



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜNEL KAZILARINDA KULLANILAN KAYA BULONU
PLAKALARINDA MÜHENDİSLİK PLASTİĞİ UYGULAMALARI:
DENEYSEL İNCELEMELER ve SAYISAL MODELLER

Baturalp ŞENTÜRK

Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, TÜBİTAK’ın 1002 kodlu destek programına ait 121M195 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması ve tüm yüksek lisans öğrenciliği sürecimde bana olan destekleri, inancı, yol göstericiliği ve anlayışı için danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yine tüm tez süreci boyunca bilgilerini ve desteğini benden esirgemeyen, malzeme bilimi konusunda yol gösterici olan Sayın Prof. Dr. Savaş ERDEM'e çok teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca gerek plakaların üretim aşamalarında gerekse her türlü ihtiyacın tedarik aşamalarında, bilime katkı yapma şevkiyle tüm proje sürecimizi maddi ve manevi destekleyen Teknofor İnşaat Taahhüt Ltd. Şti. çalışanları değerli Müslüm Gökhan KORKMAZ, Mustafa ARMAĞAN, Gökhan ÜSTÜNYER'e ve Tisan Mühendislik Plastikleri San. Tic. Ltd. Şti. çalışanı Rıfat KOÇ'a, tezimin gelişim sürecinde gerekli teknik detayları benimle paylaşan Bülent KOÇAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, meslek yaşamımda bana rehberlik eden, inanç aşıl原因an, güç veren ve desteğini her daim hissettiğim babam Jeoloji Yüksek Mühendisi Cüneyt Hüseyin ŞENTÜRK'e, mesleki hayatımın tamamında çabalarımı ve başarılarımı her zaman takdir eden, cesaretlendiren ve destekleyen eşim Fatma Nur ŞENTÜRK'e, annem Gülistan ŞENTÜRK'e ve kardeşim Toygar ŞENTÜRK'e ayrı ayrı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ekim 2022

Baturalp ŞENTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	16
2. GENEL KISIMLAR.....	17
2.1. NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD) YÖNTEMİ VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ.....	19
2.1.1. Çelik İksa	20
2.1.2. Püskürtme Beton	21
2.1.3. Çelik Hasır.....	22
2.1.4. Süren / Umbrella Arch.....	22
2.1.5. Kaya Bulonları.....	23
2.1.5.1. Bulon Plakaları	25
2.1.5.2. Somun ve Rondela	26
2.2. BULON PLAKASINA GELEN YÜK HESABI.....	26
2.3. BRITISH STANDARD (BS) 7861.....	27
2.4. YAPILMIŞ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	29
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	33
3.1. ÖN ÇALIŞMALAR.....	33
3.1.1. Mukavemet Deneyleri	33
3.1.2. Sayısal Çalışmalar	39
3.2. ÖN ÇALIŞMA BULGULARI VE BULGULAR NETİCESİNDE NİHAİ TASARIMIN VE MALZEMENİN BELİRLENMESİ.....	42
3.2.1. Kullanılan Plastik Malzemeler	44
3.2.1.1. High Density Polyethylene (HDPE).....	44
3.2.1.2. Polypropylene (PP)	45

3.2.1.3. <i>Polyamide-6/66 (PA)</i>	46
3.2.2. Üretim Aşaması	48
4. BULGULAR	55
4.1. ÜRETİLEN PLAKALARIN TESTLERİ VE SONUÇLARI.....	55
4.2. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	74
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	81



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Çelik iksa.....	21
Şekil 2.2: Püskürme beton.....	21
Şekil 2.3: Çelik hasır.....	22
Şekil 2.4: Süren / Umbrella Arch.....	23
Şekil 2.5: Kaya bulonları.....	23
Şekil 2.6: Kaya Bulonu Uygulaması ve Düzeneği a) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), 2013 b) FHWA Soil Nail Walls Reference Manuel, 2015.....	24
Şekil 2.7: Sahada basınç altında yenilen düz bulon plakalarının ön ve arka yüzleri (Li, 2017).....	25
Şekil 2.8: a) Standart somun, b) Uzatılmış somun (Li, 2017).....	26
Şekil 2.9: Bulon üstündeki yük dağılım şeması (FHWA, 2015).....	27
Şekil 2.10: a) Kaya bulonu ve tamamlayıcı bileşenlerinin çekme testindeki kurulumu, b) Test kurulumunun 10° açılı ile uygulanması (BS 7861-Part1, Figure K.1 ve Figure E.1. Birimler milimetredir).....	28
Şekil 3.1: Singapur'dan getirilen örnek numune.....	33
Şekil 3.2: Çekme testleri için kurulmuş test düzeneği.....	35
Şekil 3.3: İnterpolasyon grafiği.....	36
Şekil 3.4: Dört numunenin testler sonucunda kırılmış halleri.....	37
Şekil 3.5: 4 numaralı testin sonucunda elde edilen basınç-deformasyon ilişkisini gösteren grafik.....	38
Şekil 3.6: Kırılan numunenin içindeki hava boşlukları.....	39
Şekil 3.7: Mevcut plakaya ait SOLIDWORKS modeli.....	40
Şekil 3.8: a) Modele tanımlanan ankastre mesnet b) yükün uygulandığı bölge.....	40
Şekil 3.9: a) Analiz sonucunda elde edilen deformasyon (7.9 mm) b) Yükleminin numune içindeki vektörel dağılımı c) Numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.....	41

Şekil 3.10: Basınç-deplasman ilişkisinin laboratuvar test sonucuyla karşılaştırması.	42
Şekil 3.11: Yeni plakanın SOLIDWORKS modeline ait a) ön görünümü b) arka görünümü.....	43
Şekil 3.12: PA6 ile farklı oranlarda katkılı PA6'nın gerilme şekil değiştirme grafikleri (Dryzek ve diğ., 2017).....	47
Şekil 3.13: a) Enjeksiyon makinesine ve b) kalıp detaylarına ait görseller.....	50
Şekil 3.14: Üretim sonrası numunelere ait görseller.	51
Şekil 3.14 (devam): Üretim sonrası numunelere ait görseller.	52
Şekil 3.15: Kurutma ünitesi.....	53
Şekil 3.16: Hammaddenin kurutma sonrası ve eritme öncesindeki granüler hali.	53
Şekil 3.17: a) Enjeksiyon sonrası soğuk su havuzuna atılan numuneler b) kütleme prosedürü.	54
Şekil 3.18: a) Örnek yükleme testi kurulumu b) yeni kullanılan 700bar limitli Werner Weitner marka kriko.....	54
Şekil 4.1: İnterpolasyon grafiği.	56
Şekil 4.2: N3/HDPE(RC) basınç-deplasman grafiği.	57
Şekil 4.3: N4 / PA6 basınç-deplasman grafiği.	58
Şekil 4.4: N5/PA6-R30 basınç-deplasman grafiği.	59
Şekil 4.5: N7/PA66-GF35 basınç-deplasman grafiği.....	60
Şekil 4.6: N8/PA66-GF30-IR basınç-deplasman grafiği.....	61
Şekil 4.7: N9/PA6-GF50-IR basınç-deplasman grafiği.....	62
Şekil 4.8: N10/PA6-UNR-IR basınç-deplasman grafiği.	63
Şekil 4.9: N11/PP-LGF30 basınç-deplasman grafiği.	64
Şekil 4.10: Seçilen numunelerin toplu sonuçlarının gösterimi.....	66
Şekil 4.11: N9/PA6-GF50-IR'ye ait sekant ve tanjant elastisite modüllerinin gösterimi	69
Şekil 4.12: a) N9/PA6-GF50-IR'ye ait modele tanımlanan ankastre mesnet b) Yükün uygulandığı bölge.	70
Şekil 4.12 (devam): a) N9/PA6-GF50-IR'ye ait modele tanımlanan ankastre mesnet b) Yükün uygulandığı bölge.	71

Şekil 4.13: N9/PA6-GF50-IR'ye ait analiz sonucunda a) elde edilen deformasyon (0.696mm) b) yüklemenin numune içindeki vektörel dağılımı c) numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.	71
Şekil 4.13 (devam): N9/PA6-GF50-IR'ye ait analiz sonucunda a) elde edilen deformasyon (0.696mm) b) yüklemenin numune içindeki vektörel dağılımı c) numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.....	72
Şekil 4.14: Basınç-deplasman ilişkisinin laboratuvar test sonucuyla karşılaştırması.	73



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: NATM'a göre kaya sınıfları ve tanımları.....	20
Tablo 2.2: Çelik plakaların minimum ve maksimum test yüklerine çekme ve basma testleriyle maruz kaldıklarındaki yenilme yükleri.....	29
Tablo 3.1: Malzemeye ait test sonuçları.....	33
Tablo 3.2: Kalibrasyondan sonra interpolasyon ile elde edilmiş bar-kN ilişkisi.....	36
Tablo 3.3: Eski ve yeni tasarımların katı cisim hacmi ve plaka boyutlarının karşılaştırılması.....	43
Tablo 3.4: HDPE'ye ait genel teknik özellikler (Awad ve diğ., 2019).	45
Tablo 3.5: PP'ye ait genel teknik özellikler (Awad ve diğ., 2019).	46
Tablo 3.6: PA6 ve PA66'ya ait genel teknik özellikler.....	46
Tablo 3.7: Üretilen numunelerin listesi ve özellikleri.	49
Tablo 4.1: Kalibrasyondan sonra interpolasyon ile elde edilmiş bar-kN ilişkisi.....	56
Tablo 4.2: Numunelere ait elde edilen dayanım, deplasman ve yenilme mekanizmaları	65
Tablo 4.3: ANSYS programına ait girdi parametreleri.	70
Tablo 5.1: Çalışma kapsamında kullanılan 11 numuneye ait fiyat tablosu (2020 son çeyreği ile 2022 ilk çeyreği arasında muhtelif dönemlerde satın alımlar gerçekleşmiştir).	76

SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
SN	: SN bulonu, kaya bulonu yapmak için açılan deliğin, bulon yerleştirilmeden önce enjeksiyonla doldurulması ve bulonun daha sonra yerleştirilmesi uygulaması.
PG	: PG bulonu, kaya bulonu yapmak için açılan deliğe önce bulonun yerleştirilmesi daha sonra enjeksiyonla doldurulması uygulaması.
IBO	: IBO bulonu, delici uçtan oluşan kaya bulonunun içindeki boşluktan enjeksiyon yapılması uygulaması.

Kısaltmalar	Açıklama
BS	: British Standard (İngiliz standardı)
FEM	: Finite Element Model (Sonlu elemanlar modeli)
FHWA	: Federal Highway Administration (ABD)
GF	: Glass Fibre (Cam elyaf)
GRP	: Glass Fibre Reinforced Plastic (Cam elyaf ile güçlendirilmiş plastik)
HDPE	: High Density Polyethylene (Yüksek yoğunluklu polietilen)
IR	: Impact Resistance (Darbe dayanımı)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LGF	: Long Glass Fibre (Uzun cam elyaf)
N	: Numune
NATM	: New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu)
O	: Original (Orijinal)
PA	: Polyamide (Poliamid)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
TBM	: Tunnel Boring Machine
R	: Rubber (Kauçuk)
RC	: Recycle (Geri dönüştürülmüş)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜNEL KAZILARINDA KULLANILAN KAYA BULONU PLAKALARINDA MÜHENDİSLİK PLASTİĞİ UYGULAMALARI: DENEYSEL İNCELEMELER ve SAYISAL MODELLER

Baturalp ŞENTÜRK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Bu çalışma kapsamında, tünel uygulamalarının önemli bir parçası olan kaya bulon imalatında kullanılan çelik plaka yerine, alternatif olarak kullanılabilecek ve mühendislik plastiğinden üretilen plakaların tasarlanması ve üretilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, yurt dışından ithal edilen plastik malzemeden yapılmış bir plaka örneği incelenmiştir. İthal edilen plaka üzerinde laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sayısal ortamda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda ithal malzemenin dayanım bakımından yeterli bir mühendislik plastiği olmadığı, çok düşük yüklerde büyük deplasman değerleriyle hızlıca göçmeye ulaştığı tespit edilmiştir. Tarafımızca yapılan ilave çalışmalar sayesinde plaka için optimum geometrinin belirlenmesi ve doğru malzemenin tespiti mümkün olabilmektedir. Yeni geometri için sayısal modeller üzerinde ön araştırmalar yapılmış ve teknik yeterlilikleri sağlayan geometri referans alınarak bu geometriye ait bir kalıp üretilmiştir.

Plakanın geometrik tasarımı ve sayısal analizleri süresinde SOLIDWORKS ve ANSYS programlarından faydalanılmış, laboratuvar ortamında ise temsili bir kaplama yüzeyi

oluşturularak üretilen plakaların basınç testleri gerçekteşirilmifitir. Elde edilen dayanım ve sünme verileri polietilenden poliamide kadar farklı plastik malzemeler için ayrı ayrı değerlendirilmifitir. Ölçülen basınç değerlerine göre, güçlendirilmifit poliamid içerikli plastik plakaların 20 ila 25 ton arasında yük değerlerine kadar ulaşabildiği tespit edilmiştir.

Ekim 2022, 81 sayfa.

Anahtar kelimeler: tüneller, kaya bulonları, çelik plaka, mühendislik plastiği, plastik plaka, ansys, solidworks



SUMMARY

M.Sc. THESIS

ENGINEERING PLASTIC APPLICATIONS IN ROCK BOLT PLATES USED IN TUNNEL EXCAVATIONS: EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL MODELS

Baturalp ŞENTÜRK

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Co-Supervisor : Academic Title Name SURNAME

Engineering plastics are used as raw materials for bearing plates that can be used as an alternative to the steel plate of rock bolts. In order to achieve this goal, a plastic bearing plate was imported as a sample and examined within the scope of this study. Laboratory studies were carried out on the imported plate to determine the failure load of the plate and a finite element model was also created for the same geometry for parametric analyses. The results from both efforts clearly showed that the imported plastic bearing plate was not adequate in terms of strength and creep properties, that it quickly yielded with large displacement values at very low loads. In order to enhance the strength of the imported plate, both geometric and material modifications are made by our research group so that a more accurate geometry and material for the plate could be determined. For the new geometry, preliminary studies were made on the numerical model to fulfill the technical qualifications. After the geometrical design has been

finalized, a chamber for this specific geometry was produced for an injection type of production process.

During the geometric design and numerical analysis of the plate SOLIDWORKS and ANSYS software were used. A representative surface was created in the laboratory and compression tests of the produced plates were also carried out. The measured strength and creep data were criticized separately for varying plastic materials from polyethylene to polyamide. According to the measured values, it has been determined that the plastic plates reinforced with polyamide via different additives has the potential to reach a strength up to 20 to 25 tones.

October 2022, 81 pages.

Keywords: tunnels, rockbolt, steel plate, engineering plastic, plastic plate, ansys, solidworks

1. GİRİŞ

Tüneller inşaat sektöründe birçok alanda kendine yer bulan büyük sanat yapılarıdır. Karayolları, demiryolları ve barajlar başta olmak üzere kullanım alanları çeşitlidir. Bulonlar ise tünel inşasının en temel konularından bir tanesi olan destekleme sistemlerinin en vazgeçilmez parçası olarak kabul edilebilir. Kazı aşamalarında sürekli bir destek takımına ihtiyaç duyan tünellerde çok fazla sayıda kullanılan bulonlar birçok parçanın bir araya gelmesiyle görevini gerçekleştirir. Bu tez kapsamında, bulon parçaları arasında yer alan plakanın çelik yerine geri dönüştürülmüş plastik ve/veya mühendislik plastikleri tarafından üretildiği takdirde nasıl davranış sergileyeceği üzerinde durulmuş ve bu konu hakkında çalışmalar yapılmıştır.

İkinci bölümde bir bulon plakasının önemini ve görevini daha iyi aktarabilmek adına New Austrian Tunneling Method (NATM) uygulaması hakkında bilgiler verilecek ve bir tünel projesinin gerçekleştirilmesi aşamasında bulon hesabının nasıl yapıldığı gösterilecektir. Buradan yola çıkarak bulon tasarımı sürecinde plakaya etkiyen faktörler açıklanacaktır. Üçüncü bölümde yurt dışından ithal edilmiş örnek bir numune üzerinde yapılan testler ile bu numuneye ait yapılan sayısal analizler sunulacaktır. Yapılan ön çalışmadan elde edilen bilgilerle birlikte yola çıkılarak oluşturulmuş yeni plaka modeli ve bu modelin üretimi hakkında bilgiler verilecek, üretim sonrası ortaya çıkan yeni plakalara ait laboratuvar testlerine ve yeni yapılan nümerik analizlere sırasıyla yer verilecektir.

Bu tezde sunulan çalışma ile hangi tür plastiklerin tünelde kullanılacak kaya bulonu plakasında çeliğin alternatifi olarak piyasada yer alabileceği yönünde bulgular elde edilmiştir. Bu bulgular sonucu ortaya çıkan plaka ile çok maliyetli inşaat yapıları olan tünellere ciddi anlamda ekonomik fayda sağlayacak olmakla beraber sektörde çeliğe karşı alternatif bir bakış açısı kazandıracağı düşünülmektedir.

Tez çalışmaları boyunca yapılan tüm sayısal analizlerde sonlu elemanlar yazılımı olarak ANSYS (Educational Version) ve katı cisim modelleme yazılımı olarak SOLIDWORKS kullanılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

Tünel yapıları özellikle insan nüfusunun arttığı bu dönemlerde raylı sistemler ve karayolları tünelleri olarak en çok ulaşımda olmak üzere, derivasyon amaçlı barajlarda ve kanalizasyonlarda, yayaların ulaşımında ve hayvanların geçişlerine kadar birçok alanda etkin bir görev görmektedir. Tünel, çevre kaya ve zemin koşulları jeolojisinin, aletsel geoteknik ölçüm ve jeolojik olarak takibiyle birlikte kazı esnasında veya öncesinde oluşan gerilme ve yüklere bağlı olarak, jeolojik birimlerin iyileştirmesi ve sağlamlaştırması ile denge durumuna getirilen yer altı ulaştırma (su, insan, yük vs.) yapısıdır. Tünel şeklinde yapılan geçitlerin şehirlerde trafik problemlerini, hava kirliliği, gürültü, hayvan ve bitkilere zararlarını ortadan kaldırdığı ve iyi bir sığınak olduğu muhakkaktır. Tünellerin inşaat alanındaki kullanımlarına faydaları aşağıdaki gibi verilebilir:

- Ulaşım güvenliğini, konforunu ve emniyetini arttırmak.
- Yolculuk süresini azaltmak, ulaşılabilirliği ve hareketliliği arttırmak.
- Ulaşımın çevreye kötü etkilerini en aza indirmek, daha iyi yaşanabilir bir çevre yaratmak.
- Tarihi ve doğal çevreyi korumak ve sürekliliklerini sağlamak.
- En az kentsel yayılma ile düzenli büyümeyi teşvik etmek.
- Etkin, ekonomik yarar-maliyet ilişkisi yüksek bir ulaşım sistemi sağlamak.
- Kent içi raylı ulaşım sistemleriyle entegrasyonu sağlamak için tünel yapılır.

