve 0,007 mm çap) ve çelik lif (13 mm uzunluk ve 0,2 mm çap) kullanarak hazırladıkları karışımların şekil koruma katsayısına (çökme hunisi taban alanı/karışımın huniden tablaya düştükten sonraki taban alanı) bağlı olarak inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, liflerin kullanılması ile şekil koruma katsayısının artışına bağlı olarak inşa edilebilirliğinin arttığı, karbon ve cam liflerin çelik liflere göre biraz daha fazla etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir.

Pham, Tran ve Sanjayan (2020) çapları 0,2 mm ve uzunlukları 3 ile 6 mm olan iki farklı çelik lif kullanarak hazırladıkları karışımların inşa edilebilirliklerini ölçmüştür. Çalışma kapsamında, 1 (lifsiz-dairesel), 2 (lifsiz-kıvrılmış), 3 (%0,5 hacim oranı-3 mm uzunluğunda lif), 4 (%1 hacim oranı-6 mm uzunluğunda lif) ve 5 (%0,25 hacim oranı-6 mm uzunluğunda lif) olmak üzere beş farklı döküm yapılmıştır. 1, 2, 3, 4, 5 karışımlarının tabaka yükseklikleri sırasıyla 595, 790, 805, 798, 840 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 1.11). Böylece, lif kullanımına bağlı olarak inşa edilebilirliğin arttığı ve ayrıca lif görünüm oranının (lif uzunluğu/çapı) artışı ile düşük oranda lif kullanılması durumunda daha iyi inşa edilebilirlik elde edilebildiği anlaşılmaktadır.

Ma, Li, Wang, Wang ve Sanjayan (2019) çimento ağırlığının %0-%0,1-%0,3-%0,5-%0,7'si oranında bazalt lif (18 mm uzunluk ve 0,012-0,015 mm çap) kullanarak hazırladıkları karışımların ekstrüde edilebilirliğini 12 mm dairesel çaplı yazıcı ile incelediler. Çalışma kapsamında %0,7 oranında lif kullanılması durumunda yazıcı başlığında tıkanma meydana gelmiştir. %0,5 oranında bazalt lif kullanılması durumunda ise hem ekstrüde edilebilirlik hem de inşa edilebilirlik açısından optimum lif oranının elde edildiği belirtilmiştir (Şekil 1.12).



Şekil 1.11 Lif oranı ve lif görünüm oranına bağlı olarak inşa edilebilirlik testi (Pham vd., 2020)



Şekil 1.12 %0,5 oranında bazalt lif örneği (Ma vd., 2019)

Shakor, Nejadi ve Paul (2019) lifsiz ve bağlayıcının %1'i oranında polipropilen lif (6 mm uzunluk ve 0,1 mm çap) kullanarak iki farklı karışımın inşa edilebilirlik

özelliklerini ASTM C 1437, 2007 standardına göre çökme ve çökme-yayılma çaplarını ölçerek karşılaştırmıştır. Lifsiz ve lifli karışımlar için çökme değerleri sırasıyla 8,5 ve 6 mm olarak ölçülürken, çökme-yayılma çapları sırasıyla 188 ve 152 mm olarak ölçülmüştür. Böylece yazarlar tarafından polipropilen lif kullanımı ile karışımların ekstrüde edilebilirliği azalırken, inşa edilebilirliklerinin arttırıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, Rahul vd. (2019) tarafından da polipropilen lif kullanımı ile hazırlanan karışımların inşa edilebilirliğinin arttığı ifade edilmiştir.

1.3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı Katkı Etkisi

Süperakışkanlaştırıcı katkılar, karışım tasarımlarında dispersant (dağıtıcı) özelliği ile karışımların eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerini düşürerek reolojik özelliklerinin değişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Böylece, karışımların işlenebilirliğini arttırarak ekstrüde edilebilirlik özelliklerini geliştirirler (Gelardi ve Flatt, 2016; Marchon, Kawashima, Bessaies-Bey, Mantellato ve Ng, 2018; Kruger, Zeranka ve van Zijl, 2019). Ancak, inşa edilebilirliklerini olumsuz etkileyebilirler. Bu yüzden, optimum akışkanlaştırıcı kullanımı ile hem ekstrüde edilebilir hem de inşa edilebilir karışım elde edilebilir.

Manikandan vd. (2020) hazırladıkları farklı harç karışımlarının inşa edilebilirliklerine polikarbonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı etkisini incelemiştir. Katkılar bağlayıcı ağırlığının %1,5 ve 2,5'i oranında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, akışkanlaştırıcı katkı miktarının %1,5'ten 2,5'e yükselmesiyle karışımların inşa edilebilirliğinin olumsuz etkilendiği gözlenmiştir (Şekil 1.13).

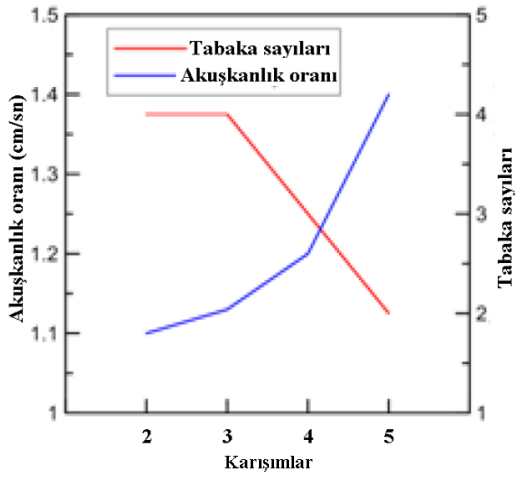


Şekil 1.13 Süperakışkanlaştırıcı oranına bağlı olarak inşa edilebilirlik değişimi (Manikandan vd., 2020)

Malaeb vd. (2015) beş farklı karışım örneği (Tablo 1.7) hazırlayarak hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların süperakışkanlaştırıcı katkı ve akışkanlık oranına (cm/s) bağlı olarak ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özellikleri Şekil 1.14'te gösterilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı oranındaki artışa bağlı olarak ekstrüde edilebilirlik özellikleri gelişirken, inşa edilebilir tabaka sayısında düşüş yaşanmaktadır. Ekstrüde/inşa edilebilir özelliklerinin sağlanması için akışkanlık oranı 1,0-1,2 cm/s aralığında olması gerektiği ifade edilmiştir. 1,0 cm/s'nin altında ekstrüde edilebilirlik için yetersiz iken, 1,2 cm/s'nin üstü içinse inşa edilebilirlik özellikleri yetersiz kalmaktadır. Böylece, ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterlerinin sağlanması için optimum karışım olarak 3. karışım seçilmiştir. Optimum süperakışkanlaştırıcı katkı miktarı ise Tablo 1.7'de verilen miktarlardaki harç için 1,0 mL olarak belirlendiği ifade edilmiştir.

Tablo 1.7 Karışım oranları (Malaeb vd., 2015)

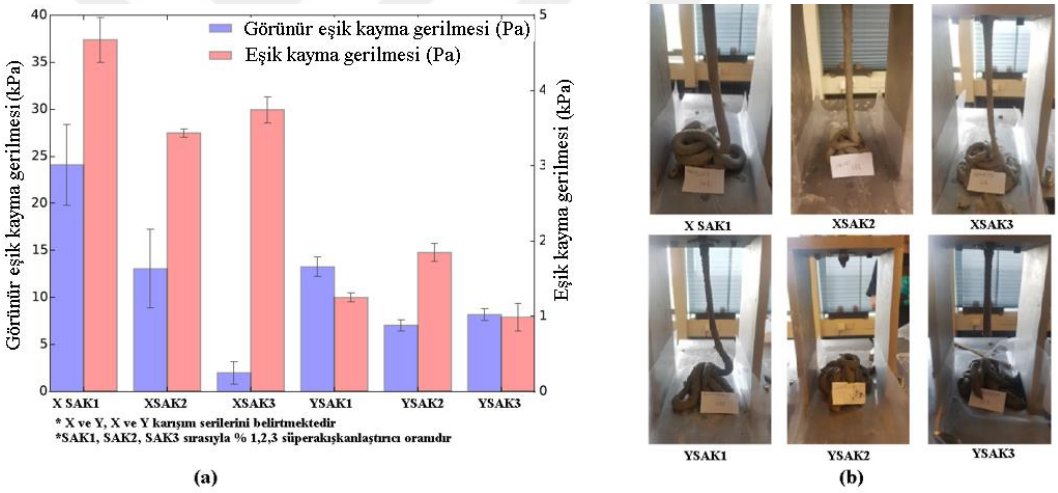
Karışımlar	Çimento (gr)	Kum (gr)	İnce agrega (gr)	su/çimento	akışkanlaştırıcı (mL)	Akışkanlık oranı (cm/sn)	Geciktirici (mL)	Hızlandırıcı (mL)
1 Kontrol	125	80	160	0.48	0	-	1	0.5
2	125	80	160	0.42	0.5	1.1	1	0.5
3	125	80	160	0.39	1	1.13	1	0.5
4	125	80	160	0.38	1.1	1.2	1	0.5
5	125	80	160	0.36	1.3	1.4	1	0.5



Şekil 1.14 Ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirliğin değerlendirilmesi (Malaeb vd., 2015)

Figueiredo vd. (2019-a) X serisi (çimento, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı tozu, polivinil alkol lif, viskozite düzenleyici katkı ve süperakışkanlaştırıcı katkı) ile Y serisi (çimento, uçucu kül, kum, kireçtaşı tozu, polivinil alkol lif, viskozite düzenleyici katkı

ve süperakışkanlaştırıcı katkı) olmak üzere 2 farklı seride harç karışımları hazırlamıştır. Hazırlanan karışımlara toplam katı ağırlığının %1, 2, 3'ü oranında süperakışkanlaştırıcı katkı (SAK) eklenmiş ve hazırlanan karışımların eşik kayma gerilmesi ve görünür eşik gerilmesi değerleri ölçülmüştür (Şekil 1.15-a). Eşik kayma gerilmesi (shear yield stress) pompalama esnasında karışımların sürtünmesini ölçerken, görünür eşik gerilmesi (bulk yield stress) ise karışımların gerçek özelliklerini yansıtmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi görünür eşik gerilmesi SAK oranı artışına bağlı olarak azalırken, eşik kayma gerilmesinde ise SAK kullanımı ile herhangi bir bağlantı kurulamadığı görülmektedir. Şekil 1.15-b'de ise hazırlanan karışımların SAK kullanımına bağlı olarak ekstrüzyon sonrası formları gösterilmektedir. SAK artışına bağlı olarak hazırlanan karışımların inşa edilebilirlik özelliklerinde düşüş yaşandığı, böylece karışımların kendi ağırlığı altında çöktüğü gözlenmiştir.



Şekil 1.15 a) Eşik kayma gerilmesi ve görünür eşik gerilmesi, b) İnşa edilebilirlik değişimi (Figueiredo vd., 2019-a)

1.3.1.6 Viskozite Düzenleyici Katkı Etkisi

Viskozite düzenleyici katkılar (VDK), ekstrüde edilebilir karışımların taze hal reolojik özelliklerini dengelemede sıkça kullanılmaktadır. Hem su tutma hem de kıvam ayarlayıcı özelliği nedeniyle, ekstrüzyon yönteminde inşa edilebilirlik açısından

kritik bir bileşen olabilmektedir (Patural vd., 2011; Brumaud vd., 2014; Rahul vd., 2019).

Figueiredo vd. (2019-b) çimento ağırlığının %0,1 (1M), %0,3 (3M), %1 (10M) oranında hidroksi-propil-metil-selüloz (HPMC) esaslı viskozite düzenleyici katkı kullanarak hazırladıkları karışımların eşik kayma gerilmesi ve görünür eşik gerilmesi değişimi esas alınarak inşa edilebilirlik değişimini incelemiştir. Çalışma sonucunda, viskozite düzenleyici katkı artışına bağlı olarak görünür eşik gerilmesinde belirli bir değişim meydana gelmezken, eşik kayma gerilmesinde artış yaşanmıştır (Tablo 1.8). Görsel muayene sonucunda da (Şekil 1.16) eşik kayma gerilmesi artışına bağlı olarak inşa edilebilirliğinin arttığı ve viskozite düzenleyici katkının inşa edilebilirlik artışı için önemli bir etken olduğu ifade edilmiştir.

Tablo 1.8 Reolojik parametrelerin ölçümü (Figueiredo vd., 2019-b)

Karışımlar	Görünür eşik kayma gerilmesi (Pa)	Eşik kayma gerilmesi (Pa)
Katkısız	16.313 ± 0.9637	0.200 ± 0.071
1M	12.841 ± 1.086	0.636 ± 0.059
3M	13.016 ± 1.170	0.828 ± 0.104
10M	22.673 ± 2.545	2.372 ± 0.115

* Eşik kayma gerilmesi (shear yield stress) pompalama esnasında karışımların sürtünmesini ölçerken, görünür eşik gerilmesi (bulk yield stress) karışımların gerçek özelliklerini yansıtmaktadır.



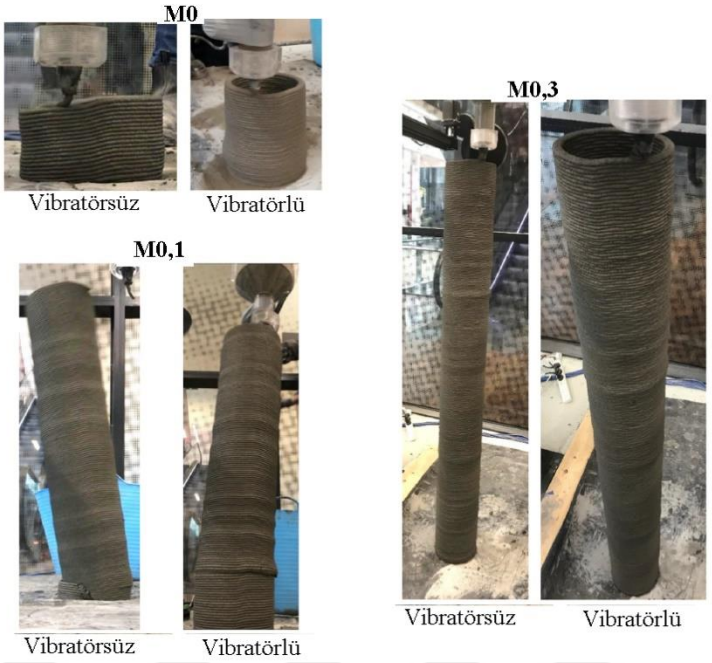
Şekil 1.16 Ekstrüzyon sonrası VDK ilavesi ile örneklerin inşa edilebilirliklerindeki değişim (Figueiredo vd.,2019-b)

Sanjayan, Jayathilakage ve Rajeev (2021) toplam katı ağırlığının %0 (M0), %0,1 (M0,1), %0,3 (M0,3) oranında nanokil kullanarak hazırladıkları karışımların inşa edilebilirlik özelliklerini incelediler. Harç tabancasına eklenen vibratör yardımıyla,

hazırlanan karışımların inşa edilebilirlik özellikleri vibratörlü ve vibratörsüz olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların Viskomat XL reometresi yardımıyla ölçülen taze hal reolojik değerleri Tablo 1.9'da verilmiştir. Ayrıca, vibratör uygulanan ve uygulanmayan karışımlara ait örnekler Şekil 1.17'de gösterilmiştir. Hazırlanan karışımların eşik kayma gerilmesi, viskozite, tiksotropi, I_{thix} (malzemelerin geri toparlanma kabiliyeti) ve A_{thix} (eşik kayma gerilmesi artış hızı) değerleri nanokil kullanımına bağlı olarak artış göstermiştir. M0, M0,1, M0,2 karışımlarının vibratörsüz tabaka yükseklikleri sırasıyla 105, 806, 1600+ mm (1600 mm'den yüksek) ve vibratörlü yükseklikleri sırasıyla 111, 656, 1600+ mm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, nanokil kullanımı ile hazırlanan karışımların taze hal reolojik özelliklerinde artış yaşandığı, böylece inşa edilebilirlik özelliklerinin geliştiği ifade edilmiştir. Ayrıca, %0,1 nanokil oranında, vibratör kullanılması durumunda inşa edilebilirlik özelliklerinin vibratör kullanılmayan duruma göre düştüğü (vibratörsüz M0,1'in tabaka yüksekliği 806 mm iken, vibratörlü M0,1 656 mm'dir) gözlenmiştir. %0,3 kullanılması durumunda ise vibratör uygulanan ve uygulanmayan karışımlara ait tabaka yükseklikleri arasında önemli bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

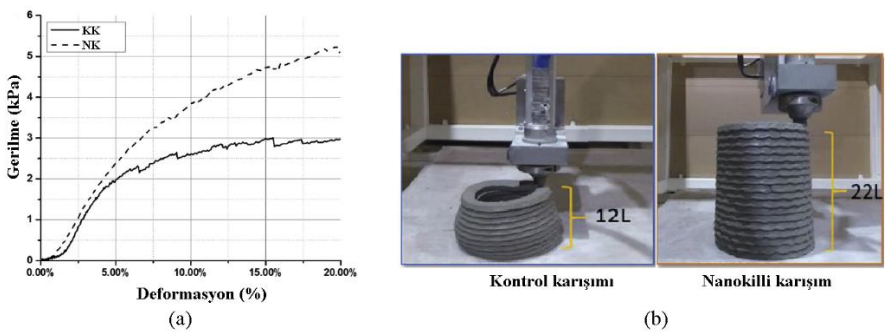
Tablo 1.9 Reolojik parametreler (Sanjayan vd., 2021)

	Statik eşik kayma gerilmesi (kPa)	Dinamik eşik kayma gerilmesi (kPa)	Viskozite (Pa.sn)	Tiksotropi(kPa/sn)	Ithix	Athix (kPa/dk)
M0	0.9	0.4	35	9	1.2	0.02
M0.1	1.4	0.5	42	13	1.7	0.02
M0.3	3.8	0.8	46	23	2.5	0.06



Şekil 1.17 Ekstrüde karışım örnekleri (Sanjayan vd., 2021)

Panda, Lim ve Tan (2019) kontrol karışımı (KK) ve kontrol karışımına bağlayıcı ağırlığının %0,5'i oranında nanokil ekleyerek hazırlanan karışımların (NK-Nanokilli karışım) taze haldeki elastisite modüllerini (koheziflik durumları) INSTRON 5969 cihazıyla gerilme-deformasyon eğrisini çıkararak hesaplamıştır. (Şekil 1.18-a). Çalışma sonucunda, KK ve NK karışımlarının elastisite modülleri sırasıyla 0,03 MPa ve 0,06 MPa olarak ölçülmüş ve nanokilli karışımların yüksek elastisite modülüne (young modülü) sahip olmasından dolayı daha kohezif olduğu, böylece inşa edilebilirliğinin daha iyi olduğu ifade edilmiştir. NK ve KK karışımlarına ait örnekler Şekil 1.18-b'de gösterilmektedir. KK ile en fazla 12-13 tabaka dökülebilirken, NK karışımında ise 20 tabaka ile deformasyon olmadan döküm yapılabilmiştir.



Şekil 1.18 a) Gerilme-deformasyon eğrisi, b) Ekstrüde örnekler (Panda vd., 2019)

Chen vd. (2019) hazırlanan karışımlara bağlayıcı ağırlığının %0,48-%0,24-%0,14 oranında hidroksipropilmetilselüloz (HPMC) esaslı VDK (viskozite düzenleyici katkı) kullanarak hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. %0,48 oranında VDK kullanımı durumunda karışımların inşa edilebilirlik özellikleri sağlanırken, pompa içindeki yüksek ekstrüzyon basıncından dolayı ekstrüde edilebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. %0,24 ve %0,14 oranında VDK kullanılması durumunda ise her iki karışımın benzer ekstrüzyon basıncına sahip oldukları ve %0,24 VDK ile hazırlanan karışımların %0,14 VDK oranı ile üretilen karışımlara göre inşa edilebilirlik özelliklerinin daha iyi olmasından dolayı optimum VDK oranı %0,24 seçilmiştir.

Lee, Kim, Moon, Kim ve Seo (2019) %0-0,2-0,4-0,6-0,8-1 oranında selüloz esaslı VDK kullanarak hazırladıkları karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Görsel muayene sonucu hem ekstrüde edilebilirlik hem de inşa edilebilirlik için optimum VDK oranı %0,4 olarak belirlenmiştir. Karışıma ait çökme-yayılma çapı (ASTM C 1437, 2007), eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerleri sırasıyla 165 mm, 670 Pa ve 141 Pa.s olarak ölçülmüştür.

Genel olarak, ekstrüzyon yöntemiyle üretilmesi istenen harç karışımlarının ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerinin aynı anda sağlanması gerekmektedir. Bu iki zıt özelliğin sağlanabilmesi için hazırlanacak olan karışımların optimum taze hal reolojik özelliklerinin elde edilmesi gerekmektedir. Taze hal reolojik özellikleri, karışım tasarımında bulunan malzemelerden (çimento, puzolan, lif, kimyasal katkı vs.) önemli derecede etkilenmektedir. Böylece, karışım tasarımında kullanılacak olan malzemelerin amaca en uygun kullanım oranları ile karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini aynı anda sağlayan optimum karışım tasarımının elde edilmesi mümkündür.

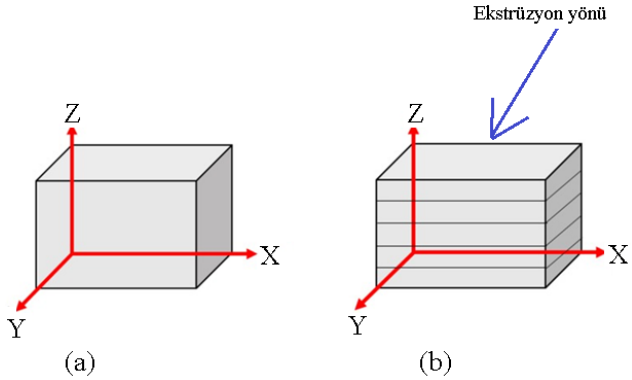
Literatür taramaları sonucu elde edilen taze hal reolojik parametreleri için farklı araştırmacılar tarafından önerilen optimum ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik değerleri Tablo 1.10'da özetlenmiştir.

Tablo 1.10 3B ekstrüde edilebilir harç örnekleri için taze hal reolojik parametreler

Yazarlar	Çökme-yayılma (mm)	Eşik kayma gerilmesi (Pa)	Viskozite (Pa.sn)
Alghamdi, Nair, Neithalath (2019)	Ölçülmedi	150-500	Ölçülmedi
Weng, Ruan, Li vd. (2019)	109,6 (inşa edilebilir karışım için optimum değer)	belirtilmemiş	Ölçülmedi
Khalil, Aouad, El Cheikh vd. (2017)	Ölçülmedi	2618 (normal harç); 47771 (% 7 alümina çimentosu kullanımı)	Ölçülmedi
Jayathilakage, Sanjayan, Rajeev (2019)	Ölçülmedi	3200-20200	Ölçülmedi
Özalp, Yılmaz, Yaşar (2018)	170-200 (normal çimento); 170 Beyaz çimento	Ölçülmedi	Ölçülmedi
Panda, Unluer, Tan (2018)	Ölçülmedi	330-600	> 20
Zhang, Zhang, Liu vd. (2018)	252-190 (başlangıç ve 1 saat sonraki değer)	≈ 200	≈ 4
Liu, Li, Weng vd. (2019)	Ölçülmedi	500-5950	Ölçülmedi
Nair, Alghamdi, Arora vd. (2019)	Ölçülmedi	150-400	Ölçülmedi
Chen, Li, Wang vd. (2020)	Ölçülmedi	650-450 (kontrol karışımına priz geciktirici katkı eklenmesi; 650-950 kontrol karışımına diatomit eklenmesi)	2,4-2,1 (kontrol karışımına priz geciktirici katkı eklenmesi; 2,4-3,1 kontrol karışımına diatomit eklenmesi)
Zhang, Zhang, She vd. (2019)	192.5-269	178,5–359,8	3,8-4,5
Panda & Tan (2018)	Ölçülmedi	600-1000	30-40
Papachristoforou, Mitsopoulos,	180-240	200-2300	Ölçülmedi
Kaci, bouras, Phan vd. (2011)	Ölçülmedi	≈ 100	Ölçülmedi
Chaves Figueiredo, Rodrigueza, Ahmed vd. (2019)	Ölçülmedi	Kayma eşik gerilmesi:1000-2500; kütle eşik gerilmesi:15000-35000	Ölçülmedi
Arunothayan, Nematollahi, Ranade (2019)	Lifsiz:119-151 (tabla düşürmeden önce-sonra); Lifli: 113-144 (önce-sonra)	Ölçülmedi	Ölçülmedi
Shakor, Nejadi, Paul (2019)	152 (lifli)-188 (lifsiz)	Ölçülmedi	Ölçülmedi
Long, Tao, Lin vd. (2019)	Başlangıç ve 60. dk. için sırasıyla 240, 200	1201,24	8,96
Rahul, Santhanam, Meena vd. (2019)	Ölçülmedi	1600	Ölçülmedi
Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, vd.	Ölçülmedi	300-900	Ölçülmedi
Kruger, Zeranka, van Zijl (2019b)	Ölçülmedi	2108-4727 (Başlangıç eşik kayma gerilmesi değerleri)	Ölçülmedi
Rubio, Sonebi, Amziane (2017)	≈150-270	131-800	Ölçülmedi
Panda, Ruan, Unluer vd., (2019)	Ölçülmedi	3000-4500 (kontrol karışımı-%0,5 nanokil kullanımı)	9,5-13,0 (kontrol karışımı-%0,5 nanokil kullanımı)
Lee, Kim, Moon vd. (2019)	165	670	141

1.4 Sertleşmiş Hal Özellikleri

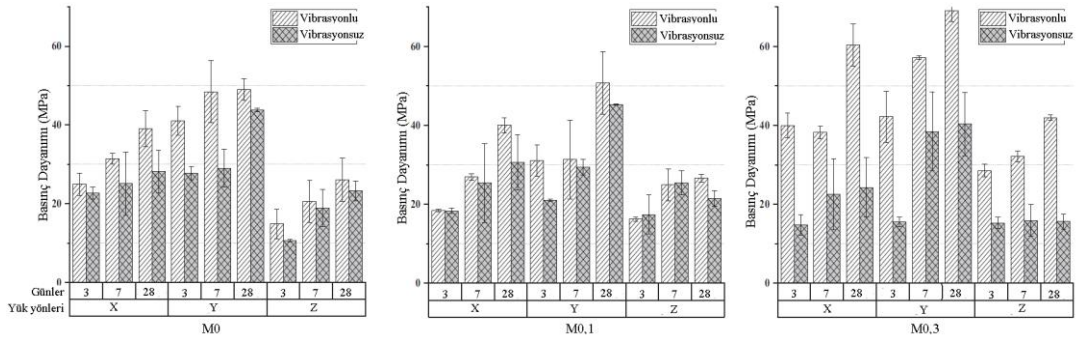
Ekstrüzyon yönteminin araştırma-geliştirme aşamasında olmasından dolayı, mevcut yöntemle ilgili yeni sorunlar ortaya çıkmaktadır. Geleneksel yöntemle ilgili mekanik özellikler detaylı olarak araştırılmasına rağmen, ekstrüzyon yönteminin üstüste bindirilen tabakalar şeklinde üretilmesinden dolayı mekanik özelliklerde büyük değişimler meydana gelmektedir. Örneğin; harçların taze haldeki pompalanabilirlik/ekstrüde edilebilirlik/inşa edilebilirlik özellikleri yapısal performansı etkilemektedir. Düzgün yapılmayan pompalanabilirlik işlemleri harçların süreksiz olarak ekstrüde edilmesine neden olacak ve yapısal performans olumsuz etkilenecektir. Yapısal performansı etkileyen bir diğer önemli faktör ise tabakalar arası zayıf aderans dayanımıdır. Zayıf aderans dayanımı, sismik yüklemeler gibi yatay yükleme durumlarında oluşacak olan kesme kuvvetlerinden dolayı düzlem içi veya düzlem dışı yapı bozulmalarına neden olabilir (Marchment, Sanjayan ve Xia, 2019; Lu vd., 2019). Tabakalar arası aderans dayanımını etkileyen en önemli faktörler; ekstrüzyon süresi aralığı (bir tabaka ekstrüde edildikten sonra diğer tabakanın ekstrüzyonu için beklenen süre) ve yüzey nemidir (Wolfs, Bos ve Salet, 2019). Ekstrüzyon yönteminde aşılması gereken bir diğer önemli sorun, geleneksel yöntemde kullanılan donatıların burada kullanılamamasıdır. Bu yüzden mekanik özelliklerin arttırılması için ekstrüzyon yönteminde lif kullanımı ve lif yönlenmesi önemli bir konu olmaktadır (Hambach vd., 2019). Kalıp kullanılmadığı için ekstrüzyon yöntemiyle üretilen karışımların mekanik özelliklerinde yönlere göre farklılıklar (anizotropi) (Şekil 1.19) meydana gelecektir (Kim, Park, Kim, Jeong ve Lee, 2017).