Tarihi süreç incelendiğinde ilk tünel açma işleri genel olarak insan gücüne dayalı ve parçalı kazı sistemiyle yapılmaktaydı. Günümüzde ise parçalı kazı sistemli tünel açma yöntemleri devam etmekle beraber insan gücü büyük ölçüde yerini tünel açma makinelerine bırakmıştır. Eski sistemlerde kereste/ahşap destek sistemleriyle açılan tünellerde artık ahşap yerine kullanılmaya başlanan çelik destekler gözle görülür bir şekilde tünel açma yöntemlerine olumlu yönde katkı sağlamıştır. Bunun en belirgin göstergeleri çeliğin aşınmaya karşı yüksek direnci, esnemeye olan eğilimi ve tüneller içerisinde ahşaba göre çok daha iyi fiziksel özellikler göstermesidir. Tünel içerisindeki deformasyonlar çeliğin dışında betonun da tünel kaplamasında tuğlanın yerine kullanılmaya başlamasıyla çok daha kontrol edilebilir ve engellenebilir hal almıştır.

Son birkaç on yıl içerisinde yaşanan bu gelişmelerle beraber kaya bulonları ve püskürtme beton da tünel açma yöntemleri içerisinde dahil olmuştur. Püskürtme beton ve betona uygun olarak kullanılan kaya bulonu destekleme sistemleri, tünel aynasındaki kazıda veya patlatma sonrasında kazılan yüzeylerde kullanılmaya başlanmıştır. (Singh ve Goel, 2006; Şentürk, 2016) Tüm bu teknolojik gelişmeler ise günümüzde kullanılan tünel açma yöntemlerinin çeşitlenmesine ve geliştirilmesine katkıda bulunmuştur ve bu yöntemlerin temellerini oluşturmaktadır. Şüphesiz tüm bu süreçte tünel içerisindeki tüm teknik tetkiklerin yapılabilmesini kolaylaştıran bir diğer konu ise sonlu elemanlar ve sonlu farklar içeren bilgisayar yazılımlarının artık tünel projelerinde yaygın olarak kullanılmasıdır. Bu yazılımsal yöntemlerle, fiziksel olarak testini kurmanın zor olduğu tünel yapısının ve çevresindeki zeminin veya kayanın tüm geoteknik parametrelerinin tespiti ardından, tünele ait tüm mühendislik verileri elde edilebilmektedir.

Tünel inşaatında mühendislik açısından en zor konu kayayı ve çok zayıf mühendislik özelliklerine sahip zemini kazabilmek ve yeraltında oluşturulan yapay açıklığın doğru yöntemlerle destekleyebilmektir. Tünel, kazı aşamalarının yavaşlığı nedeniyle sabır ve dikkat isteyen, birçok iş makinesinin birlikte çalışmasını ve güncel teknolojinin kullanılmasını gerektiren, inşaatın özel bir alanıdır. Bu zorlu ve önemli süreçte ise tünellerdeki kazı yöntemleri ve ekipman seçiminde dört ana konuya vurgu yapılması gerekmektedir. Bunlar, arazinin jeolojik yapısı, oluşturulacak açıklığın geometrisi ve kesit büyüklüğü, maliyet ve zaman. Özellikle tünelin güzergahındaki jeolojiye uygun kazı destekleme sistemleri ve tüm tünel açma sürecindeki ekipmanların seçimi proje için kilit önemdedir (Şentürk, 2016).

Ana olarak tünel açma yöntemlerini iki başlık altında toplayabiliriz. Bunlar mekanize kazı ve delme-patlatma şeklindedir. Bu tez altında asıl incelenecek olan tünel açma metodu NATM olmakla beraber, ihtiyaçlara ve uzun tecrübeler dayanan başka bir takım tünel açma yöntemleri de bulunmaktadır. Bunlar arasında, Alman, Belçika, Eski Avusturya, İngiliz metotları ve TBM (Tunnel Boring Machine) sayılabilir. Bu yöntemlerin kendi arasında seçimleri ise iksa sistemlerinin oluşturulması, kazı paternleri ve kemer kaplamasının tipleri dahilinde detaylanabilmektedir (Polat, 2010).

2.1. NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD) YÖNTEMİ VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ

NATM yöntemi esas olarak tünelin kendisini açıldığı kayaya taşıtmasına dayanan bir ilkedir. 1950li yıllarda Avusturyalı Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller ve Franz Pacher tarafından yöntemin temelleri atılmıştır. Bu yöntemde esas amaç zemine en uygun kazı tahkimat yöntemiyle ilerleyerek, kazı nedeniyle oluşacak ikincil gerilmelerin ve deformasyonların tüneli çevreleyen kayaya yönlendirilmesidir. Burada kazı bölgesi kendi kendini tutar ve doğal bir tahkimat bölgesi oluşur. Bu tahkimat bölgesini tutmak içinse ana tahkimat olan çelik iksa ve çelik hasır sonrasında ise püskürtme beton ve kaya bulonları uygulanarak birincil tahkimat (birincil destekleme sistemi) kurulmuş olur. Birincil destekleme sistemlerinden sonra ise iç kaplama yapılır (Akın, 2019). Birincil destekleme sistemi ve iç kaplama detayları Bölüm 2.1.1’de verilecektir.

Bu yöntemin temel ilkelerinden birisi olan konu ise destek sistemlerin nasıl uygulanacağıdır. Yöntemin mucitleri bu konu hakkında “destek çok erken veya çok geç monte edilmemelidir. Çok sert veya çok zayıf olmamalıdır” uyarısında bulunmuşlar ve aslında tüneller açılırken bir miktar deformasyona izin verilmesinin önemini belirtmişlerdir. Tünelin kendi kendini taşıyabilmesi için uygulanan bu yöntemde eğer destek sistemleri çok erken kurulursa ve çok sert olursa tünelin deformasyon yapması engellenecek bu da kaya basıncında artışa sebebiyet verecektir. Mucitler patent başvurusunda NATM tanımlaması hakkında şöyle bir açıklama getirmişlerdir: ”İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır.” Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve daha sonra daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir.” Bu yöntemin başarılı olması için zemine ait mekanik özellikler, su etkisi ve birincil gerilmeler belirlenmiş olmalı ve tünel açımı sırasında ve sonrasında ikincil deformasyonlar ve gerilmeler gözlemlenmelidir. (Polat, 2010; Akın, 2019)

NATM yönteminde kullanılan kaya sınıfları tanımlarıyla aşağıda verilmiştir. Bu kaya sınıflarına göre önerilen sistemler de Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) şartnamesinde detaylarıyla gösterilmektedir.

Tablo 2.1: NATM'a göre kaya sınıfları ve tanımları.

Kaya Sınıfı	ÖNORM B2203 Ekim 1994 ve Sonrası		ÖNORM B2203 Ekim 1994 Öncesi	
	A	A1	Stabil	A1
A2		Sonradan Az Sökülen	A2	Hafif Aşırı Sökülen
B	B1	Gevrek	B1	Gevrek
	B2	Çok Gevrek	B2	Çok Gevrek
	B3	Daneli		
C	C1	Dağ Atma	C1	Baskılı
	C2	Baskılı		
	C3	Çok Baskılı	C2	Çok Baskılı
	C4	Akıcı	L2	Gevşek Zemin Düşük Kohezyon
	C5	Şişen	L1	Gevşek Zemin Yüksek Kohezyon

NATM'a göre yapılacak kazı sonrası hemen destekleme sistemlerinin kurulmaması gerekir. Zeminde veya kayada oluşacak ikincil gerilmelere karşı bir müddet beklenerek tünelde bir miktar deformasyona izin verilir. Ancak uzun beklemler ciddi sorunlara sebebiyet vermektedir (Akın, 2019). Yapılacak olan sağlamlaştırma işlemleri iki aşamada incelenebilir. Birincil destekleme sistemleri veya geçici sağlamlaştırma içerisinde çelik hasır, püskürtme beton, boru süren, kaya bulonları ve çelik veya kafes iksa uygulamaları kullanılmaktadır. Daha sonra yapılacak olan kalıcı sağlamlaştırma ise nihai betonarme kaplamayı içermektedir (Polat, 2010).

2.1.1. Çelik İksa

Çelik iksa, kazı yapılan tünel aynasına uygulanan püskürtme beton priz alana kadar yük dağılımına yardımcı olur ve yapının güvenliğini sağlar.



Şekil 2.1: Çelik iksa.

2.1.2. Püskürtme Beton

Geçici sağlamlaştırma aşamalarından en önemlisi püskürtme beton imalatıdır. Püskürtme beton, agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı maddelerinin karışımı olarak, yaş veya kuru olarak uygulanır. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve deplasmanların bir kısmını karşılar. Kayacın yerinde dayanımını artırır. Ancak uygulanması sırasında yüzeydeki suyun drene edilmiş olması ve üstüne uygulanacağı çelik hasırın tünel yüzeyine iyi sabitlenmiş olması önemlidir (Süzen, 2009; Polat, 2010; Akın, 2019).



Şekil 2.2: Püskürme beton.

2.1.3. Çelik Hasır

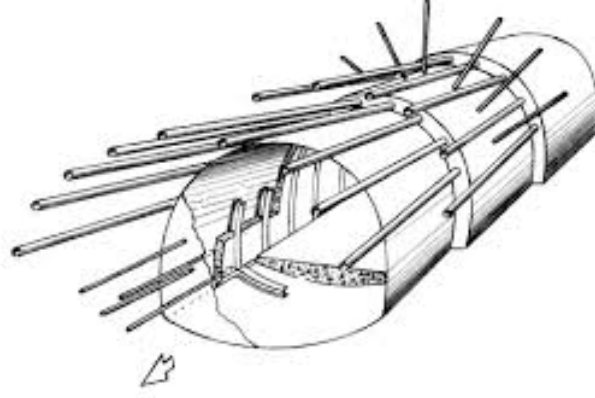
Çelik hasır kazı sonrasında hemen imal edilen geçici sağlamlaştırma aşamalarından birisidir. Çelik hasır püskürtme betonla beraber betonarme bir yapı içerisinde çalışır. Çok çatlaklı veya zemin birimlerde, kaya bulonları veya çivilerin arasındaki boşluklarda stabiliteyi sağlamak ve püskürtme beton priz alana kadar kütleyi desteklemek amacıyla uygulanır. Küçük kaya parçalarının da kopmasıyla oluşabilecek hasarların veya yaralanmaların önüne geçer. Bütün tünel tiplerinde kullanılan çelik hasır, tip olarak Q221/221 ve bindirme oranlarında yatayda ve düşeyde 30cm aralıklarla monte edilir (Süzen, 2009; Polat, 2010; Akın, 2019).



Şekil 2.3: Çelik hasır.

2.1.4. Süren / Umbrella Arch

Süren, kötü ve kendini tutamayan zeminlerde veya çatlaklı kayalarda uygulanmaktadır. Uygulanma amacı, tünel aynasındaki kazı alanını korumak ve aynada oluşacak deformasyonları engellemektir. Süren ve Umbrella Arch arasındaki fark, Umbrella'nın malzeme çapının ve et kalınlığının süren borularına göre daha büyük olmasıdır (Akın, 2019). Tercihen enjeksiyonlu olarak da uygulanabilmektedir. Süren imalatı, süren boyuyla alakalı olarak belirlenen bindirme boyu sağlanmak suretiyle tekrarlanarak yapılmaktadır (Polat, 2010; Akın, 2019).



Şekil 2.4: Süren / Umbrella Arch.

2.1.5. Kaya Bulonları

Kaya bulonları tüneller için bir numaralı destek sistemidir. Genellikle kullanılan 4 tip bulon vardır: SN, PG, IBO ve Swellex bulon. Bu bulonlar için aranan kapasite, bulon üzerinde etkili olan kuvvet ile ilgilidir. Bu kuvvet nümerik analizler sonucu elde edilmektedir. Bulon boyu ise, yapılan analizde hesaplanan plastik bölge çapı ile belirlenmektedir. Bulonların, tüneller çevresindeki bu yenilme alanının dışına uzanması istenmektedir. Analizlerde bulon uzunluğu, aralığı ve çapı değiştirilerek optimum bulon yerleşimi belirlenmektedir.

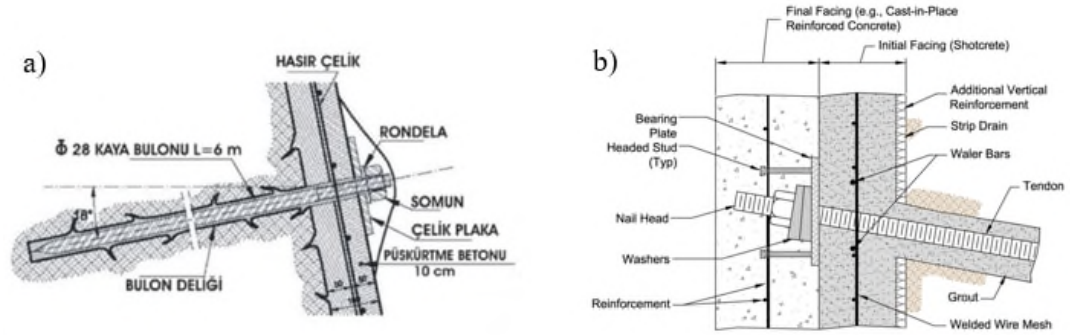


Şekil 2.5: Kaya bulonları.

Bulon türünün seçimi ise hesaplamalara değil, yapım koşulları ile ilgilidir. SN bulonlar daha nitelikli kaya koşullarında uygulanmaktadır. Genel uygulamada NATM A, B1 ve B2 kaya destek sınıflarında SN bulon tercih edilebilir. PG bulon, NATM B3 sınıfında olduğu gibi daha kötü koşullarda seçilmektedir. IBO bulonlar ise bulon delgisinin kendisini tutamadığı, NATM C2 ve üstü sınıflarda olduğu gibi durumlarda seçilmektedir. Swellex bulonlar daha özel durumlarda (aşırı su gelişine bağlı ayna yenilmesi gibi) kullanılan ve ithal edildiği için genelde tercih edilmeyen elemanlardır. Tünelde kullanılan bulonlar, plakalar ve diğer destekleme, sağlamlaştırma elemanları hesap sonuçlarına göre boyutlandırılmaktadır. Şartnameler karşılanması gereken asgari kriteri vermektedir.

Bulonlar, kablo ankrajlardan farklı olarak pasif elemanlar olup, ancak tünelde deformasyon başladıktan sonra görev yapmaya başlamaktadır. Başlangıçta 2 tonluk bir ön germe verilerek gerilmektedirler. Bulon, imalatından sonra 250kN değerine kadar çekme testlerine tabi tutulur.

Şekil 2.6'da klasik bir kaya bulonunun (veya zemin çivisinin) uygulama sırasında kurulum düzeni ve birlikte görev yaptığı diğer elemanların kullanımı gösterilmektedir. Örneklerde gösterilen plakalar yassı olmayan çelik plakalar olup, somun ve rondela ile kurulum modelinde birlikte nasıl bir yerleşim içerisinde oldukları belirtilmiştir. Burada somun plaka ile çelik donatı arasında yük aktarmada en kritik eleman olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.6: Kaya Bulonu Uygulaması ve Düzenegi a) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS), 2013 b) FHWA Soil Nail Walls Reference Manuel, 2015.

Williams (1998)'e göre kaya bulonlarının performansını etkileyebilecek 4 madde aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Kaya bulonunun ve/veya enjeksiyon dayanımı
- Donatının çekme dayanımı

- Bulon plakasının dayanım kapasitesi
- Rondela ve somunun dayanım kapasitesi

2.1.5.1. Bulon Plakaları

Bir kaya bulonu plakası genellikle, ortasında kullanılan donatının çapına göre açılmış bir delik bulunan çelik sacdan yapılır. Plakalar ya düzdür ya da kubbe şeklindedir. Düz plakaların dezavantajı, yüklenme sırasında plakanın sıkışan kayaya bakan yüzünde yırtılmalar olduğunda ve plaka yüzeyi genişlediğinde, plakanın ciddi şekilde deformasyon göstermesi ve kolayca taşıma kapasitesini kaybetmesidir (Şekil 2.7). Bu durumda, somun ve rondela deliğe zımbalanıp plakayı yırtabilir. Yırtma sorunu, kubbeli plakalarda nadiren görülür. Kubbeli plakanın deliği, plaka rondela ve somunun altına yüklendiğinde merkeze doğru büzülme eğilimindedir. Kubbeli plakaların bir başka avantajı, kubbe düzleştirilmeden önce nispeten büyük bir yer değiştirmeye (20-30mm) uyum sağlamalarıdır. Bu nedenle kubbeli plakalar, düz plakalardan daha büyük bir deformasyon kapasitesine sahiptir. Plakaların kullanımındaki temel bir gereklilik ise, plakaların yük taşıma kapasitesinin donatı dışının gücüne en az eşit veya daha yüksek olmasıdır. Aksi takdirde bulon, plakanın göçmesi nedeniyle zamanından önce yenilmiş olacaktır (Li, 2017).



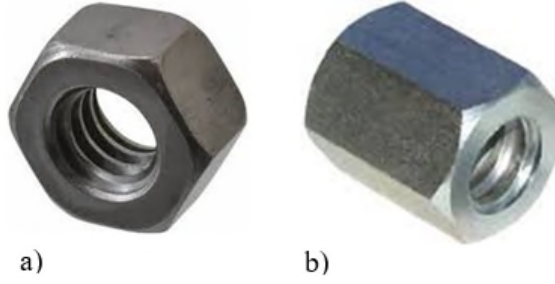
Şekil 2.7: Sahada basınç altında yenilen düz bulon plakalarının ön ve arka yüzleri (Li, 2017).

Bulon plakalarının düz veya bombeli olması tamamen yüklenicinin sahada karşılaştığı jeolojik etmenlere veya tercihinine ilişkindir. Burada önemli bir nokta, plakaların tüneldeki amacıdır. Tünel imalatında uygulanan sistemin yeterliği, yapılan deplasman ölçümleri ile izlenmektedir. Bir tünelde, püskürtme beton kaplaması üzerinde çatlak oluşumu veya gözle görülür bir

deformasyon olmadığı sürece, ölçüm sonuçlarına bakmadan o tünelde bir sorun olup olmadığını anlamak çok mümkün değildir. Bulon plakaları bu aşamada gözle takip için önemli olmaktadır. Plakaların eğilmesine izin verilmesi halinde, bir tünelin hangi noktasında ve hangi kesiminde zorlandığı ve bulonların nasıl çalıştığı izlenebilmektedir.

2.1.5.2. Somun ve Rondela

Uygulamada kaya bulonları için hem standart somunlar hem de uzatılmış somunlar kullanılmaktadır (Şekil 2.8). Standart somunlarda dış ezilmesi hatasının sıklıkla meydana geldiği sahada gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, uzatılmış somunlar standart somunlardan daha güçlüdür. Somun seçimindeki prensip, somunun çekme mukavemetinin donatı dişinin mukavemetinden daha yüksek olması gerektiğidir (Li, 2017).



Şekil 2.8: a) Standart somun, b) Uzatılmış somun (Li, 2017).

Kaya bulonu imalatında rondela kullanılması ise somundan plakaya aktarılan yükü önemli ölçüde iyileştirir. Plaka ve donatının uygun şekilde yüklenmesi için kaya bulonları kaya yüzeyine dik olarak monte edilmelidir. Bununla birlikte, kuyular çoğu zaman normal hattan kaya yüzeyine doğru hafifçe sapar. Böyle bir kuyuya yerleştirilen bulonun plakası üzerindeki yük bir tarafta yoğunlaşacak, bu da civata başının plastik olarak bükülmesine ve simetrik olmayan yükleme nedeniyle plakanın zamanından önce kırılmasına neden olacaktır. Kuyuların maksimum sapma açısı 20°'yi geçmemelidir (Li, 2017).

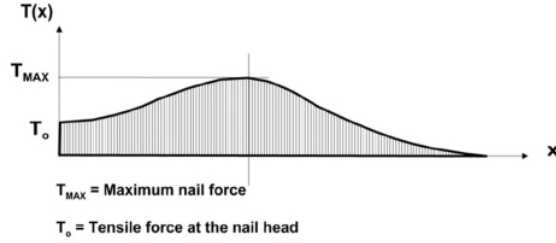
2.2. BULON PLAKASINA GELEN YÜK HESABI

Tünellerde uygulanacak bulonların projelendirmesi aşamasında tüm dünyada geçerli uluslararası veya ulusal şartnameler olmakla birlikte sonlu elemanlar yöntemleriyle (FEM) bulon kapasitelerinin tahkiki oldukça pratik olarak kullanılmaktadır. Tüneller jeolojik koşullar

göz önüne alınarak hem TBM için hem de NATM için FEM modelleri oluşturulmaktadır. NATM için yapılan analizlerde kaya bulonları modellenilebilmekte ve ilerleme boyunca bulonlarda oluşacak maksimum çekme kuvvetleri (T_{max}) tespit edilebilmektedir. Bulon plakasına gelen yük ise analizde elde edilen maksimum çekme kuvveti değeri kullanılarak bulunabilmektedir. Bulon kafasında oluşan maksimum yük T_0 ise;

$$T_0 = T_{max}[0.6 + 0.2(s - 1)] \quad (FHWA, 2015) \quad (2.1)$$

Bağıntısından faydalanılarak bulunmaktadır. Burada “s” bulonların ilerleme yönündeki uygulama aralığını temsil etmektedir. Elde edilen T_0 kuvveti çekme kuvvetine maruz kalan bulon donatısının kafa bölgesine aktardığı temsil ederken bu yük somun aracılığıyla aktarılıp bulon plakasına etki etmektedir. Yük dağılımı aşağıdaki görselde sunulduğu şekilde oluşmaktadır.



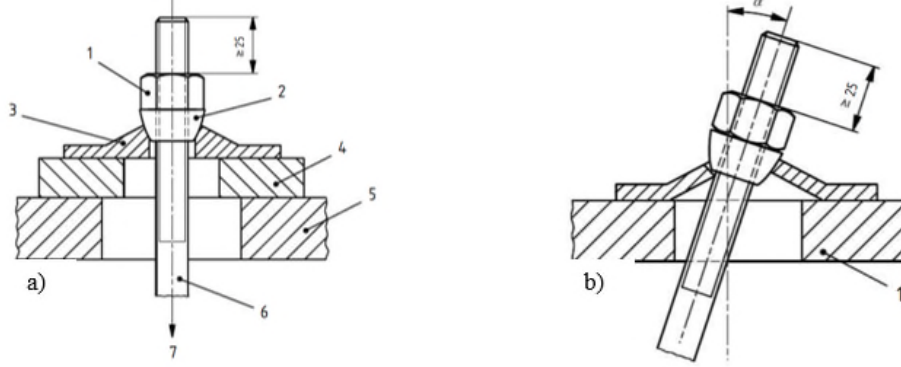
Şekil 2.9: Bulon üstündeki yük dağılım şeması (FHWA, 2015).

2.3. BRITISH STANDARD (BS) 7861

Bu çalışma kapsamında araştırılan yönetmelikler ve standartlar çerçevesinde proje kapsamında değerlendirilip uygulanabilecek olan sadece British Standard (BS) 7861 tespit edilmiştir. Amerikan, Kanada ve Alman Standartları, polimerik veya metalik olmayan plakalardan bahsetmemekte, yalnızca çelik kaya bulonları ile kullanım için çelik plakalara atıfta bulunmaktadır. Plakanın yükleme hızı bu standartlarda belirtilmemiştir. Amerikan ve Kanada Standartları, yükün ya bulona ya da yukarıdan somuna uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Amerikan ve Kanada standartları hemen hemen aynıdır. Alman standardı ise bulona uygulanan yükleme sırasında yükün plakaya 15° lik bir açıyla eğimli şekilde uygulanması gerektiğini belirtmekte; ilgili İngiliz standardı (BS7861) ise bulona uygulanan yükleme sırasında yükün plakaya 10° lik bir eğim açısında uygulandığı bir test prosedürü içermektedir. Diğer tüm standart testler plakanın düz, yani sıfır eğimli bir açıda test edileceğini

belirtmektedir (Williams, 1998). Bu nedenlerden dolayı bu tez çalışması kapsamında minimum gereklilikler ve testin uygulanma şekilleriyle alakalı BS 7861 takip edilecektir.

BS 7861'in başlığı "*Strata reinforcement support system components used in coal mines Part 1: Specification for rockbolting*" olup aslında İngiltere'de bulunan kömür madenlerinde kullanılabilecek olan "*cam elyaf katkılı plastik (glass fibre reinforced plastic-GRP)*" kaya bulonları ve bulonun tamamlayıcı bileşenleri göz önüne alınarak hazırlanılmış bir standart olup aynı zamanda çelik malzeme için de bilgiler vermektedir. Dokümanda plakalara da yer verilmiş olup, plakaların hangi mertebede basınca dayanması gerektiği, boyutlandırma koşulları, materyale ait mukavemet özellikleri, plakaların hangi şartlarda çekme testlerine tabi tutulacağı gibi bilgiler yer almaktadır. BS 7861-Part 1'e göre çelik olmayan numunenin test kurulumu Şekil 2.10'da verildiği gibidir.



Şekil 2.10: a) Kaya bulonu ve tamamlayıcı bileşenlerinin çekme testindeki kurulumu, b) Test kurulumunun 10° açılı ile uygulanması (BS 7861-Part1, Figure K.1 ve Figure E.1. Birimler milimetredir).

Burada numaralar sırasıyla;

- 1- GRP somun
- 2- Konik rondela
- 3- Bombeli plaka
- 4- 55mm delik çapı olan arka (destekleyici) plaka
- 5- Test makinesi gövdesi
- 6- 21.5mm çapındaki GRP bulon donatısı
- 7- Uygulanan yükleme

olarak verilmektedir. Donatı somundan sonra en az 25mm daha uzunluğa sahip olmalıdır.

BS 7861 Part-1’de GRP kaya bulonu mekanizmasının çekme testinde uygulanacak ve plakalar için dikkat edilmesi gereken diğer hususlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1- Plaka en az 10 saniye boyunca yangına dayanabilmelidir,
- 2- Plaka, somun ve rondela birbirine uyumlu olmalıdır,
- 3- 5 adet numune test edilmelidir,
- 4- Yükleme birden değil arttırılarak uygulanmalı ve numunedeki deformasyonlar ölçülmelidir,
- 5- Kopma/sıyrılma yükü kaydedilmeli ve bu yük maksimum çekme yükü olarak addedilmelidir,
- 6- Metal olmayan plakalar en az 50kN çekme yüküne dayanabilmelidir,
- 7- Plaka aniden değil progresif bir yenilme mekanizması sergilemelidir.

BS 7861 Part-1’de çelik plakaların çekme ve basma testlerinde maksimum ve minimum uygulanacak yüklerde hangi mertebelerde yenilmesi gerektiği detayları da verilmektedir. Bu değerler, plastikten üretilen plakaların ulaşması gereken dayanım mertebeleri için bir referans oluşturmaktadır. Çelik plakalar için verilen değerler Tablo 2.2’de sunulmaktadır.

Tablo 2.2: Çelik plakaların minimum ve maksimum test yüklerine çekme ve basma testleriyle maruz kaldıklarındaki yenilme yükleri.

	Basma	Çekme
Maksimum test yükü	200kN	290kN
Minimum test yükü	140kN	210kN

2.4. YAPILMIŞ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

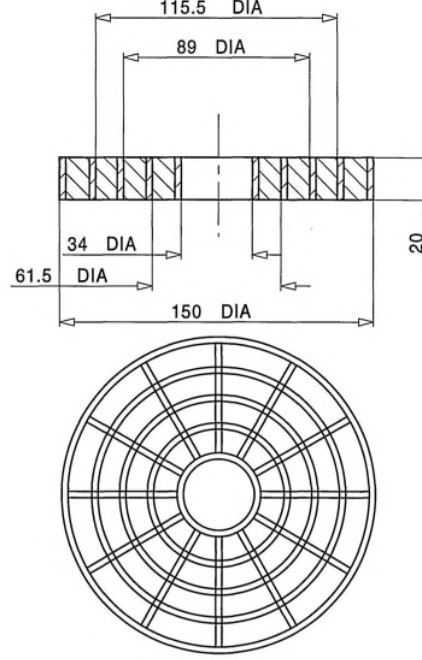
Plastik malzemeler her ne kadar tünel imalatında kullanılsa bile kaya bulonunu oluşturan elementlerden birisi olarak piyasada sıkça kullanılmamaktadır. Plastik temelli üretilen kaya bulonu donatısı daha önceden kimi çalışmalarda ve standartlarda karşımıza çıkmaktadır; fakat tünellerde bulon plakası olarak kullanıldığına dair dünya genelinde bir uygulamaya denk gelinmemiştir. Her ne kadar uygulamada görülmesi bile, bulon veya zemin çivisi plakasının tüneller haricinde kullanılmaya çalışıldığı ve metal olmayan bir malzemedan üretilme fikriyle alakalı dünyada yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmalardan ilki ve şüphesiz en kapsamlı olanı Williams (1998) tarafından yapılmış doktora tezidir. Williams bu teziyle birlikte İngiltere’de kömür madeni duvarlarını desteklemek için cam elyaf (GRP) kaya bulonları ile kullanılan ve metal olmayan plakaların tasarımını ve testini araştırmıştır. Williams öncelikli olarak metal bulon plakalarının sağlaması gereken mekanik gereklilikleri ortaya koymuş ve BS 7861 standardını göz önüne alarak GRP olarak üretilen bulon parçalarının gereklilikleriyle bir kıyaslama yoluna gitmiştir. Metal olmayan kaya bulonu parçalarının testleri ve gereklilikleriyle alakalı en kapsamlı standart olan BS 7861’e Bölüm 2.3’te yer verilmişti. Williams çalışmasında bulon plakasının kademeli olarak yenilmesi gerektiğini belirtmiş, yenilmenin polimerik donatıdan ve polimerik somundan önce olması gerektiğini vurgulamıştır. Benzer şekilde polimerik somun ise polimerik donatıdan önce yenilmelidir. Buradaki yenilme sırasının amacı bulon donatısının yenilerek tamamen işlevsiz hale gelmesinden önce sırasıyla bulon plakasında ve somunda deformasyonları gözlemektir. Bulon plakasının gözle görülür şekilde deformasyonları belli etmesi anlık gerilme durumu hakkında bilgi verebilmekte ve gerekirse önlemler almayı sağlayabilmektedir. Williams yaptığı laboratuvar çalışmalarından sonra aşağıdaki 4 sonuca ulaşmıştır:

1. Test düzeneğinde plakanın altına konulan destek plakasındaki çapın küçüklüğü bulon plakasında kesme yenilmelerine neden olmaktadır. Destek plakasındaki büyük çap ise bükülme yenilmelerine neden olmaktadır. Küçük çaplı destek plakası bulon plakasının daha çok yük taşımasını sağlamıştır.
2. Laboratuvarda test sırasında bulon plakalarına uygulanan yükleme hızının, plakanın taşıyabildiği maksimum yük üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır.
3. Destek plakasının deliğindeki çap, bulon plakasının taşıdığı yükte %2’den daha az bir farka neden olmuş ve kırılma/yenilme mekanizmasında herhangi bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.
4. 10 ° eğimle test edilen bulon plakaları düz olarak test edilen bulon plakalarına göre %8 daha az yük taşımıştır.

Williams (1998)’ın plakanın geometrisi hakkında bulduğu sonuçlarda ise tercihen tamamen içi dolu bir katı cisim olarak plakanın tercih edilmesi, eğer ağ şeklinde bir tasarım tercih edilecekse ağların bulon plakasının merkezine yakın yoğunlaşması gerektiği ve verimli bir ağ kalınlığı ile plakanın bazen daha iyi performans gösterebileceğini belirtmiştir. Williams bu çalışmasında merkezi dolu bir katı olup dış tarafı ağırlı bir model üzerinde çalışmamıştır; fakat yaptığı tüm

çalışmalar neticesinde içi dolu katı cisim ve çevresi ağ örgülü bir modelin en iyi seçenek olabileceğine ve dış kenarlardan ziyade plakanın merkezindeki malzeme miktarını arttırmanın en iyi yaklaşım olduğuna kanaat getirmiştir.



Şekil 2.11: Williams (1998) tarafından tasarlanan plaka modeli önerilerinden birisi.

Metal olmayan kaya bulonu plakaları için yapılmış olan bir diğer önemli çalışma Kotake ve Sato (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kotake ve Sato (2021) ise çalışmalarını şevler destekleme için gerçekleştirmişlerdir. Bu neden dolayı bu çalışma kaya bulonlarında değil zemin çivilerinde gerçekleştirilmiş olarak kabul edilebilir. Kotake ve Sato (2021) bu çalışmalarında şev yüzeyine uyguladıkları ve plastikten üretilmiş, sekizgen şekilli bir model tasarlamışlar ve malzemeye ait teknik kapasiteyi belirlemişlerdir. Yazarlar çalışmalarında üç farklı plaka ile çalışmış ve plakaları hem metalden (solid) hem de polipropilen materyalinden (flexiable) üretmişlerdir. Metal üretilen plakaların çapları değişken olup ($D=30, 40, 50\text{mm}$) kalınlığı sabit ($t=9\text{mm}$) tutulmuştur. Metal plakanın elastisite modülü $E=1.92 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ olarak verilmiştir. Polipropilenden üretilen plaka ise metal plaka ile aynı üç farklı boyutta ve üç farklı kalınlıkta ($t=2, 3, 5\text{mm}$) üretilmiş olup malzemenin elastisite modülü $E=1.19 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ olarak verilmiştir. Kotake ve Sato'nun yaptıkları çalışmada hem metal hem de polipropilenden üretilmiş plakaların yüklemeler sırasında davranışları takip edilmiş ve

deformasyonlar kaydedilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar aslında plastik plakaların metal plakaların alternatifi olabileceğini açıkça ortaya koymaktadır. En küçük boyutta üretilen ($D=30\text{mm}$) metal ve polipropilen plakalar yaklaşık aynı zamanda yenilip aynı deformasyon değerlerini göstermişlerdir. Her iki malzemeden üretilmiş plakaların teknik yeterlilikleri çapları arttıkça ayrılmaya başlamış olmalarına rağmen birbirlerine çok uzak değerler göstermemişlerdir. Bu çalışma ile, malzemenin elastisite modülüne bağlı olarak belirli kalınlık ve boyutlarda üretilecek plakalar, çelik plakaya yakın performans gösterebilmekte; fakat burada plakadan beklenen yük hedefleri ve plakaya ait mühendislik parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır. Kotake ve Sato çalışmalarında zemine ait yay katsayısı değerini de göz önünde bulundurmuş ve analizlerini farklı zemin tiplerine göre değiştirerek, yay katsayısının etkisinin ortaya koyulması konusunda hassasiyetlerini belli etmişlerdir. Bu çalışmada ise, zemine ait yay katsayısı değeri dikkate alınmamış ve plakanın arka yüzeyi ankastre mesnet olarak modellenmiştir.

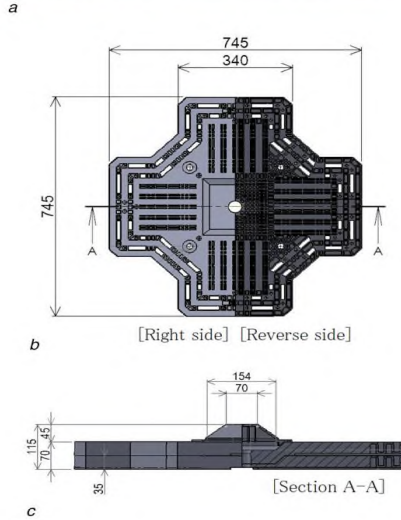


Figure 1

Şekil 2.12: Kotake ve Sato (2021) tarafından tasarlanan plaka modeli ve sahada uygulanmış gösterimi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÖN ÇALIŞMALAR

3.1.1. Mukavemet Deneyleri

En uygun plastikten ve şekilden üretilecek model için daha öncesinde yurt dışında yapılmış olan bir örnek numune ithal edilmiştir. Bu numunenin üretimi Singapur'da bir firma tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Singapur'dan getirilen örnek numune.

Numunenin High Density Polyethylene (HDPE) malzemeden üretildiği ifade edilmiş ve malzemeye ait mukavemet testleri ilgili şirket tarafından daha önce yapılp sonuçları bizimle paylaşılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1: Malzemeye ait test sonuçları.

Malzeme	HDPE	
Test	Test Metodu	Test Sonucu
Birim hacim ağırlık	ASTM D1238-20	0,9414 g/cm ³
%20 Deformasyona denk gelen basınç gerilmesi	ASTM D695-15	29,3 MPa
Esneklik dayanımı	ASTM D790-17	27,3 MPa
Çekme dayanımı	ASTM D638-14	29,6 MPa
Shore sertliği	ASTM D2240-15e1	65

Elde edilen test sonuçlarına bakıldığı zaman numuneye ait elastisite modülü değeri verilmemiştir. Bu numuneye tarafımızca yapılan testler sonucunda ortaya çıkan Gerilme-Gerinme grafikleri ile numuneye ait gerçek elastisite modülü değerleri elde edilmiş ve nümerik analizlerde kullanılmıştır.

Birçok sayıda ithal edilmiş ve HDPE olarak üretildiği ifade edilen numuneye Şekil 3.2’de gösterilen kurulmuş test düzeneği aracılığıyla çekme testi uygulanmıştır. Dört adet yapılan çekme testi sonuçlarında numunenin yaklaşık aynı bölgelerden kırılmaya başladığı tespit edilmiş ve zayıf bölgeleri belirlenmiştir. Bu göstergeler numunenin tasarımsal olarak geliştirilmesi açısından önemli veriler sunmaktadır.