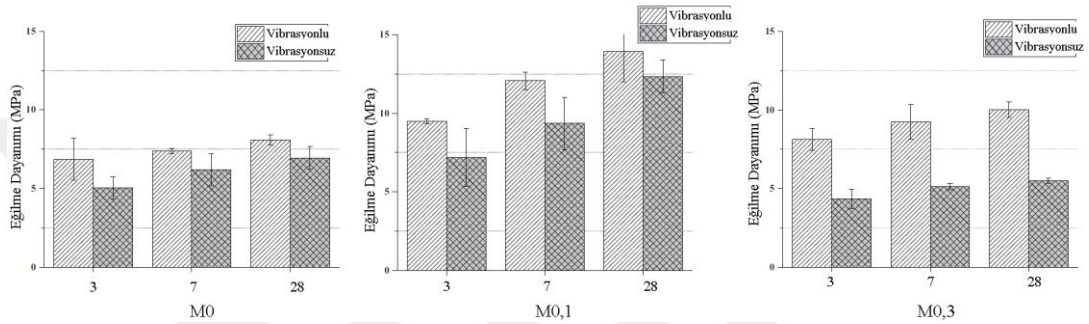
Şekil 1.19 a) Geleneksel yöntemde izotropik özellik; b) Ekstrüzyon yöntemindeki anizotropik yapı (Kim vd., 2017)

1.4.1 Basınç ve Eğilme Dayanımları

Sanjayan vd. (2021) ekstrüzyon tabancasına vibratör ekleyerek hazırladığı vibrasyonlu ve vibrasyonsuz karışımların 3, 7, ve 28. gündeki basınç dayanımlarını (Şekil 1.19'da belirtilen X, Y, Z yük uygulama yönlerinde ve 5x5x5 cm boyutunda numuneye 0,36 MPa/sn yük uygulama hızında) ve eğilme dayanımlarını (Y yük uygulama yönünde; 5x5x20 cm boyutundaki numuneye 0,5 mm/dk. yük uygulama hızında) belirlemiştir. Çalışma kapsamında toplam katı ağırlığının %0 (M0), %0,1 (M0,1), %0,3 (M0,3) oranında nanokil kullanımı ile mekanik özelliklerin değişimi incelenmiştir. Hazırlanan tüm numuneler 25 ^{o}C sıcaklıkta bekletilmiştir. Çalışma sonuçları Şekil 1.20 ve Şekil 1.21'de gösterilmiştir. Bekleneceği üzere, vibrasyon işlemi uygulanan numunelerde daha az boşluk oranı ve daha yoğun yapısından dolayı basınç ve eğilme dayanımları vibrasyonsuz numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Vibrasyonlu ve vibrasyonsuz numuneler arasındaki basınç ve eğilme dayanımları arasındaki fark M0,3 numunesinde daha yüksektir. Yazarlar tarafından, yüksek oranda nanokil kullanımı ile eşik kayma gerilmesinin yükseldiği ve buna bağlı olarak taze harcın ekstrüde edilebilirliğinin azaldığı ifade edilmiştir. Buna bağlı olarak, M0,3 numunesinin daha fazla boşluk hacmine sahip olduğu ve vibrasyon işlemi ile daha fazla mekanik dayanım artışı yaşandığı ifade edilmiştir. Basınç dayanımı için tüm numunelerde en düşük dayanım Z yük uygulama yönünde elde edilmiştir.



Şekil 1. 20 Basınç dayanımı deney sonuçları (Sanjayan vd., 2021)

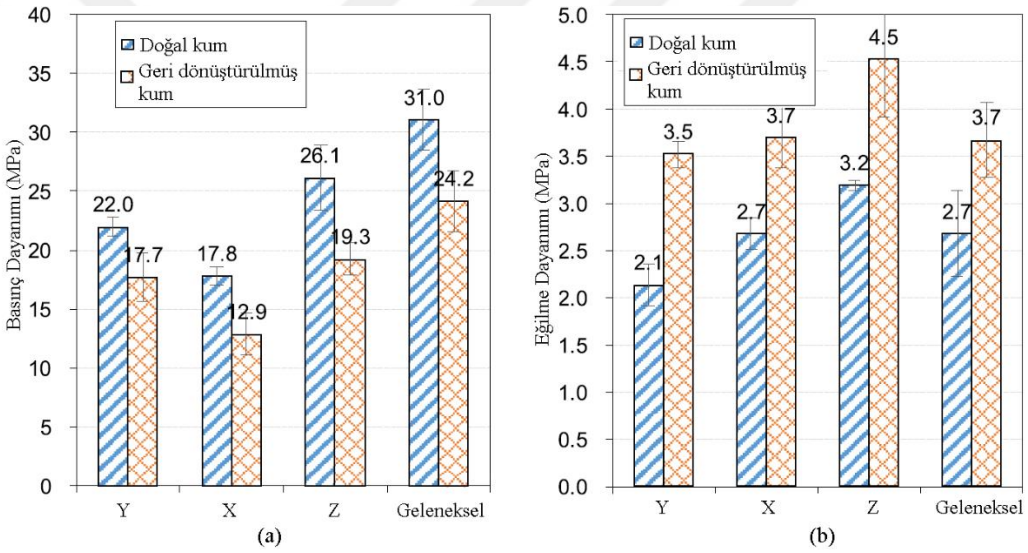


Şekil 1.21 Eğilme dayanımları deney sonuçları (Sanjayan vd., 2021)

Marchment ve Sanjayan (2020) hazırladıkları ekstrüde karışımların 7. gün eğilme (40x40x160 mm boyutunda numune, X ve Z yük uygulama yönlerinde) ve eğilme sonrası basınç dayanımlarını (40x40 mm boyutunda, X ve Z yük uygulama yönünde) BS EN 196 1:1995 standardına göre ölçmüştür. Çalışma kapsamında geleneksel yöntemle kalıplanarak üretilen karışımlarla kıyaslama yapılmıştır. Çalışma sonucunda geleneksel yöntem, X ve Z yönündeki basınç dayanımları sırasıyla 64, 38, 43 MPa ölçülürken, eğilme dayanımları sırasıyla 8,2, 8,6, 7,3 MPa olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımında en yüksek dayanım geleneksel yöntemde elde edilirken ve geleneksel yöntem ile ekstrüzyon yöntemi arasında önemli dayanım farkı varken, eğilme dayanımı için bütün değerler birbirine yakın ve en yüksek dayanım X yönünde ekstrüde edilen numunelerden elde edilmiştir.

Ding, Xiao, Zou ve Wang (2020) hazırladıkları ekstrüde karışımların 28. gün basınç dayanımlarını (X, Y, Z yük uygulama yönlerinde, 70.7×70.7×70.7 mm boyutunda numuneler) ASTM C109 standardına göre ve eğilme dayanımlarını (X, Y, Z yük uygulama yönlerinde, 90x90x360 mm boyutunda numuneler) ASTM C78 standardına

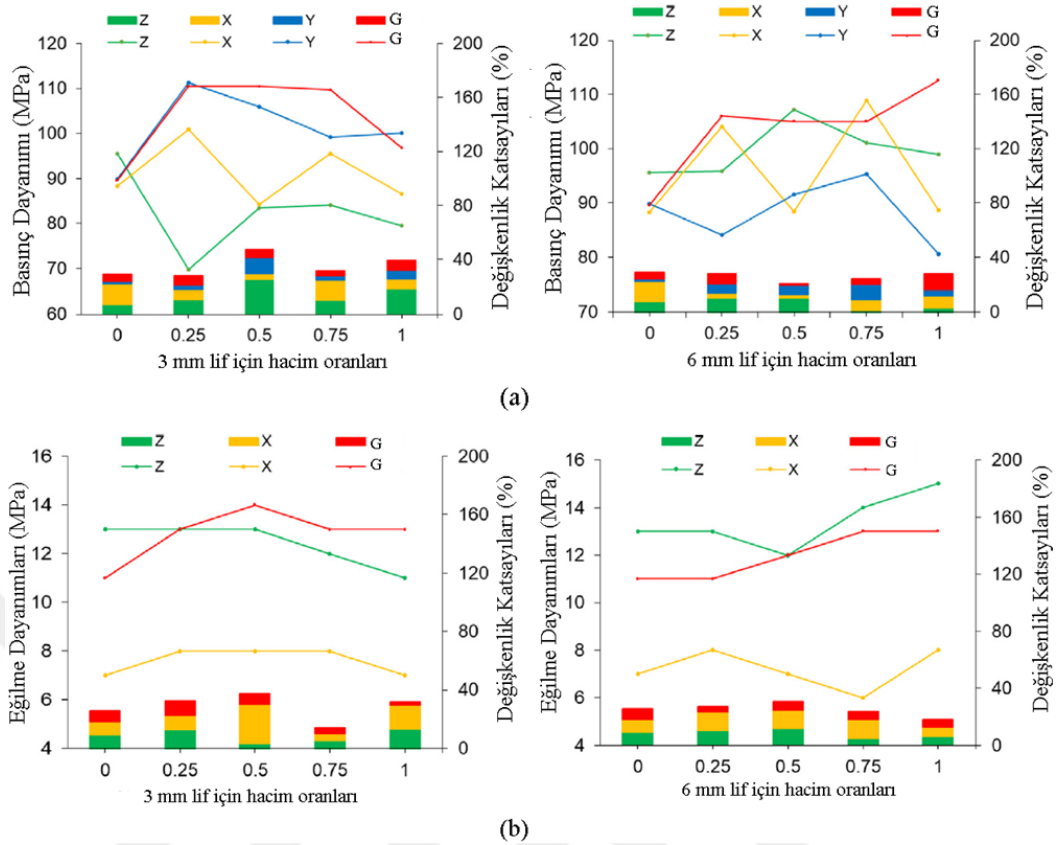
göre ölçmüştür. Çalışma kapsamında %100 doğal kum ve doğal kum yerine %25 oranında geri dönüştürülmüş ince agrega kullanımının basınç ve eğilme dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Basınç dayanımı için, geri dönüştürülmüş ince agrega kullanımı ile tüm numunelerin basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir. En yüksek dayanım %100 doğal kum kullanımı ve geleneksel yöntemle üretilen karışımlarda elde edilmiştir. Ekstrüzyon yönteminde ise en yüksek dayanım Z yönünde elde edilmiştir. Eğilme dayanımı için, geri dönüştürülmüş ince agrega kullanımında tüm numunelerin dayanımında artış gözlenmiştir. Geleneksel yöntemle üretilen karışımlar X ve Y yönlerine göre daha yüksek dayanımlar verse de en yüksek dayanım Z yönünde elde edilmiştir (Şekil 1.22).



Şekil 1.22 a) Basınç; b) Eğilme dayanımları (Ding vd., 2020)

Pham vd. (2020) hazırladıkları karışımların 28. gün basınç (50 mm boyutunda küp, X, Y, Z yük uygulama yönlerinde) ASTM C109 standardına göre ve 28. gün eğilme dayanımlarını (40x40x160 mm boyutunda, X ve Z yük uygulama yönlerinde) ASTM C348 standardına göre ölçmüştür. Bütün numunelere su kürü uygulanmış ve her bir karışım için 3 numune test edilmiştir. 0,2 mm çapında ve uzunlukları 3 ile 6 mm olan iki farklı çelik lifin %0, 0,25, 0,5, 0,75 ve 1,0 hacim oranında basınç ve eğilme dayanımları değişimleri incelenmiştir (Şekil 1.23). Şekil 1.23-a'da lifsiz karışımların basınç dayanımları geleneksel yöntem (G) ile ekstrüzyon yöntemindeki X ve Y yönlerinde hemen hemen aynıdır. Ancak, Z yönünde diğer karışımlara göre daha

yüksek basınç dayanımı ölçülmüştür. Her iki lif uzunluğunda, lif hacim oranındaki değişimin basınç dayanımı üzerinde pozitif etkisi görülmektedir. Her iki lif uzunluğunda geleneksel yöntemle üretilen numuneler genel olarak ekstrüde numunelerden daha yüksek basınç dayanımı verirken, ekstrüde numunelerde ise 3 mm uzunluğundaki lif için en yüksek basınç dayanımı Y yönünde ölçülmüştür. 6 mm lif için X ve Z yönlerinde en yüksek basınç dayanımı, Y yönünde ise en düşük basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Basınç dayanımları için geleneksel yöntemde değişkenlik katsayısı %1,09-11,42 arasında iken, ekstrüde numuneler için bu değer %1,62-25,11 arasındadır. Bu durum ekstrüde numunelerin heterojen yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 1.23-b'de ise karışımların eğilme dayanımları sonuçları gösterilmektedir. Lifsiz karışımlarda geleneksel yöntem (G), ekstrüde yöntemde X ve Z yönlerindeki dayanımlar sırasıyla 11, 7, 13 MPa ölçülmüş ve en yüksek dayanım Z yönünde elde edilmiştir. Geleneksel yöntemde 3 ve 6 mm uzunluğundaki liflerin eklenmesi ile lifsiz karışımlara göre daha yüksek eğilme dayanımları ölçülmüştür. 3 mm uzunluğunda lif eklenmesi ile dayanımda önemli değişimler meydana gelmezken, %0,75 ve %1,0 oranında 6 mm uzunluğunda lif eklenmesi ile eğilme dayanımlarında önemli artışlar yaşanmıştır. 3 mm uzunluğundaki lifler ile en yüksek eğilme dayanımı geleneksel yöntemde elde edilirken, 6 mm için Z yönündeki karışımlarda en yüksek dayanım elde edilmiştir. Değişkenlik katsayıları geleneksel yöntemde %1,73-9,56 arasında değişirken, ekstrüde örneklerde %3,31-27,04 arasında değişmektedir. Bu durum, yukarıda bahsedildiği gibi ekstrüde numunelerin heterojen yapısına bağlanmıştır.



Şekil 1.23 a) Basınç, b) Eğilme dayanımları (Pham vd., 2020)

* Sütun grafiği değişkenlik katsayısını, çizgi grafikleri dayanımları göstermektedir.

1.4.2 Tabakalar Arası Aderans Dayanımları

Ekstrüzyon yöntemindeki önemli sorunlardan bir tanesi de üst üste bindirilen tabakalar şeklinde üretilmesinden dolayı tabakalar arasındaki zayıf aderans dayanımıdır. İki tabaka arasındaki bekleme süresi (ekstrüzyon süresi aralıkları) arttıkça soğuk derz oluşumundan dolayı iki tabaka arasındaki aderans zayıflar. (Sanjayan vd., 2018; Keita vd., 2019). Pratikte yapının her katmanının üzerine sonraki katmanın uygulanması için önemli bir süre geçeceğinden tabakalar arası soğuk derz oluşum riski bulunmaktadır. İki tabaka arasındaki zayıf ara yüzeyde lokal gerilme yoğunlaşması (stress concentration-gerilme akışında kesinti) meydana geleceğinden tabakalarda kusur, çatlak ve yapının şeklinde düzensizlikler ortaya çıkabilmektedir (Le vd., 2012b).

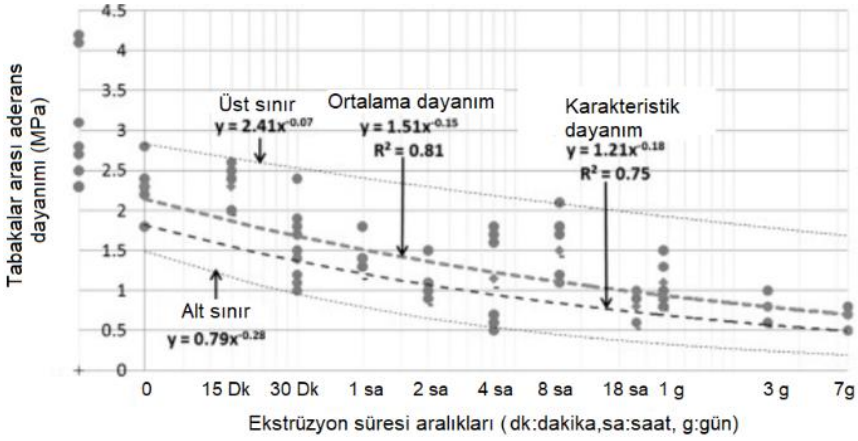
Sakka, Assaad, Hamzeh ve Nakhoul (2019) hazırladıkları karışımların 28. gün aderans dayanımlarını çekme koparma test cihazı ile BS EN 1542 standardına göre ölçmüştür. Çalışma kapsamında ekstrüde numunelerin aderans dayanımlarının ekstrüzyon süresi aralıkları, kür koşulları ve karışım içinde SBR (stiren bütadien kauçuk) polimeri kullanımı ile değişimleri incelenmiştir (Tablo 1.11). Çimento 550, 750 kg/m^3; su/bağlayıcı oranı 0,35-0,45 ve bağlayıcının %15'i oranında SBR polimeri kullanılmıştır. Karışımlar 2 farklı kür koşulunda hazırlanmıştır (Laboratuvar ortamındaki oda koşulları ve 12 saat 45°C- 12 saat oda koşulları ile 7 gün boyunca döngüsel olarak). Çalışma sonucunda, ekstrüzyon süresi aralıklarının artışı ile aderans dayanımının düştüğü, SBR latex eklenmesi ile aderans dayanımlarında artış yaşandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıktaki kür koşullarında aderans dayanımlarının düştüğü, SBR eklenmesi ile sözü edilen azalmaların hafifletilebileceği ifade etmişlerdir.

Tablo 1.11 Aderans dayanımı sonuçları (Sakka vd. 2019)

	Ekstrüzyon süresi aralıkları (standard kür)			Ekstrüzyon süresi aralıkları (Yüksek sıcaklıkta kür)		
	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
550-0.45	2.7	2.92	2.34	1.65	1.74	0.95
550-0.45-15%SBR	3.58	3.16	3.02	2.88	2.33	2.64
750-0.35	3.27	2.96	2.42	2.86	2.02	0.8
750-0.35-15%SBR	4.87	4.1	4.04	3.95	2.88	3.02

* Tüm aderans dayanımları MPa biriminde alınacaktır.

Le vd. (2012b) Şekil 1.24'te gösterildiği gibi, ekstrüde örneklerin aderans dayanımlarını farklı ekstrüzyon süresi aralıklarında ölçmüşlerdir. Hazırlanan örnekler üzerinde 28. günde doğrudan çekme testi uygulanmıştır. Ekstrüzyon süresi aralığının artmasıyla tabakalar arası aderans dayanımının azaldığı ifade edilmiştir. 0 ve 15 dakikalık ekstrüzyon süresi aralıklarında ortalama aderans dayanımı 2,3 MPa iken, 7 günlük ekstrüzyon süresi aralığındaki aderans dayanımı ortalama 0,7 MPa'a düşmüştür. Bu dayanım azalmasının, eski ve yeni tabaka arasındaki üniform olmayan büzülmeden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu durum geleneksel beton dökümü sırasında verilen aralardan kaynaklanan soğuk derz oluşumuna benzetilebilir.



Şekil 1.24 Farklı ekstrüzyon süresi aralıklarında aderans dayanımlarındaki değişim (Le vd., 2012b)

Marchment vd. (2019) ekstrüde örneklerin 7. gündeki tabakalar arası aderans dayanımlarına çimento pastası ve çeşitli kimyasal katkıların etkilerini incelemişlerdir. Tabakalar arasında çimento pastası olmayan örneklerin tabakalar arası ortalama aderans dayanımının 0.27 MPa olduğu ifade edilmiştir. Sadece çimento pastası kullanılan kontrol örneklerinin ortalama aderans dayanımını, yaklaşık olarak 0.30 MPa olarak belirlemişlerdir. Çimento pastası-geciktirici katkı ve çimento pastası-viskozite düzenleyici katkılı örneklerin her ikisinde de 0.34 MPa'lık ortalama dayanım ölçmüşlerdir. Çimento pastası-süperakışkanlaştırıcı katkılı örneklerin tabakalar arası ortalama aderans dayanımını 0.43 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı türde katkı kullanımı ile tabakalar arası aderans dayanımın arttırılabileceği ifade edilmiştir.

Literatür taramaları kapsamında, karışımların doğrudan çekme test cihazı ile 7. gün tabakalar arası aderans dayanımı 0.27-0.7 MPa arasında iken, 28. gündeki tabakalar arası aderans dayanımının 0.75-1.5 MPa arasında olduğu görülmektedir (Soltan ve Li, 2018; Sanjayan vd., 2018; Marchment vd., 2019; Le vd., 2012b). Literatür taramaları incelendiğinde tabakalar arası aderans dayanımı için doğrudan çekme test cihazı ile yaygın olarak çalışma yapılmışken, çekme-koparma (pull-off) cihazı ile aderans dayanımının ölçülmesi yok denecek kadar azdır.

BÖLÜM İKİ

MALZEME, METOD VE KAPSAM

2.1 Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada kullanılacak Portland çimentosu CEM I 42,5R tipi olup Çimentaş fabrikasından temin edilmiştir. Uçucu kül İzmir Demir Çelik tesisinden temin edilen F tipi uçucu küldür. Yüksek fırın cürufu Adana Çimento fabrikasından, metakaolin katkısı ise yurtdışından temin edilmiştir. Mineral katkılara ait fiziksel, kimyasal ve mekanik analizler Tablo 2.1'de verilmiştir. Karışımların tiksotropik özelliklerini arttırmak, koheziflik ve yapışkanlık özelliklerini geliştirmek için metil hidroksietil selüloz kökenli (MHEC) viskozite düzenleyici katkı (VDK) kullanılmıştır. Toz halde VDK kullanılmasının sebebi bu katkıların düşük oranda bile kohezifliğe önemli bir etkisinin olmasıdır. VDK özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Hedef şekil koruma katsayısını (yaklaşık olarak 1,0) sağlamak amacıyla farklı oranlarda ticari ismi Master Glenium SKY 608 olan yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Lif olarak yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP-high tenacity polypropylene) kullanılmış olup özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Agrega olarak maksimum tane çapı 2 mm ve özgül ağırlığı 2,7 olan kırma ince agrega kullanılmıştır. İnce agreganın tane boyut dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir. Tüm malzemelerin özellikleri üretici firmalardan temin edilmiştir.

2.2 Karışımların Hazırlanması ve Örnek Alımı

Karışımların hazırlanması aşamasında literatür taramaları referans alınarak öncelikle çimento, mineral katkılar, viskozite düzenleyici katkı gibi toz malzemeler Hobart mikserde 1 dakika boyunca yavaş hızda (56 dev/dk.) karıştırılmıştır. Kuru karışıma karışım suyu eklenerek 1 dakika yavaş ve 1 dakika orta hızda (104 dev/dak) karıştırılmıştır. Sonrasında süperakışkanlaştırıcı katkı eklenerek 1 dakika düşük ve 1

dakika orta hızda karıştırılma işlemine devam edilmiştir. Son olarak, lifler karışıma eklenerek liflerin tamamıyla homojen bir şekilde dağıtılması için 5 dk. orta ve 2 dk. yüksek hızda (185 dev/dak) karıştırılma sonrası işlem sonlandırılmıştır.

Tablo 2.1 Portland çimentosunun (CEM I 42,5 R), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (YFC), uçucu külün (UK) ve Metakaolinin (MK) kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik özellikler		Portland Çimentosu (PÇ)	Granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	Uçucu Kül (UK)	Metakaolin (MK)
Kimyasal kompozisyon (%)	SiO_2	18,11	39,98	53,73	54,93
	Al_2O_3	4,42	11.06	22,18	41
	Fe_2O_3	3,09	0,77	5,40	2
	CaO	63,43	32,95	3,37	0,04
	MgO	1,31	10,26	1,08	0,06
	Na_2O	0,57	N/A	0,22	0
	K_2O	0,81	N/A	1,85	0,21
	SO_3	3,57	0,34	0,25	0,03
	Kızdırma kaybı	4,00	2,34	9,99	0,08
	Cl^-	0,011	0,0075	0,0184	N/A
	Serbest kireç	1,40	N/A	0,21	N/A
Özgül ağırlık		3,11	2,87	2,23	2,79
Özgül yüzey alanı (m^2/kg)		329	550	N/A	239,7
Priz Başlangıç süresi (dakika)		161	---	---	---
2 / 28 günlerdeki Basınç dayanımı (MPa)		29,9 /49,6	---	---	---
28. gündeki puzolanik aktivite indeksi (PAI) (%)		---	90**	87***	129

* N / A: mevcut değil.

** PAI, ASTM C989'a göre belirlenmiştir.

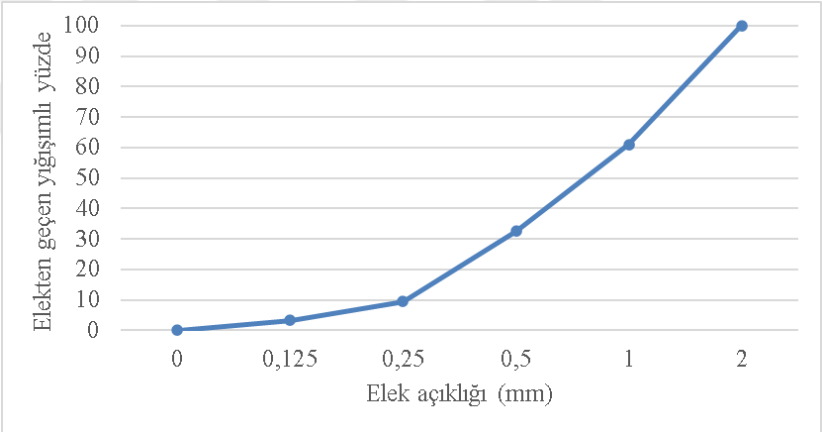
*** PAI, ASTM C311'e göre belirlenmiştir.

Tablo 2.2 Viskozite düzenleyici katkı özellikleri

Ticari ismi	TYLOSE MH 600 YP2
Kimyasal köken	Metil hidroksietil selüloz
Aktif madde içeriği	En az %91,5
Nem	En fazla %7
NaCl içeriği	En fazla %1,5
Tane boyutu <180 mikron	En az %85
Tane boyutu <100 mikron	En az %25
Tane boyutu <125 mikron	-
Viskozite Brookfield 20 rpm (%1,9'luk çözelti)	En az %28

Tablo 2.3 Lif özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık	Young modülü (GPa)
10	12	850	0,91	6



Şekil 2.1 İnce agrega tane boyut dağılımı

Çalışma kapsamında ikili bağlayıcı sistem (çimento+mineral katkı) için 8 ve üçlü bağlayıcı sistem (çimento+metakaolin+ mineral katkı) için 8 olmak üzere toplamda 16 farklı karışım tasarlanmıştır. İkili sistemlerde çimento-uçucu kül ve çimento-yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren serilere metakaolin eklenerek üçlü sistemlerde karışımlar oluşturulmuştur. Karışım oranları ağırlıkça Tablo 2.4'te sunulmuştur. VDK ve metakaolin, hazırlanan karışımların kohezif özelliklerini arttırmak ve böylece inşa edilebilirlik özelliklerini arttırmak amacıyla sabit bir oranda kullanılmıştır. Geleneksel yöntemden farklı olarak kalıp

kullanılamadığı için, inşa edilebilirlik özelliklerinin etkilenmemesi amacıyla süperakışkanlaştırıcı katkı oranı her karışımda farklılık göstermektedir. Mineral katkı/çimento oranı, kum oranı, VDK oranı tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. İki farklı lif dozajında (toplam hacmin %0,4'ü ve %1,5'i) karışımlar üretilmiş, böylece HTPP liflerin hem ekstrüde/inşa edilebilirlik hem de mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. 3B ekstrüde/inşa edilebilir karışımlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun etkisi ayrıca incelenmiştir. Su/bağlayıcı oranının karışımların taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisini incelemek için düşük ve yüksek su/bağlayıcı oranında (0,27 ve 0,4) karışımlar hazırlanmıştır.