Yukarıda görselleri bulunan test düzeneği imkanlar dahilinde kurulmuş olup Bölüm 2.4’teki BS 7861’de verilmiş olan test düzeneği birebir sağlanamamıştır. Buna rağmen teorik olarak doğru yaklaşımlar uygulanmış olup çekme testi deformasyonları her iki uçta bulunan hassas kompaktör saatler aracılığıyla takip edilmiştir. Testlerde kullanılan ankraj manometresi maksimum kapasitesi 400bar iken bölüntüsü 10bar’dır. Williams (1998) yaptığı çalışmalarda yükleme aralığını 0.5kN olarak seçmiştir. Williams (1998) tarafından metal olmayan plakalarda yapılan analizlerde bu kadar hassas bir yükleme aralığının tercih edilmesi, plastik malzemelerde çok daha fazla gözlenen sünme davranışının gözlemi açısından değerli bir uygulamadır. Fakat bu tez kapsamında yapılan testlerde bu kadar hassas bir makinenin kullanımı ön çalışma aşamasında imkanlar dahilinde olmamakla birlikte genel davranışı anlamak bakımından yeterlidir.



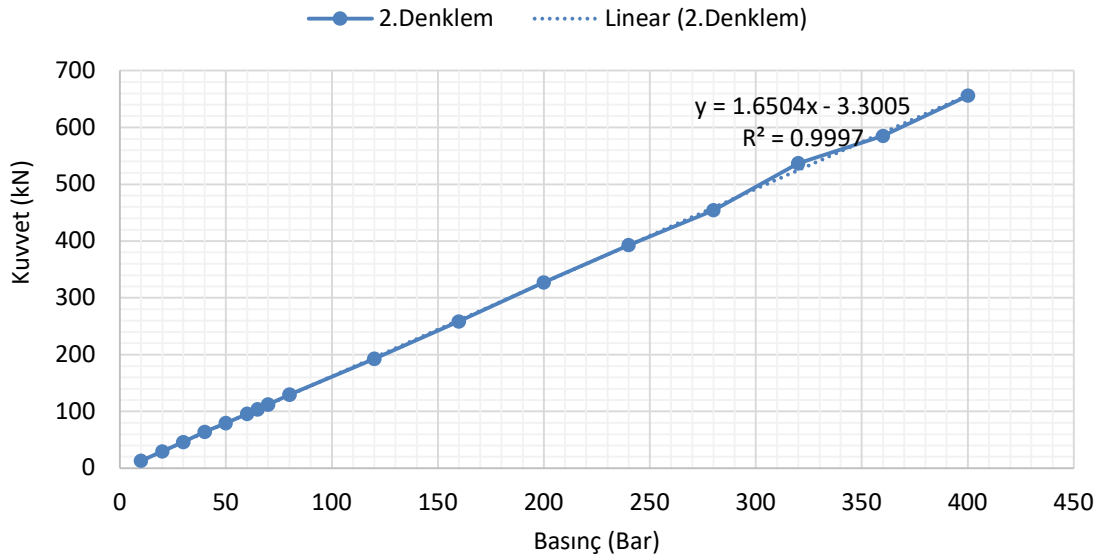
Şekil 3.2: Çekme testleri için kurulmuş test düzeneği.

Ön çalışma testleri aşamasında kullanılan ankraj manometresi için testler önce kalibrasyon yapılmış ve test cihazında okunan bar değerine denk gelen ortalama kuvvet değerleri bulunmuştur. Kalibrasyon sırasında 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360 ve 400bar değerlerine denk gelen ortalama kuvvetler elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak üç interpolasyon ile en uygun bar-kN bağıntısı elde edilmiştir. Testler sırasında okunan ara basınç değerlerine denk gelen kuvvetlerin daha iyi tespit edilebilmesi sırasında bu bağıntı kullanılmıştır. Elde edilen tablo ve grafikler Tablo 3.2 ve Şekil 3.3'te sunulmaktadır.

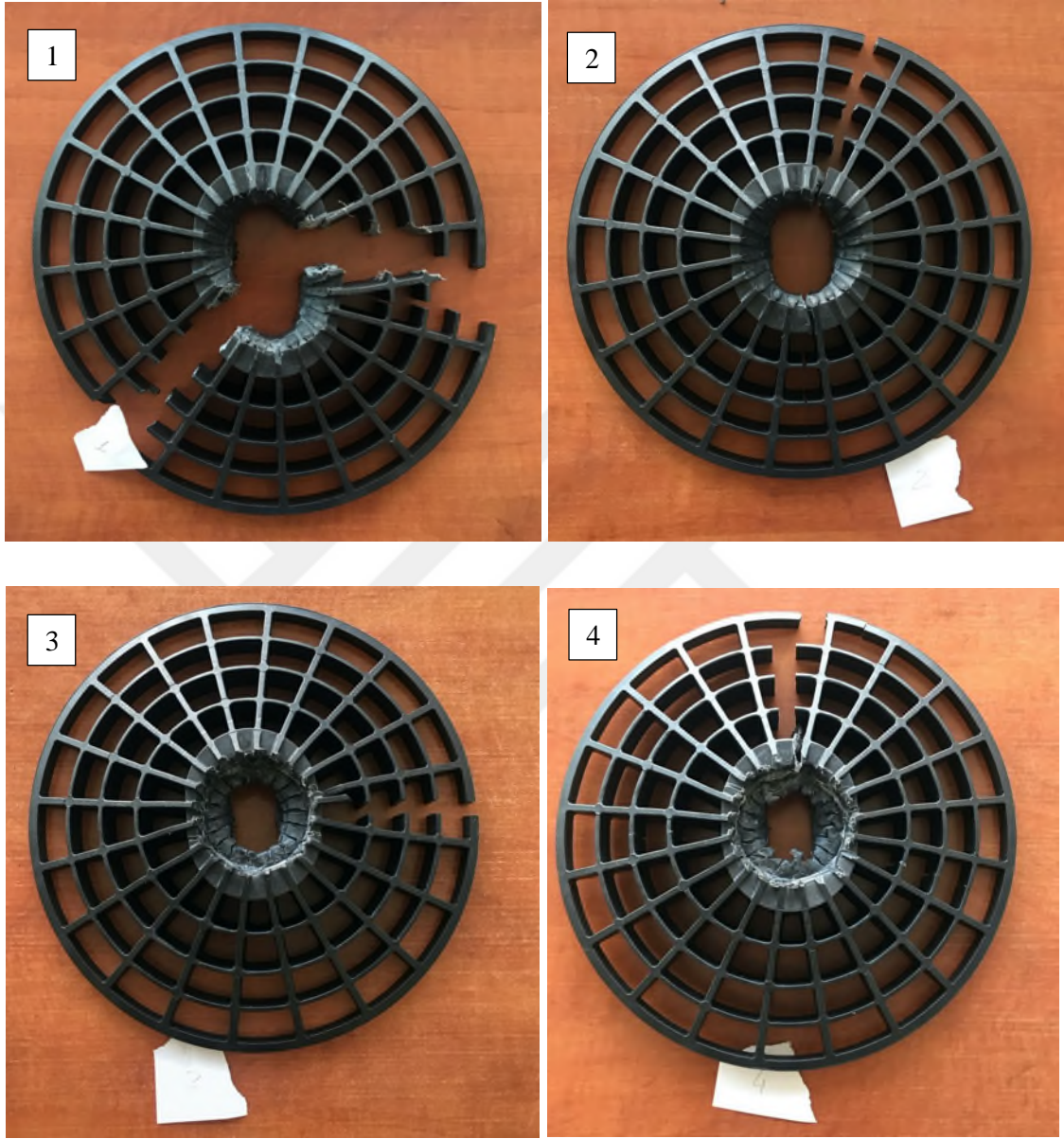
Tablo 3.2: Kalibrasyondan sonra interpolasyon ile elde edilmiş bar-kN ilişkisi.

Cihazda Okunan Basınç (Bar)	Ana veriler		$y=1,6504x-3,3016$	$y=1,6504x-3,301$	$y=1,6504x-3,3005$
	Kuvvet (N)	Kuvvet (kN)	1.Denklem	2.Denklem	3.Denklem
10	13202	13,2024	13,2024	13,20300	13,203500
20	29706	29,7064	29,7064	29,70700	29,707500
30	46210	46,2104	46,2104	46,21100	46,211500
40	63928	63,9280	63,9280	63,92800	63,928000
50	79218	79,2184	79,2184	79,21900	79,219500
60	95722	95,7224	95,7224	95,72300	95,723500
65	103974	103,9744	103,9744	103,97500	103,975500
70	112226	112,2264	112,2264	112,22700	112,227500
80	129842	129,8420	129,8420	129,84200	129,842000
120	192790	192,7900	192,7900	192,79000	192,790000
160	258253	258,2530	258,2530	258,25300	258,253000
200	327370	327,3700	327,3700	327,37000	327,370000
240	392822	392,8220	392,8220	392,82200	392,822000
280	454336	454,3360	454,3360	454,33600	454,336000
320	537145	537,1450	537,1450	537,14500	537,145000
360	585373	585,3730	585,3730	585,37300	585,373000
400	655964	655,9640	655,9640	655,96400	655,964000

Kalibrasyon Eğrisi 3



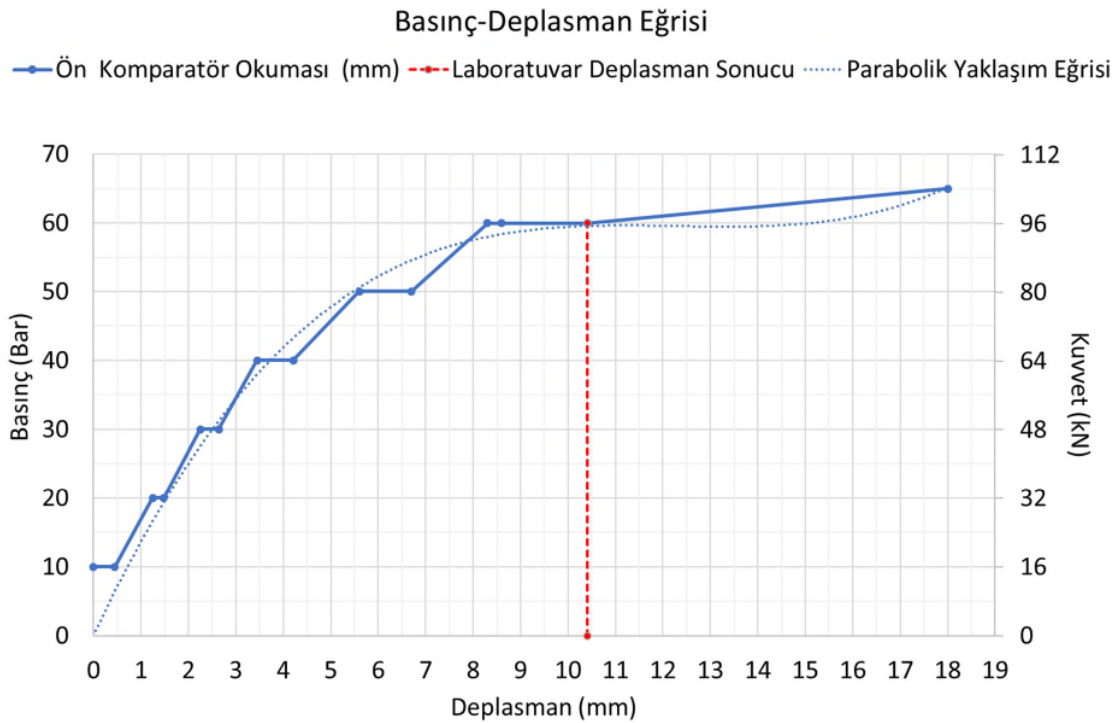
Şekil 3.3: İnterpolasyon grafiği.



Şekil 3.4: Dört numunenin testler sonucunda kırılmış halleri.

Testin uygulanması sırasında bulon plakasının aşamalı olarak göçmesi hedeflenmiş, ani göçme durumu istenilmemiştir. Plaka ve somun hala yüke dayanırken, plakanın deformasyonunu görmek mümkün olmalıdır (Williams, 1998). Test sırasında her yükleme adımında 4dk beklenilmiştir. Yapılan testlerde yüklemeler 10bar arttırılmıştır. Henüz ilk 10barlık yükleme yapıldığında, Şekil 3.4'teki gibi plaka merkezindeki ezilme gerçekleşmiş ve Şekil 3.5'teki yük-deplasman grafiğinde verilen sabit yük altında sünme (krip) davranışı gözlenmiştir. Sünek bir davranış sergileyen plakaların göbek bölgesinde mukavemet bakımından istenilen sonuçlar

alınamamıştır. Kademeli yükleme 60bar basınca kadar uygulanabilmiş ve numunenin Şekil 3.4'teki gibi merkezden ezilerek ve radyal yönde çekme dayanımının aşılmasıyla birlikte göçmesi gerçekleşmiştir. Bu çalışma süresince plakanın maruz kaldığı deformasyon değeri test mekanizmasına yerleştirilmiş ön ve arka kompaktör saatlerle düzenli olarak ölçülmüştür. Değerlendirmeler sonucunda numunenin 10.4mm deformasyon yaptığı ve 96kN yüke dayanabildiği belirlenmiştir (Şekil 3.5'te kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir). Ancak ara yük kademelerinde sabit yük altında gözlenen sünme deplasmanları, malzemenin mevcut halinde uygunluğunun sorgulanmasına neden olmuştur. Bu testler sonucunda elde edilen nihai çıkarıma göre plaka mukavemet kriterlerini sağlayamamış ve sabit yük altında aşırı şekil değiştirme göstermiştir. Testler sonucunda kırılan numunelerin ön ve arka yüzlerinin fotoğrafları çekilmiş ve Şekil 3.4'te bu görseller sunulmuştur.



Şekil 3.5: 4 numaralı testin sonucunda elde edilen basınç-deformasyon ilişkisini gösteren grafik.

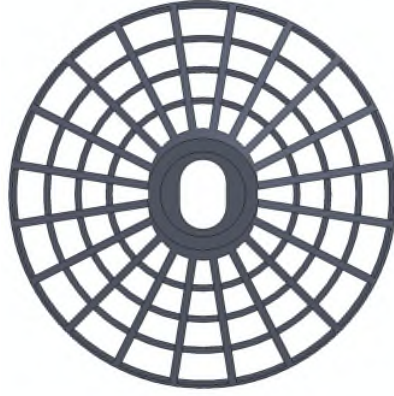
3.1.2. Sayısal Çalışmalar

Yapılan deneylerden sonra göçmeye uğrayan plakalardan bir tanesinin göbek bölgesine ait kesit incelenmiş ve çekilen fotoğraf Şekil 3.6’da verilmiştir. Görünen hava boşlukları kötü imalat konusunda endişeleri arttırmış ve HDPE yerine geri dönüşüm plastik ürünlerin kullanıldığı yönünde şüphe uyandırmıştır. Bu nedenle, plaka sayısal ortamda modellenerek tarafımızca yapılan deneylerdeki yük-deplasman davranışının elde edilebilmesine yönelik geri analiz çalışmaları yürütülmüştür. Sonlu elemanlar programı olan ANSYS kullanılarak yapılan çözümde kullanılan model katı çizim programı SOLIDWORKS’te birebir ölçülerle tasarlanmış modeldir (Şekil 3.7).

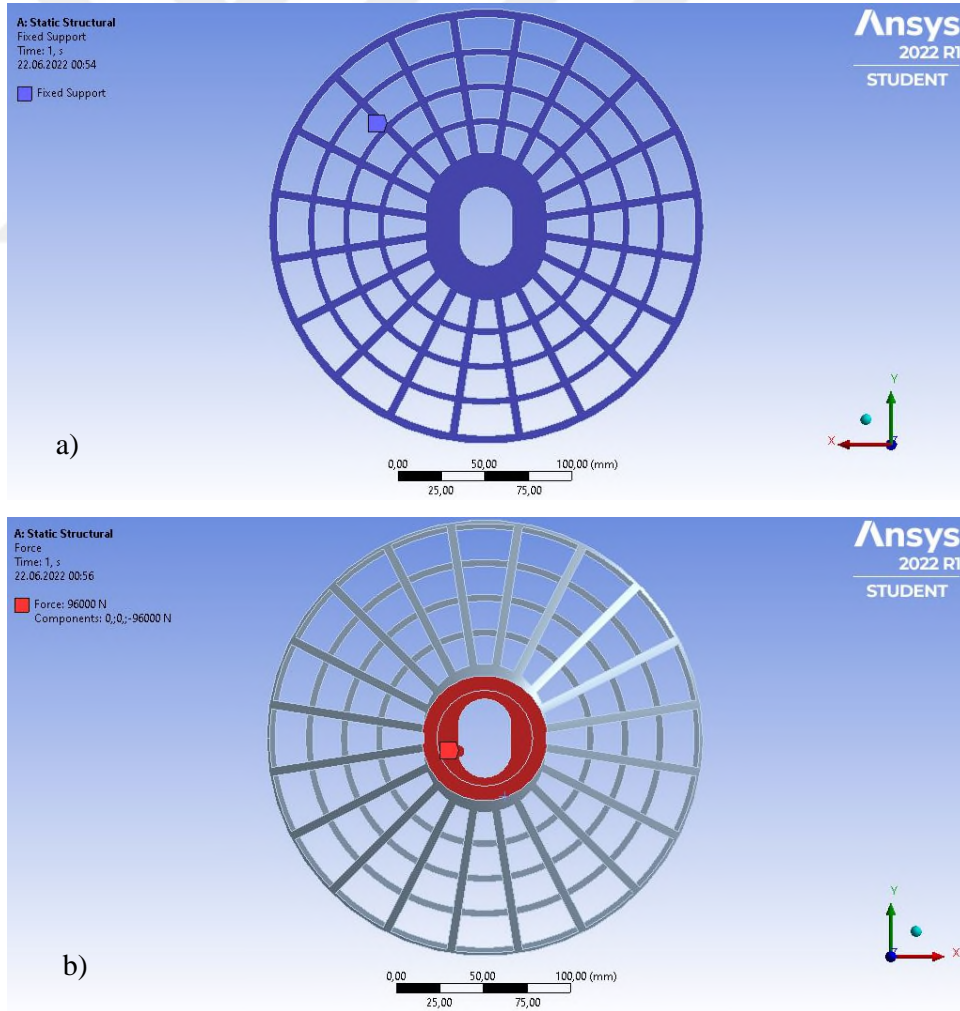


Şekil 3.6: Kırılan numunenin içindeki hava boşlukları.

SOLIDWORKS’te oluşturulan model ANSYS programıyla beraber laboratuvar testinden elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. ANSYS içindeki modelin test kurulumuyla maksimum uyumu sağlayabilmesi ve modelin doğru analiz yapabilmesi amacıyla plakanın arka yüzeyi tamamen ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.8’de ankastre mesnetin tanımlandığı bölge mavi ile gösterilmiş olup kırmızı renkli olarak gösterilen bölgeye 96kN yük uygulanmış ve deformasyon değerleri okunmuştur.

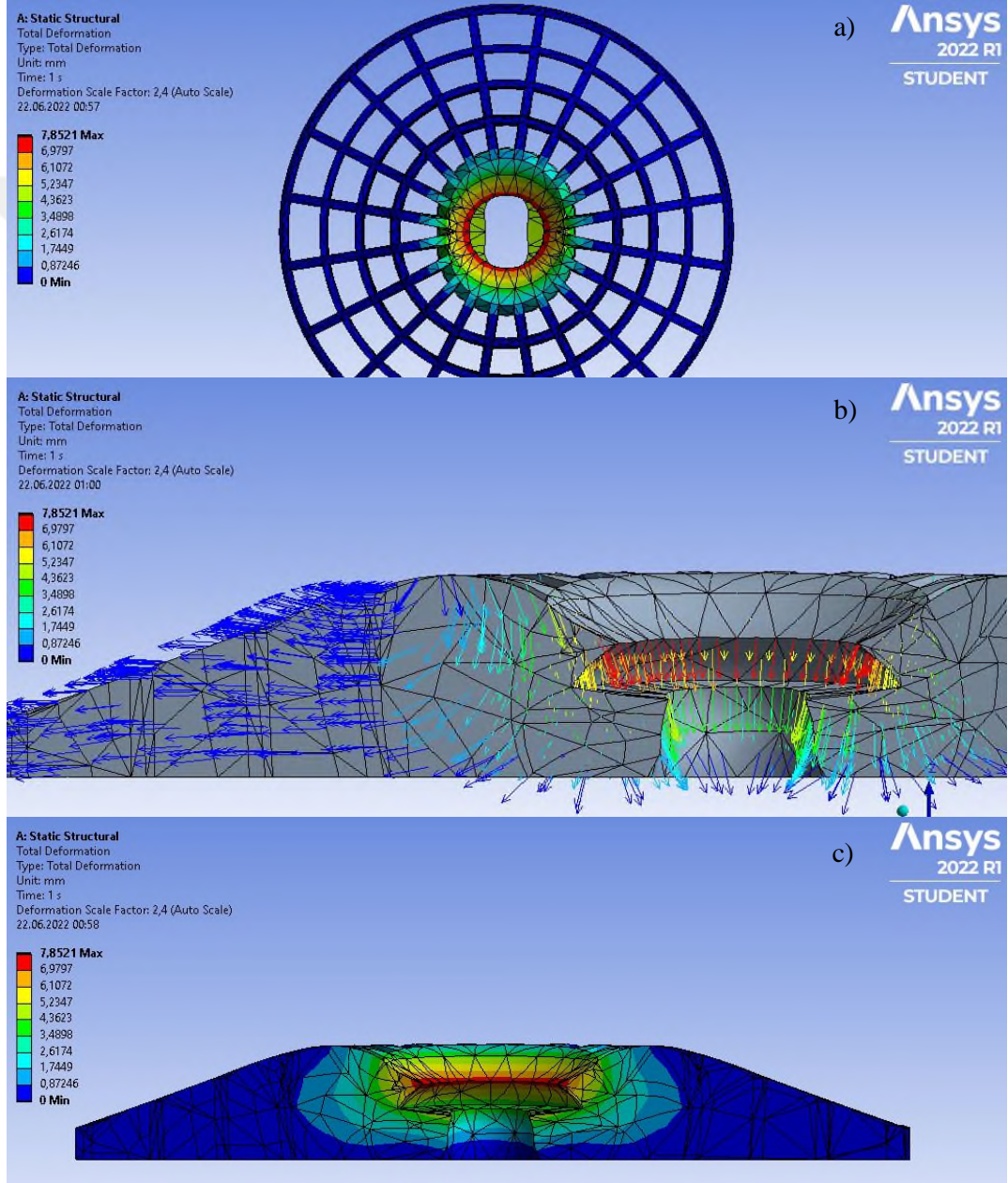


Şekil 3.7: Mevcut plakaya ait SOLIDWORKS modeli.

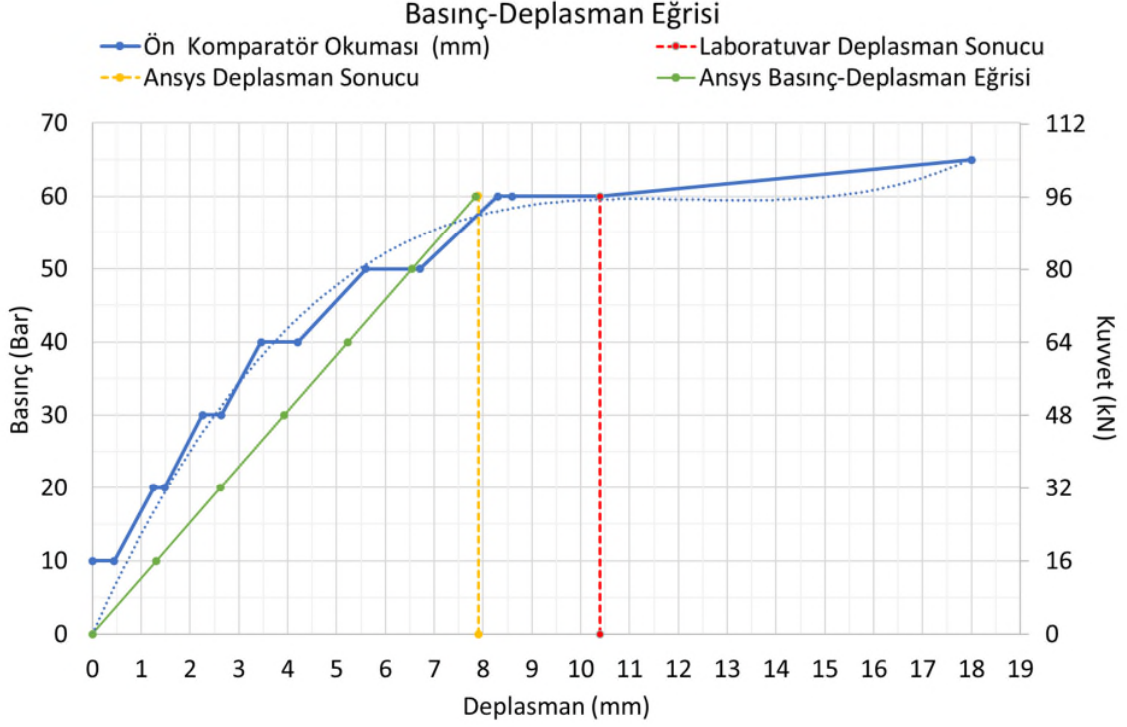


Şekil 3.8: a) Modele tanımlanan ankastre mesnet b) yükün uygulandığı bölge.

Sayısal hesaplar sonucunda Şekil 3.9’da verildiği gibi hesaplanan deplasman değerleri yaklaşık olarak 7.9mm mertebesindedir ve laboratuvarıda ölçülen değerlere makul seviyelerde yaklaşmıştır (Şekil 3.10’da sarı ile gösterilmiştir). 7.9mm deplasman değeri, numunenin laboratuvar deneyi grafiğinde, malzemenin yenildiği anda gösterdiği deformasyon değeridir.



Şekil 3.9: a) Analiz sonucunda elde edilen deformasyon (7.9 mm) b) Yüklemin numune içindeki vektörel dağılımı c) Numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.



Şekil 3.10: Basınç-deplasman ilişkisinin laboratuvar test sonucuyla karşılaştırması.

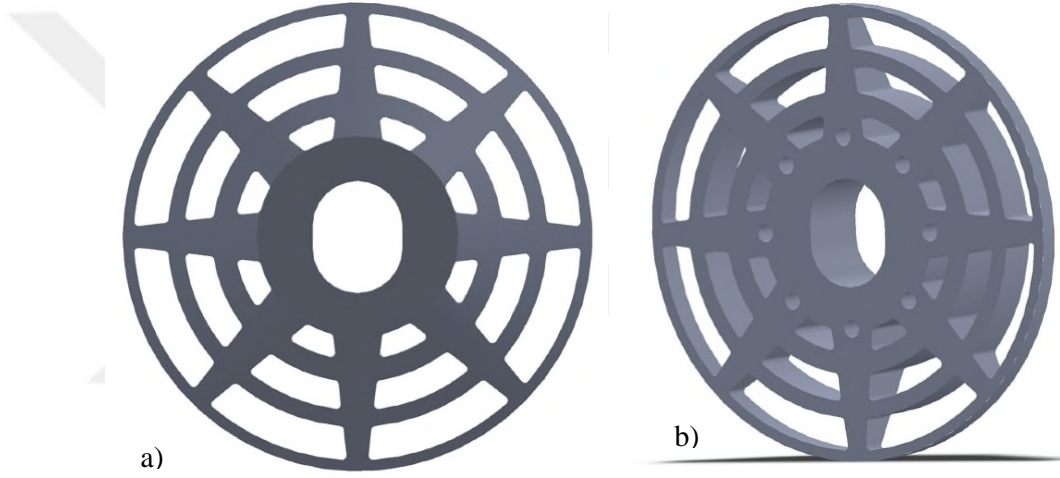
Modelde yükün uygulandığı bölgenin alanı üzerinden yapılan geri analiz ile kaliteli bir HDPE olduğundan şüphe edilen malzemenin elastisite modülü hesaplanmaya çalışılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda laboratuvar testlerinde yenilme anında 10.4mm deplasman değerine ulaşılan malzemenin elastisite modülü değeri 127MPa olarak bulunmuştur ve bu değer gerçek bir HDPE malzemenin elastisite modülü değeriyle karşılaştırınca çok düşük bir değer olarak kaldığı belirlenmiştir. ANSYS analizlerinde de 127MPa değeri analizlerde kullanılmıştır.

3.2. ÖN ÇALIŞMA BULGULARI VE BULGULAR NETİCESİNDE NİHAİ TASARIMIN VE MALZEMENİN BELİRLENMESİ

Elde edilen ön çalışmalar neticesinde gerek laboratuvar testleri gerekse nümerik analizler sonucunda kimi bulgular elde edilmiştir. Bu bulgular ışığında, mevcut plastik plakayı geliştirmeye yönelik hamleler yapılmış ve bu yönde araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmalar kapsamında ilk olarak plakanın geometrisine odaklanılmıştır. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere test sırasında somunun zımbalanması neticesinde yüklenen plakanın göbek bölgesi, plastiğin sünmesi nedeniyle dışarı doğru açılmaya yapmaya çalışmakta, daha

sonrasında bu genişleme işlemi plakanın göbeğine dik kolları tetiklemekte ve bu kolların ayrılmaya başlamasıyla hep benzer kırılma düzlemleri elde edilmektedir. İki kol arasından geçen kırılma hattı her testte gözlemlenmiştir. Bu vesile ile yeni geometri geliştirilirken mevcut modelde çok ince olan kollar kalınlaştırılmaya çalışılmıştır. Aynı şekilde yenilme mekanizmasının yine benzer olacağı düşünülerek plakanın göbeğinden dışarı doğru olan çemberler de kalınlaştırılmıştır. Tüm bu veriler değerlendirilerek elde edilen tasarım model SOLIDWORKS aracılığıyla modellenmiştir. İlgili model Şekil 3.11’de sunulmaktadır.



Şekil 3.11: Yeni plakanın SOLIDWORKS modeline ait a) ön görünümü b) arka görünümü.

Tüm bu kalınlaştırmalar neticesinde mevcut plakaya göre malzeme kullanım değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Tablo 3.3’te mevcut plaka numunesiyle SOLIDWORKS’te yeniden tasarlanan yeni plakanın hacim ve boyut bazında karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.3: Eski ve yeni tasarımların katı cisim hacmi ve plaka boyutlarının karşılaştırılması.

	Çap (mm)	Maksimum Yükseklik-Göbek Bölgesi (mm)	Minimum Yükseklik-Kenarlar (mm)	Katı Cisim Hacmi (cm ³)
Eski Tasarım	250	40	10	479,892
Yeni Tasarım	210	40	10	574,904

SOLIDWORKS modelinin arka görünümünde görüleceği gibi, numunenin içine doğru uzanan 8 adet boşluk tasarlanmıştır. Bu boşlukların sebebi üretim sonrası numunenin hızlı soğuması için kanallar oluşturmaktır. Şekil 3.6’da gözlenen hava boşluklarının üretim kalitesiyle birlikte

numunenin hızlı soğuyamaması nedeniyle oluştuğu tespit edilmiş ve bahsedilen hava kanalları tasarlanmıştır.

İkinci olarak ise yeni modelde kullanılacak olan malzemeye odaklanılmıştır. Mevcut plakadaki malzemenin (HDPE) çok fazla sünek ve dayanımı düşük bir malzeme olması, geri dönüştürülmüş malzemeden üretilmiş olması ve bu vesile ile üretime bağlı hataların meydana gelmesi, malzemenin kalın plaka göbeğinden kaynaklı olarak hızlı soğuyamaması gibi malzemeye yönelik unsurlar yeni malzeme seçiminde değerlendirilmiştir. Yeni plaka tasarımında dayanım mukavemeti açısından daha kuvvetli olan mühendislik plastiklerine odaklanılmıştır. Ayrıca bu mühendislik plastikleri seçilirken çalışmanın önemli faktörlerinden birisi olan maliyet konusu her zaman göz önünde bulundurulmuştur. Bu vesile ile malzeme seçimleri ve üretim aşamalarında zaman zaman katkı maddelerinin de kullanılması yönünde tercihlerin oluşacağı göz önünde bulundurulmuştur. Seçilen mühendislik plastiklerinin hangi katkı malzemeleri ile uyumlu çalışacağı da değerlendirilmiştir.

3.2.1. Kullanılan Plastik Malzemeler

Yeniden üretilecek olan plaka için geometrik iyileştirmelerden sonra bu plakanın hangi malzeme ile üretileceği konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu malzemenin seçimi sırasında birkaç opsiyon denenmiş ve seçilen malzemelerin plastik sanayiinde kolay temin edilebilir olmasına, malzemenin mekanik özelliklerinin istenilen mukavemet seviyelerine hitap etmesine, maliyet açısından planlanan şekilde çelik plakaya alternatif olabilmesine ve plastik enjeksiyon makinesinde dökülebilir olmasına dikkat edilmiştir. Bu bağlamda baz alınan mühendislik plastikleri High Density Polyethylene, Polypropylene ve Polyamide olarak seçilmiştir. Bu ana malzemelerin yanı sıra plastiğin mekanik davranışlarının istenilen yönde gelişmesi adına gerekli katkılar ve üretim detayları da değerlendirme altına alınmıştır. Bu bağlamda kullanılan plastik malzemelerinin katkısız özelliklerinin yanında mühendislik plastiği konusunda çalışmalar yapmış ve projeyi destekleyen firmalar ile birlikte oluşturduğumuz katkılı plastikler de açıklanmıştır. Detaylandırılan plastiklerin üretimi sonucu plakalara yapılan yükleme testleri sonrasında ise hangi malzemenin proje için en optimum olduğu kararına varılmıştır.

3.2.1.1. High Density Polyethylene (HDPE)

Poliyeten yapısının moleküler yoğunluğuna ve kristal yapısına bağlı olarak üç ana poliyeten sınıfından bahsetmek mümkündür. Bunlar sırasıyla düşük yoğunluklu, orta yoğunluklu ve

yüksek yoğunluklu polietilenlerdir (LDPE, MDPE ve HDPE). Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), diğerlerine göre daha yüksek sertlik, mukavemet ve daha iyi sürünme davranışına sahiptir. HDPE orijinal hammadde ve geri dönüştürülmüş olarak üretilebilmektedir (Fatemi ve Amjadi, 2020).

Kullanılacak ilk malzeme olarak yüksek yoğunluklu polietilen malzemesinin seçilme nedeni ön çalışmalarda testleri gerçekleştirilen numune plaka ile sonuçların karşılaştırılmasıdır. Ön çalışmalar sırasında elimizde bulunan ithal ürünün hammadde ve üretim kalitesinden emin olunamamıştır. Bu nedenle, PETKİM kaynaklı HDPE hammaddesi ile yeni geometri kullanılarak plaka üretilmesi plaka tasarımının gelişimi hakkında net sonuçları ortaya çıkartmaktadır. Mukavemet parametreleri yönünden projede kullanılan diğer plastiklere göre dayanım değerleri daha düşük olan HDPE, sünme performansı açısından ise istenilen mertebelerden fazla sonuçlar vermektedir.

Tablo 3.4: HDPE'ye ait genel teknik özellikler (Awad ve diğ., 2019).

Teknik Özellikler	HDPE	Birim
Yoğunluk (22±1 °C)	0.95	g/cm ³
Elastisite Modülü	1250	MPa
Kopma Mukavemeti (22±1 °C)	33	MPa
Kopma Uzaması (22±1 °C)	>400	%
Erime Sıcaklığı	200-235	°C

3.2.1.2. Polypropylene (PP)

PP, son derece değerli ticari önemi nedeniyle hem akademide hem de endüstride en çok araştırılan polimerik malzemelerden biridir (Kaymakçı, 2021). 1954 yılında keşfedilmiş ve ticari plastikler arasında en düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle çok hızlı bir şekilde popülerlik kazanmıştır. PP, mükemmel kimyasal dirence sahiptir ve enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi birçok dönüştürme yöntemiyle işlenebilir. Mükemmel mekanik özelliklere sahip serbest renkli bir malzemedir (Maddah, 2016).

Polipropilen'in önemi üç ana neden ile açıklanabilir. Birincisi, PP'nin düşük yoğunluk, yüksek erime sıcaklığı ve kimyasal inertlik gibi harika özellikleridir. Bunun yanında düşük maliyetli bir plastik olması PP'yi uzun ömürlü uygulamalar için optimum hale getirir. İkincisi,

polipropilen yapısal tasarımlarda ve mekanik özelliklerde çeşitliliğin sağlanabileceği çok yönlü bir malzemedir. Üçüncüsü ise, PP'nin farklı morfolojik yapısı, dolgu maddeleri veya takviye maddesi olarak kullanılmasına müsaade ederek diğer üstün özelliklere sahip olan polimerlerle karıştırılmasını mümkün kılmaktadır (Maddah, 2016).

Tablo 3.5: PP'ye ait genel teknik özellikler (Awad ve diğ., 2019).