Tablo 2.4 Karışım oranları (Ağırlıkça)

SİSTEM	KARIŞIMLAR	Çimento	Uçucu kül	Yüksek fırın cürufu	Metakaolin	Viskozite katkısı	Süperakışkanlaştırıcı	Kum	Lif	Su/Bağlayıcı
İKİLİ SİSTEM	K1	1	1,1	-	-	0,08	1,4	0,5	1,5	0,27
	K2	1	1,1	-	-	0,08	1,0	0,5	0,4	0,27
	K3	1	1,1	-	-	0,08	-	0,5	0,4	0,4
	K4	1	1,1	-	-	0,08	-	0,5	1,5	0,4
	K5	1	-	1,1	-	0,08	1,3	0,5	1,5	0,27
	K6	1	-	1,1	-	0,08	1,0	0,5	0,4	0,27
	K7	1	-	1,1	-	0,08	-	0,5	0,4	0,4
	K8	1	-	1,1	-	0,08	-	0,5	1,5	0,4
ÜÇLÜ SİSTEM	M1	1	0,8	-	0,3	0,08	1,3	0,5	1,5	0,27
	M2	1	0,8	-	0,3	0,08	0,9	0,5	0,4	0,27
	M3	1	0,8	-	0,3	0,08	-	0,5	0,4	0,4
	M4	1	0,8	-	0,3	0,08	-	0,5	1,5	0,4
	M5	1	-	0,8	0,3	0,08	1,4	0,5	1,5	0,27
	M6	1	-	0,8	0,3	0,08	1,0	0,5	0,4	0,27
	M7	1	-	0,8	0,3	0,08	-	0,5	0,4	0,4
	M8	1	-	0,8	0,3	0,08	-	0,5	1,5	0,4

* Lif, toplam karışım hacminin yüzdesi olarak alınmıştır.

2.3 Metod

Bu bölümde üretilen karışımlar üzerinde gerçekleştirilen taze ve sertleşmiş hal deneyleri açıklanmıştır. Taze halde ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerinin incelenmesi, mini yayılma çaplarının ölçümü, reolojik parametrelerin reometre ve Vicat cihazı sonda aparatı yardımıyla ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş hal deneylerinde ise birim hacim ağırlık ölçümü, basınç, eğilme ve tabakalar arası aderans dayanımı deneyleri yapılmıştır.

2.3.1 Taze Hal Deneyleri

2.3.1.1 Karışımların Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışma kapsamında farklı malzeme oranlarında hazırlanan karışımların ekstrüzyon tabancası (hazne hacmi 1,3 dm^3, ağız kesit alanı (1,5x5,6 cm) (Şekil 2.2-a) yardımıyla ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Tüm karışımlar için ekstrüzyon hızı sabit ve yaklaşık olarak 1,8 cm/s olarak belirlenmiştir. Van Der Putten vd. (2019) tarafından ekstrüde edilebilirlik için tek tabakanın 30 cm yol boyunca herhangi bir kusur ve tıkanma olmadan ekstrüzyon tabancası başlığından dökülebilmesi şartı tanımlanmıştır. İnşa edilebilirlik için ise 4 tabakanın herhangi bir çökme olmadan üst üste bindirilebilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri Van Der Putten vd. (2019) tarafından belirtilen tavsiyeler referans alınarak araştırılmıştır. Ayrıca, hazırlanan karışımların inşa edilebilirlik kabiliyetleri Panda vd. (2018) tarafından belirlenen şekil koruma (İnşa edilebilirlik) katsayısı değeri referans alınarak belirlenmiştir. İnşa edilebilirlik katsayısı, ekstrüde alt tabakanın genişliğinin/ekstrüzyon tabancası başlığı genişliğine (56 mm) oranı olarak ifade edilmiştir.



a) b)

Şekil 2.2 a) Ekstrüzyon tabancası ile ekstrüzyon örneği b) Şekil koruma katsayısı için alt tabaka genişliğinin ölçülmesi

2.3.1.2 Mini Yayılma Deneyleri

Bölüm 2.3.1.1'de ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerini sağlayan optimum karışımların mini yayılma konisi (100 (taban çapı) x 70 (tavan çapı) x 60 (yükseklik) mm boyutunda) ile yayılma çapları ASTM C1437:2007 standardı esas alınarak belirlenmiştir. Mini yayılma konisinin yarısına kadar harç örneği doldurulup 20 defa tokmakla sıkıştırılmış ve daha sonra koninin kalan yarısı da doldurulup 20 defa daha tokmaklanıp koninin yüzeyi perdahlanmıştır. Koni yavaşça kaldırılıp ilk andaki serbest yayılma çapı ve 15 saniye içinde 25 tabla düşürme yapılıp yayılma çapı ölçülmüştür. Ayrıca, 15 tabla düşürme sonrası yayılma çapları da TS EN 1015-3 standardı esas alınarak ölçülmüştür. İşlem 15 saniyede 15 tabla düşürme olacak şekilde yapılmıştır.

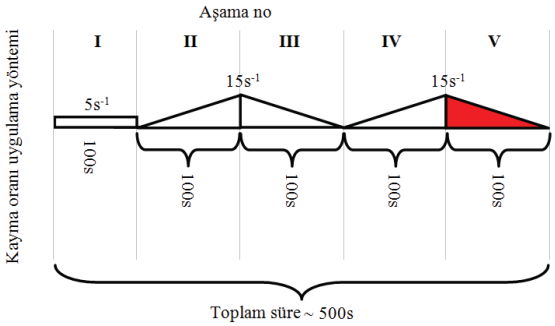
2.3.1.3 Reolojik Parametrelerin Ölçümü.

2.3.1.3.1 Rotasyonel Reometre Deneyleri. Harçların taze hal reolojik özellikleri Anton Paar Physica MCR 51 rotasyonel reometresi (Şekil 2.3-a) yardımıyla incelenmiştir. Reolojik parametrelerin elde edilmesi için 8 mm çapında bilyalı başlık kullanılmıştır. Rotasyonel reometrenin bilyalı sistemi için sınır kayma gerilmesi değeri olan 2850 Pa ve çıkılabilecek maksimum kayma hızı $35s^{-1}$'dir. Taze hal reolojik özelliklerinin elde edilmesi için reometre cihazında kayma hızı (deformasyon hızı) esas alınarak lif içermeyen matrisler için 5 aşamalı bir kayma paterni kullanılmış (Felekoğlu, 2014) (Şekil 2.3-b) ve böylece kompozitlerin akma eğrileri çıkartılıp reolojik davranışları (Bingham, Herchel Bulkley… vb) modellenmiştir. Modelleme sonucunda reolojik veriler (eşik kayma gerilmesi, viskozite) bilyanın dönüş sürecinde kararlı rejime ulaşıldığı 5. bölgeden alınan verilerle ölçülmüştür. Literatür taramaları esas alınarak lif ilave edilmiş matrislerde ise ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için 3 aşamalı model oluşturulup kullanılmıştır. (Şekil 2.3-c).

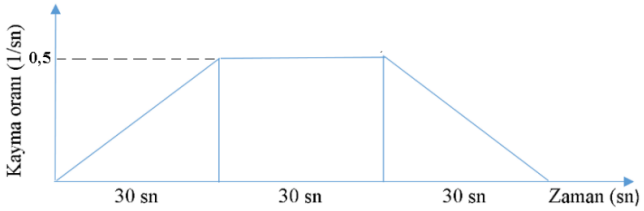
Lifsiz ve lifli karışımlarda farklı paternlerin kullanılmasının nedeni şu şekilde açıklanabilir: Lifsiz karışımlarda bilyanın dönüşünü engelleyen lif bulunmadığı için kararlı rejime ulaşılabilen 5 aşamalı model kullanılmıştır. Lifli karışımlarda ise bilyanın birden fazla tur atması durumunda liflerin bilya etrafında topaklaşması ve böylece bilyanın hareketini engellemesi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle, literatür çalışmaları da esas alınarak daha kısa bir patern (3 aşamalı model) oluşturulmuştur (Schatzman, 2005).



a)



b)



c)

Şekil 2.3 a) Çalışma kapsamında kullanılan reometre cihazı, b) matris (lifsiz) c) kompozit (lifli) karışımların taze hal reolojik parametrelerin ölçümü için oluşturulan reometre modelleri

2.3.1.3.2 Vicat Sonda Aparatı Yardımıyla Penetrasyon Derinliği ve Hızının Ölçümü. Hazırlanan karışımların taze hal reolojik özelliklerinin belirlenmesinde başvurulan bir diğer yöntem de Vicat sonda aparatı ile batma derinliği ölçümüdür. Lootens vd. (2009) özellikle kohezif ve lif içeren karışımlarda standart reometreler yardımıyla reolojik parametrelerin elde edilmesinin zor olduğunu ve bu yüzden taze hal reolojik parametrelerin elde edilmesinde standart Vicat sondasından yararlanılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu yüzden çalışma kapsamında 3B harç gibi kohezif karışımların taze hal özelliklerinin belirlenmesinde Vicat sonda aparatından yararlanılmıştır.1 cm çaplı 300 gr ağırlığındaki silindir başlıklı demir çubuk sonda daha önceden kabın içine dökülmüş taze harcın yüzeyinden serbest bırakılıp 30 sn sonunda (T30) batma derinliği ölçülmüştür. Batma derinliği ölçülen karışımların Lootens vd. (2009) tarafından önerilen denklem 2.1'de eşik kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır.

$$\tau_0 x(3 \pi R^2+2 \pi Rh)=F \quad (2.1)$$

τ_0=Eşik kayma gerilmesi (Pa)
R= Vicat çubuğu ucunun yarıçapı (mm)
F= Vicat çubuğunun ağırlığı (g)
h=Batma derinliği (mm)

Rubio vd. (2017) tarafından ifade edildiği gibi kohezif karışımlarda reometre cihazı yardımıyla veri alınamaması durumunda Vicat sondası batma derinliğinden eşik kayma gerilmesi değerine geçiş yapılabilmektedir. Ayrıca, yazarlar tarafından eşik kayma gerilmesi, yayılma çapı ve Vicat sondası batma derinliği arasında yüksek bir korelasyon bulunduğu (R^2> 0,86) ifade edilmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara ait yayılma çapları, Vicat sondası batma derinliği ve batma hızı yardımıyla elde edilen "rölatif viskozite" (vicat sondasının (başlığının) tüm karışımlarda sabit bir batma derinliğine gelme süreleri) ile eşik kayma gerilmesi değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu çalışmada tüm harçların batma hızını kıyaslayabilmek için harçlardan elde edilen minimum batma

derinliğine ulaşma süresi olarak ifade edilen "rölatif viskozite" değerleri belirlenmiştir.

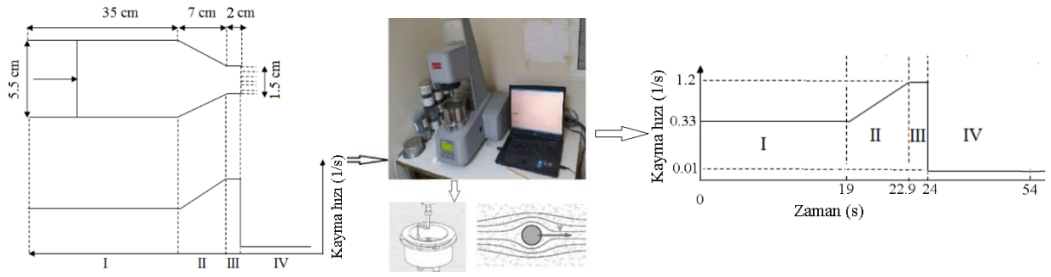
2.3.1.4 Ekstrüzyon Tabancası Boyunca Akışın Reometre Tabanlı Simülasyon

Ekstrüzyon tabancasına ait boyutlar ve simülasyon metodolojisi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Ekstrüzyon tabancası içindeki harç karışımına piston yardımıyla kuvvet uygulanır. Bu kuvvet etkisinde harç, ekstrüzyon başlığından dışarıya doğru ekstrüde olur. Ekstrüzyon tabancası geometrisinden dolayı çıkış ağzı boyutu küçülmektedir ve böylece çıkış ağzı öncesi ve sonrası durumunda farklı eşik kayma değerleri elde edilmektedir. Bu nedenle, ekstrüzyon çıkış ağzı öncesi düşük eşik kayma değeri ve viskozite değerleri, çıkış ağzı sonrası yüksek eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerine sahip harç tasarımları ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için temel hedeftir. Ekstrüzyon tabancasına ait harçların çıkış ağzı öncesi ve sonrasındaki deformasyon hızlarına ait değerler ve bu değerlere karşılık gelen pompadan geçiş süreleri Denklem 2.2 ve 2.3'ten yararlanılarak belirlenmiştir. Bu değerler bilyalı reometre cihazında simüle edilerek reolojik parametreler zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Böylece, ekstrüzyon tabancası ile reometre arasında ilişki kurulmuş ve simülasyon metodunun geçerliliği tartışılmıştır.

$$t = x/v \tag{2.2}$$

$$\dot{\gamma} = v/h \tag{2.3}$$

Burada, t harç tabancasının farklı bölümlerindeki harcın geçiş süresini (s), x ekstrüderin farklı bölümlerinin uzunluğunu (cm), v tüm numunelerdeki sabit ekstrüzyon hızını (1,8 cm/s), $\dot{\gamma}$ harç tabancasının farklı bölümlerindeki kayma hızını (1/s), h kesit azalmasının olduğu iç çapı (cm) temsil etmektedir. v (ekstrüzyon hızı=1,8 cm/s) seçilmesinin sebebi, ön deneylerde tüm karışımlarda süreksizlik sağlamayan optimum ekstrüzyon hızı olmasıdır.



(a) (b) (c)

Şekil 2.4 a) Ekstrüzyon pompası ve başlık sistemi ile ekstrüzyon pompası boyunca kayma hızı değişimi, b) bilyalı reometre ve çalışma prensibi, c) Ekstrüzyon pompası boyunca harç için hesaplanan zamana bağlı kayma hızı modeli

* I, II, III, IV, sırasıyla ekstrüzyon öncesi düşük kayma hızı bölgesi, kayma hızı artış bölgesi, yüksek kayma hızı bölgesi ve ekstrüzyon sonrası çok düşük kayma hızını temsil eder.

Simülasyon metodunun performans değerlendirmesi açısından M1 (%1,5 lif), M2 (%0,4 lif), M1 matris (lifsiz inşa edilemeyen karışım), lifsiz inşa edilebilir karışım (uçucu kül/çimento=1,1 ve su/bağlayıcı=0,32) olmak üzere dört farklı karışım tasarımı ile çalışılmıştır. Çalışma kapsamında simülasyon yeteneği ölçüldüğü için birbirinden farklı karışım türleri seçilmiştir. Bu seçim yapılırken özellikle lif etkisine odaklanılmıştır.

2.3.2 Sertleşmiş Hal Deneyleri

2.3.2.1 Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

Ekstrüzyon ile üretilmiş karışımların düzensiz şekillerinden dolayı arşimet terazisi yardımıyla hacimleri belirlenip birim hacim ağırlıkları (B.H.A) hesaplanmıştır (Şekil 2.5). Ekstrüde karışım örneği pompadan basıldıktan sonra 1 gün boyunca oda koşullarında bekletilip priz kazandıktan sonra kuru ağırlığı (W_{kuru}) ölçülmüştür. Daha sonra arşimet terazisinde su içindeki hazneye bırakılıp su içerisinde (W_{su}) tartılmıştır. Karışımların birim hacim ağırlıkları $W_{kuru}/(W_{kuru}-W_{su})$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, karışımlara ait hava sürükleme oranı (%) ise (teorik B.H.A-gerçek B.H.A)/teorik B.H.Ax100 formülü ile hesaplanmıştır.



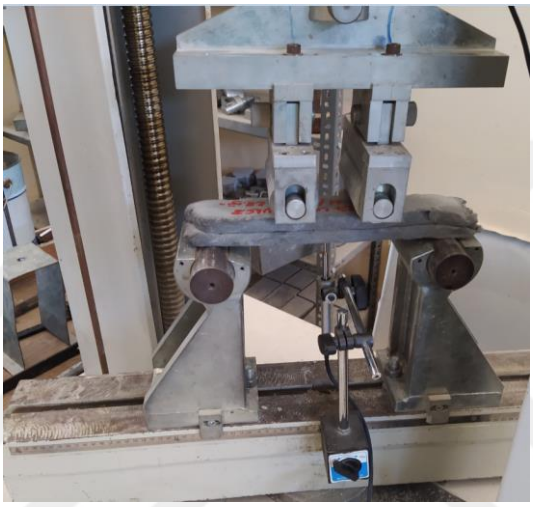
Şekil 2.5 Arşimet terazisi ile birim hacim ağırlık deneyi

2.3.2.2 Basınç ve Eğilme Deneyleri

Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait 7. ve 28. gün basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Basınç deneyi için dört tabakalı numune üretilmiş ve 49 mm çapında karot cihazı ile 49x60 mm boyutunda silindir numune alınmıştır. Prizma numunelerin yüzeyinde kusurlar oluşacağı için basınç deneyinde prizma yerine silindir numuneler alınmıştır. Kesme cihazı yardımıyla 49x49 mm boyutunda düzgün yüzeyli silindir numune şekline getirilmiş ve basınç presinde 0,6 MPa/s yük uygulama hızında basınç dayanımları TS-EN 12390-3 (2010) standardına uygun olarak belirlenmiştir (Şekil 2.6). Basınç dayanımları ekstrüzyon yönüne dik yönde ölçülmüştür. Eğilme deneyi için iki tabakalı (56 mm (genişlik) x 30 mm (yükseklik) x 300 mm(uzunluk)) döküm yapılmış ve 0,5 mm/dk. deplasman uygulama hızıyla TS EN 12390-5 standartlarına uygun olarak dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır (Şekil 2.7). Deney için mesnetler arası yükleme açıklığı 260 mm'dir. Her bir karışım için 3 adet numune alınmış ve bu 3 numunenin ortalama basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür (Şekil 2.7). Örneklerin standart sapma değerleri de hesaplanarak grafiklerde gösterilmiştir. Bütün numuneler laboratuvar koşullarında (hava kürü) kür edilmiş ve hava kürü sonrası dayanımlar ölçülmüştür.



Şekil 2.6 a) Karot makinesi ile numune alımı, b) numune kesim cihazı, c) basınç deneyi cihazı



Şekil 2.7 Dört noktalı eğilme deneyi

2.3.2.3 Çekme Koparma Dayanımı (Tabakalar Arası Aderans) Deneyleri

Çalışma kapsamında eski ve yeni tabaka arasındaki aderans dayanımına farklı ekstrüzyon bekleme süresi aralıklarının (0. dk., 30 dk. ve 1. gün) etkisi araştırılmıştır. Uygun geometride hazırlanan harçların tabakalar arası aderans özellikleri ASTM D4541 standardı Tip V sınıfına uygun Defelsko Positest AT modeli bir çekme-koparma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı ekstrüzyon süresi aralıklarında üretilen harç tabakaları üzerinde karot açma makinesi ile 50 mm çapında izler açılmıştır (Şekil 2.8-a). Açılan bu izler üzerine epoksi reçinesi ile piyonlar yapıştırılmıştır (Şekil 2.8-b). 48 saat epoksi reaksiyonunun tamamlanması için bekletildikten sonra çekme-koparma deney cihazı (Şekil 2.8-c) ile tabakalar arası

mekanik aderans dayanımları ölçülmüştür. Tüm örnekler laboratuvar koşullarında bekletilerek (hava kürü) 7. ve 28. gün aderans dayanımları belirlenmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 2.8 a) Karot makinesi ile numunelerde iz açma, b) Piyonların yapıştırılması, c) Çekme koparma cihazı ile aderans dayanımının ölçülmesi

2.3.2.4 Tabakalar Arası Doğrudan Çekme Aderans Dayanımı

İki tabaka halinde 100 mm x 56 mm boyutunda üretilen ekstrüde numuneler 60 mm x 300 mm boyutunda paralel iki plaka arasına epoksi reçinesi ile yapıştırılmıştır. 50 kN yük kapasiteli bir çekme test cihazı (Şekil 2.9) ile 0,5 mm/dk.lık çekme hızıyla çekme testleri yapılmıştır. Aderans dayanımları maksimum yük (N)/tabakalar arası yüzey alanı (mm^2) formülü ile hesaplanmıştır. Çekme-koparma aderans dayanımları ile doğrudan çekme aderans dayanımları arasındaki ilişkinin incelenmesi için uçucu kül içeren seriler (M1, M2, M3) seçilmiştir. Her bir karışım için farklı ekstrüzyon bekleme süresi aralıklarında (0. dk., 30. dk., ve 1. gün) 3'er adet numune hazırlanmıştır. Laboratuvar koşullarında (hava kürü) bekletilen numunelerin 7. ve 28. gündeki aderans dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 2.9 Doğrudan çekme test cihazı

2.4 Kapsam

Tez önerisi kapsamında Portland çimentosu, mineral katkılar, lif, viskozite düzenleyici katkı vs. gibi malzemeler temin edilip ikili ve üçlü bağlayıcılı sistemlerde farklı karışım tasarımları için ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri araştırılmıştır. İkili sistemlerde ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterleri sağlanamadığı için üçlü sistemlere geçilmiştir. Üçlü sistemlerde ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterleri sağlanmış ve taze halde yayılma çapları, Vicat sondası ve rotasyonel reometre ile reolojik parametrelerin dolaylı yoldan ölçümü gerçekleştirilmiştir. Reometrede hem lifli hem de lifsiz karışımların reolojik parametreleri incelenmiştir. Ekstrüde/inşa edilebilir karışımların ekstrüzyon tabancası içindeki akış davranışının reometre yardımıyla simüle edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Sonrasında sertleşmiş halde birim hacim ağırlık, eğilme, basınç dayanımları ile çekme koparma ve doğrudan çekme aderans dayanımları belirlenmiştir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

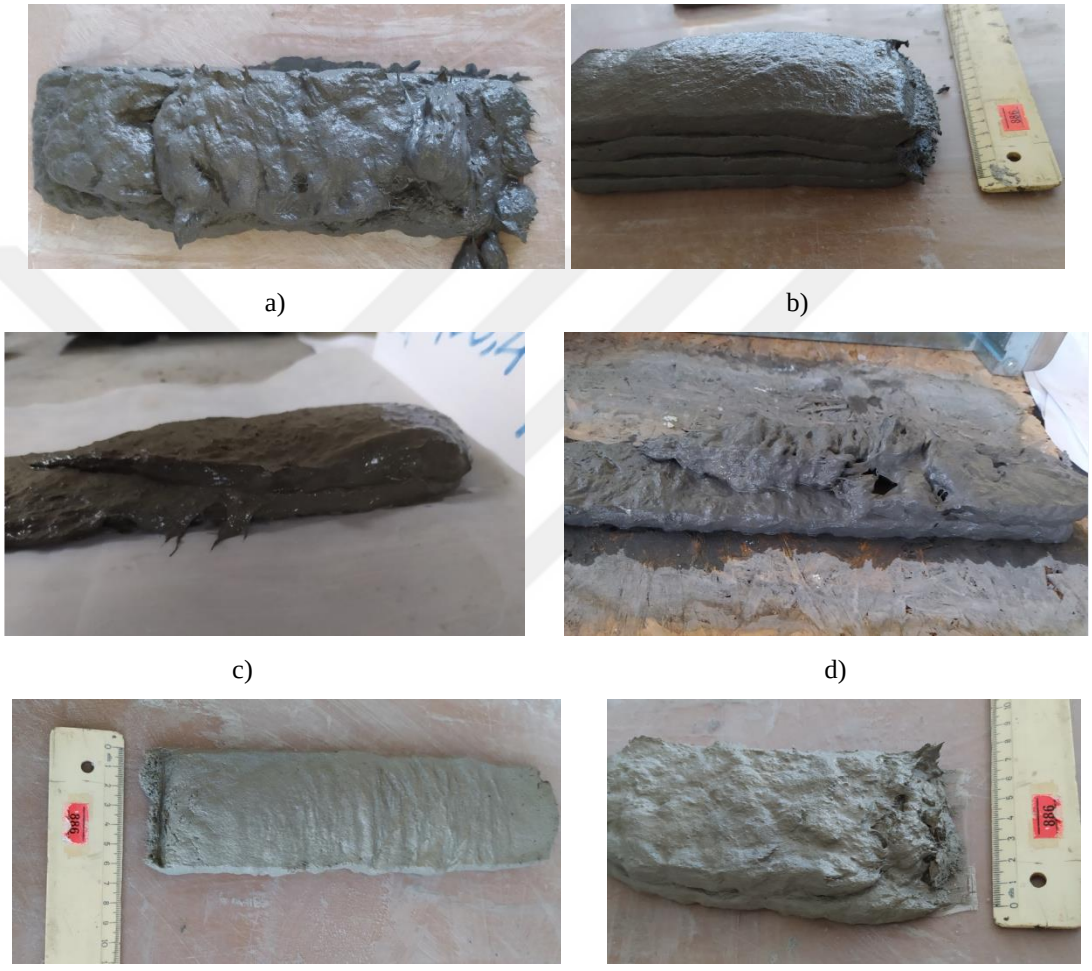
3.1 İkili Sistemler ile Üretilen Karışımların Taze Hal Özellikleri

Çalışma kapsamında çimento+uçucu kül ve çimento+yüksek fırın cürufu olmak üzere farklı karışım tasarımları hazırlanmıştır (Tablo 2.4). Her bir karışım için düşük su/bağlayıcı oranı (S/B=0,27) ve yüksek su/bağlayıcı oranı (S/B=0,40) olmak üzere iki farklı su/bağlayıcı oranında hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca her bir karışım için düşük lif oranı (hacimce %0,4 oranında) ve yüksek lif oranında (hacimce %1,5 oranında) karışım tasarımları yapılmıştır. Çalışma sonucunda hem uçucu küllü hem yüksek fırın cüruflu sistemlerde K2, K3, K7 karışımlarının görsel muayene sonucu kendi ağırlığı altında çöktüklerinden dolayı, inşa edilebilirlik açısından yetersiz oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, diğer karışımlarda (K1, K4, K5, K6, K8) ise süreksizlik meydana gelmiş ve K4 ve K8 için şekil koruma katsayıları ölçülememiştir. Bazı karışımlara ait görseller Şekil 3.1'de verilmiştir. Panda vd. (2021) ve Panda vd. (2018) tarafından belirtildiği gibi ikili sistemde hazırlanan karışımların şekil koruma katsayısı hesaplanarak inşa edilebilirlik özellikleri incelenmiştir (Tablo 3.1). Hem görsel muayene sonucu hem de şekil koruma katsayıları değerlendirildiğinde bütün karışımlarının ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 3.1 İkili sistemde hazırlanan karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik ve şekil koruma katsayıları (Karışım oranları için Tablo 2.4'e bakınız)

Karışımlar	Ekstrüde/inşa edilebilirlik	Şekil koruma katsayısı (inşa edilebilirlik katsayıları)
K1	Yetersiz	0,78
K2	Yetersiz	0,77
K3	Yetersiz	0,94
K4	Yetersiz	Ölçülemedi
K5	Yetersiz	0,77
K6	Yetersiz	0,84
K7	Yetersiz	0,70
K8	Yetersiz	Ölçülemedi

Sonuç olarak; tez çalışması kapsamında belirlenen harç tasarımları için ikili sistemlerde hem düşük hem de yüksek su/bağlayıcı oranında ekstrüde edilebilir karışımların üretilemeyeceği görülmüş, bu yüzden ekstrüde/inşa edilebilir harç karışım tasarımları üretimi için üç farklı bağlayıcının olduğu üçlü sistemler (çimento+metakaolin+UK/YFC) üzerine yoğunlaşılmıştır.



a) b) c) d) e) f)

Şekil 3.1 İkili sistemde ekstrüde edilebilen ancak inşa edilemeyen a) K1, b) K2, c) K3, d)K5, e) K6, f) K7 karışımlarına ait ekstrüzyon örnekleri

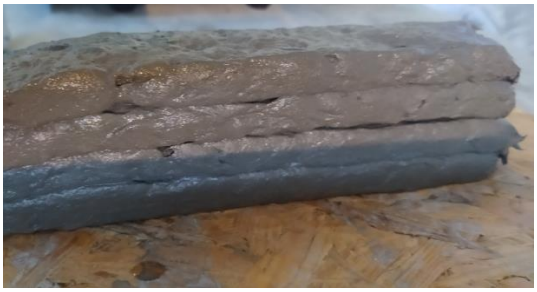
3.2 Üçlü Sistemler ile Üretilen Karışımların Taze Hal Özellikleri

3.2.1 Karışımların Ekstrüde/İnşa Edilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi

İkili sistemlerde yüksek su/bağlayıcı oranında ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri açısından yetersiz kalan serilerin inşa edilebilirlik özelliklerinin geliştirilmesi için uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışımlara uçucu kül ve yüksek fırın cürufu yerine ağırlıkça %30 oranında metakaolin eklenerek 8 farklı üçlü sistem karışım örneği hazırlanmıştır (Tablo 2.4).

Çalışma kapsamında üçlü sistemde üretilen karışımlara ait örnekler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Görsel muayene sonucunda hem uçucu küllü sistemde hem de yüksek fırın cüruflu sistemde yüksek su/bağlayıcı oranı-yüksek lif dozajında (hacimce %1,5) üretilen karışımlarda (M4 ve M8) süreksizlik/çökmeler meydana gelmiştir. Bu nedenle söz konusu karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 3.2-d ve Şekil 3.3-d). Diğer 6 karışımda ise görsel muayene sonucunda ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından herhangi bir sorun görülmemiştir (Şekil 3.2-a, b, c ve Şekil 3.2-a, b, c).

Her bir karışıma ait şekil koruma katsayısı değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Şekil koruma katsayısı M1, M2, M5 ve M6 karışımlarında 1,0 olarak ölçülmüştür. Böylece bu karışımlar Panda vd. (2018)'e göre inşa edilebilir harç karışımı olarak değerlendirilmiştir. M3 ve M7'e ait şekil koruma katsayısı değerleri sırasıyla 0,98 ve 0,99 olarak elde edilmiştir. Böylece ilgili karışımların inşa edilebilirlik özelliklerinin diğer karışımlara göre daha düşük olarak değerlendirilmiştir. Literatürde bir karışımın inşa edilebilir bir karışım olarak değerlendirilebilmesi için şekil koruma katsayısı açısından herhangi bir limit değer belirlenmemiştir. Bu yüzden, şekil koruma katsayıları karışımlar arasında karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. M4 ve M8 örneklerinde oluşan süreksizlikler/düzgün olmayan şeklinden dolayı şekil koruma katsayıları ölçülememiştir. Genel olarak hem görsel muayene sonucu hem de şekil koruma katsayısı göz önüne alındığında UK ve YFC'li karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri açısından herhangi bir fark gözlenmemiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.2 Üçlü sistemlerde üretilen a) M1; b) M2; c) M3; d) M4 için ekstrüzyon örnekleri



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.3 Üçlü sistemlerde üretilen a) M5; b) M6; c) M7; d) M8 için ekstrüzyon örnekleri

Tablo 3.2 Üçlü sistemde üretilen karışımlara ait ekstrüde/inşa edilebilirlik ve şekil koruma katsayısı değerleri (karışım oranları Tablo 2.4'te görülebilir.

Karışımlar	Ekstrüde/inşa edilebilirlik	Tabaka yüksekliği (cm) (4 tabaka için)	Tabaka genişliği (cm) (b)	Şekil koruma katsayısı
M1	Yeterli	6	5,6	1
M2	Yeterli	6	5,6	1
M3	Yeterli	5,9	5,7	0,98
M4	Yetersiz	Ölçülemedi	Ölçülemedi	Ölçülemedi
M5	Yeterli	6	5,6	1
M6	Yeterli	6	5,6	1
M7	Yeterli	5,95	5,65	0,99
M8	Yetersiz	Ölçülemedi	Ölçülemedi	Ölçülemedi

*Ekstrüzyon tabancası başlığı yüksekliği 1,5 cm'dir. 4 tabaka için toplam yükseklik maksimum 6 cm olmaktadır.

Sonuç olarak, ilk aşamada incelenen ikili sistemlerle üretilen lifli karışımların hem düşük hem de yüksek su/bağlayıcı oranlarında, ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Üçlü sistemlerle üretilen karışımların hem görsel muayene sonucu hem şekil koruma katsayıları dikkate alınarak ikili sistemlere göre ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri açısından daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, karışımlara metakaolin eklenmesiyle üretilen harcın inşa edilebilirlik özelliklerinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Metakaolin, görece yüksek özgül yüzey alanı gereği zamanla serbest suyun büyük bir çoğunluğunu emerek ve yüksek kayma direnci oluşturmaktadır. Metakaolinin emilen suyu tekrar geri salarak düşük kayma gerilmesi oluşturacağına yönelik literatür değerlendirmelerine de rastlanmıştır. Kayma gerilmesindeki bu tersinir değişimler karışımlarda yüksek tiksotropiye yol açacağından 3B harçlar için gerekli olan yüksek tiksotropi özelliklerin kazandırılmasında metakaolinin yararlı olabileceği rapor edilmiştir (Chen vd., 2020).

3.2.2 Mini Çökme Yayılma Çapları

Üçlü sistemlerde üretilen ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için serbest yayılma (koni kaldırıldıktan hemen sonraki yayılma çapı), 15 ve 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ölçülmüştür (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Karışımlara ait yayılma çapları sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. Serbest yayılma sonucu M1, M2, M5 ve M6'da yayılma çapı 100 mm olarak ölçülmüştür (başlangıca göre sıfır yayılma artışı). Paul

vd. (2018) tarafından belirtildiği gibi 3B ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar mümkün olduğu kadar düşük yayılma çapı değerine sahip olmalıdır. Bu nedenle hem şekil koruma katsayısı hem de serbest yayılma çapı sonucu M1, M2, M5 ve M6 karışımları ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından en uygun karışımlar seçilmiştir. Ayrıca, M3 ve M7 harçlarında da az da olsa yayılma artışı meydana gelmiştir (serbest yayılma çapı değerleri 103 mm ve 101,5 mm). Tay vd. (2019) ekstrüde/inşa edilebilir harç karışımları için 25 tabla düşürmeden sonra ideal yayılma çapının 150-190 mm arasında olması gerektiğini ifade etmişlerdir. 25 tabla düşürme sonrası M2, M3, M6 ve M7 karışımları incelendiğinde bu ideal bölge içinde bulunmaktadır. M1 ve M5 karışımı bu bölgede bulunmamasına rağmen ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından herhangi bir sorun yaşanmamıştır. M4 ve M8'de ideal bölgede bulunmalarına rağmen ekstrüzyon sırasında pompada tıkanma meydana gelmiş ve ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından yetersiz kalmışlardır. Bu nedenle, yayılma çapı değerlerinin ekstrüde/inşa edilebilir karışımların belirlenmesi açısından tek başına belirleyici olamayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.3 Mini çökme yayılma çapları

Karışımlar	Mini çökme yayılma çapları (mm)		
	Serbest yayılma	15 tabla düşürme sonrası	25 tabla düşürme sonrası
M1	100	131	141
M2	100	139	149
M3	103	164	183
M4	104	140	148
M5	100	129	140
M6	100	148	164
M7	101,5	161	184
M8	103	151	182



a) b) c)

Şekil 3.4 Uçucu küllü üçlü sisteme (M1 karışımı) ait a) Serbest yayılma, b) 15 tabla düşürme sonrası, c) 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ölçümü



a) b) c)

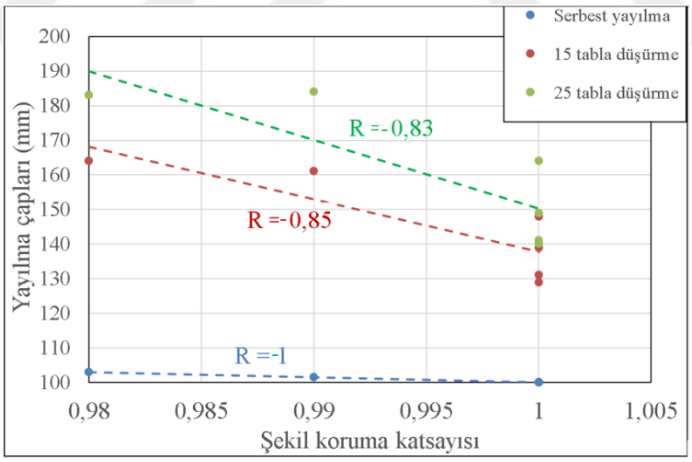
Şekil 3.5 Yüksek fırın cüruflu üçlü sisteme (M7 karışımı) ait d) Serbest yayılma, e) 15 tabla düşürme sonrası, f) 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ölçümü

Lifli kompozitlerden lif çıkarılarak elde edilen matris karışımlarına ait yayılma çapları Tablo 3.4'te verilmiştir. Lifli karışımların lifsiz karışımlara göre yayılma çaplarında %0,4 lif için %6'ya kadar ve %1,5 lif için %36'ya kadar düşüşler yaşanmıştır. Böylece akıcı kıvamdaki karışımlara HTPP liflerinin eklenmesiyle karışımların inşa edilebilirlik özelliğinin önemli derecede geliştirildiği sonucuna varılmıştır. Shakor vd. (2019) yaptıkları deneysel çalışmalarda bağlayıcının %1'i oranında polipropilen lif kullanarak yayılma çapının 188 mm'den 152 mm'ye düştüğünü belirtmiştir. Arunothayan vd. (2019) %2 oranında çelik lif kullanarak yayılma çapının 151 mm'den 141 mm'ye düştüğünü, böylece karışımların inşa edilebilirlik özelliklerinin geliştirildiğini ifade etmiştir. Literatür taramaları kapsamında da belirtildiği gibi farklı türde ve farklı oranda lif kullanılarak karışımların inşa edilebilirlik özellikleri arttırılmaya çalışılmıştır. Her ne kadar polipropilen lif ile ilgili çalışmalar yapılmış olsa da HTPP lif ile ilgili çalışmalar yok denecek kadar azdır. HTPP lifi polipropilen lifin özel bir türü olup, polipropilen lifin iki katı çekme dayanımına sahiptir. Bu yüzden çalışma kapsamında HTPP liflerin inşa edilebilirlik özellikleri üzerine etkileri araştırılmış ve HTPP liflerin karışımların yayılma çaplarını önemli derecede düşürerek inşa edilebilirlik özelliklerini geliştirdikleri belirlenmiştir. Lif kullanımı ile yayılma çaplarında düşüşler meydana geldiği için 3B ekstrüzyon yönteminde ekstrüzyon sırasında pompada tıkanma olmaması için lif dozajının optimize edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında %1,5 hacminde HTPP lif kullanımı ile karışımlarda herhangi bir sorun olmadan ekstrüde/inşa edilebilir özellikte karışım tasarımları üretilebilmiştir.

Tablo 3.4 Lifsiz (matris) karışımlara ait yayılma çapları

Karışımlar	Mini slump yayılma çapları (mm)		
	Serbest yayılma	15 tabla düşürme sonrası	25 tabla düşürme sonrası
M1	107	201	222
M2	108	180	207
M3	109	207	237
M4	111	175	202
M5	110	195	221
M6	104	181	201
M7	104	175	201
M8	105	176,5	193

Genel olarak, karışımların ekstrüde/inşa edilebilir olarak değerlendirilebilmesi için hem görsel muayene sonucunda kusurlar/süreksizlik/çökme olmaması gerekir hem şekil koruma katsayısı 1 veya 1'e çok yakın değerler almalıdır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi şekil koruma katsayısı ile serbest yayılma çapları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Şekil koruma katsayısı 1 olan karışımlar sıfır yayılma değerine karşılık gelmektedir. Serbest yayılma, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapları ile şekil koruma katsayıları arasında yüksek korelasyon katsayıları (R>-0,83) bulunmaktadır.



Şekil 3.6 Lifli ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için şekil koruma katsayısı-yayılma çapları arasındaki ilişki

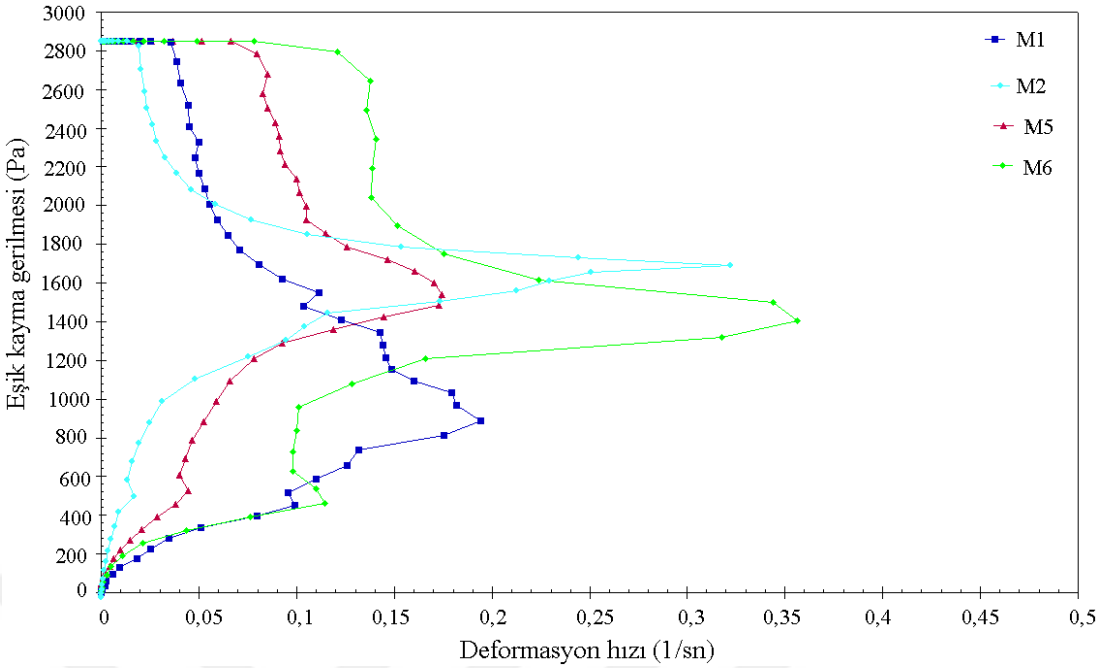
* Serbest yayılma durumunda M1, M2, M5 ve M6 üst üste çakışmaktadır (Şekil koruma katsayısı 1 için, yayılma çapları 100 mm).

3.2.3 Reolojik Parametreler

3.2.3.1 Rotasyonel Reometre Yardımıyla Belirlenen Reolojik Parametreler

Literatür bölümünde belirtildiği gibi 3B ekstrüzyon yöntemine ait en önemli özelliklerin başında ekstrüde/inşa edilebilirlik gelmektedir. Karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden ikisi eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitedir. Ekstrüzyon yöntemiyle harç üretiminde inşa edilebilirlik için yüksek eşik kayma gerilmesi değeri gerekirken, pompadan tıkanma olmadan ekstrüde edilebilmesi için plastik viskozitenin düşük olması gerekmektedir. Bu nedenle, reometre yardımıyla lifli ve lif içermeyen (yalın matris) karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir.

Üçlü sistemle üretilen bazı karışımların rotasyonel reometre ile elde edilen akma eğrileri Şekil 3.7'de verilmiştir. Akma eğrilerinden görüldüğü üzere, M1 (%1,5 lif hacmi), M2 (%0,4 lif hacmi), M5 (%1,5 lif hacmi) ve M6 (%0,4 lif hacmi) kompozitlerinin rotasyonel reometrenin bilyalı sistemi için üst sınır kayma gerilmesi değeri olan 2850 Pa değerini aştığı, ayrıca reometrede harca uygulanan kayma hızı paternine göre ulaşılması gereken 0,5 s^{-1} kayma hızına ulaşamadıkları görülmüştür. Bu durumun, reometredeki bilyalı ucun dönüşü sırasında liflerin bilyanın hareketini zorlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak lifli kompozitlerin eşik kayma gerilmesi değerlerinin 2850 Pa değerini aştığı belirlenmiştir. Diğer bir değişle reometrenin ölçüm kapasitesi aşılmıştır. Ayrıca viskozite ölçümü için de reometrede anlamlı bir sonuç alınamamıştır. Rahul vd. (2019) tarafından yapılan deneylerde düşük oranda polipropilen lif kullanımında bile (hacimce %0,2) 1500-3000 Pa arası eşik kayma gerilmesi değerleri ölçüldüğü ifade edilmiştir. Böylece, polipropilen lif kullanımıyla eşik kayma gerilmesinin önemli derecede arttığı, buna bağlı olarak bilyalı uca sahip reometre ile lifli karışımların eşik kayma gerilmesi değerlerinin belirlenemeyeceği tespit edilmiştir.

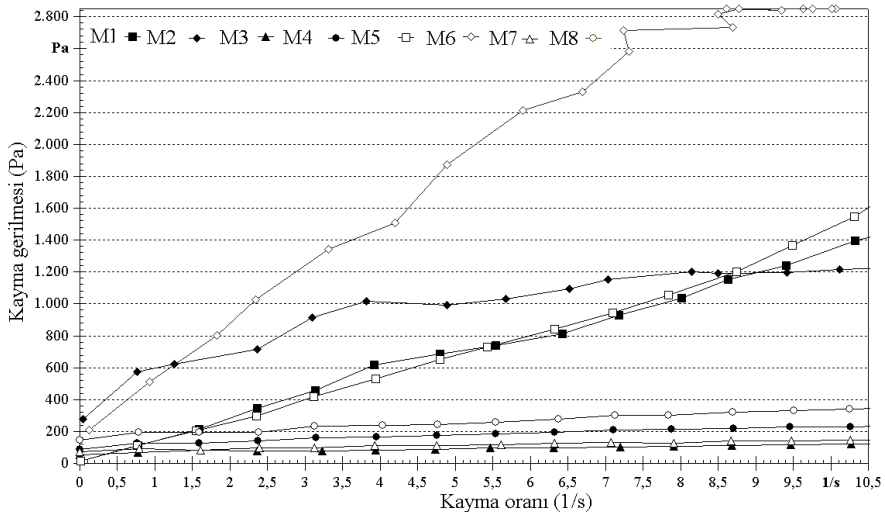


Şekil 3.7 Bazı lifli karışımlar için reometrede taze hal reolojik parametrelerin ölçümü

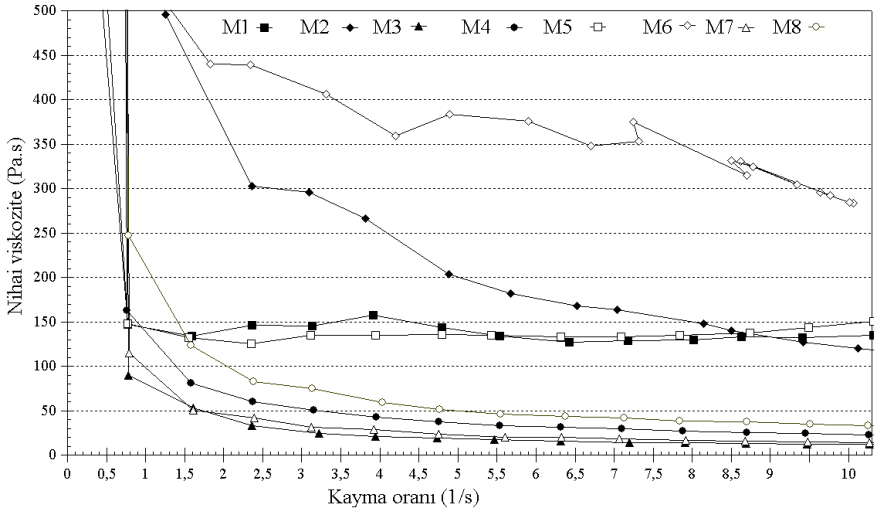
Bilyalı uca sahip reometrede lifli karışımların reolojik parametreleri belirlenemediği için, bu karışımların lif içermeyen matris fazında Herschel–Bulkley modeli ile reolojik parametreleri ölçülmüştür. Şekil 3.8'de 3B ekstrüde/inşa edilebilir kompozit (lifli) karışımlara ait yalın matrislerin (lifsiz) akma eğrisi grafiği verilmiş olup, matrislere ait eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Reometre sonucu matris karışımlarına ait eşik kayma gerilmesi değerleri Şekil 3.8-a'da sol Y ekseni ile eğrilerin kesişim noktasından (0 s^{-1} kayma hızında) 11-279 Pa arasında ölçülmüştür (Şekil 3.8-a). Bu karışımlara düşük (%0,4 hacim) oranda HTPP lif eklenmesiyle bile eşik kayma gerilmesi değerleri 2850 Pa değerini aşmaktadır (Şekil 3.7). Bu durum, HTPP lif türünün düşük oranda bile eşik kayma gerilmesi değerlerini çok fazla arttırarak karışımların inşa edilebilirlik özelliklerine önemli derecede etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Yüksek eşik kayma gerilmesi değerleri inşa edilebilirlik özelliklerini arttırırken, ekstrüde edilebilirlik özelliklerinin sağlanması açısından viskozite değerlerinin mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir. Literatüre göre optimum viskozite değerleri için kabul edilebilir bir değer bulunmamasına karşın genel olarak <40 Pa.s için literatürdeki karışımların ekstrüde edilebilirliklerinde herhangi bir sorun

yaşanmadığı ifade edilmiştir (Zhang vd., 2019; Long vd., 2019; Panda, Ruan vd., 2019). Şekil 3.8-b'de görüldüğü üzere 10,5 s^{-1} kayma hızında viskozite değerleri büyük ölçüde yataylaşmaktadır. Bu nedenle kıyaslamalarda 10,5 s^{-1} kayma hızındaki viskozite değeri kullanılmıştır. Tablo 3.5'te görüldüğü üzere M1, M5 ve M6 matrislerinin viskozite değerleri >130 Pa.s olarak ölçülmüştür. Matris karışımları için 10,5 s^{-1} kayma hızında ölçülen viskozite değerleri Zhang vd. (2019), Long vd. (2019), Panda, Ruan vd. (2019) tarafından belirlenen değerlere göre yüksek olsa da matrislerin kompozit (lifli) karışımları için ekstrüzyon sırasında ekstrüde edilebilirlik özelliklerinde herhangi bir sorun yaşanmamıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.8 Matris karışımlarının a) Eşik kayma, b) Viskozite grafikleri

* Bu değerler, 5 adımlı Herschel-Bulkley modelinin 5. adımından elde edilen değerlerdir.

Tablo 3.5 Matris karışımlarına ait reolojik parametreler

Karışım Kodu	Eşik Kayma Gerilmesi (Pa)	Viskozite (Pa. s)	Akma eğrisi korelasyon katsayısı (R)
M1	11,06	135	0,987
M2	279,3	119,9	0,988
M3	53,2	11,8	0,987
M4	87,6	22,5	0,996
M5	14,5	150,1	0,962
M6	127,0	283	0,987
M7	72,8	14	0,989
M8	150,5	33	0,992

3.2.3.2 Vicat Sonda Aparatı Yardımıyla Belirlenen Reolojik Parametreler

Literatürde de belirtildiği gibi taze hal reolojik parametrelerin ölçülmesinde özellikle kohezif veya lif içeren harçlar için kullanılan bir diğer yöntem Vicat sonda aparatı yardımıyla batma derinliğinden faydalanmaktır. Vicat batma derinliği ölçüm örnekleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Hazırlanan karışımlar haznelere doldurulmuş ve Vicat sonda çubuğu harç yüzeyinde sabitlenmiştir. Vicat sonda çubuğu serbest düşüşü sonrasında Vicat aparatındaki cetvel yardımıyla batma derinlikleri ölçülmüştür.



a) b)

Şekil 3.9 Vicat deneyi a) Vicat çubuğu düşürme öncesi, b) düşürme sonrası

Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait taze hal reolojik parametrelerin ölçümünde Lootens ve diğer (2009) tarafından belirlenen silindir uçlu vicat cihazı için Denklem 2.1'den yararlanılmıştır. Çalışma sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir. Tablo 3.6'da görüldüğü gibi %1,5 lifli karışımlarda Vicat sondası batma derinliği %0,4 lifli karışımlara göre daha düşük ölçülmüştür. Lootens ve diğer (2009) denklemine göre düşük batma derinliğine sahip karışımların eşik kayma gerilmesi daha yüksek hesaplanmıştır. Bu durum literatürde belirtildiği gibi lif artış oranına bağlı olarak eşik kayma gerilmesi değerlerinin artışı ve buna bağlı olarakta karışımların inşa edilebilirlik özelliğinde artış sağladığını göstermektedir. Ayrıca düşük su/bağlayıcı oranındaki karışımlarda (M1, M2, M5) yüksek su/bağlayıcı oranına sahip karışımlara göre (M3, M7) daha düşük batma derinliği/yüksek eşik kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Bu durum, düşük su/bağlayıcı-yüksek lif oranında karışımların daha iyi inşa

edilebilir özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü üzere akma eğrisinden elde edilen grafiklerde tüm lifli kompozitlerin reometrenin ölçebileceği maksimum kayma gerilmesi değeri olan 2850 Pa değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, Vicat sondası batma derinliği sonucu elde edilen eşik kayma gerilmesi değerlerinin 2850 Pa değerini aşması durumunda bu tür rotasyonel reometre ile ölçüm alınamayacak karışımlar için Vicat sondasının bu amaçla kullanılabileceğini göstermektedir. Lootens vd. (2009) tarafından belirtildiği gibi klasik rotasyonel reometre cihazıyla ölçülemeyen kohezif karışımlarda Vicat sondası ile ölçüm alınması gerekmektedir. Ayrıca, literatürde ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için önerilen optimum eşik kayma gerilmesi değerleri 200-47000 Pa değerleri arasında değişebilmektedir (Papachristoforou vd., 2018; Jayathilakage vd., 2019; Zhang vd., 2019; Panda ve Tan, 2018). Bu durum, farklı tür karışım tasarımları ve reometre cihazı ile bu cihazlardaki taze hal reolojik parametrelerin ölçüm sistemlerindeki farklılıktan kaynaklanabilmektedir. Vicat sonda aparatından elde edilen eşik kayma gerilmesi değerleri literatüre göre değerlendirildiğinde (Tablo 1.10'dan), maksimum ve minimum değerlerin arasında kalmaktadır. Çalışma kapsamında üçlü sistemlerde hazırlanan karışımlardan sadece ikisinde ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından yetersiz olduğu sonucuna ulaşılmaktadır (M4 ve M8). Bu durumun, söz konusu karışımların yeterince kohezif olmaması ve yüksek lif oranında liflerin matriste topaklaşması, böylece pompada tıkanma meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. M1, M2, M3, M5, M6 ve M7 karışımlarında ise eşik kayma gerilmesi 2972-7950 Pa değerleri arasında iken pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirlik açısından herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

Lifli karışımların viskozite değerleri de rotasyonel reometre yardımıyla ölçülemediği için vicat sondası batma hızından yararlanılarak farklı serilerin viskozite değerleri kıyaslanmıştır. Bu kapsamda en düşük batma derinliği esas alınarak (M1 için 4 mm) vicat cihazı sondasının bu derinliğe gelme süreleri ölçülmüş ve "rölatif viskozite" ile ilişkilendirilmiştir (Tablo 3.6). Çalışma sonucunda, rölatif viskozite değeri, düşük lif ve düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda (M1 ve M5) en yüksek değerleri almıştır. Pompada tıkanma meydana gelmeden karışımların ekstrüde edilebilmesi için düşük viskozite değerlerine sahip olması gerekmektedir. Bu durum,

yüksek lif oranlarında Vicat sondası batma derinliğinin azaldığı, buna bağlı olarak viskozite değerlerinin yükseldiği ve böylece ekstrüde edilebilirlik özelliklerinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, yüksek su/bağlayıcı ve düşük lif (M3 ve M7) oranında ise rölatif viskozite en düşük değerleri almıştır. Bu durum, su/bağlayıcı oranı artışına bağlı olarak ekstrüde edilebilirlik özelliklerinin arttığını göstermektedir. Ancak, eşik kayma gerilmesi değerlerinin düşmesinden dolayı inşa edilebilirlik özelliklerinin de azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 3.6 Vicat batma derinliği ile elde edilen eşik kayma gerilmesi değerleri

Karışımlar (Lif oranı)	Vicat Batma Derinliği (mm)	Eşik Kayma Gerilmesi (Pa)	Rölatif viskozite (4 mm'ye gelme süreleri-s)
M1 (%1,5)	4	7950	30
M2 (%0,4)	6	6710	20
M3 (%0,4)	23	2972	5,2
M4 (%1,5)	5,3	7060	22,6
M5 (%1,5)	5	7247	24
M6 (%0,4)	8	5490	15
M7 (%0,4)	16	3855	7,5
M8 (%1,5)	7	6247	17,1

3.2.3.3 Ekstrüzyon Tabancası Boyunca Akış Hareketinin Reometre Tabanlı Simülasyonu

Simülasyon analizinden elde edilen zamana bağlı reolojik veriler Şekil 3.10 ve Tablo 3.7'de sunulmuştur. Harcın ekstrüzyon borusu içerisine hareket kolaylığı ile ilişkilendirilebilen "ekstrüde edilebilirlik katsayısı", sabit yüksek kayma hızı bölgesinin (III) sonundaki anlık viskozite değerinin düşük kayma hızı bölgesinin (I) sonuna oranı olarak tanımlanır (Şekil 3.10-c). Bu değerin 1'den küçük olması durumunda, harç psödoplastik olarak sınıflandırılabilir ve daha düşük boru basıncı talebinin pompalamayı kolaylaştırıcı etkisinden dolayı "düşük ekstrüde edilebilirlik katsayıları", faydalıdır. Lif takviyesi başlangıç viskozite değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bununla birlikte, "ekstrüde edilebilirlik katsayıları", belirli bir karışımın zaman içinde akışı kolaylaştırma yeteneğini kıyaslamada kullanılabilir. Bu açıdan

bakıldığında, en düşük ekstrüde edilebilirlik katsayısına (0.23) sahip M4 karışımı, ekstrüzyon borusu boyunca akışı kolaylaştırma açısından diğer karışımlardan daha iyi performans gösterdiği söylenebilir (Tablo 3.7).