Teknik Özellikler	PP	Birim
Yoğunluk (22±1 °C)	0.905	g/cm ³
Kopma Mukavemeti (22±1 °C)	25	MPa
Kopma Uzaması (22±1 °C)	10	%
Erime Sıcaklığı	235-250	°C

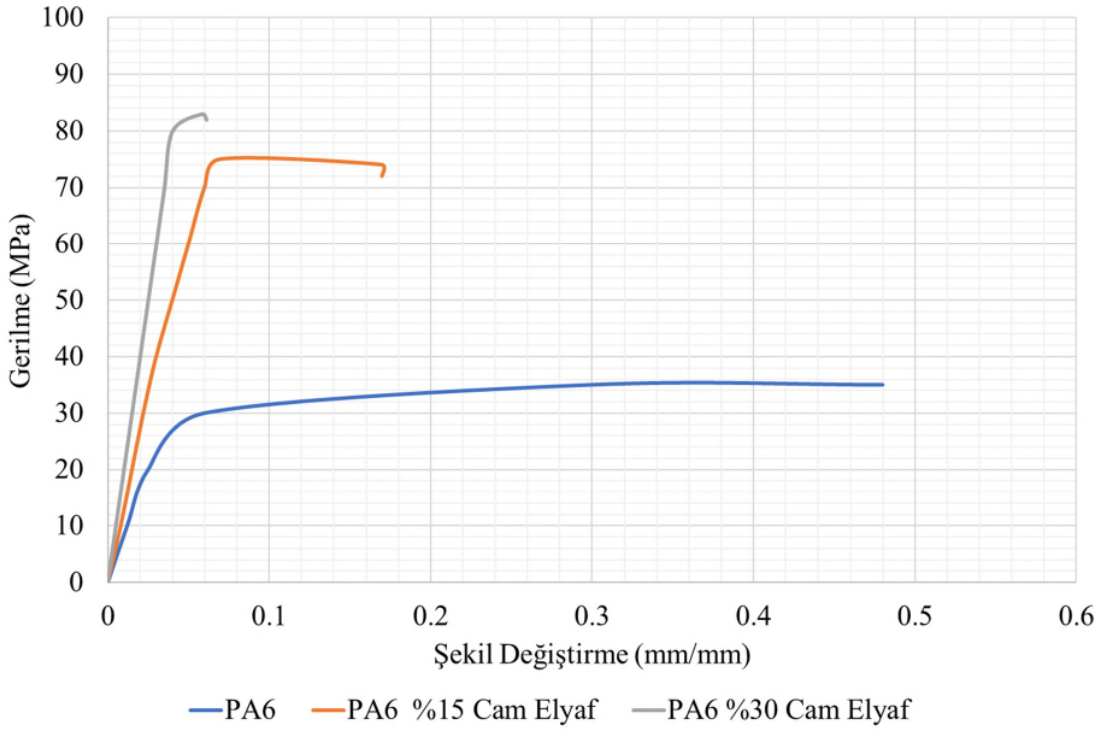
3.2.1.3. Polyamide-6/66 (PA)

Poliamid-6 (PA6), temel mühendislik polimer malzemelerinden biridir. Polar olmayan solventlere karşı iyi kimyasal dirence, mükemmel termal özelliklere ve çok iyi mekanik özelliklere sahip termoplastik bir polimerdir. Uygun katkı maddeleri kullanılarak mekanik özellikleri kolaylıkla değiştirilebilir (Dryzek ve diğ., 2017). PA6'nın kaya saplama donatısı amaçlı kullanılması ile ilgili çalışmalarını yapan Kömürlü ve diğ. (2017), asidik yeraltı sularının bulunduğu maden gibi çalışma alanlarında hızlı korozyonun önüne geçmek adına çelik donatı yerine PA6 kullanılabileceği düşüncesiyle çalışmalarını sunmuşlardır. Burada PA6'nın yüksek kimyasal direnciyle birlikte mukavemet değerlerinin de yüksek olması özellikleri ön plana çıkmıştır. Bu tez kapsamında kullanılan PA6 ve PA66 ham maddeleri plastik sanayiinden temin edilmiştir. Temin edilip çalışmada kullanılan PA6 ham maddesine ait özellikler Tablo 3.6'da sunulmuştur.

Tablo 3.6: PA6 ve PA66'ya ait genel teknik özellikler.

Teknik Özellikler	PA6	Birim
Yoğunluk (22±1 °C)	1.13	g/cm ³
Elastisite Modülü	3000	MPa
Kopma Mukavemeti (22±1 °C)	75	MPa
Kopma Uzaması (22±1 °C)	>10	%
Izod Çentikli Darbe Dayanımı (22±1 °C)	6	kJ/m ²
Erime Sıcaklığı	220	°C

Yarı kristalin yapıda olan PA6 ve PA66 arasındaki fark molekül dizilimleridir. Bu dizilimden kaynaklı olarak PA66'nın PA6'ya göre biraz daha erime sıcaklığı daha yüksek olup kopma mukavemeti de bir miktar yüksektir. PA6 ve PA66 katkı maddeleriyle kolaylıkla birleştirilebilir. Örneğin, ağırlıkça %40'tan daha yüksek miktarlarda cam elyafı (GF) ile güçlendirilmiş PA6 iyi bir metal ikamesidir (Dryzek ve diğ., 2017). Ancak yüksek oranda kullanılan cam elyafın PA6'ya ait şekil değiştirme değerini etkilediği Dryzek ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmalarda gözlenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 3.12'de sunulmuştur.



Şekil 3.12: PA6 ile farklı oranlarda katkılı PA6'nın gerilme şekil değiştirme grafikleri (Dryzek ve diğ., 2017).

Şekil değiştirme oranlarının bu denli azalması PA6'yı yükleme altında sünmeye daha az meyilli bir malzeme yapmaktadır. Bununla beraber bir diğer elde edilen bulgu olan Elastisite Modülü değerlerindeki 1.7-2.5 kat arası değişen artışlar malzemenin mukavemet özelliklerinin iyileştiği yönündeki bulgulardır. Bu tez kapsamında çalışılan plakanın istenilen mukavemet özelliklerinin yanı sıra istenilen sünme oranlarını da koruması hedeflenen sonuçlardan birisi olup PA6 ve PA66 için farklı opsiyonlarla formüller oluşturulmuş ve bu plakalar üretilmiştir. Üretilen malzemeler hakkında detaylı bilgiler 3.2.2 numaralı bölümde sunulmaktadır.

3.2.2. Üretim Aşaması

Bölüm 3.2.1’de bahsedilen hammaddeler kullanılarak istenilen sünme ve yenilme kriterlerinin sağlanması bu çalışma kapsamında beklenen mekanik kriterler arasında olmuştur. Bu iki kriter daha önceden de bahsedildiği üzere, bulon plakalarının tüm sistemin dayanımında oynadığı rolün ve yükleme aldıkça gözlemlenen şekil değiştirmelerinin öneminden kaynaklanmaktadır.

Tünel içerisinde (veya zemin çivisinin açıkta kullanıldığı herhangi bir yerde de) bulon plakalarının gözle gözlemi yükleme durumu hakkında imalat sırasında ön bilgi vermede önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel metal plakaların zımbalanma etkisiyle somun bölgesinden aldığı basıncı kenarlara dağıtması ve sonrasında da kare plakanın uç kısımlarının yüzeyden ayrılarak bükülmesi durumunda yenilmenin gerçekleşmeye başladığı veya bulon donatısının yüksek mertebelerde yükleme aldığını yorumlamamız mümkün olmaktadır. Benzer şekilde plastik malzemeden üretilen plaka modelinde de gözle görülür bir şekilde belirli bir deformasyon gözlemlenmesi hedeflerden bir tanesi olmuştur. Modelin göbek bölgesindeki kalınlığı ve plastiğin moleküler yapısından dolayı metal kadar birlikte hareket edebilen bir malzeme olmamasından dolayı göbek bölgesindeki basınç etkisinden kenarlarda bükülme davranışı gözlemlenmesi zaten beklentilerin arasında tutulmamıştır. Ancak göbek bölgesindeki zımbalama etkisiyle plakanın deformasyon almaya başladığı ve dayanım sınırların zorlandığı sonucuna ulaşmak deformasyon gözlemi konusunda bir hedef olarak belirlenmiştir. Malzemenin bu şekilde davranabilmesi şüphesiz ki plastiğin sünme davranışının istenen mertebede olmasıyla alakalı olmaktadır.

Bölüm 2.2’de plakanın üstüne gelecek kuvvetin belirlenmesi sürecinde yapılan hesaplamalar anlatılmıştı. Bu hesaplar sonucunda somunun plakanın göbek bölgesine zımbalanırken aktardığı kuvvet T_0 olarak tanımlanmaktadır. Bu kuvvetin plakanın malzemesi tarafından karşılanması ve istenen mertebelerde performans göstermesi önemlilik arz etmektedir. Tünel için KGM Şartnamesi (2013)’te verilen bilgiler ışığında IBO bulon tipindeki donatıların performansının 250kN’a kadar ulaşması beklenmektedir. Bu değer bulon uygulama sıklığı ile belirli bir oranda azaltılması Bölüm 2.2’de açıklanmıştır. Bu noktada plakaların net bir sayı değerindeki kuvvete dayanması yerine üretim sürecinde en yüksek dayanım değerlerini elde etmek amaçlanmıştır. Bu noktada, çeşitli kombinasyonlar neticesinde üretilen örnek numuneler farklı dayanımlara ve yenilme mekanizmalarına sahip olmakla birlikte, tünel projesi veya başka bir zemin çivisi projesi kapsamında da projenin ihtiyaçlarına göre değerlendirilebilecektir.

Dayanım seviyesi açıklandığı gibi, plakalar proje özelinde değerlendirilebilecek olup, farklı yük seviyelerinde ve farklı plastiklerle kullanımı ve üretimi mümkündür.

Bu çalışma kapsamında PA, PP ve HDPE temelinde farklı katkı maddelerinin kullanımıyla birlikte 11 adet numune örneği oluşturulmuş. Çeşitli hammadde sağlayıcılarından temin edilen PA, PP ve HDPE malzemeler ilk seferlerinde orijinal durumlarında (tek başına hammadde olarak) kullanılmış, daha sonra ise üretici firmanın önerileri ve formülleri doğrultusunda katkılı formüller temin edilmiştir. Projenin kaynakları, hammadde fiyatları ve kısıtlayıcı zaman etmenleri göz önünde bulundurulduğunda temini daha kolay olan ve üretim aşamasında mevcut enjeksiyon kalıbının kullanılması zorunluluğu altında tercih edilen katkı maddeleri seçeneklerin daha fazla artmasına engel teşkil etmiştir. Fakat mevcut durumda da katkı maddelerinin plakaların yenilme ve dayanma davranışları üzerinde nasıl etkiye sahip olduğu hakkında sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan tüm numunelerin detaylı bilgileri Tablo 3.7’de ve numunelere ait görseller Şekil 3.14’te sunulmaktadır.

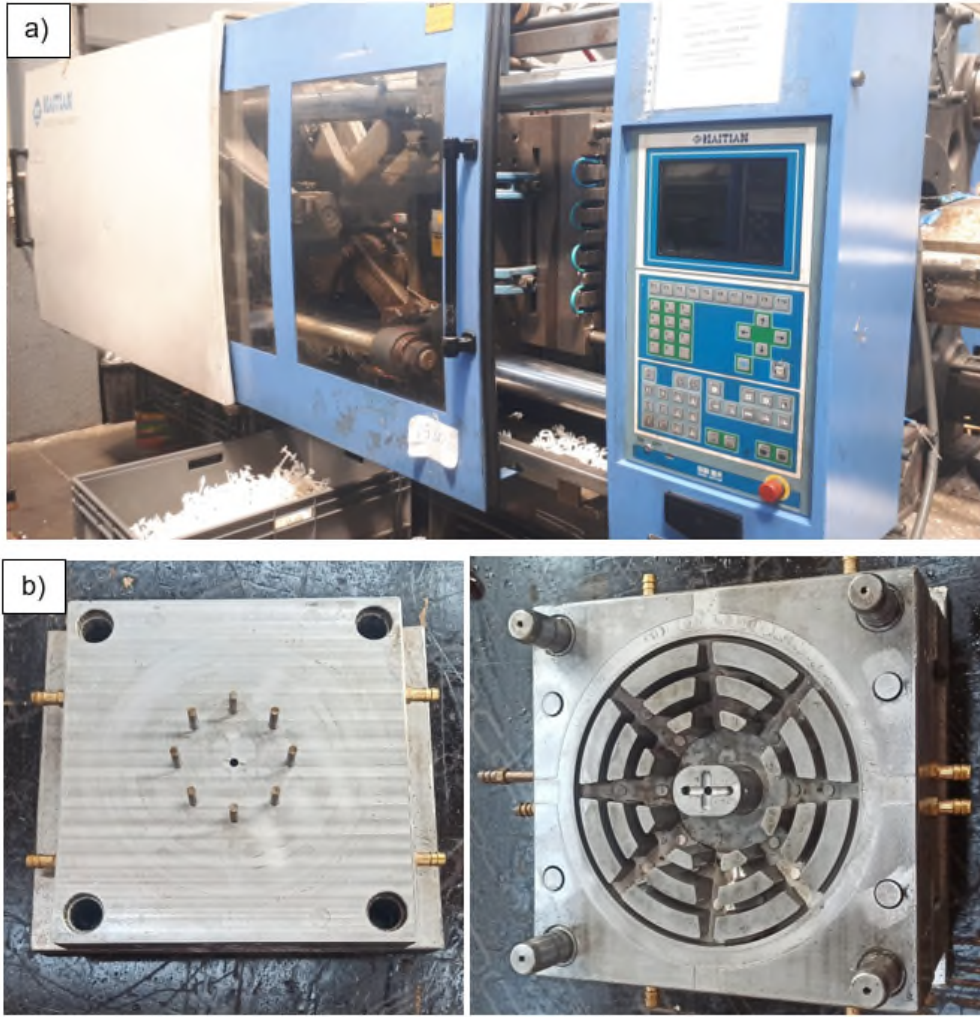
Tablo 3.7: Üretilen numunelerin listesi ve özellikleri.

Numune No	İsmlendirme	Kullanılan Malzeme	İçerik	Katkı Oranı
Numune 1	PP	PP (Polypropylene)	%100 PP	-
Numune 2	HDPE(O)	HDPE (High Density Polyethylene)	Orijinal %100 HDPE	-
Numune 3	HDPE(RC)	HDPE (High Density Polyethylene)	Geri Dönüştürülmüş %100 HDPE	-
Numune 4	PA6	PA6 (Polyamide6)	%100 Polyamide	-
Numune 5	PA6-R30	PA6 (Polyamide6) + (%30 Kauçuk)	Polyamide + Kauçuk	%30 Kauçuk
Numune 6	PA66-GF30	PA66 (Polyamide66) + (%30-Cam Elyaf)	Polyamide + Cam Elyaf	%30 Cam Elyaf
Numune 7	PA66-GF35	PA66 (Polyamide66) + (%35-Cam Elyaf)	Polyamide + Cam Elyaf	%35 Cam Elyaf
Numune 8	PA66-GF30- IR	PA66 (Polyamide66) + (%30-Cam Elyaf) + Darbe Dayanımlı	Polyamide + Cam Elyaf + Darbe Dayanımlı	%30 Cam Elyaf
Numune 9	PA6-GF50-IR	PA6 (Polyamide6) + (%50-Cam Elyaf) + Darbe Dayanımlı	Polyamide + Cam Elyaf + Darbe Dayanımlı	%50 Cam Elyaf
Numune 10	PA6-UNR-IR	PA6 (Polyamide6)+UNR+Darbe Dayanımlı	Polyamide + UNR + Darbe Dayanımlı	-
Numune 11	PP-LGF30	PP (Polypropylene) +(%30 Uzun Cam Elyaf)	Uzun Cam Elyaf	%30 Cam Elyaf

Burada isimlendirme sırasında kodlamalar sırasıyla “hammaddenin adı - katkı adı ve yüzdeler oranı – ikinci katkı” formülü kullanılmış olup kısaltma açıklamaları aşağıda belirtilmektedir.

- O: Original (Orijinal)
- RC: Recycle (Geri dönüştürülmüş)
- R: Rubber (Kauçuk)
- GF: Glass Fibre (Cam elyaf)
- LGF: Long Glass Fibre (Uzun cam elyaf)
- IR: Impact Resistance (Darbe dayanımı)

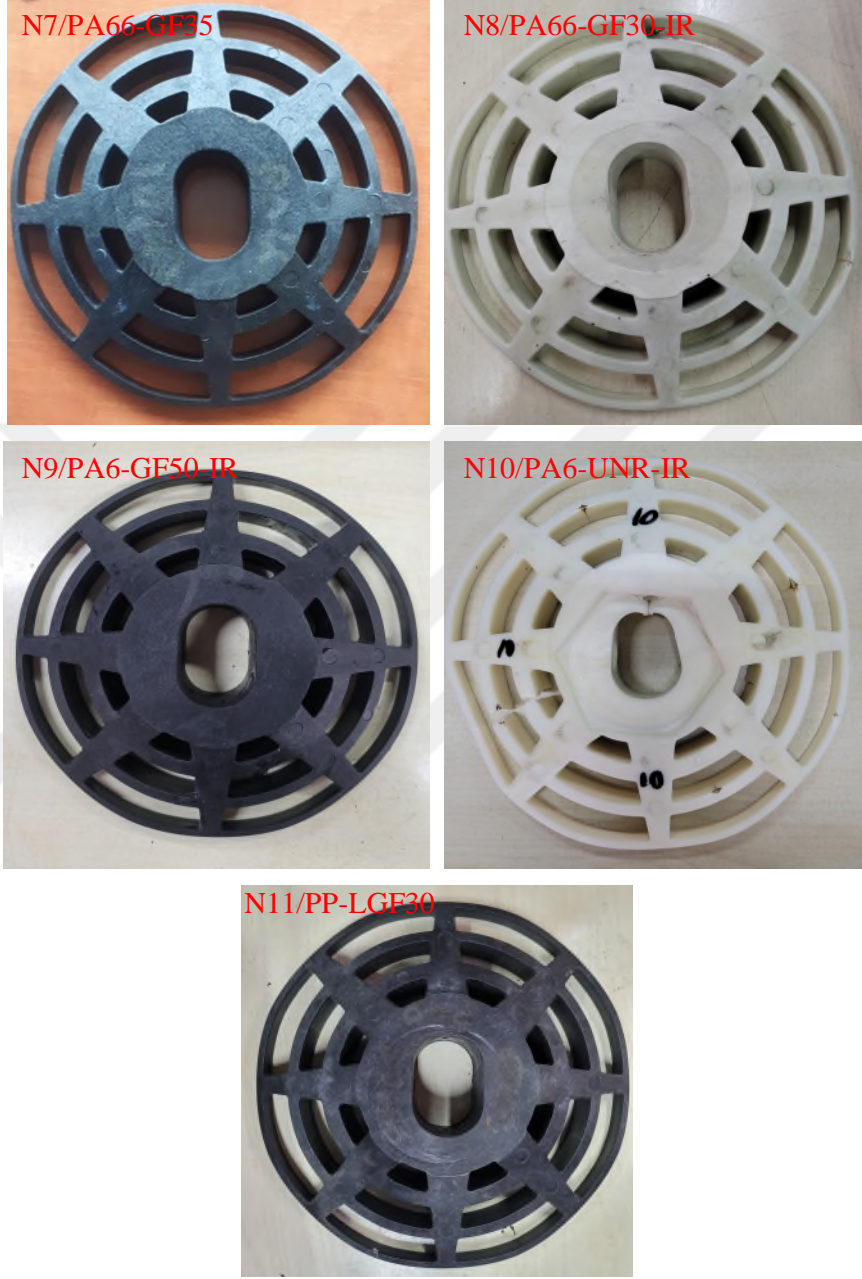
Numunelerin üretimleri HAITIAN marka plastik enjeksiyon makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13'te enjeksiyon makinesine ve plakaya özel hazırlanmış kalıp detayları sunulmaktadır.



Şekil 3.13: a) Enjeksiyon makinesine ve b) kalıp detaylarına ait görseller.



Şekil 3.14: Üretim sonrası numunelere ait görseller.



Şekil 3.14 (devam): Üretim sonrası numunelere ait görseller.