Şekil 3.10-b'de gösterildiği gibi, ekstrüde edilebilirlik bölgesi (Bölge I, II ve III) incelendiğinde, lifsiz ekstrüde/inşa edilebilir karışımına (Uçucu kül/çimento=1,1, Su/bağlayıcı=0,32) kıyasla M1 ve M2 karışımı için önemli ölçüde daha yüksek kayma gerilmesi değerleri ölçülmüştür. Ölçülen yüksek kayma gerilmesi, ekstrüde edilebilirliği olumsuz etkilemektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, lif takviyeli karışımlar, akış yönü boyunca lif takviyeli harçların viskozitesindeki belirgin düşüşe rağmen, pompalama/ekstrüzyon için daha büyük bir başlangıç kuvveti/enerji gerektirecektir.

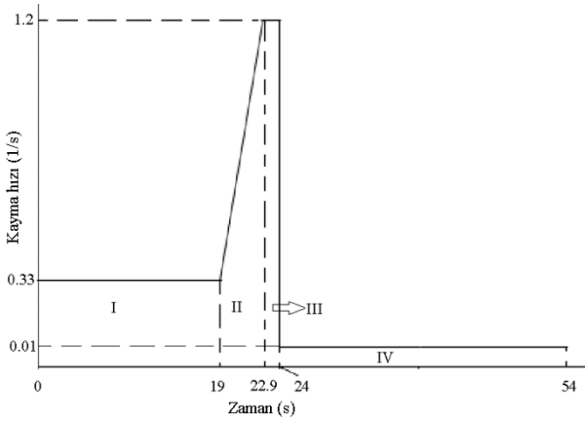
Harcın ekstrüzyondan sonra şeklini koruma yeteneği ile ilişkilendirilebilecek "inşa edilebilirlik katsayısı" Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Bu katsayı, çok düşük kayma hızı bölgesinin (IV) sonundaki kayma gerilmesi değerinin yüksek kayma hızı bölgesinin (III) sonundaki kayma gerilmesi değerine oranı olarak tanımlanmıştır. Bu değer 1'den büyükse, harcın inşa edilebilirlik özelliklerinin iyileştiği söylenebilir.

Şekil 3.10-b ve Tablo 3.7'de görüldüğü gibi IV bölgedeki M1 ve M2 karışımlarının inşa edilebilirlik katsayılarında %11 oranında artış yaşanırken, M1 matris ve lifsiz inşa edilebilir karışımlarının kayma gerilmesi değerlerinde sırasıyla %45 ve %26 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca, M1, M1 matris, M2 ve lifsiz inşa edilebilir karışımlarının inşa edilebilirlik katsayıları sırasıyla 1,11, 0,55, 1,11 ve 0,74 olarak ölçülmüştür. Kayma gerilmesi artışı ve inşa edilebilirlik katsayısı açısından en iyi performans, lifli karışımlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlar, inşa edilebilirliğin HTPP lif eklenmesiyle önemli ölçüde arttırıldığını göstermektedir.

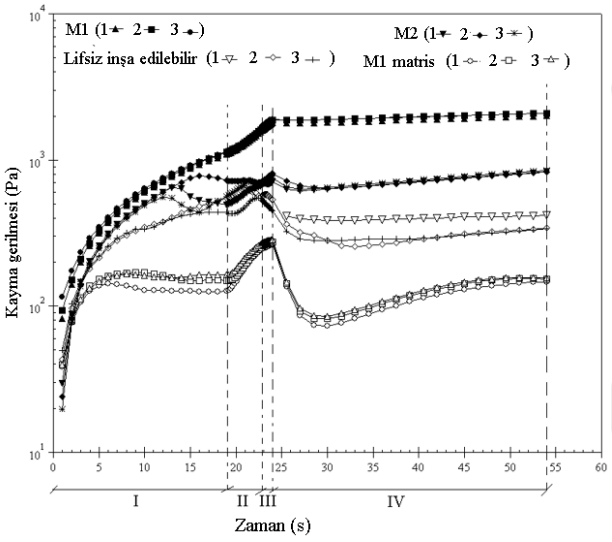
Simülasyon analizi ekstrüzyon sürecinde boru içindeki farklı bölgelerde harcın reolojik davranışını tahmin etmek, tek bir eşik kayma gerilmesi veya viskozite değeri öneren geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kapsamlı ve pratik açıdan yararlı bilgiler edinilmesini sağlayabilir. Bu bakımdan ekstrüzyon harçlarının akma

eğrilerinden elde edilen klasik reolojik parametrelerle karakterize edilemeyecek veriler sunmaktadır ve ekstrüzyon harçlarının reolojik optimizasyon tabanlı tasarımlarında kullanılabilir.

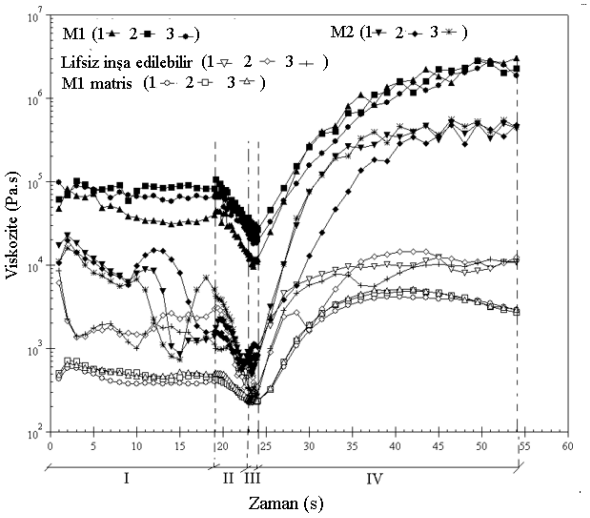
Genel olarak, **Bölüm 3.2.3.1**'de de belirtildiği gibi yüksek kayma hızı oranlarında reometrede akma eğrileri elde edilememiştir. Ancak, boru içi akıştaki kayma hızları düşük olduğu için reometrede taze hal reolojik veriler daha düzgün bir şekilde edilmiştir. Bu durum, lifli karışımlarda Herschel-Bulkley vb. gibi modeller sonucu taze hal reolojik verilerin elde edilememesi durumunda simülasyon deneyinin iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10 Zamana bağlı reometre tabanlı simülasyon analizi a) kayma hızı modeli b) kayma gerilmesi, c) viskozite değerleri

Tablo 3.7 Ekstrüzyon borusu boyunca kritik noktalar için kayma gerilmesi ve viskozite değerleri ve bu çalışmada önerilen ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik katsayılarının belirlenmesi yöntemi

Karışımlar	Kod	Ekstrüde edilebilirlik bölgesi için viskozite değişimi (II bölgenin başlangıcından III bölgenin sonuna)		Ekstrüde edilebilirlik katsayısı	İnşa edilebilirlik bölgesi için eşik kayma gerilmesi değişimi (IV bölgenin başlangıcından IV bölgenin sonuna)		İnşa edilebilirlik katsayısı
		II bölgenin başlangıcı (Pa.s)	III bölgenin sonu (Pa.s)	II bölgenin başlangıcından III bölgenin sonuna oranı	IV bölgenin başlangıcı (Pa)	IV bölgenin sonu (Pa)	IV bölgenin başlangıcından IV bölgenin sonuna oranı
M1	1	45014	11855	0,26	1805	2004	1,11
	2	107066	26610	0,25	1887	2093	1,11
	3	70671	19445	0,28	1881	2087	1,11
	Ort.	74250	19303	0,26	1858	2061	1,11
	Std.	25459	6025	0,01	37	41	0
	D.K	34%	31%	4,2%	2%	2%	0%
M1 matris	1	430	235	0,55	264	146	0,55
	2	448	236	0,53	276	153	0,55
	3	509	236	0,46	283	156	0,55
	Ort.	462	236	0,51	274	152	0,55
	Std.	34	0	0,04	8	4	0
	D.K	7%	0%	6,9%	3%	3%	0,2%

Tablo 3.7 devamı

Karışımlar	Kod	Ekstrüde edilebilirlik bölgesi için viskozite değişimi (II bölgenin başlangıcından III bölgenin sonuna)		Ekstrüde edilebilirlik katsayısı	İnşa edilebilirlik bölgesi için eşik kayma gerilmesi değişimi (IV bölgenin başlangıcından IV bölgenin sonuna)		İnşa edilebilirlik katsayısı
		II bölgenin başlangıcı (Pa.s)	III bölgenin sonu (Pa.s)	II bölgenin başlangıcından III bölgenin sonuna oranı	IV bölgenin başlangıcı (Pa)	IV bölgenin sonu (Pa)	IV bölgenin başlangıcından IV bölgenin sonuna oranı
M2	1	1764	775	0,44	709	833	1,17
	2	1590	1044	0,66	806	826	1,02
	3	4272	769	0,18	750	850	1,13
	Ort.	2542	863	0,43	755	836	1,11
	Std.	1225	128	0,19	40	10	0,06
	D.K	48%	15%	45,8%	5%	1%	6%
Lifsiz inşa edilebilir	1	1799	494	0,27	501	417	0,83
	2	3107	346	0,11	535	342	0,64
	3	991	287	0,29	448	337	0,75
	Ort.	1966	376	0,23	495	365	0,74
	Std.	872	87	0,08	36	37	0,08
	D.K	44%	23%	35,9%	7%	10%	10%

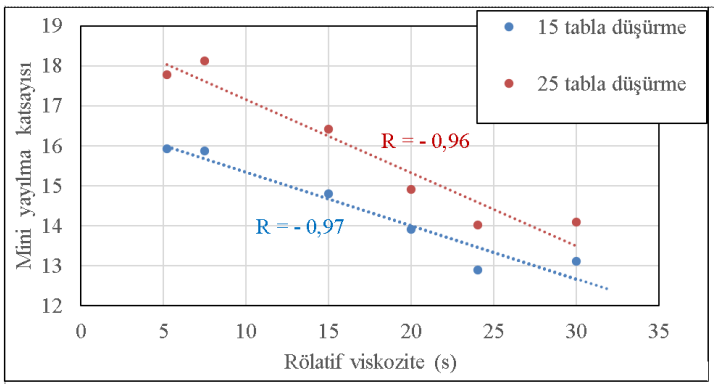
*1,2,3 üç karışım örneğini, ort. ortalamayı, std. standart sapmayı ve D.K değişkenlik katsayısını simgelemektedir.

3.2.4 Taze Hal Sonuçları Arasındaki ilişkiler

Çalışma kapsamında elde edilen yayılma çapları (serbest yayılma, 15 ve 25 tabla düşürme), mini çökme yayılma katsayısı ((15 veya 25 tabla düşürme sonrası yayılma çapı/serbest yayılma çapı) x10)) ve Vicat sondasının 4 mm'ye gelme süreleri (rölatif viskoziteler) Tablo 3.8 ve Şekil 3.11'de verilmiştir. Çalışma sonucunda, karışımlara ait 15 ve 25 tabla düşürme için mini yayılma katsayıları ile rölatif viskoziteler arasında sistematik bir ilişki tespit edilmiştir (R>-0,96). Mini çökme yayılma katsayısı düştükçe karışımların rölatif viskozitelerinin arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, 3B ekstrüde edilebilir harç karışımları gibi rotasyonel reometreden veri alınamayan karışımlarda Vicat sondası ve yayılma deneyleri esas alınarak karışımların taze hal reolojik özellikleri ve buna bağlı olarak ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri hakkında yorum yapılabileceği belirlenmiştir.

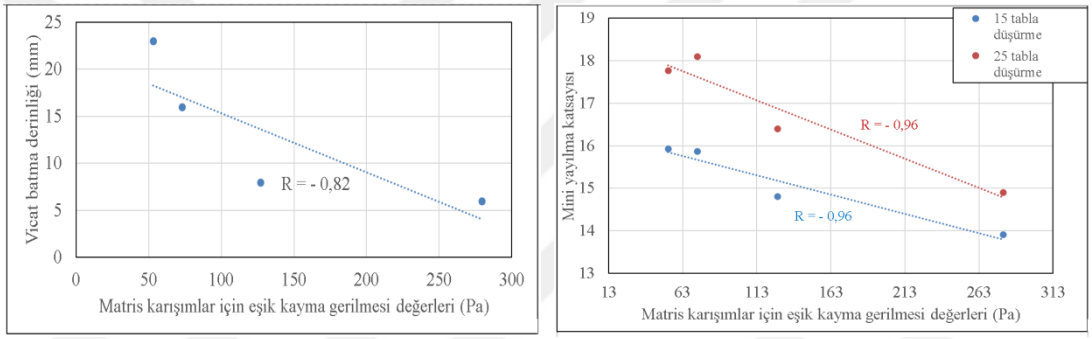
Tablo 3.8 Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlarda mini çökme yayılma katsayısı-rölatif viskozite arasındaki ilişki

Karışımlar	Serbest yayılma çapı (mm)	15 tabla düşürme sonrası yayılma çapı (mm)	15 tabla düşürme için mini çökme yayılma katsayısı	25 tabla düşürme sonrası yayılma çapı (mm)	25 tabla düşürme için mini çökme yayılma katsayısı	Vicat sondası batma derinlikleri (mm)	Vicat sonda çubuğunun 4 mm'ye gelme süresi (s) (Rölatif viskozite)
M1	100	131	13,1	141	14,1	4	30
M2	100	139	13,9	149	14,9	6	20
M3	103	164	15,9	183	17,8	23	5,2
M5	100	129	12,9	140	14	5	24
M6	100	148	14,8	164	16,4	8	15
M7	101	161	15,9	184	18,1	16	7,5



Şekil 3.11 Mini çökme yayılma katsayısı- Vicat sondasının 4 mm batması için geçen süre (rölatif viskozite) arasındaki ilişki

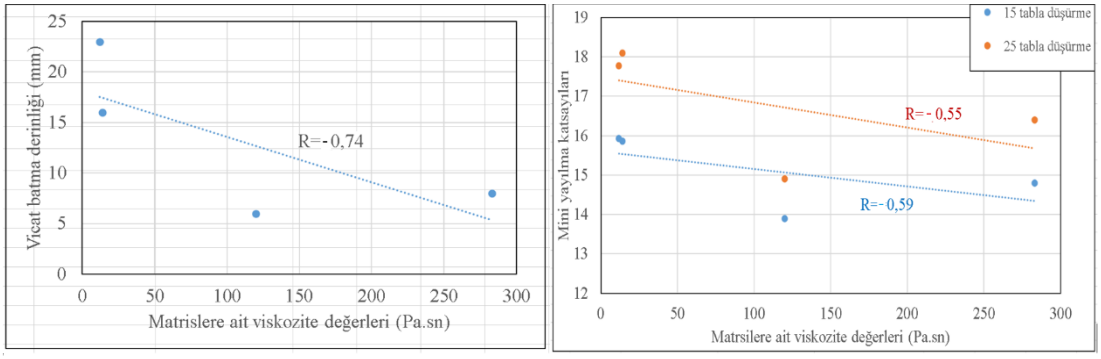
Şekil 3.12'de % 0,4 lif hacmindeki kompozitlere (M2, M3, M6 ve M7) ait Vicat sondası batma derinliği ve mini çökme yayılma katsayılarının bu karışımlara ait matrislerinin (lifsiz) rotasyonel reometre verileriyle belirlenen eşik kayma gerilmesi değerleri ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, matris karışımların eşik kayma gerilmesi değerleri ile kompozit karışımların Vicat sondası batma derinliği, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası mini çökme yayılma katsayısı ile güçlü bir ilişki bulunduğu tespit edilmiştir (R>-0,82). Sonuç olarak, ekstrüde/inşa edilebilir kompozitlere ait Vicat sondası batma derinliği ve yayılma katsayıları ile matris karışımların eşik kayma gerilmesi değerleri arasında bağlantı kurulabileceği ortaya konulmuştur.



a) b)

Şekil 3.12 %0,4 lifli karışımların (M2, M3, M6, M7) matrislerine ait eşik kayma gerilmesi değerlerinin a) kompozit (lifli) karışımlarının Vicat sondası batma derinliği, b) kompozit (lifli) karışımlarının mini çökme yayılma katsayıları ile ilişkisi

Şekil 3.13'te % 0,4 lif hacmindeki kompozitlere (M2, M3, M6 ve M7) ait vicat batma derinliği ve mini yayılma katsayılarının bu karışımlara ait matrislerinin (lifsiz) reometrede ölçülen viskozite değerleri ile ilişkisi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, matris karışımların viskozite değerleri ile kompozit karışımların vicat batma derinliği ile orta seviyeli bir ilişkiye sahipken, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası mini yayılma katsayısı ile düşük dereceden bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



a) b)

Şekil 3.13 %0,4 lifli karışımların (M2, M3, M6, M7) matrislerine ait viskozite değerlerinin a) kompozit (lifli) karışımlarının Vicat sondası batma derinliği, b) kompozit (lifli) karışımlarının mini çökme yayılma katsayıları ile ilişkisi

Sonuç olarak; ekstrüde/inşa edilebilir karışım tasarımlarına ait optimum eşik kayma gerilmesi değerleri, inşa edilebilirlik katsayısı, yayılma çapları vs. taze hal özellikleri arasında ilişkiler araştırılmış ve şekil koruma katsayısı, eşik kayma gerilmesi, viskozite gibi karışımların ekstrüde/inşa edilebilir özellikleri için belirleyici olan parametrelerin; Vicat batma derinlikleri, yayılma çapları vs. gibi parametrelerle ilişkilendirilebileceği, böylece bu parametrelerden yola çıkarak ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar hakkında değerlendirme yapılabileceği tespit edilmiştir.

3.3 Sertleşmiş Hal Deney Sonuçları

3.3.1 Birim Hacim Ağırlık deneyi

Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait teorik ve ölçülen kuru birim hacim ağırlık değerleri Tablo 3.9'da verilmiştir. Ayrıca, karışımların birim hacim ağırlıklarındaki düşüş miktarının büyük ölçüde hava sürükleme etkisinden kaynaklandığı kabulüyle hesaplanan hava içerikleri de aynı tabloda sunulmuştur. Söz konusu düşüşlerin lifin hava sürükleme etkisi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 3.9 Ekstrüde/inşa edilebilir kompozit karışımların birim hacim ağırlıkları

Karışımlar	M1	M2	M3	M5	M6	M7
Teorik birim hacim ağırlık (kg/m^3)	2029	2041	1885	2135	2154	1976
Arşimet yöntemiyle ölçülen birim hacim ağırlık (kg/m^3)	1962	1966	1830	2088	2090	1865
Hesaplanan hava sürüklenme oranı (%)	3,3	3,7	2,9	2,2	3,0	5,6

* Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait birim hacim ağırlık değerleri ölçüldüğü için M4 ve M8 ölçülmemiştir.

3.3.2 Basınç Dayanımları

Basınç dayanımı değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük lif oranına sahip karışımlar (M2, M6) yüksek lif içeren karışımlara göre (M1, M5) daha yüksek dayanımlar vermiştir. Bu durumun, liflerin harç karışımlarında boşluk hacmini arttırması, böylece basınç dayanımında düşüş yaşanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük S/B-yüksek lif durumunda, YFC içeren karışımın (M5) hem 7. hem de 28. gündeki basınç dayanımları, UK içeren karışıma (M1) göre daha yüksek ölçülmüştür. Bu durumun, YFC'nin UK'ya göre lifi daha homojen dağıtmasından dolayı boşluk hacmini düşürerek daha yüksek dayanım vermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, düşük ve yüksek S/B-düşük lif oranında, YFC içeren karışımların 7. gün basınç dayanımları, UK içeren karışımlara göre daha düşük ölçülmüştür. Bu aşamada bu durumun nedeni bilinmemektedir. Ancak, 28. gündeki basınç dayanımlarında YFC içeren karışımlar (M6, M7), UK içeren karışımlara (M2, M3) kıyasla daha fazla dayanım artışı vermiştir. Bu durumun, YFC'nin bu karışımlarda uzun dönem dayanım artışına etkisinin daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 7. ve 28. gün basınç dayanımları açısından değerlendirildiğinde, 28. gündeki karışımların dayanım artışlarında 7. güne göre %18-59 arasında artış yaşanmıştır. Bu durum, mineral katkıların uzun dönem dayanım artışlarına geç katılması ile yaşla beraber harç içindeki hidratasyon reaksiyonlarının devam etmesinden kaynaklanmaktadır. Her bir dayanım için 3 farklı örneğin ortalaması alınmış ve standart sapma ile değişkenlik katsayıları değerlendirildiğinde, bu değerlerin düşük seviyelerde kaldığı, böylece basınç

dayanımları açısından numunelerin karışımı temsil etmede eşdeğer kabul edilebileceği belirlenmiştir.

Tablo 3.10 Basınç dayanımı değerleri

Karışımlar	Basınç dayanımı ortalaması (MPa)		Standart sapma (MPa) (Değişkenlik katsayısı (%))		7-28 günler arasındaki dayanım artışı (%)
	7. gün	28. gün	7. gün	28. gün	7 → 28
M1	37,9	44,9	1,78 (4,7)	2,1 (4,8)	18
M2	49,2	59,6	1,69 (4,4)	1,5 (2,6)	21
M3	31,3	45	2,1 (5,5)	1,7 (3,7)	44
M5	45,3	56,9	2,4 (5,2)	1,9 (3,3)	26
M6	46,1	70	1,6 (3,3)	1,33 (1,9)	52
M7	27,7	44	1,7 (6,2)	1,6 (3,5)	59

3.3.3 Eğilme Dayanımları

Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait eğilme deneyi sonuçları Şekil 3.14-15 ve Tablo 3.11'de verilmiştir.

Yüksek lif dozajlı karışımlar (M1, M5) için ilk çatlak yükünden sonra yük artışı devam etmiş ve çoklu çatlama kaynaklı "sehim sertleşmesi" (deflection hardening) davranışı net bir şekilde gözlenmiştir. Düşük lif dozajlı karışımlarda (M2, M3, M6, M7) ise ilk çatlak yükünden sonra yük artışı gözlenmemiş ve tek çatlak oluşumuyla "sehim yumuşaması" (deflection softening) davranışı gözlenmiştir. Bu durum, HTPP liflerin %1,5 lif hacminde bile çoklu çatlak oluşturup örneklerin süneklik düzeylerini arttırdığını, %0,4 HTPP lif oranında ise çoklu çatlak oluşumunu sağlayamadığını göstermiştir. Genel olarak, ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri sağlanan karışımlar arasında yeterli mekanik özellikleri sağlama açısından M1 ve M5 karışımları en ideal karışımlar olarak ön plana çıkmaktadır.

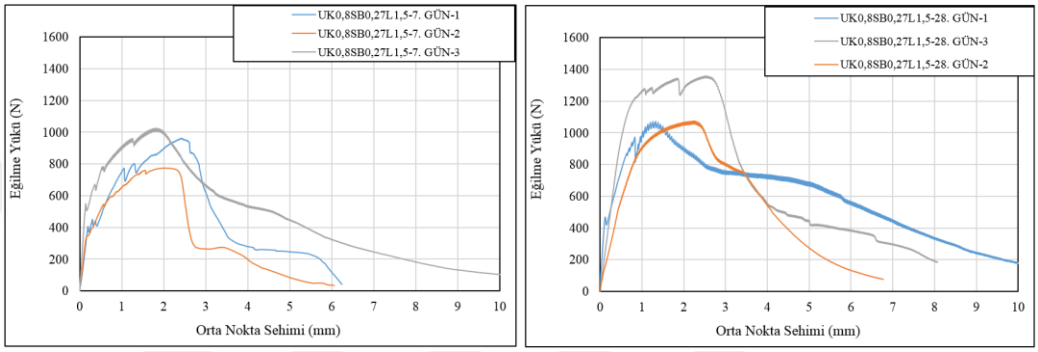
Yüksek fırın cürufu-yüksek lif dozajındaki karışımın (M5) ilk çatlak ve eğilme dayanımı uçucu küllü-yüksek lif dozajındaki karışıma (M1) oranla daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum, yüksek lif dozajı için yüksek fırın cürufu içeren kompozitlerin matrislerinin uçucu kül içeren kompozitlere göre daha zor çatladığı (ilk çatlak

dayanımı daha yüksek), ilk çatlak dayanımından sonraki dayanım gelişiminin de uçucu kül içeren kompozitlere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, yüksek lif dozajında yüksek fırın cüruflu karışımların uçucu küllü karışımlara göre hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımı açısından daha avantajlı olduğu gözlenmiştir. Düşük lif dozajlı karışımlarda ise uçucu kül içeren karışımların (M2, M3) hem ilk çatlak dayanımı hem de eğilme dayanımı açısında yüksek fırın cürufu içeren karışımlara (M6, M7) göre daha avantajlı olduğu gözlenmiştir. Ancak düşük lif dozajında zaten sehim sertleşmesi davranışı gözlenmediği için lif etkinliğinin kısıtlı seviyede kaldığına dikkat edilmelidir.

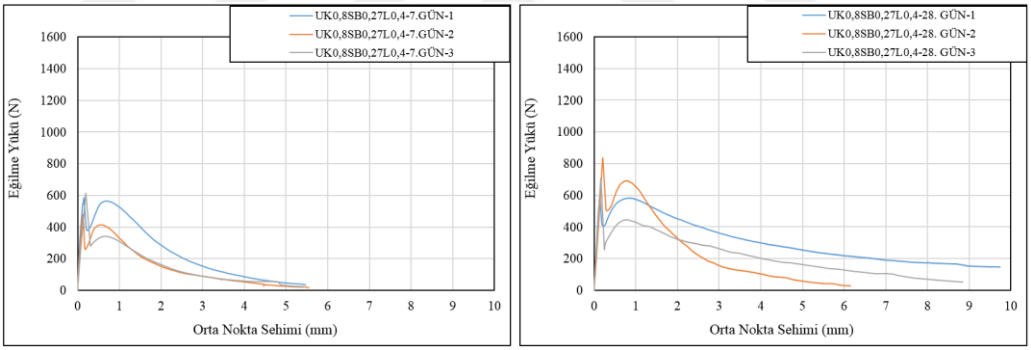
Uçucu küllü karışımlarda (M2, M3) su/bağlayıcı oranının 0,27'den 0,4'e yükselmesi ile 7. ve 28. günde sırasıyla %15 ve %62 oranında dayanım düşüşü yaşanırken, yüksek fırın cüruflu karışımlarda ise sırasıyla %5 ve %50 oranında dayanım kaybı gözlenmiştir. 28. gündeki dayanım azalmasının daha yüksek olmasının, mineral katkıların dayanıma etkisinin ileri yaşta daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük su/bağlayıcı oranındaki karışımların (M1, M2, M5, M6) 7. ve 28. gündeki eğilme dayanımları kıyaslandığında yaş artışı ile %18-29 arasında dayanım artışı gözlenmiştir. Ancak, yüksek su/bağlayıcı oranındaki karışımların (M3, M7) 28. gündeki eğilme dayanımlarında 7. güne göre %53-77 arasında dayanım düşüşü ölçülmüştür. Bu durumun, yüksek su içeriğinden dolayı yaş ilerledikçe kuruma rötresi oluşumu artışına bağlı olarak üstüste bindirilen elemanların arayüzeyinde iç gerilme-mikroçatlak oluşumu ile arayüzey aderansının zayıflaması ve böylece yaşla birlikte eğilme dayanımlarında düşüş yaşanması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Yapı sektöründe malzeme kalitesini belirleyen en önemli özelliklerden bir tanesi sehim kapasitesindeki değişime bağlı olarak karışımların tokluk değerleri (enerji yutma kapasitesi) olmaktadır. Tokluk değerlerinin yüksek olması, karışımların dinamik yük ve etkilere karşı daha dirençli olması, gevrek davranışının azalması veya ortadan kalkması, ilk çatlağın yayılmasından sonra çatlak yayılması için gerekli enerjinin yüksek olması anlamına gelmektedir (Koç ve Birinci, 2012). Bu durum özellikle lif takviyeli kompozitlerde daha belirgin olmaktadır. Bu yüzden, eğilme deneyi sonucunda elde edilen tokluk değerleri HTPP lif kullanımı ile artmıştır. Tablo

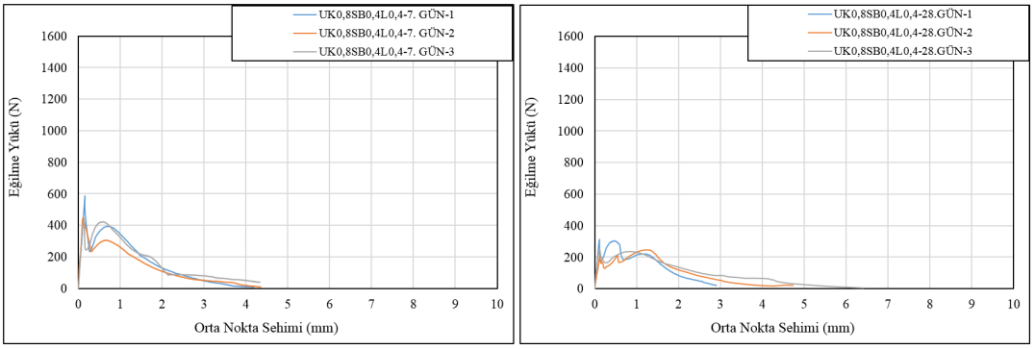
3.11'de sehim kapasitesi ve tokluk değerleri incelendiğinde lif dozajının %0,4'ten %1,5'e yükselmesi ile sehim kapasitesi ortalama 0,1 mm'den 2,5 mm'ye kadar yükselmiştir. Ayrıca, tepe noktası tokluk (enerji yutma kapasitesi) değerleri lif dozajındaki artışa bağlı olarak ortalama 8,38 N.mm'den 3150 N.mm'ye yükselmiştir. HTPP liflerin yüksek dozajda kullanımı ile tokluk değerlerinin büyük oranda arttığı, böylece HTPP liflerin karışımların mekanik özelliklerinin de önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir.



a)

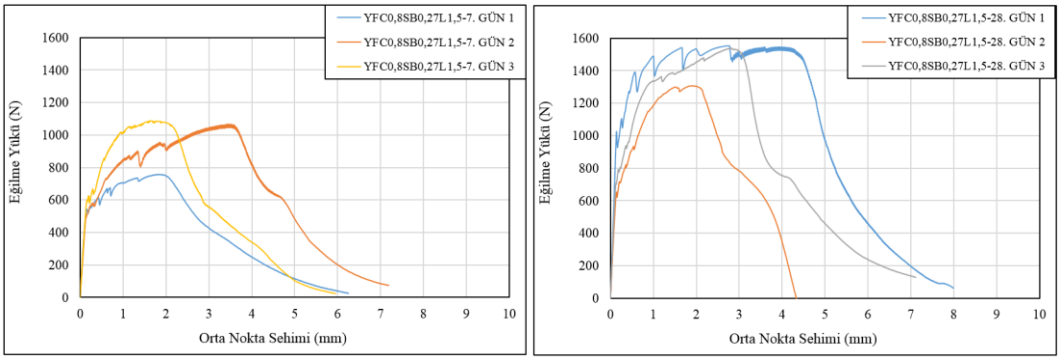


b)

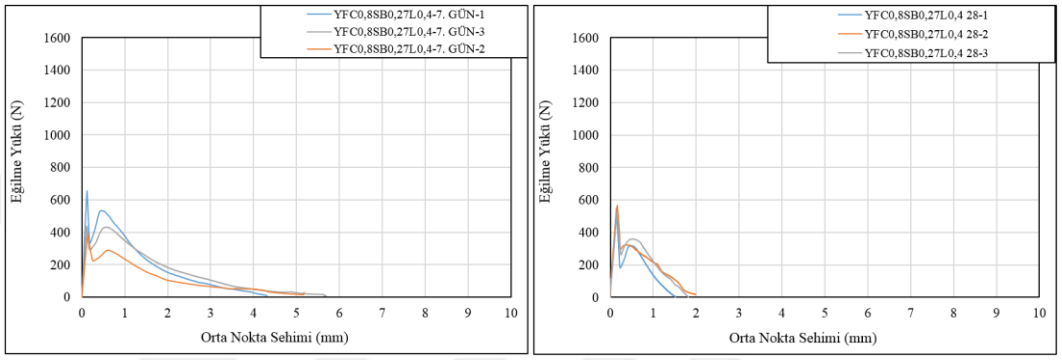


c)

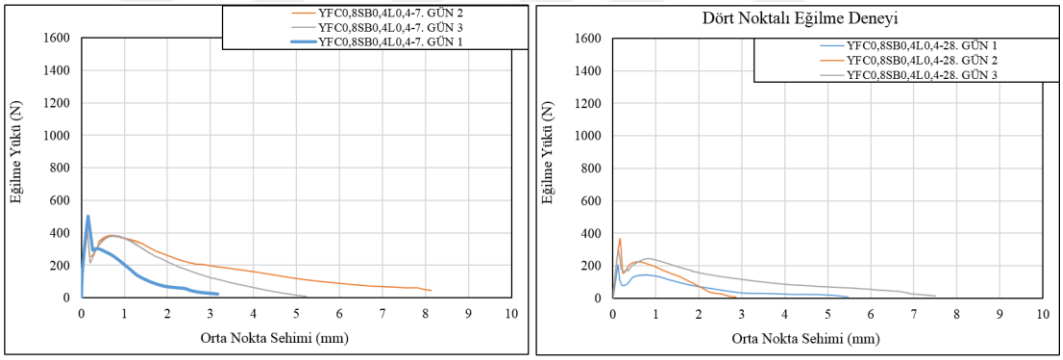
Şekil 3.14 Uçucu küllü karışımlarda a) M1 (UK0,8SB0,27L1,5), b) M2 (UK0,8SB0,27L0,4), c) M3 (UK0,8SB0,4L0,4) karışımları için 7. ve 28. gün eğilme grafikleri



a)



b)



c)

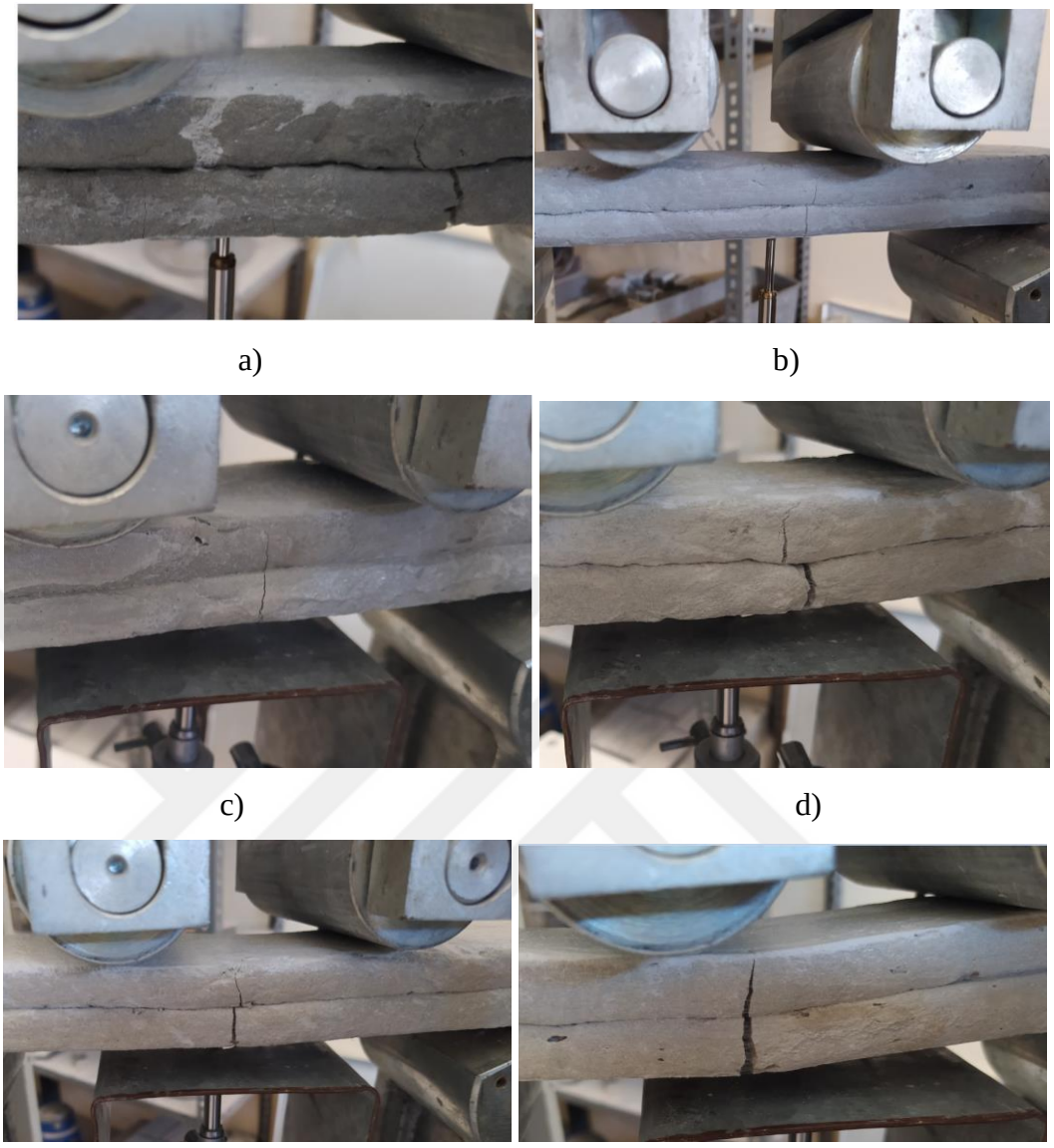
Şekil 3.15 Yüksek fırın cüruflu karışımlarda a) M5 (YFC0,8SB0,27L1,5), b) M6 (YFC0,8SB0,27L0,4), c) M7 (YFC0,8SB0,4L0,4) karışımları için 7. ve 28. gün eğilme grafikleri

Standart sapma ve değişkenlik katsayıları incelendiğinde, standart sapma değerleri ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı için 0,0-1,5 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Sehim kapasitesi için standart sapma değerleri 0,0-0,8 mm arasında iken, tokluk için 8,4-816,4 N.mm arasında değişmektedir. Değişkenlik katsayıları ise tüm sonuçlarda %3,6-43,4 arasında değişmektedir.

Tablo 3.11 Ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait eğilme deneyi sonuçları

Karışım kodu		İlk çatlak dayanımı (MPa)		Eğilme dayanımı (MPa)		Sehim kapasitesi (mm)		Tepe noktası tokluk (N.mm)	
		7. gün	28. gün	7. gün	28. gün	7. gün	28. gün	7. gün	28. gün
M1	1	1,9	2,0	4,5	4,9	2,4	1,3	1696	1041
	2	1,8	3,0	3,6	5,0	2,0	2,3	1214	1812
	3	2,7	5,6	4,4	5,4	1,8	2,6	1464	1173
	Ort.	2,1	3,5	4,2	5,1	2,1	2,1	1458	1342
	Std.	0,4	1,5	0,4	0,2	0,2	0,6	196,8	336,7
	D.K. (%)	18,9	42,9	9,7	4,2	12,1	26,9	13,5	25,09
M2	1	2,8	2,9	2,8	2,9	0,2	0,1	56	46
	2	2,4	4,0	2,4	4,0	0,1	0,2	41	84
	3	2,9	3,4	2,9	3,4	0,2	0,2	111	61
	Ort.	2,7	3,4	2,7	3,4	0,2	0,2	69,33	63,67
	Std.	0,2	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	30,09	15,63
	D.K.	8,0	13,1	8,0	13,1	18,7	15,0	43,4	24,55
M3	1	2,7	1,5	2,7	1,5	0,2	0,1	48	19
	2	2,2	1,2	2,2	1,2	0,1	1,2	29	231
	3	2,1	1,3	2,1	1,3	0,1	0,1	33	19
	Ort.	2,3	1,3	2,3	1,3	0,1	0,5	36,67	89,7
	Std.	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0	0,5	8,2	99,9
	D.K. (%)	11,2	9,4	11,2	9,4	12,4	111,1	22,3	111,5
M5	1	2,6	4,9	3,6	6,1	1,8	2,8	1178	3831
	2	2,8	3,1	5,1	6,6	3,4	1,9	2986	2002
	3	2,9	3,9	5,2	6,7	1,6	2,8	1522	3617
	Ort.	2,8	4,0	4,6	6,5	2,3	2,5	1895	3150
	Std.	0,1	0,7	0,7	0,3	0,8	0,4	783,9	816,4
	D.K. (%)	4,5	18,6	15,8	4,1	35,5	17,0	41,4	25,9
M6	1	2,4	2,7	2,4	2,7	0,1	0,1	68	67
	2	1,8	2,7	1,8	2,7	0,1	0,2	50	53
	3	2,0	2,5	2,0	2,5	0,1	0,2	26	47
	Ort.	2,1	2,6	2,1	2,6	0,1	0,2	48	55,7
	Std.	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	17,2	8,4
	D.K. (%)	12,1	3,6	12,1	3,6	6,8	6,1	35,8	15,1
M7	1	2,3	1,0	2,3	1,0	0,2	0,1	88	12
	2	2,0	1,6	2,0	1,6	0,1	0,2	42	35
	3	1,8	1,4	1,8	1,4	0,1	0,1	50	24
	Ort.	2,0	1,3	2,0	1,3	0,1	0,1	60	23,7
	Std.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	20,1	9,4
	D.K. (%)	10,1	18,7	10,1	18,7	35,4	35,4	33,4	39,7

*Ort. üç örneğin sonuçlarının ortalama değerlerini (MPa), Std. standart sapma değerini (MPa) ve D.K. (%) değişkenlik katsayısının yüzde cinsinden değerini simgelemektedir.



Şekil 3.16 a) M1, b) M2, c) M3, d) M5, e) M6, f) M7 karışımlarına ait çatlak gelişimi görselleri

Eğilme yüklemesi sonucu her seri için temsili bir numuneden elde edilen çatlak gelişimi görselleri Şekil 3.16'da verilmiştir. Düşük su/bağlayıcı oranındaki karışımlarda (M1, M2, M5, M6) çatlak alt tabakadan üst tabakaya farklı bir rotadan ilerlemektedir. Bu durum, tabakaların bağımsız olarak hareket ettiğini gösterebilir. Ancak, yüksek su/bağlayıcı oranında (M3, M7) çatlak alt tabakadan üst tabakaya ilerlerken aynı doğrultuda devam etmiştir. Bu durumun nedeni bu aşamada bilinmese de düşük su/bağlayıcı oranında ekstrüde karışımların yüksek su/bağlayıcı oranında elde edilen karışımlara göre daha kohezif bir yapıda olmasından ve tabakalar

arasındaki temas yüzeyinin az olmasından dolayı çatlak gelişiminin alt ve üst tabakalarda farklı doğrultularda ilerlemesine neden olabileceği düşünülmektedir.

3.3.4 Çekme-koparma (aderans) Dayanımları

Ekstrüde/inşa edilebilir harç karışımlarının çekme koparma cihazı ile ölçülen ortalama aderans dayanımları Şekil 3.17'de verilmiştir. Çalışma kapsamında her bir karışım için 0.dk, 30.dk ve 1. gün olmak üzere tabakaların uygulanması arasında 3 farklı ekstrüzyon bekleme süresi için aderans dayanımları ölçülmüştür.

Şekil 3.17-a'da 7. gün aderans dayanımı sonuçları verilmiştir. Ekstrüzyon sürelerindeki artışla beraber (0. dk.'dan 1. güne) aderans dayanımlarında %40-%87 arasında düşüşler meydana gelmiştir. Sanjayan vd. (2018), Keita vd. (2019) tarafından belirtildiği gibi bu duruma taze ile sertleşmiş haldeki tabakalar arasında soğuk derz oluşumu nedeniyle örneklerin birbirine yapışma performansını azaltıp tabakalar arasındaki aderans dayanımlarını düşürdüğü açıklanmıştır. 0. dk. ekstrüzyon süresindeki maksimum ortalama aderans dayanımı M5 karışımlarında görülmüştür. Tablo 3.9'da hesaplanan hava sürüklenme oranları değerlendirildiğinde minimum hava sürüklenme oranının M5 karışımına ait olduğu görülmektedir. Bu durum, daha düşük hava sürüklenme oranından dolayı iki harç tabakası arasında daha fazla temas yüzeyi alanı oluştuğu ve böylece karışımların aderans dayanımlarında artış sağladığı düşünülmektedir. Ancak, ekstrüzyon süresi artışına bağlı olarak (0. dk.'dan 1. güne) aderans dayanımlarındaki maksimum düşüş (%87) M5 karışımlarında elde edilmiştir.

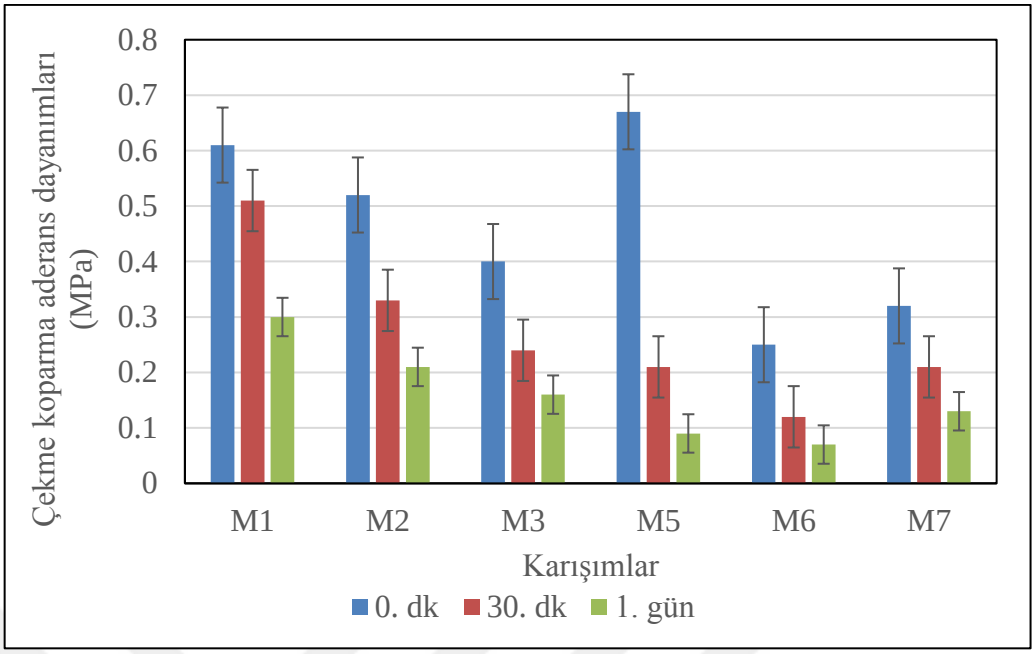
Soltan ve Li, (2018), Sanjayan vd. (2018), Marchment vd. (2019), Le vd. (2012b) tarafından açıklandığı gibi 7. gün tabakalar arası aderans dayanımları 0,27-0,7 MPa arasında değişmektedir. Çalışma kapsamında ekstrüde/inşa edilebilir harç karışımlarına ait aderans dayanımı değerleri (0,4 MPa-0,67 MPa) literatürde ölçülen dayanım değerleri ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 3.17-b'de ekstrüde/inşa edilebilir karışımlara ait 28. gün aderans dayanımları verilmiştir. Maksimum aderans dayanımı ortalaması 0,98 MPa ile M5 karışımlarında ölçülmüştür. Böylece hem 7. gün hem de 28. günde maksimum dayanım M5 karışımlarında ölçülmüştür. Ancak, 28. günde ekstrüzyon süresi aralığındaki artışa bağlı olarak en fazla dayanım azalması yine M5 karışımlarında tespit edilmiştir.

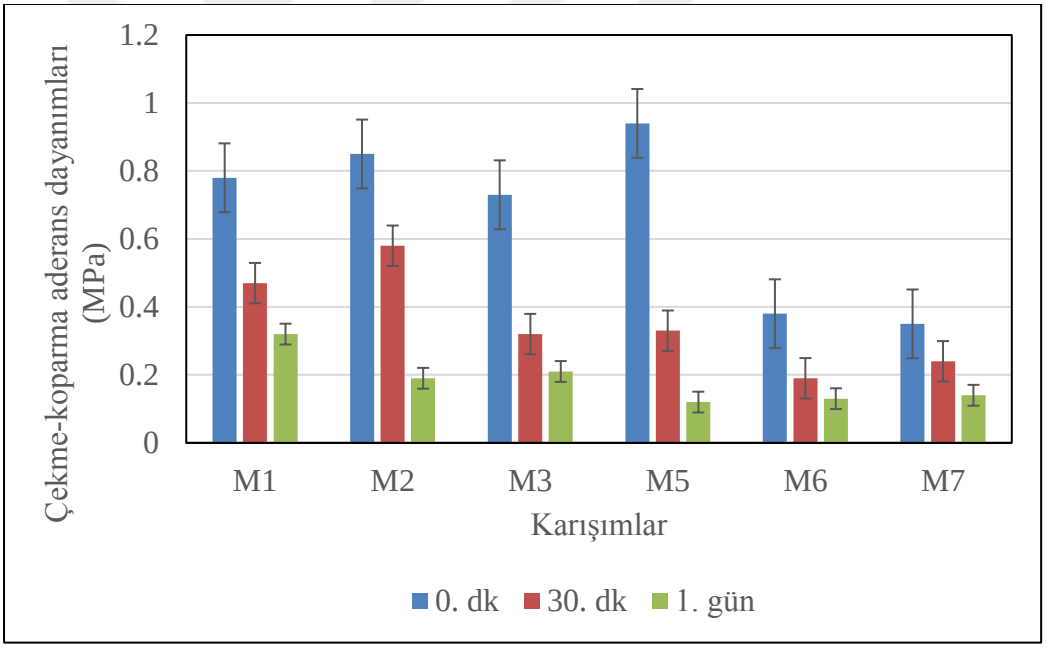
Ekstrüzyon süresi artışına bağlı olarak (0. dk.'dan 1. güne) 7. gündeki aderans dayanımlarındaki düşüş %51-87 iken, 28. gündeki aderans dayanımlarındaki düşüş %60-87 olmaktadır. Genel olarak, 28. gündeki aderans dayanımı düşüşleri 7. gündeki düşüşlere göre daha fazla ortaya çıkmaktadır.

Düşük su/bağlayıcı oranında üretilen karışımların (M1, M2, M5, M6) aderans dayanımları tüm karışımlarda yüksek su/bağlayıcı oranında üretilen karışımlara (M3, M7) göre daha yüksek ölçülmüştür. Uçucu küllü karışımlarda yüksek su/bağlayıcı oranında elde edilen karışımlardaki dayanım düşmesi %44'e kadar ölçülürken, yüksek fırın cüruflu karışımlarda tam tersi durum söz konusudur. Özellikle 1. gün ekstrüzyon süresi aralıklarında aderans dayanımlarında %50 artış tespit edilmiştir. Bu durumun, yüksek fırın cüruflu karışımların daha kohezif yapısından dolayı 1. gün ekstrüzyon süresinde taze haldeki tabakanın sertleşmiş tabaka üzerine yapışma özelliğinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Genel olarak, uçucu küllü karışımlarda hem 7. gün hem de 28. gündeki aderans dayanımları yüksek fırın cüruflu karışımlara göre daha yüksek ölçülmüştür. Ancak, maksimum aderans dayanımı M5 karışımında (yüksek fırın cüruflu karışım) elde edilmiştir.