Üretim aşamasında karşılaşılan en büyük zorluk üretilen plakaların optimum seviyede kürlenmesi prosedürü olmuştur. PA hammadde içerikli numunelerin maksimum mekanik özelliklerini sergileyebilmesi adına hammadde sağlayıcısı TİSAN A.Ş.'nin önerisiyle önce plastik malzeme etüvde 120°C sıcaklıkta 3 saat kurutulmuş ve içindeki tüm nemin kaybolması sağlanmış, daha sonra plastik enjeksiyon makinesinde dökümü gerçekleştirilmiş ve üretilen plakaların soğuk su havuzuna atılması, ardından ikişerli olarak poşetlenip içerisine bir su

bardağı su eklenerek poşetin hava almayacak şekilde kapatılması ve 3 gün bu durumda bekletilmesi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kütleme aşamasını takiben testler gerçekleştirilmiştir. PP veya HDPE malzemelerde bu tarz bir prosedür uygulanmasına gerek duyulmamıştır. Enjeksiyon makinesinde üretim öncesi kurutma işleminin yapıldığı ünite, hammadde, üretim sonrası soğuk havuz ve kütleme süresindeki numunelerin ayrıştırılması aşağıdaki şekillerde sırasıyla sunulmaktadır.



Şekil 3.15: Kurutma ünitesi.

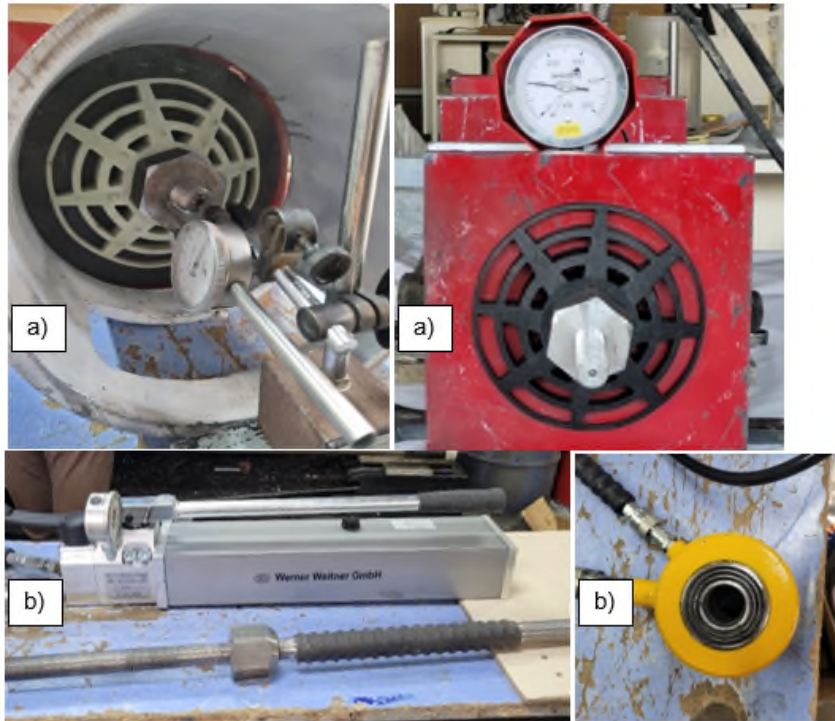


Şekil 3.16: Hammaddenin kurutma sonrası ve eritme öncesindeki granüler hali.



Şekil 3.17: a) Enjeksiyon sonrası soğuk su havuzuna atılan numuneler b) kürlenme prosedürü.

Üretim sonrası Bölüm 3.1’de anlatılan test prosedürü ile 11 adet numuneye basınç testleri yapılmıştır. Bu testlerde kullanılan ekipman ve test düzeneği görselleri aşağıda sunulmaktadır. Testlere ait sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirilmesi konuları Bölüm 4’te sunulmaktadır.



Şekil 3.18: a) Örnek yükleme testi kurulumu b) yeni kullanılan 700bar limitli Werner Weitzer marka kriko.

4. BULGULAR

4.1. ÜRETİLEN PLAKALARIN TESTLERİ VE SONUÇLARI

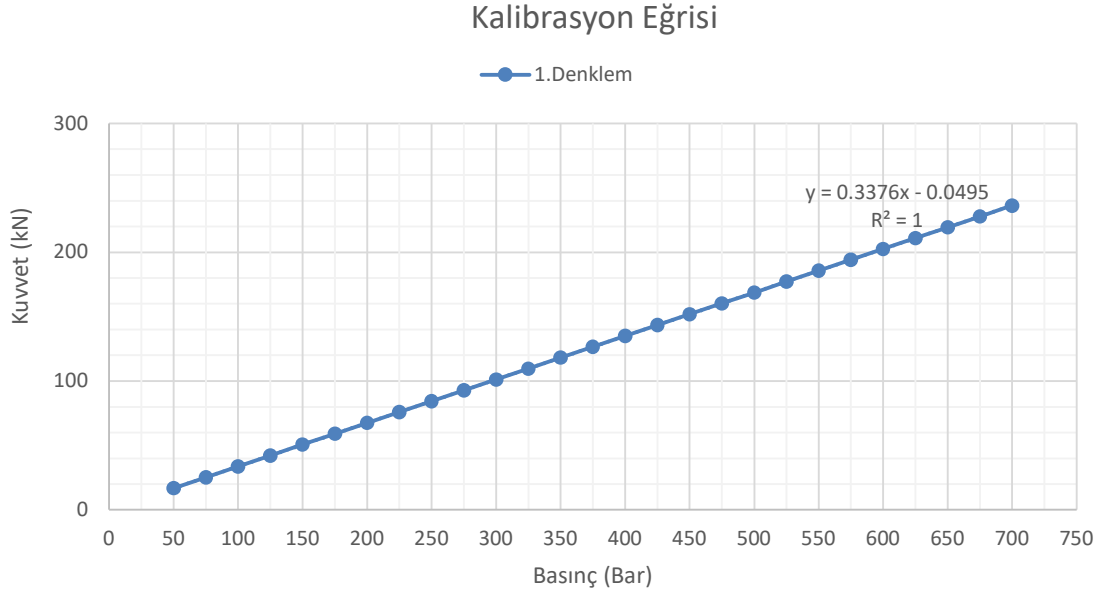
Üretilen her bir numune için öncelikle maksimum dayanım yükünün belirlenebilmesi için kapasite yükleme testleri yapılmıştır. Bu testler neticesinde istenilen dayanım mertebesine ulaşan hammaddelere daha çok odaklanılmıştır. İlk olarak üretimleri yapılan PP, HDPE ve PA6 numuneleri herhangi bir katkı olmadan teste tabi tutulmuştur. Test sonuçlarından alınan veriler neticesinde bu malzemelerin yenilme davranışı ve maksimum dayanım kapasiteleri tespit edilmiştir. Yeterliliklerin sağlanması adına öncelikli olacak dayanımı arttıracak katkıları değerlendirme altına alınmıştır. Katkıların ilk dört numune üzerinde farklı kombinasyon ve oranlarda eklenmesiyle birlikte numune sayısı genişletilmiş ve toplamda 11 adete yükseltilmiştir. Numune 5, 8, 9 ve 10 gibi malzeme denemelerinde darbe dayanımını arttıracak eklentiler kullanılmış ve bu karışımların temin edildiği şirketler tarafından oluşturulan formüller ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Özellikle UNR katkısı ve darbe dayanımını arttıran ek katkılı malzemeler için şirketler formüllerini paylaşmayı tercih etmemişlerdir.

Testler sırasında ilk çalışmalardan farklı olarak kullanılan Werner Weitner GmbH marka manuel el krikosu kullanılmıştır. Krikonun en fazla ulaşabildiği basınç 700bar olmakla birlikte, kalibrasyonu yapılmış ve kalibre değerlerine göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Krikoya ait kalibrasyon değerleri Tablo 4.1’de sunulmaktadır. 25bar için kalibrasyon değeri olmadığı için bu değere karşılık gelen kuvvet değeri interpolasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Yapılan komparatörlü testler neticesinde elde edilen basınç-deplasman grafikleri Tablo 3.7’de verilen numune sıralamalarına göre Şekil 4.2-Şekil 4.9 arasında sunulmaktadır.

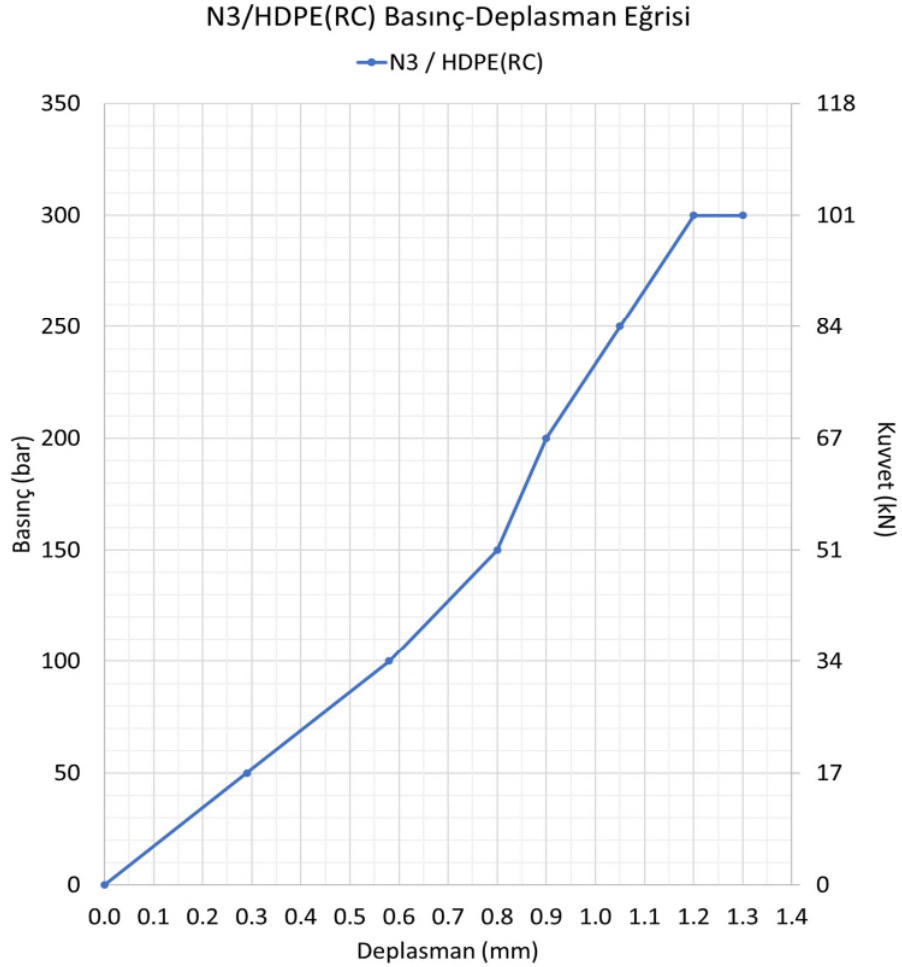
Testleri yapılan numuneler içinde komparatör okumalı testler PP ve HDPE(O) numunelerinde gerçekleştirilememiştir. Ancak bu numunelere ait yenilme mekanizmaları ve yenilme dayanımları yapılan testlerde belirlenmiştir. PA66-GF30 (Numune 6)’da ise test kurulumunda yaşanan aksaklıklar ve ölçümlerin doğru alınmaması nedeniyle elde edilen okumalar dikkate alınmamıştır.

Tablo 4.1: Kalibrasyondan sonra interpolasyon ile elde edilmiş bar-kN ilişkisi.

Cihazda Okunan Basınç (Bar)	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
Kuvvet (kN)	8,3	16,8	25,3	33,7	42,1	50,5	58,9	67,3	75,8	84,2	92,7	101,1	109,5	118,0
Cihazda Okunan Basınç (Bar)	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700
Kuvvet (kN)	126,4	134,7	143,2	151,6	160,1	168,5	180,5	185,4	193,8	202,2	210,7	219,0	227,4	235,9

**Şekil 4.1: İnterpolasyon grafiği.**

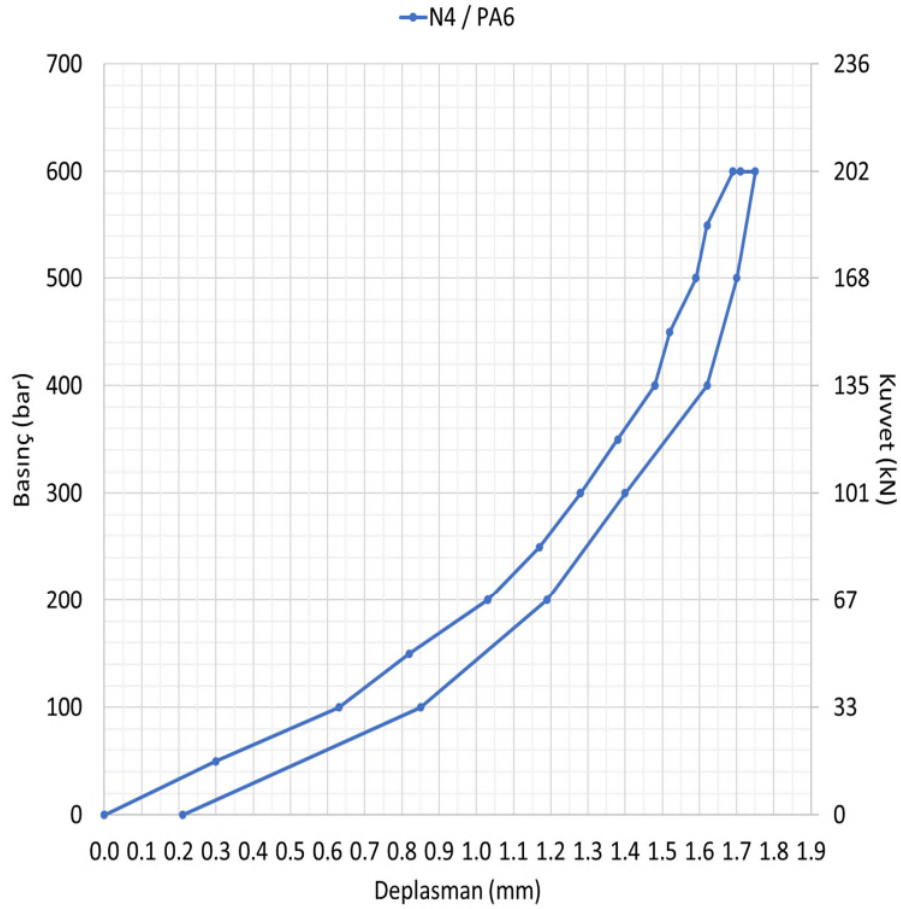
Yapılan testlerde elde edilen sonuçlar yukarıda sunulan kalibrasyon değerlerine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen okumaların daha net sonuçlar verebilmesi adına komparatörlü test yapılan her numune için basınç-deplasman eğrisini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklerde sol y-ekseni krikoda okunan basıncı, sağ y-ekseni kalibrasyona göre ilgili basınca denk gelen kuvvet değerini ve x-ekseni ise okunan deplasman değerlerini göstermektedir. Komparatörlü testi yapılan numuneler hakkında yorumlara grafiklerin altında yer verilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2: N3/HDPE(RC) basınç-deplasman grafiği.

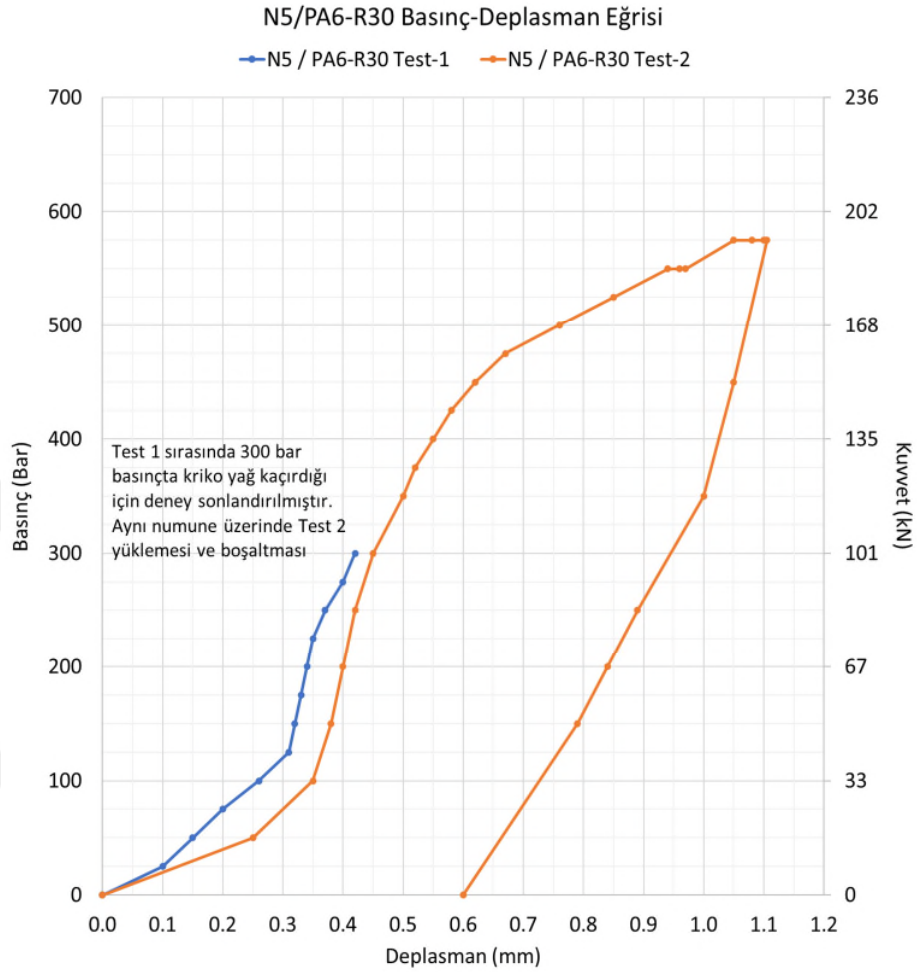
HDPE(RC) malzemesi geri dönüştürülmüş bir yüksek yoğunluklu polietilen malzemedir. Malzemenin davranışı grafik üzerinde incelendiği zaman yüksek seviyelerde sünme davranışı gösteriyor olmasına karşın dayanım seviyeleri beklenen seviyelere (250kN civarı) çıkamamıştır. Yükleme altındaki grafiğin oluşumu incelendiği zaman ise hemen hemen dayanımının yarısına kadar yük etkisiyle ezilme ve hızlı bir deformasyon gözlenirken daha sonra malzemenin süneklilik özelliği nedeniyle yük almaya devam ettiği tespit edilmiştir. Ancak bu yükleme yaklaşık 100kN seviyelerini geçememeye başlamış ve kriko üzerinden basınç artışı yapılmasına rağmen malzeme yenildiği için grafikte bir değişiklik gözlenmemiştir. HDPE(RC) bu proje kapsamında yeterli mukavemet özelliklerini göstermemiş olmasına karşın malzemelerin karşılaştırılmasında bir mertebeye belirtmesi adına grafiklere eklenmiştir.