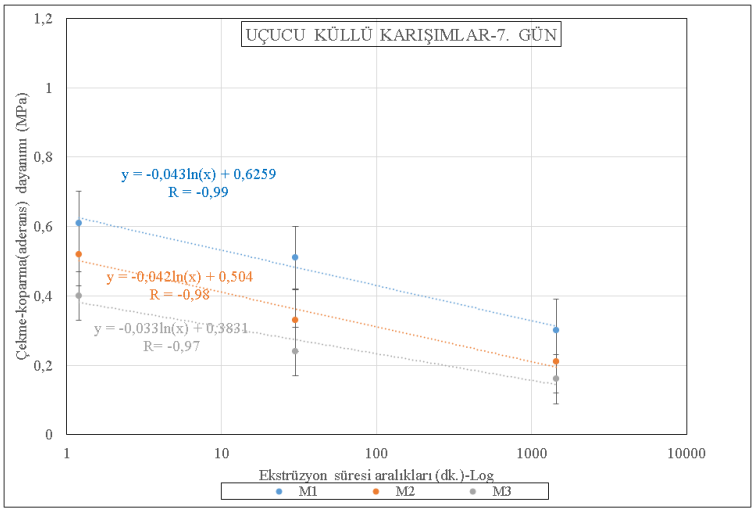
a)



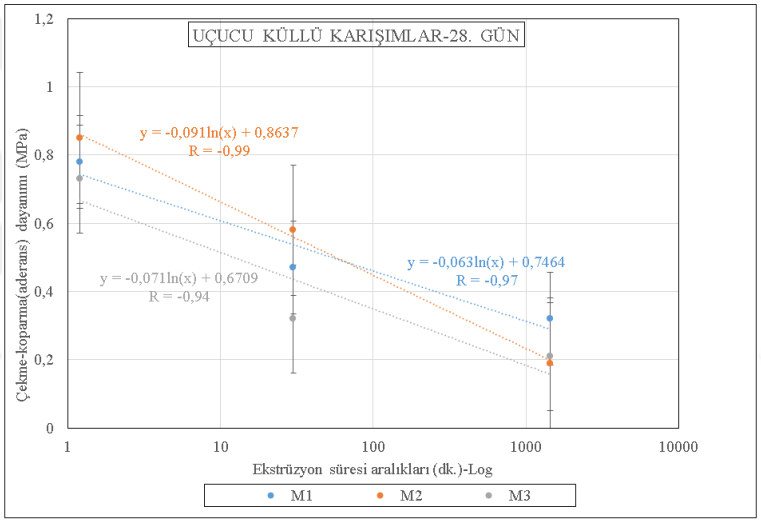
b)

Şekil 3.17 Çekme koparma (pull-off) a) 7. gün, b) 28. gün aderans dayanımları

Çekme-koparma aderans dayanımlarının ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak incelendiğinde tüm karışımlar için korelasyon katsayısı >0,93 olarak ölçülmüştür. Bu durum hem uçucu küllü hem de yüksek fırın cüruflu karışımların 7. gün ve 28.gün aderans dayanımları ile ekstrüzyon süresi aralıkları arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

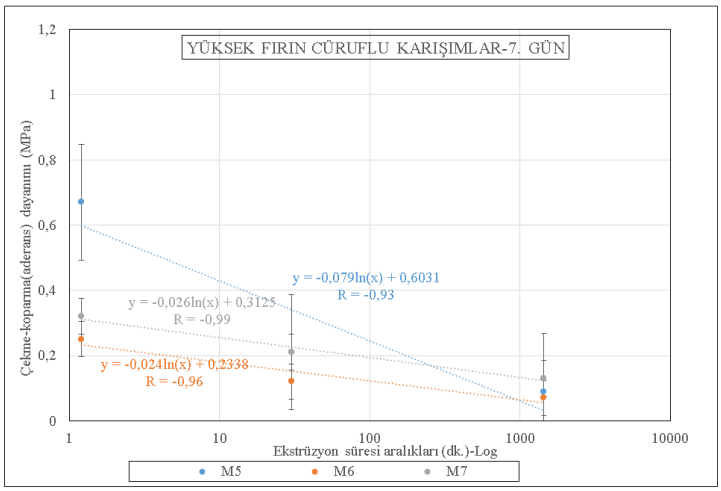


(a)

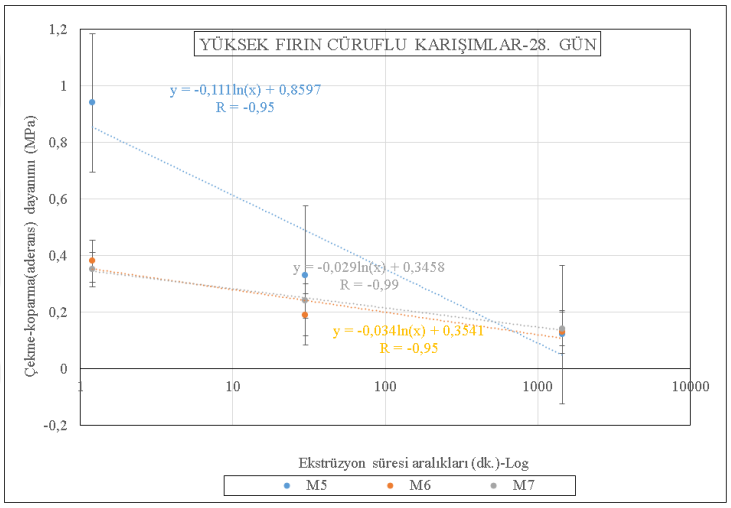


(b)

Şekil 3.18 Uçucu küllü a) 7. gün, b) 28. gün ve yüksek fırın cüruflu karışımlara ait c) 7.gün ve d) 28. gün aderans dayanımları



(c)



(d)

Şekil 3.18 Devamı

Sonuç olarak, 7. ve 28. gündeki aderans dayanımları Soltan ve Li, (2018), Sanjayan vd. (2018), Marchment vd. (2019); Le vd. (2012b) tarafından belirtilen değerler (7. gün için 0,27-0,7 MPa ve 28. gün için 0,75-1,5 MPa) arasında olsa da aderans dayanımlarının geliştirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Özellikle 3B ekstrüzyon için büyük kütleli yapılarda kolon ve kirişlerin olmamasından dolayı taşıyıcılık özelliklerini bu tabakalar sağlamaktadır. Yapısal performans için bu tabakaların birbirleriyle olan uyumlu çalışılabilirlikleri çok büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, tabakalar arasına reçine, yapıştırıcı katkı vs. sürülerek tabakalar arası aderans dayanımları arttırılmaya çalışılmaktadır (Hosseini vd., 2019; Marchment vd., 2019). Pratikteki uygulamalarda; yemek molaları, mesai sonrası veya bir makine

arızası durumunda tabakalar arasında uzun süre bekleme yapılması kaçınılmazdır. Ekstrüzyon tabakaları arasındaki bekleme süresindeki artışa bağlı olarak soğuk derz kaynaklı büyük dayanım düşüşlerinin önüne geçilmesi açısından reçine vs. gibi ara yüzey aderansını arttırıcı uygulamaların yapılması önerilmektedir. Ancak bu şekilde bir uygulamanın ekstrüzyon uygulamasına ilave maliyet ve işlem süresi getireceği dikkate alınmalıdır.

Çekme-koparma aderans dayanımları ölçümüne ait görseller Şekil 3.19'da sunulmuştur. Deney sonunda tüm numuneler tabakalar arası arayüzeyden kopmuştur (adezif göçme). Bu durum, en zayıf bağ dayanımının numunelerin arayüzeyinde olduğunu göstermektedir. Özellikle ekstrüzyon süresi aralıkları 1 gün olan numunelerde üst tabakadan karot alınması işlemi sırasında alınan bazı örneklerin alt tabakadan koptuğu-kurtulduğu görülmüştür (Şekil 3.19-h). Şekil 3.18'de bütün numunelerde standart hata çubukları değerlendirildiğinde, tüm ekstrüzyon sürelerinde hata çubuklarının maksimum ve minimum değerleri iç içe geçtiği ve aderans dayanımı ile ekstrüzyon süreleri arasındaki ilişkinin net bir şekilde tespit edilemediği görülmüştür.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Şekil 3.19 a) Numunelerin hazırlanması, b-c) Çekme-koparma aderans dayanımının ölçülmesi, d-e-f-g-h) çekme-koparma sonucu ara yüzey görünümü

3.3.5 Doğrudan Çekme Aderans Dayanımları

7. ve 28. gün doğrudan çekme aderans dayanımının ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak değişimi Tablo 3.12 ve Şekil 3.20'de verilmiştir. Ekstrüzyon süresindeki artışa bağlı olarak (0. dk'dan 1. güne) 7. gün ortalama aderans dayanımları arasındaki düşüş %25-70 arasında ölçülürken, 28. gündeki ortalama aderans dayanımları arasındaki düşüş %54-85 olarak ölçülmüştür. Bu durumun, taze ile sertleşmiş haldeki tabakalar arasında soğuk derz oluşumu nedeniyle örneklerin birbirine yapışma performansının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

M1 (%1,5 lif oranı) ve M2 (%0,4 lif oranı) karışımları değerlendirildiğinde (aynı su/bağlayıcı ve farklı lif oranları), numune yaşı ve ekstrüzyon süresine bağlı olarak tüm numunelerde yüksek lif oranına sahip M1 karışımı aderans değerleri %6-70 daha yüksek ölçülmüştür. Bu durumun, liflerin tabakalar arasında bir köprü görevi görerek tabakaların daha iyi kenetlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

M2 (su/bağlayıcı oranı=0,27) ve M3 (su/bağlayıcı oranı=0,4) karışımları değerlendirildiğinde (farklı su/bağlayıcı ve aynı lif oranları), genel olarak M2 karışımlarında doğrudan çekme aderans dayanımları daha yüksek ölçülürken, su/bağlayıcı oranının doğrudan çekme aderans dayanımları arasında belirli bir etkisi olmamıştır.

Doğrudan çekme aderans dayanımları, ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak incelendiğinde tüm karışımlar için korelasyon katsayısı >0,92 olarak ölçülmüştür. Bu durum tüm karışımların 7. ve 28. gün aderans dayanımları ile ekstrüzyon süresi aralıkları arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Değişkenlik katsayısı (D.K) iki örnek dışında tüm örneklerde %10 değerinin altındadır. Bu durum, doğrudan çekme aderans dayanımı açısından örneklerin benzer davranış gösterdiğini kanıtlamaktadır.

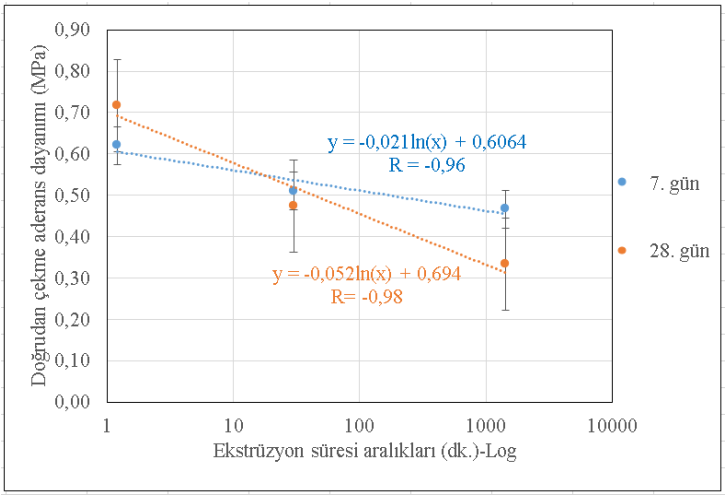
Şekil 3.20'de bütün numunelerde standart hata çubukları değerlendirildiğinde, tüm ekstrüzyon sürelerinde hata çubuklarının maksimum ve minimum değerlerinin iç içe geçtiği görülmektedir. Ortalama değerleri dikkate alındığında doğrudan çekme aderans dayanımı ile ekstrüzyon süreleri arasındaki genel bir ilişki olsa da standart sapma değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.12 Ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak doğrudan çekme aderans dayanımları değerleri

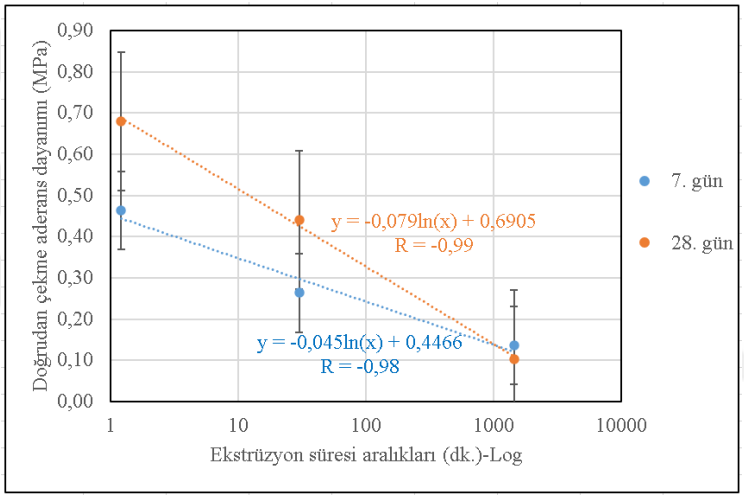
Karışım kodu		7. gün			28. gün		
		Ekstrüzyon süresi aralıkları			Ekstrüzyon süresi aralıkları		
		0.dk	30.dk	1. gün	0.dk	30.dk	1. gün
M1	1	0,60	0,51	0,45	0,75	0,49	0,27
	2	0,60	0,49	0,39	0,69	0,50	0,40
	3	0,66	0,53	0,56	0,71	0,43	0,33
	Ortalama	0,62	0,51	0,47	0,72	0,47	0,33
	Std.	0,03	0,02	0,07	0,02	0,03	0,05
	D.K (%)	4,56	4,03	15,08	3,48	6,53	15,94
M2	1	0,46	0,26	0,13	0,74	0,46	0,10
	2	0,41	0,26	0,13	0,60	0,45	0,10
	3	0,52	0,27	0,15	0,7	0,41	0,11
	Ortalama	0,46	0,26	0,14	0,68	0,44	0,10
	Std	0,04	0,00	0,01	0,06	0,02	0,00
	D.K (%)	9,71	1,79	6,90	8,66	4,91	4,56
M3	1	0,40	0,22	0,11	0,72	0,27	0,21
	2	0,42	0,25	0,16	0,70	0,30	0,19
	3	0,41	0,26	0,18	0,68	0,24	0,17
	Ortalama	0,41	0,24	0,15	0,70	0,27	0,19
	Std	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
	D.K (%)	2,0	7,0	19,6	2,3	9,07	8,59

* 1, 2, 3 üç farklı örneğin doğrudan çekme aderans dayanımlarını (MPa), ortalama üç örneğin ortalamasını (MPa), std. standart sapma değerlerini (MPa), D.K. % cinsinden değişkenlik katsayısını simgelemektedir.

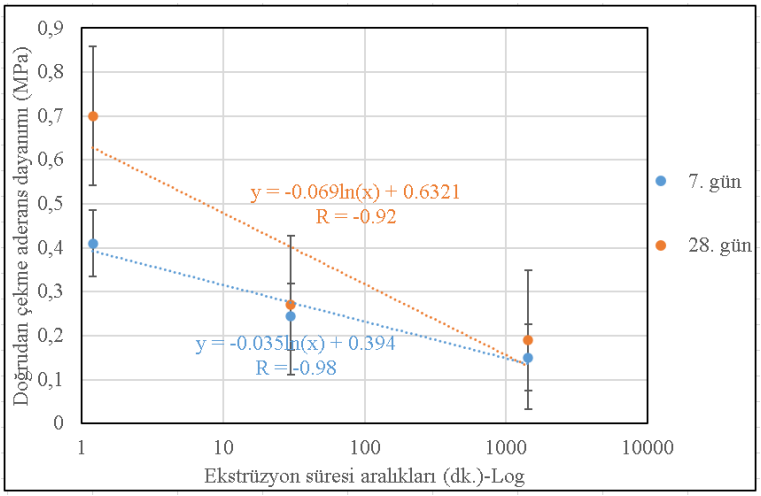
Şekil 3.21'de M1, M2, M3 karışımlarına ait her bir ekstrüzyon süresi için (0. dk., 30. dk., 1. gün) doğrudan çekme deneyi sonucu örnekler gösterilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm numunelerin ara yüzeyden koptuğu görülmektedir.



a)

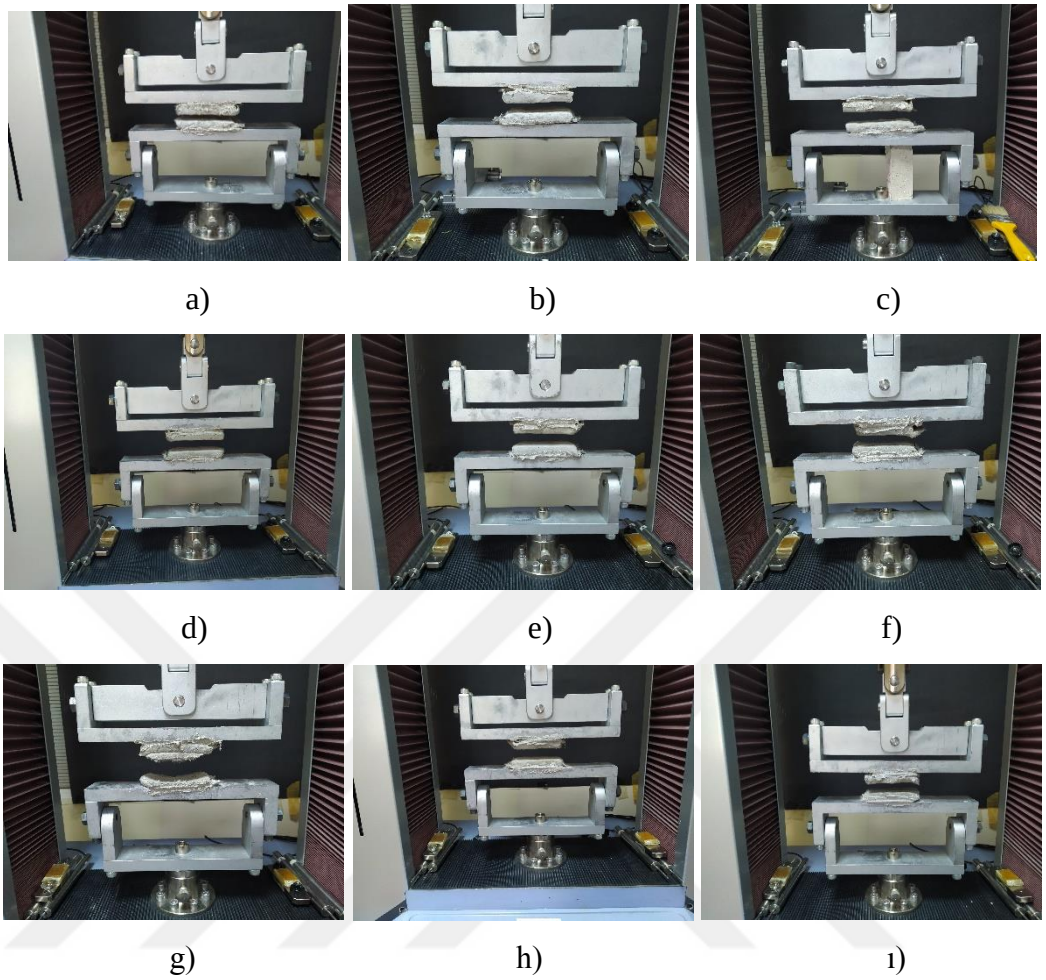


b)



c)

Şekil 3.20 a) M1, b) M2, c) M3 karışımlarının doğrudan çekme aderans dayanımlarının ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak değişimi



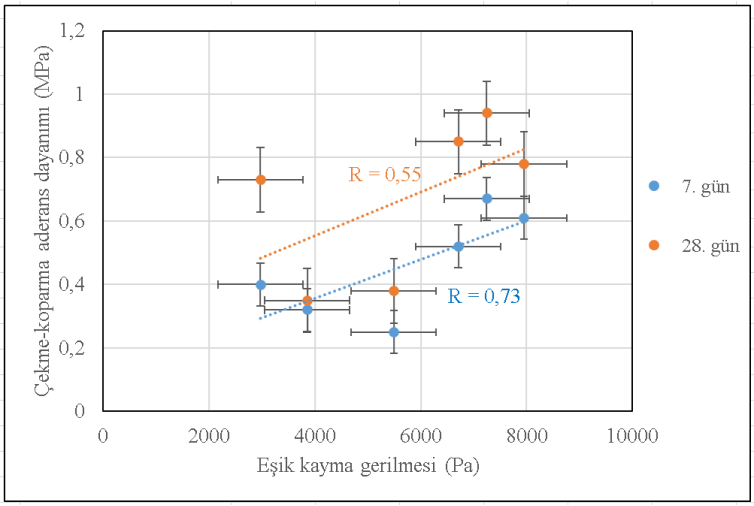
Şekil 3.21 M1 karışımı için a) E.S. (Ekstrüzyon süresi) =0. dk., b) E.S.=30. dk., c) E.S.= 1. gün, M2 karışımı için d) E.S.=0. dk., e) E.S.=30. dk., f) E.S.= 1. gün, M3 karışımı için g) E.S.=0. dk., h) E.S.=30. dk., ı) E.S.= 1. gün için doğrudan çekme deneyleri örnekleri

3.3.6 Çekme-koparma Aderans Dayanımları ile Taze Hal Özellikler Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

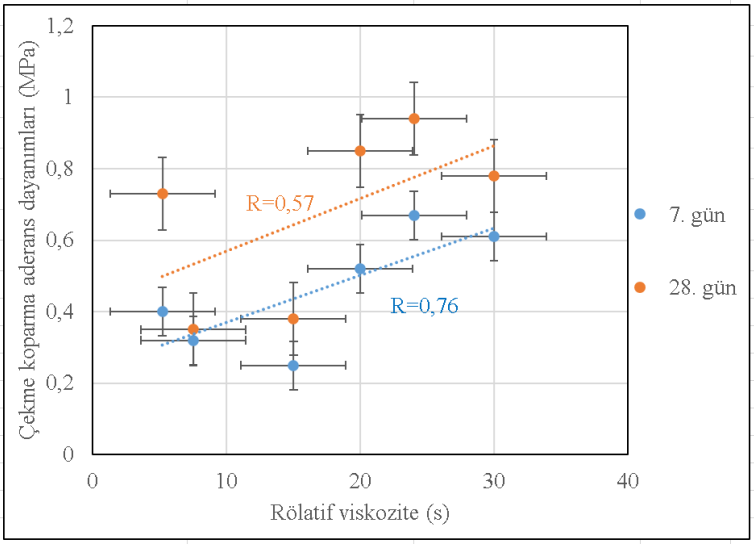
Ekstrüde/inşa edilebilirlik açısından uygunluğu tespit edilmiş karışımlarda yapısal performans açısından mekanik dayanımların da yüksek olması tercih edilmektedir. 3B ekstrüzyon yöntemiyle üretilen harçlarda kalıp kullanılmadığı için nihai dayanımların yüksek olmasının yanında ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterlerinin sağlanması gerekir. Üst üste bindirilen tabakalı üretimden dolayı, 3B ekstrüzyon yöntemi açısından en önemli mekanik özellik tabakalar arası aderans dayanımı olmaktadır. Tez kapsamında,

3B ekstrüde edilebilir harçların taze hal reolojik özellikleri ile çekme koparma aderans dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Şekil 3.22'de karışımların tabakaları arasında beklenmeksizin uygulama yapıldığı durumda (0 dk. ekstrüzyon bekleme süresi) 7. ve 28. gündeki ortalama aderans dayanımları ile Vicat sondası batma derinliğinden ölçülen eşik kayma gerilmesi değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, 7. gündeki aderans dayanımı ile eşik kayma gerilmesi arasında doğrusal ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 28. gündeki aderans dayanımı ile eşik kayma gerilmesi değerleri arasında da doğrusal ilişki olup daha düşük korelasyon katsayısı olduğu tespit edilmiştir. Böylece aderans dayanımı ile eşik kayma gerilmesi arasında sistematik bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır. Şekil 3.23'te aderans dayanımları ile rölatif viskozite arasındaki korelasyon gösterilmiştir. Eşik kayma gerilmesi ile benzer şekilde rölatif viskozite de 7. gün aderans dayanımları açısından belirli bir ilişki gözlenirken, 28. günde korelasyon katsayısı değerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Böylece karışımların taze hal reolojik özellikleri ile aderans dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde 7. gündeki aderans dayanımı değerlerinin 28. gündeki değerlere göre reolojik özelliklerle daha güçlü bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.22 Aderans dayanımı-eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişki



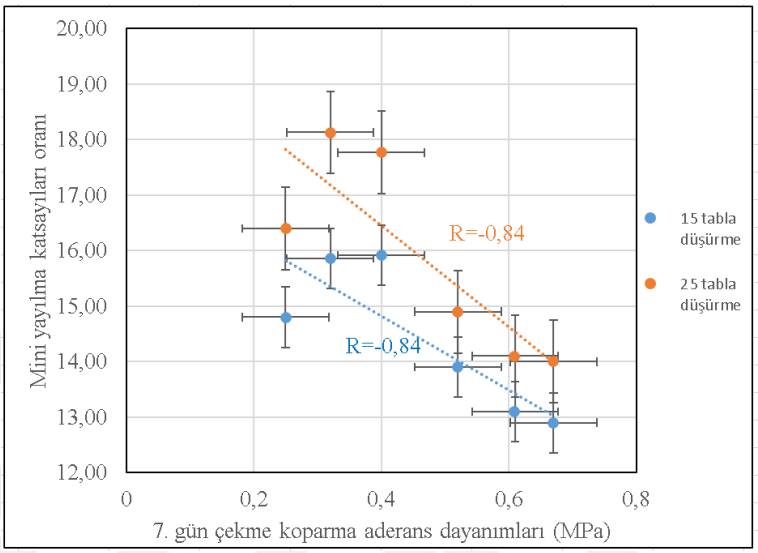
Şekil 3.23 Aderans dayanımı-rölatif viskozite arasındaki ilişki

Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te bütün numunelerde standart hata çubukları değerlendirildiğinde, 7. ve 28. gündeki tüm numunelerde hata çubuklarının maksimum ve minimum değerlerinin iç içe geçtiği ve böylece çekme koparma aderans dayanımı ile eşik kayma gerilmesi ve viskozite arasındaki ilişkinin genel ortalamalar dikkate alındığında var olduğu ancak korelasyonun çok güçlü olmadığı belirlenmiştir.

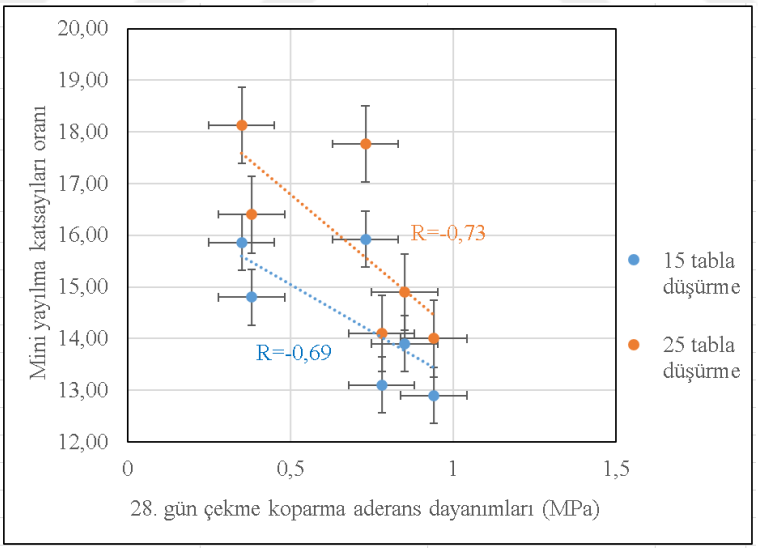
Şekil 3.24'te 0. dk. ekstrüzyon süresinde 7. gün çekme-koparma aderans dayanımları ile 15 ve 25 tabla düşürme için mini yayılma katsayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre mini yayılma katsayısı azaldıkça aderans dayanımları artmaktadır. 7. gün aderans dayanımları ile 15 ve 25 tabla düşürme için yayılma katsayıları arasında doğrusal bir ilişki için korelasyon katsayısının oldukça yüksek (R=-0,84) olduğu tespit edilmiştir. Ancak, 28. gün aderans dayanımlarının mini yayılma katsayıları ile olan ilişkisi incelendiğinde (Şekil 3.25), 7. gün aderans dayanımlarına göre daha düşük korelasyon katsayıları elde edildiği gözlenmiştir. Böylece, numune yaşı arttıkça mini yayılma katsayılarının mekanik aderans ile olan ilişkisinin genel eğilim aynı kalmakla beraber az da olsa zayıfladığı bulgusuna ulaşılmıştır.

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te bütün numunelerde standart hata çubukları değerlendirildiğinde, ardışık serilerin hata çubuklarının maksimum ve minimum

değerlerinin zaman zaman iç içe geçtiği tespit edilmiştir. Mini yayılma katsayıları oranı ile 7. ve 28. gün çekme koparma aderans dayanımları arasındaki ilişki için ortalama değerler dikkate alındığında bir eğilim tespit edilse de birbirine yakın serilerde iç içe geçmeler söz konusu olmaktadır.



Şekil 3.24 Mini yayılma katsayısı-7. gün aderans dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 3.25 Mini yayılma katsayısı-28. gün aderans dayanımları arasındaki ilişki

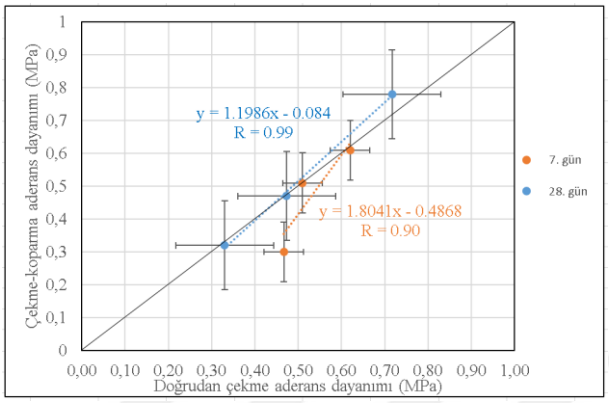
Sonuç olarak, ekstrüde/inşa edilebilir karışımlarda bazı taze hal özellikleri ile mekanik özellikler arasında doğrusal ilişkiler tespit edilmiştir. Böylece, ekstrüde/inşa

edilebilir karışım tasarımları üretildikten sonra taze hal özelliklerinden yararlanılıp mekanik aderans özellikleri hakkında değerlendirmeler yapılabilmiştir.

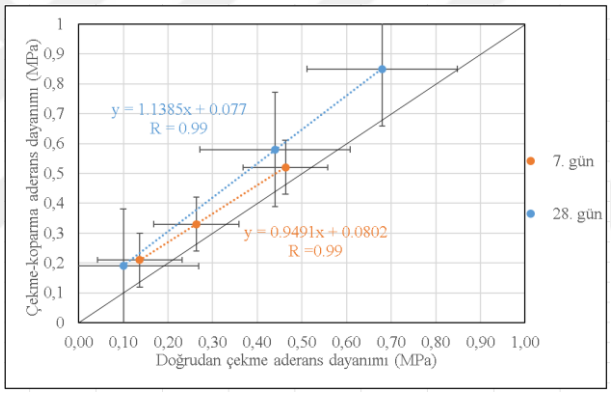
3.3.7 Çekme-Koparma Aderans Dayanımları ile Doğrudan Çekme Aderans Dayanımları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Ekstrüzyon tabakaları arasında bekleme süresi aralıklarına (0. dk., 30. dk., 1. gün) bağlı olarak ölçülen 7. ve 28. gün doğrudan çekme aderans dayanımları ile çekme-koparma aderans dayanımları arasındaki ilişki Şekil 3.26'da verilmiştir. Doğrudan çekme ile çekme koparma aderans dayanımları arasındaki doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı 0,90'ın üzerindedir. Bu durum, iki farklı aderans dayanımı ölçüm metodu arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ancak, çekme koparma aderans dayanımı (karot alma sonucu örselenmiş) ve doğrudan çekme (örselenmemiş) aderans dayanımı değerlerine bakıldığında bazı örneklerde "çekme koparma dayanımı" daha yüksek ölçülürken, bazı durumlarda "doğrudan çekme aderans dayanımı" değerleri daha yüksek ölçülmüştür. Çekme koparma aderans dayanımının doğrudan çekme yöntemine göre düşük çıkmasının nedeninin karot alma işlemi sırasında numunenin zarar görmesi (örselenmiş numuneler), doğrudan çekme aderans değerlerinin çekme koparma aderans dayanımı değerlerine göre düşük çıkmasının nedeninin ise paralel plakalar arasındaki numune yapıştırma aşamasında zaman zaman kaynaklanabilecek eksantrisite problemleri ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Her iki durumda rastgele gerçekleşebilecek deneysel hatalar olabileceği için iki yöntem ile bulunan değerlerin birebir aynı çıkmamasına altyapı oluşturmaktadır. Genel olarak, sahada daha kolay uygulanabilmesinden dolayı çekme koparma aderans dayanımının doğrudan çekme aderans yöntemine göre daha iyi bir seçenek olabileceği düşünülmektedir. Şekil 3.26-a'da standart hata çubukları değerlendirildiğinde, 7. gün aderans dayanımı için standart sapmalar düşük aderans değerlerinde net bir şekilde ayırt edilirken, 28. gün aderans değerlerinde standart sapmalar yüksek dayanım değerlerinde net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Şekil 3.26-b'de standart hata çubukları değerlendirildiğinde, 7. gün aderans dayanımı için standart sapmalar yüksek aderans değerlerinde net bir şekilde ayırt edilirken, 28. gün aderans değerlerinde standart sapmalar düşük dayanım değerlerinde net bir şekilde ayırt edilmektedir. Şekil

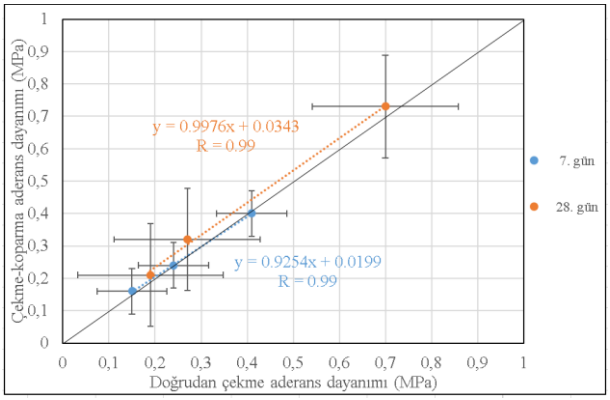
3.26-c'de ise standart hata çubukları değerlendirildiğinde, hem 7. gün hem de 28. gün aderans dayanımı için standart sapmalar yüksek aderans değerlerinde net bir şekilde ayırt edilebilmektedir.



a)



b)



c)

Şekil 3.26 Ekstrüzyon süresi aralıklarına bağlı olarak ölçülen a) M1, b) M2, c) M3 karışımları için doğrudan çekme aderans dayanımları ile çekme-koparma aderans dayanımları arasındaki ilişki

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen HTPP lifli karışımlar için taze ve sertleşmiş hal özellikleri ile ilgili deneysel çalışma sonuçları aşağıda sıralanmıştır:

1) Ön deneysel çalışmalarda tasarlanan ikili kompozit karışım sistemlerinde (çimento-uçucu kül veya çimento-yüksek fırın cürufu) tüm karışımlar ekstrüde/inşa edilebilirlik şartını sağlayamamıştır. Bazı karışımların (K4 ve K8 karışım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir) şekil koruma katsayıları ölçülemezken, ölçülebilen karışımlarda ise maksimum 0,94 olarak tespit edilmiştir. Bu yüzden, ekstrüde/inşa edilebilir karışım tasarımları için minimum şekil koruma katsayısı 0,95 olarak önerilmiştir.

2) İkili sistemlerdeki karışımlara metakaolin ikame edilmesiyle elde edilen üçlü sistemlerin ekstrüde/inşa edilebilirlik kriterlerini sağladıkları belirlenmiştir. Bu karışımlarda çoğunun şekil koruma katsayıları 0,98-1,00 arasında ölçülmüştür. Ancak, yüksek su/bağlayıcı-yüksek lif oranlarındaki karışımlar (M4 ve M8 karışım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir) bu kriterleri sağlayamamıştır. Bu durumun, yüksek lif oranında yeterli kohezifliği sağlayacak bağlayıcı (mineral katkı, çimento vs.) katkı eksikliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hem görsel muayene sonucu hem de şekil koruma katsayısı gözönüne alındığında UK ve YFC'li karışımların ekstrüde/inşa edilebilirlik özellikleri açısından herhangi bir fark gözlenmemiştir.

3) Ekstrüde/inşa edilebilir karışım tasarımlarına ait taze hal özellikler incelendiğinde;

i) 15 ve 25 tabla düşürme için mini yayılma çapları sırasıyla 130-165 mm ve 140-185 mm aralığında ölçülmüş ve bu değerler arasında ekstrüde/inşa edilebilir karışım tasarımlarının elde edilebileceği tespit edilmiştir. Matris karışımlarına ait yayılma çapları ile karşılaştırıldığında %0,4 hacminde HTPP lif kullanımı ile %6 düşüş ve %1,5

hacminde lif kullanımı ile yayılma çaplarında %36'ya kadar düşüş tespit edilmiştir. Yayılma çaplarındaki bu düşüşler karışımların şekil koruma katsayısını arttırarak inşa edilebilirlik özelliklerini geliştirmiştir. Sonuç olarak, HTPP liflerin yayılma çaplarında önemli derecede düşüşler sağlayarak karışımların inşa edilebilirlik özelliklerini arttırdığı belirlenmiştir. Serbest yayılma, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası ölçülen yayılma çapları ile şekil koruma katsayısı arasında sistematik bir ilişki tespit edilmiştir.

ii) Rotasyonel reometre deneyinden matris (lifsiz) karışımları için elde edilen akma eğrileri analiz edildiğinde, eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin sırasıyla 11-127 Pa ve 9,53-283 Pa.s arasında olduğu belirlenmiştir. Matris karışımlara ait eşik kayma gerilmesi ile Vicat sondası batma derinliği arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,83 olarak ölçülürken, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası mini çökme yayılma katsayısı arasındaki korelasyon katsayıları 0,96 olarak ölçülmüştür. Yalın (lifsiz) karışımlarına ait reometrede ölçülen eşik kayma gerilmesi değerleri ile lifli karışımlara ait Vicat sondası batma derinliği ve mini yayılma katsayıları arasında güçü bir ilişki tespit edilmiştir. Ancak, lifsiz karışımlara ait viskozite değeri ile vicat batma derinliği, 15 ve 25 tabla düşürme sonrası mini yayılma katsayıları arasında orta dereceli sistematik bir ilişki tespit edilmiştir ($R>0,55$).

iii) Bilyalı ölçüm sistemine sahip rotasyonel reometrenin 2850 Pa olan sınırlı kapasitesi nedeniyle özellikle yüksek dozajda lif kullanılan harçlarda taze hal reolojik parametreleri ölçülememiştir. Reomertre ile karakterize edilemeyen ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar için Vicat sondası yardımıyla eşik kayma gerilmesi ve rölatif viskozite (Vicat sondasının 4 mm batma derinliğine gelme süresi) değerleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Eşik kayma gerilmesi ve rölatif viskozite değerleri sırasıyla 2972-7950 Pa ve 5,2-30 s arasında ölçülmüştür. 15 ve 25 tabla düşürme sonrası elde edilen mini yayılma katsayısı ile rölatif viskozite arasında güçlü bir ilişki tespit edilmiştir ($R>0,96$).

iv) Ekstrüde/inşa edilebilir lifli ve lifsiz karışımların rotasyonel reometre yardımıyla ekstrüzyon ekseni boyunca reolojik davranışı simüle edilmiştir. Klasik akma eğrisi yöntemiyle elde edilen tek bir eşik kayma gerilmesi ve viskozite

değerlerine kıyasla boru içi akış simülasyonu sonucunda farklı deformasyon hızlarında elde edilen zamana bağlı eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin oranlanması ile elde edilen katsayıların ekstrüzyon yöntemi için daha gerçekçi ve pratikte kullanılabilir olacağı değerlendirilmiştir.

4) Sertleşmiş hal deney sonuçları değerlendirildiğinde;

i) Basınç dayanımları açısından, lif dozajındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımında düşüşler yaşanmıştır. Bu durumun, lif artışına bağlı olarak karışımlarda boşluk hacminin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Lifler hava sürükleme etkisi oluştırmakta ve aynı zamanda matris bünyesinde sıkışık hava hapsolmasına yol açmaktadır. Zamana bağlı olarak hidratasyon reaksiyonlarındaki gelişimle beraber basınç dayanımı artmıştır. 7. gündeki dayanıma kıyasla 28. gündeki basınç dayanımında %18-59 arasında artış belirlenmiştir.

ii) Eğilme dayanımları açısından, yüksek lif dozajındaki (%1,5) karışımlarda (M1, M5 karışım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir) çoklu çatlak kaynaklı sehim sertleşmesi davranışı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek lif dozajı ile ilk çatlak oluşumundan sonra liflerin çatlak köprüleme ile çoklu çatlak davranışı sergilediği, böylece süneklik düzeyi yüksek karışım elde edildiğini göstermektedir. Düşük lif dozajında (%0,4) üretilen karışımlarda (M2, M3, M6, M7 karışım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir) ise tek çatlak ve sehim yumuşaması davranışı gözlenmiştir. İlk çatlaktan sonra yük artışı kaydedilmemiştir. Bu durum, düşük lif dozajında HTPP liflerin çoklu çatlak oluşturamadığını kanıtlamaktadır. Düşük dozajda HTPP lifler inşa edilebililiğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca plastik büzülme kaynaklı erken yaşlarda oluşan çatlakları kısıtlayıcı olarak kullanılması tavsiye edilebilir.

iii) Ekstrüzyon süresindeki artışa bağlı olarak çekme koparma aderans dayanımlarında %40-87 arasında düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden, tabakalar arası aderans dayanımının arttırılması ve soğuk derz sonucu oluşan aderans düşüşlerinin önüne geçilmesi için reçine vs. gibi iki tabaka arasında daha yüksek aderans dayanımı sağlayabilecek malzemelerin kullanılması önerilebilir.

iv) En yüksek aderans dayanımı M5 (Yüksek fırın cüruflu sistemde su/bağlayıcı 0,27 ve lif hacmi %1,5 olan karışım) karışımında tespit edilmiştir. Bu durumun, M5 karışımının minimum hava sürüklenme oranına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

v) Ekstrüde/inşa edilebilir karışımların (M1, M2, M3, M5, M6, M7 karışım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir) 7. gün çekme koparma aderans dayanımları 0,25-0,67 MPa arasında ölçülürken, 28. gün aderans dayanımları 0,35-0,94 MPa arasında ölçülmüştür. Genel olarak, uçucu küllü karışımların mekanik aderans dayanımları yüksek fırın cüruflu karışımlara göre daha yüksek ölçülmüştür (M5 hariç).

5) Çekme koparma aderans dayanımı ile taze hal özellikler arasındaki ilişkiler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

i) Eşik kayma gerilmesi ile 7. gün aderans dayanımları arasında korelasyon katsayısı (R) 0,73 iken, 28. gün aderans dayanımı için korelasyon katsayısı değeri 0,55 olarak ölçülmüştür. 7. ve 28. gün aderans dayanımları ile rölatif viskozite arasındaki korelasyon katsayısı değerleri sırasıyla 0,76 ve 0,57 olarak ölçülmüştür. Hem eşik kayma gerilmesi hem rölatif viskozite açısından bakıldığında numune yaşı düştükçe mekanik aderans ile taze hal özellikleri arasındaki ilişkinin güçlendiği tespit edilmiştir.

ii) 7. gün aderans dayanımı ile 15 ve 25 tabla düşürme sonrası ölçülen mini yayılma katsayısı oranı arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,84 olarak belirlenmiştir. 28. gündeki korelasyon katsayıları ise 0,69-0,73 arasında tespit edilmiştir. Böylece, 7. gündeki aderans dayanımlarının 28. gündeki aderans dayanımlarına göre taze hal özellikleri ile güçlü bir ilişkisi sergilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tabakalar arası aderans dayanımlarının belirlenmesinde en yüksek korelasyon katsayısı değerine sahip olan mini yayılma katsayısının dikkate alınması önerilebilir. Standart hata çubuklarının maksimum ve minimum değerleri iç içe geçtiği ve 15 ve 25 tabla düşürme sonrası ölçülen mini yayılma katsayısı oranı ile 7. ve 28. gündeki aderans dayanımı arasındaki ilişkinin ortalamalar dikkate alındığında genel eğilimi yansıttığı ancak ardışık seriler arasındaki değişimi net bir şekilde yansıtamadığı gözlenmniştir.

6) Çekme koparma ve doğrudan çekme aderans dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde korelasyon katsayısının 0,9'dan yüksek olduğu belirlenmiştir. Böylece iki test metodu arasında güçlü bir ilişki olduğu ve genel eğilimi yansıttığı tespit edilmiştir.

Genel olarak, ikili bağlayıcılı sistemde ekstrüde/inşa edilebilirlik sağlanamazken, metakaolin eklenmesi ile elde edilen üçlü bağlayıcılı sistemde ekstrüde/inşa edilebilir karışımlar elde edilmiştir. Lif dozajı artışına bağlı olarak taze hal reolojik özelliklerindeki değişimler inşa edilebilirlik özelliklerini olumlu etkilerken, ekstrüde edilebilirliği olumsuz etkilemektedir. Standart reometreden elde edilen tek bir reolojik parametre yerine taze hal reolojik özelliklerinin zamana bağlı simülasyonu ekstrüde/inşa edilebilirlik özelliklerini daha iyi bir şekilde yansıtmaktadır. Sertleşmiş hal özellikleri açısından yüksek fırın cüruflu karışımlar genellile daha iyi sonuçlar vermektedir. Lif artışına bağlı olarak basınç dayanımları olumsuz etkilenirken, eğilme ve aderans dayanımı performanslarında artış yaşanmıştır. Çekme koparma aderans dayanımı ile taze hal reolojik özellikler arasında genellikle sistematik bir ilişki tespit edilirken, en yüksek korelasyon katsayısı çekme koparma aderans dayanımı ve mini yayılma katsayısı oranları arasında elde edilmiştir. Doğrudan çekme ve çekme koparma aderans dayanımları arasında güçlü bir ilişki tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

Agustí-Juan, I. ve Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of Cleaner Production, 142*, 2780-2791.

Alghamdi, H., Nair, S. A. O., ve Neithalath, N. (2019). Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders. *Materials and Design*, *167*, 107634. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107634

Apis Cor. (22 Eylül 2021). *The first on-site house has been printed in Russia*. http://additivemanufacturing.global/index.php/en/print-en/architecture/3542-the-first-on-site-house-has-been-printed-in-russia

Arunothayan, A. R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H., & Sanjayan, J. (2020). Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials*, 257, 119546.

ASTM C 1437:2007 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. *American Society for Testing and Materials.* https://doi.org/10.1520/C1437-07.2

ASTM C230. (2010). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1. *Annual Book of ASTM Standards*. https://doi.org/10.1520/C0230

Boissonneault T. (22 Eylül 2021). *Dubai constructs largest 3D printed two-storey building in the world*. https://www.3dprintingmedia.network/dubai-largest-3d-printed-two-storey-building/

Bong, S. H., Nematollahi, B., Nazari, A., Xia, M., ve Sanjayan, J. (2019). Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications. *Materials*, *12*(6), 902.

Brumaud, C., Baumann, R., Schmitz, M., Radler, M., ve Roussel, N. (2014). Cellulose ethers and yield stress of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *55*, 14-21.

Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., ve Thorpe, A. (2007). Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, *16*(2), 224-231.

Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., ve Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry–A forward-looking review. *Automation in Construction*, *89*, 110-119.

Ceccanti, F., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., ve Pambaguian, L. (2010). 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil. In *61st International Astronautical Congress, Prague, CZ, IAC-10-D3*, *3*, 1-9.

Chen, Y., Chaves Figueiredo, S., Yalçinkaya, Ç., Çopuroğlu, O., Veer, F., ve Schlangen, E. (2019). The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing. *Materials*, *12*(9), 1374.

Chen, M., Yang, L., Zheng, Y., Huang, Y., Li, L., Zhao, P., ... ve Cheng, X. (2020). Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*, *252*, 119090.

Chu, S. H., Li, L. G., ve Kwan, A. K. H. (2020). Development of extrudable high strength fiber reinforced concrete incorporating nano calcium carbonate. *Additive Manufacturing*, 101617.

Ding, T., Xiao, J., Zou, S., ve Wang, Y. (2020). Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites, 113*, 103724.

El Cheikh, K., Rémond, S., Khalil, N., ve Aouad, G. (2017). Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials, 145*, 452-463.

EN, T. (2010). 12390/3, Testing hardened concrete-Part 3, Compressive strength of test specimens, Ankara. *Turkish Standardization Institute*.

Felekoğlu, B. (2014). Rheological behaviour of self-compacting micro-concrete. *Sadhana, 39*(6), 1471-1495.

Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *Journal of Research of The National İnstitute of Standards and Technology, 104*(5), 461.

Figueiredo, S. C., Rodríguez, C. R., Ahmed, Z. Y., Bos, D. H., Xu, Y., Salet, T. M., ... ve Bos, F. P. (2019-a). An approach to develop printable strain hardening cementitious composites. *Materials ve Design, 169*, 107651.

Figueiredo, S. C., Çopuroğlu, O., ve Schlangen, E. (2019-b). Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. *Construction and Building Materials, 212*, 818-840.

Gelardi, G., ve Flatt, R. J. (2016). Working mechanisms of water reducers and superplasticizers. *In Science And Technology of Concrete Admixtures*, 257-278. Woodhead Publishing.

Hague, R., Campbell, I., ve Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *217*(1), 25-30.

Hambach, M., Rutzen, M., ve Volkmer, D. (2019). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *3D Concrete Printing Technology*, 73-113.

Han, Y., Yang, Z., Ding, T., ve Xiao, J. (2021) Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123884.

Hwang, D., ve Khoshnevis, B. (2004). Concrete wall fabrıcatıon by contour craftıng Dooil Hwang and Behrokh Khoshnevis. *ISARC 2004 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.

ICPMA (22 Eylül 2021). *3D Printed Office Dubai*. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D Printed Office Dubai

Jamie D. (22 Eylül 2021). *World's First 3D Print Bridge Opens in Amsterdam*. https://www.3dnatives.com/en/3d-print-bridge-amsterdam-291020174/#!

Jayathilakage, R., Sanjayan, J., ve Rajeev, P. (2019). Direct shear test for the assessment of rheological parameters of concrete for 3D printing applications. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *52*(1), 1–13. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1322-4

Jha, K.N. (2012), Formwork for Concrete Structures, *Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Delhi, ISBN* (13): 978-1-25-900733-0.

Kaci, A., Bouras, R., Phan, V. T., Andréani, P. A., Chaouche, M., ve Brossas, H. (2011). Adhesive and rheological properties of fresh fibre-reinforced mortars.

Cement and Concrete Composites. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.009

Kadiroğlu, İ., Öz, E., Tezcan, O., ve Kuru, E. B. (2017). Geri Dönüşümlü Agreganın Beton Üretiminde Kullanılabilirliği. *Hazır Beton*, 86-94.

Keita, E., Bessaies-Bey, H., Zuo, W., Belin, P., ve Roussel, N. (2019). Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*, *123*(June), 105787. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105787

Keskinateş, M., ve Felekoğlu, B. (2018). The influence of mineral additive type and water/binder ratio on matrix phase rheology and multiple cracking potential of HTPP-ECC. *Construction and Building Materials*, *173*, 508-519.

Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., ve Rémond, S. (2017). Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials*, *157*, 382-391.

Khoshnevis, B., ve Dutton, R. (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, *13*(2), 53-56.

Kim, K., Park, S., Kim, W., Jeong, Y., ve Lee, J. (2017). Evaluation of Shear Strength of RC Beams with Multiple Interfaces Formed before Initial Setting Using 3D Printing Technology. *Materials*, *10*(12).

Koç, V., ve Birinci, F. (2012). Lifli betonda boyut etkisi tokluk ve kırılma enerjisi. *SDU International Journal of Technological Science*, *4*(3).

Kruger, J., Zeranka, S., ve van Zijl, G. (2019). An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. *Construction and Building Materials, 224*, 372-386.

Kruger D. (22 Eylül 2021). *Take Me Higher: 3D-Printed Concrete Could Give Wind Turbines A Powerful Lift.* https://www.ge.com/news/reports/take-me-higher-3d-printed-concrete-could-give-wind-turbines-powerful-lift

Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., ve Thorpe, T. (2012a). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z

Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G., ve Thorpe, T. (2012b). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research, 42*(3), 558-566.

Lee, H., Kim, J. H. J., Moon, J. H., Kim, W. W., ve Seo, E. A. (2019). Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials, 226*, 712-720.

Liu, Z., Li, M., Weng, Y., Wong, T. N., ve Tan, M. J. (2019). Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing. *Construction and Building Materials*, *198*, 245–255. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.25

Lootens, D., Jousset, P., Martinie, L., Roussel, N., ve Flatt, R. J. (2009). Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and Concrete Research, 39*(5), 401-408.

Long, W. J., Tao, J. L., Lin, C., Gu, Y. cun, Mei, L., Duan, H. B., ve Xing, F. (2019). Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 118054. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118054

Lu, B., Weng, Y., Li, M., Qian, Y., Leong, K. F., Tan, M. J., ve Qian, S. (2019). A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *207*, 477-490.

Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., ve Sanjayan, J. (2019). Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*, *202*, 770-783.

Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., ve Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *6*(April), 14–22.

Manikandan, K., Wi, K., Zhang, X., Wang, K., ve Qin, H. (2020). Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. *Manufacturing Letters*.

Marchment, T., Sanjayan, J., ve Xia, M. (2019). Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. *Materials ve Design*, *169*, 107684.

Marchment, T., ve Sanjayan, J. (2020). Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing. *Automation in Construction*, *120*, 103394.

Martinie, L., Rossi, P., ve Roussel, N. (2010). Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement And Concrete Research*, *40*(2), 226-234.

Manikandan, K., Wi, K., Zhang, X., Wang, K., ve Qin, H. (2020). Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. *Manufacturing Letters*.

Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S., ve Ng, S. (2018). Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research, 112*, 96-110.

McHale B. (22 Eylül 2021). *3D Printing Construction: Myths and Reality*. https://www.ibigroup.com/ibi-insights/3d-printing-construction-myths-reality/

Moeini, M. A., Hosseinpoor, M., ve Yahia, A. (2020). Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Construction and Building Materials*, *257*, 119551

Mohan, M. K., Rahul, A. V., Van Tittelboom, K., ve De Schutter, G. (2021). Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, 103855.

Nair, S. A. O., Alghamdi, H., Arora, A., Mehdipour, I., Sant, G., ve Neithalath, N. (2019). Linking fresh paste microstructure, rheology and extrusion characteristics of cementitious binders for 3D printing. *Journal of the American Ceramic Society*, *102*(7), 3951–3964. https://doi.org/10.1111/jace.16305

Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Künze, G., Mechtcherine, V., ve Schach, R. (2017). Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht.

Nerella, Venkatesh Naidu, Hempel, S., ve Mechtcherine, V. (2019). Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*, *205*, 586–601. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235

Ogura, H., Nerella, V. N., ve Mechtcherine, V. (2018). Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D-printing. *Materials*, *11*(8), 1375.

Özalp, F., Yılmaz, H. D., ve Yaşar, Ş. (2018). 3D YazıcıTeknolojisine UyguSürdürülebilir Yenilikçi BetonlaGeliştirilmesi. *Hazır Beton*, 62–70.

Panda, B., Ruan, S., Unluer, C., ve Tan, M. J. (2019). Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. *Composites Part B: Engineering*, *165*(June 2018), 75–83. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.109

Panda, B., Unluer, C., ve Tan, M. J. (2018). Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, *94*, 307-314.

Panda, B., ve Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, *44*(9), 10258–10265. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031

Panda, B., Lim, J. H., ve Tan, M. J. (2019). Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering*, *165*, 563-571.

Panda, B., Sonat, C., Yang, E. H., Tan, M. J., ve Unluer, C. (2021). Use of magnesium-silicate-hydrate (MSH) cement mixes in 3D printing applications. *Cement and Concrete Composites*, *117*, 103901.

Papachristoforou, M., Mitsopoulos, V., ve Stefanidou, M. (2018). Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete. *Procedia Structural Integrity*, *10*, 155-162.

Patural, L., Marchal, P., Govin, A., Grosseau, P., Ruot, B., ve Deves, O. (2011). Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, *41*(1), 46-55.

Paul, S. C., van Zijl, G. P., Tan, M. J., ve Gibson, I. (2018). A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*.

Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, *5*(5), 427-437.

Pham, L., Tran, P., ve Sanjayan, J. (2020). Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*, *250*, 118785.

Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., ve Ghani, Z. (2019). 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, *97*, 13-23.

Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, *112*, 76-85.

Rubio, M., Sonebi, M., ve Amziane, S. (2017). 3D printing of fibre cement-based materials: fresh and rheological performances. *Academic Journal of Civil Engineering*, *35*(2), 480-488.

Sakin, M., ve Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, *134*, 702-711.

Sakka, F. El, Assaad, J. J., Hamzeh, F. R., ve Nakhoul, C. (2019). Thixotropy and interfacial bond strengths of polymer-modified printed mortars. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *52*(4), 1–17. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1356-7

Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., ve Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, *172*, 468–475. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

Sanjayan, J. G., Jayathilakage, R., ve Rajeev, P. (2021). Vibration induced active rheology control for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Research*, *140*, 106293.

Schatzmann, M. (2005). *Rheometry for large particle fluids and debris flows* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Tay, Y. W. D., Qian, Y., ve Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, *174*, 106968.

TS EN 1015-3. (2000). Methods of test for mortar for masonry: Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).

TS EN 12390-5, 2010. Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Shahrubudin, N., Lee, T. C., ve Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, *35*, 1286-1296.

Shakor, P., Nejadi, S., ve Paul, G. (2019). A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar. *Materials*, *12*(10), 1708.

Van Der Putten, J., Azima, M., Lesage, K., De Schutter, G., ve Van Tittelboom, K. (2019). Combination of Portland cement and Calcium-Sulfoaluminate cement: the highroad for durable 3D printing? In *RheoCon2 ve SCC9*, 1-9.

Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., … Flatt, R. (2016). Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16

Weng, Y., Ruan, S., Li, M., Mo, L., Unluer, C., Tan, M. J., ve Qian, S. (2019). Feasibility study on sustainable magnesium potassium phosphate cement paste for 3D printing. *Construction and Building Materials, 221*, 595-603.

Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., ve Salet, T. A. M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research, 119*, 132-140.

Zhang, X., Li, M., Lim, J. H., Weng, Y., Tay, Y. W. D., Pham, H., ve Pham, Q. C. (2018-a). Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction, 95*, 98-106.

Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M., ve Pang, B. (2018-b). Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials, 174*, 263-271.

Zhang, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G., ve Yang, Y. (2019). Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials, 201*, 278-285.

Zou, S., Xiao, J., Ding, T., Duan, Z., ve Zhang, Q. (2020). Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand. *Construction and Building Materials*, 121699.

Zuriguel, I., Garcimartín, A., Maza, D., Pugnaloni, L. A., ve Pastor, J. M. (2005). Jamming during the discharge of granular matter from a silo. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.051303