N4 / PA6 Basınç-Deplasman Eğrisi



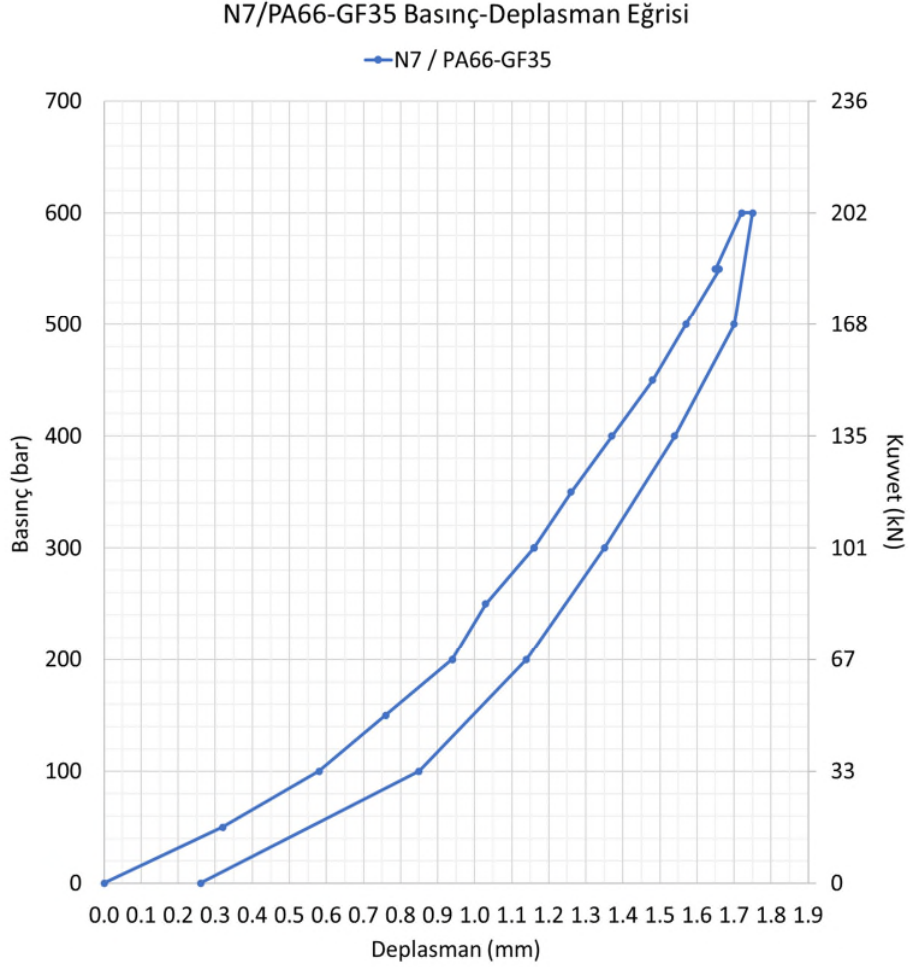
Şekil 4.3: N4 / PA6 basınç-deplasman grafiği.

Poliamid 6 (PA6) son derece yüksek mekanik özelliklere sahip bir mühendislik plastiğidir. Kendine özgü bu yüksek mekanik özelliği, mikro düzeyde sahip olduğu hidrojen bağlarının güçlü moleküler-moleküler etkileşiminin sonucunda ortaya çıktığı da bilinmektedir. Ancak önemli bir rijitliğe sahip olmasına rağmen bu rijitliği özellikle büyük yer değiştirmelere sebep olacak yüklemeler altında çatlak köprüleme kapasitesini zayıflatmakta ve devamında çok gevrek kırılmasına sebep olmaktadır.



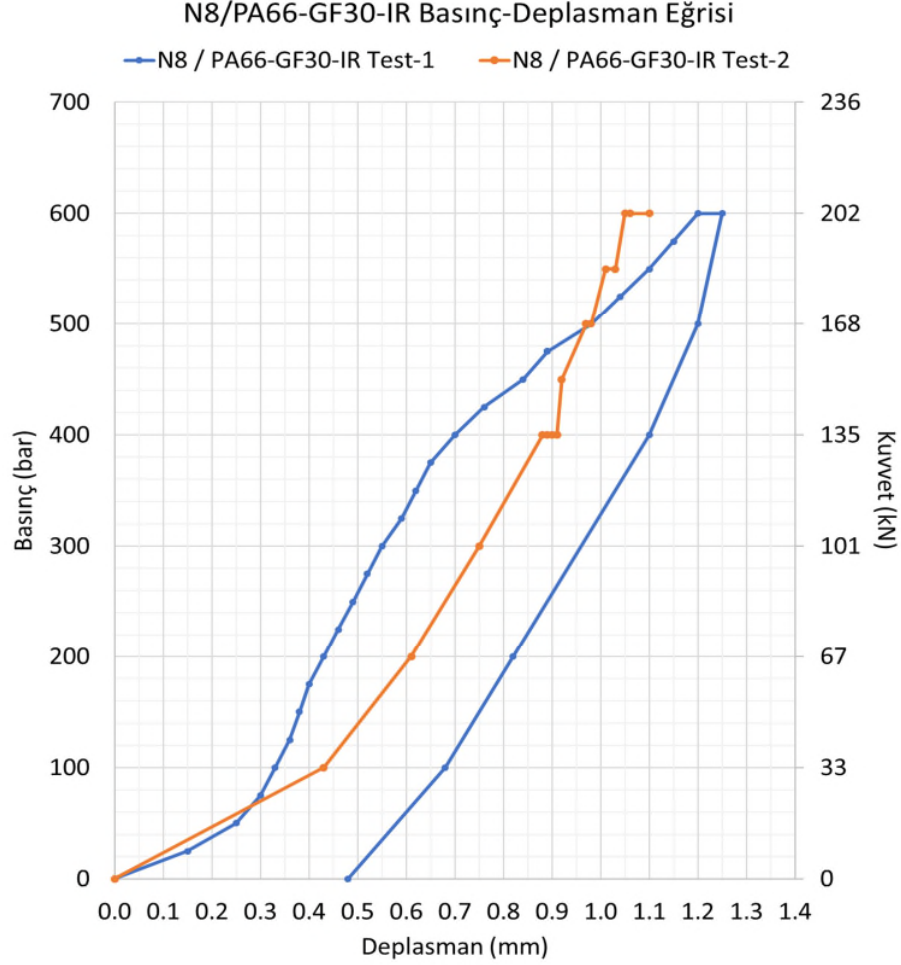
Şekil 4.4: N5/PA6-R30 basınç-deplasman grafiği.

Malzeme mekaniği prensipleri gereği, PA6' nın içerisine yüksek elastikiyet özelliğine sahip kauçuk ilavesiyle enerji yutabilme kapasitesinde önemli artışların ve devamında kırılma davranışında daha sünek bir göçme modunun oluşması beklenebilir. Ancak N5/PA6-R30 numunesinde kauçuk ilavesine rağmen yük altında gevrek bir yenilme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan görsel incelemeler neticesinde takviye elemanı olarak kullanılan kauçuk parçacıklarının, yük altında, kılcal çatlaklar şeklinde PA6 ile bağlandığı ara yüzeylerden koptuğu ve matris- takviye ara yüzeylerinde çekme gerilmenin baskısıyla birlikte yağlayıcı bir film tabakası gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Bu mekanizmanın etkisiyle matris yapılardan ayrılan kauçuk katkıların beklenen plastik deformasyonu oluşturmadan ayrılma ile kırılma yüzeyleri oluşturduğu ve kompozitin gevrek karakterde kırılmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.



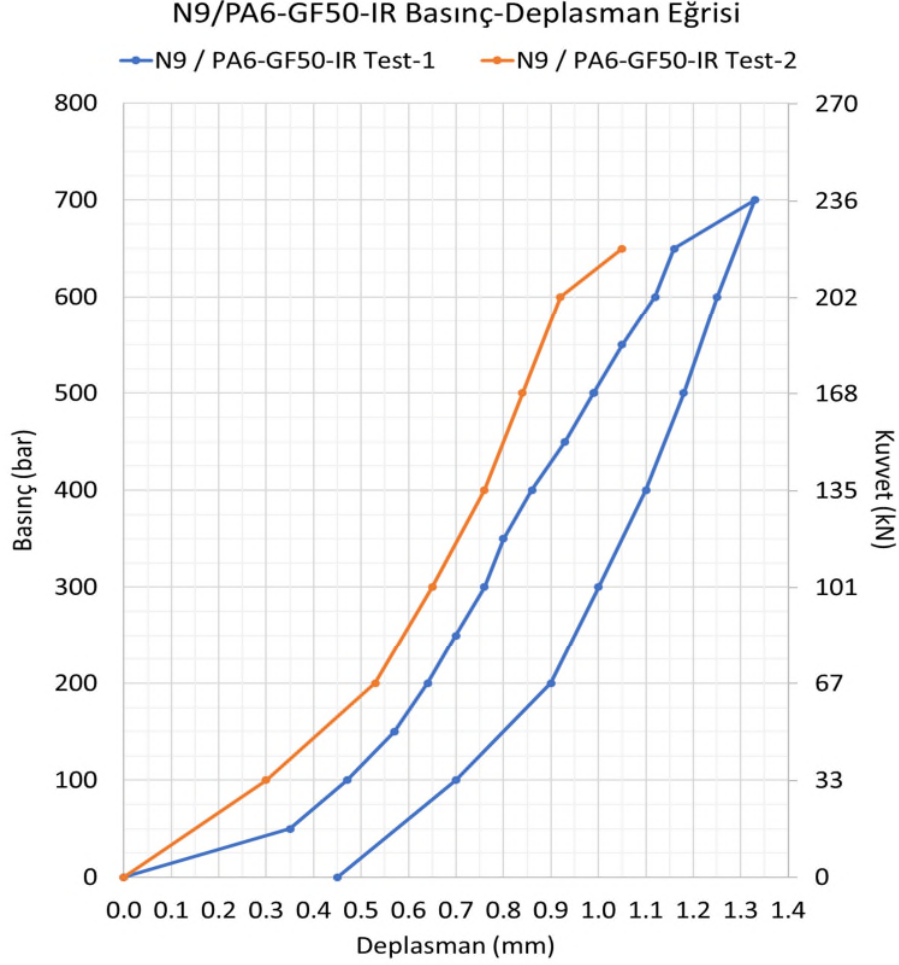
Şekil 4.5: N7/PA66-GF35 basınç-deplasman grafiği.

PA6 kompozitinin maksimum gerilme, çekme uzama ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin cam elyaf takviyesiyle önemli derecede iyileştiği görülmüştür. Kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan inceleme, takviye elemanı olan cam elyaf ile matris bağının etkin olarak gerçekleştiği göstermiştir. Lif takviyeli kompozitlerde davranışı belirleyen en önemli hususlardan biri takviye elemanı olan elyaf katkının matris bileşeni içerisinde dağılımı ve yönlenişidir. Üretim sürecine bağlı olarak matris içerisinde gerçekleşecek homojen elyaf takviyesi dağılımı gerilme konsantrasyonları oluşumunu minimize ederek kompozitin deformasyona karşı dayanımı artırabilmektedir. Benzer şekilde, yükleme doğrultusuna paralel doğrultunda yerleşim gösteren elyaf bileşenler Poission etkisiyle meydana gelen çekme gerilmelerini daha etkin şekilde köprüleyerek yük taşıma kapasitesini iyileştirebilmektedir.



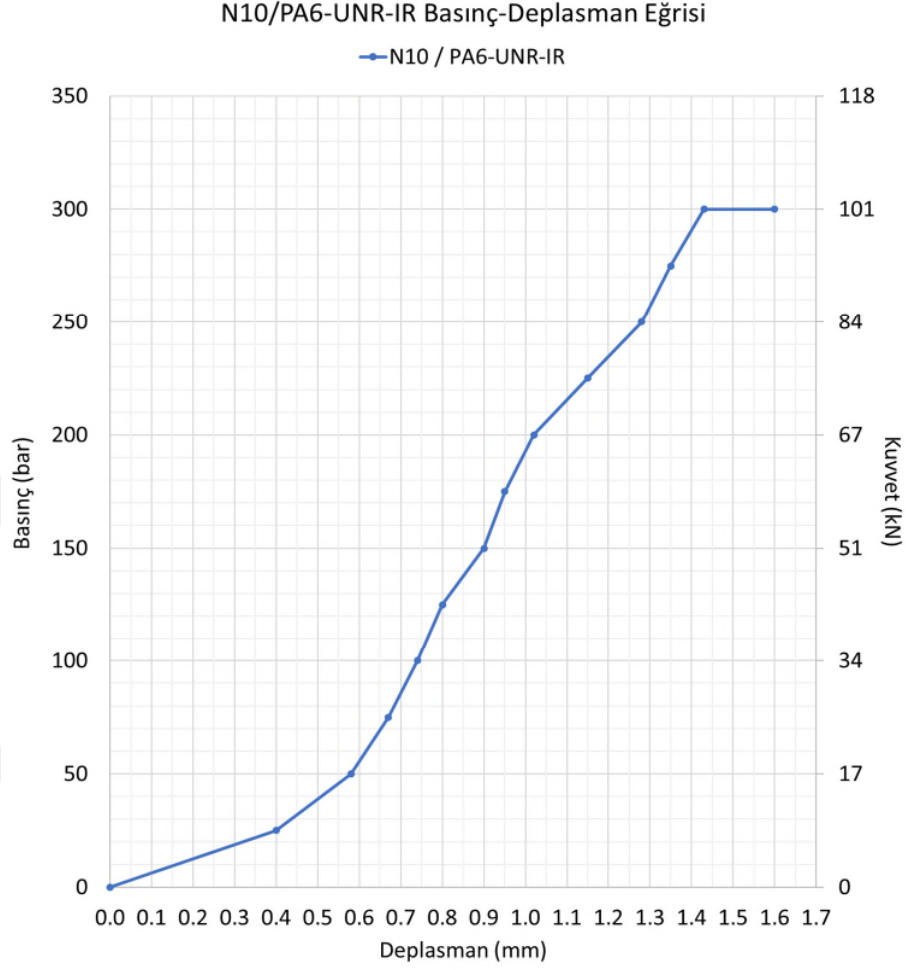
Şekil 4.6: N8/PA66-GF30-IR basınç-deplasman grafiği.

Elde edilen N8/PA66-GF30-IR grafikleri incelendiği ve bir sonraki sayfada sunulan N9/PA6-GF50-IR grafikleri ile karşılaştırıldığı zaman, özellikle 1 numaralı testte plakanın davranışı net bir şekilde anlaşılamamıştır. Bu numunenin N9/PA6-GF50-IR'ye göre daha düşük cam elyaf içeriyor olması, yükleme sırasında numunenin daha çok sünme göstermesi beklenmesine neden olmakla birlikte, 1 numaralı testte grafik hızlı bir şekilde yük almaya başlamıştır. Oluşan bombeli eğrinin nedeninin somunun tam sıkışmamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bunun yerine 2 numaralı test dikkate alındığı zaman IR ve GF katkılı PA malzemeler özelinde daha uyumlu bir eğri elde edildiği gözlenebilmektedir. Bu noktada, GF yüzdesinin ve PA6 veya PA66 hammaddesinin kullanılmasının bu dayanım mertebelerinde bir öneminin olmadığı yorumu yapılabilir.



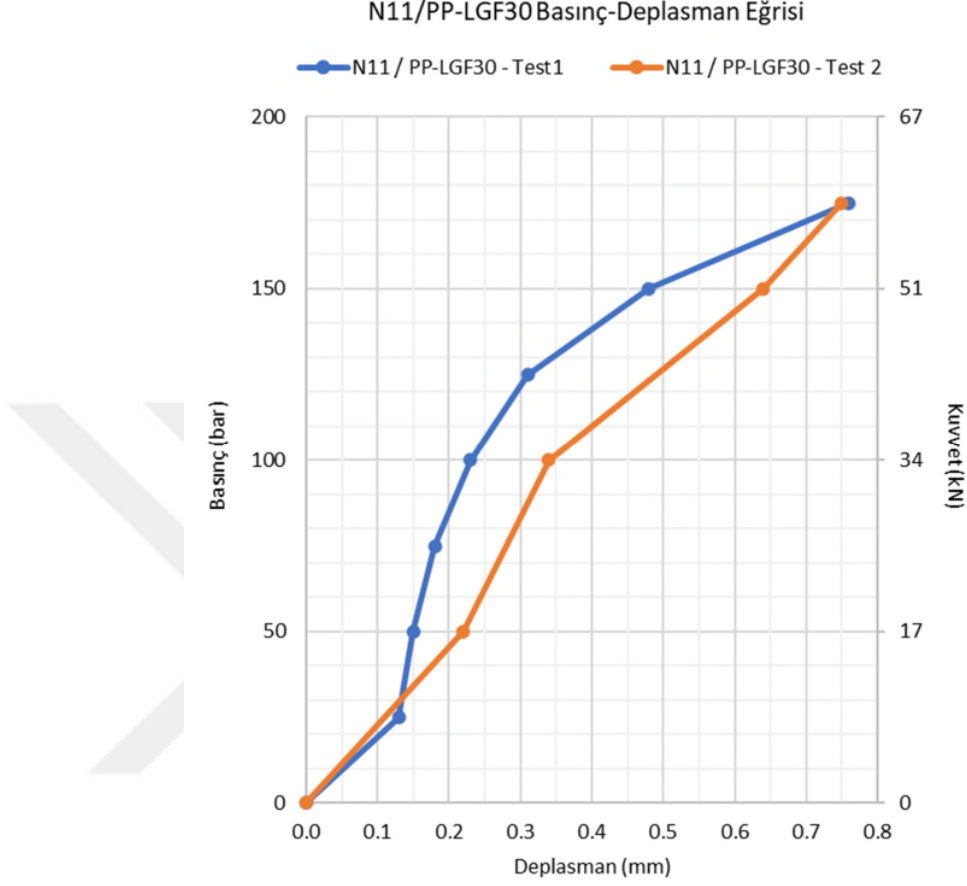
Şekil 4.7: N9/PA6-GF50-IR basınç-deplasman grafiği.

Kompozit malzemelerin iç yapısında yük altında meydana gelen matris çatlakları, fiber kopması ve delaminasyon gibi hasar türleri yük taşıma kapasitesinde önemli ölçüde düşüşlere sebep olarak yapı güvenliğini ciddi derecede tehlikeye atabilmektedir. Buna ek olarak, çok iyi bilindiği üzere kompozitlerin darbe yüklerine karşı verdikleri tepkiler ve darbe ucunun kinetik enerjisini sönmüleme biçimleri çok farklıdır. Kompozitler malzemelerde plastik deformasyona uğrama yeteneği genelde sınırlı olduğu için darbe enerjisini büyük kırılma bölgeleri oluşturarak sönmümler ve bunun neticesinde de kompozitin dayanım ve sertliğinde azalmalar meydana gelir. Bu kapsamda, darbe dayanımı katkılı (impact modifier) ve cam elyaf takviyeli PA66/PA6 kompozitler davranışları incelediğinde şekil değiştirme kapasitesi yüksek bir kompozit üretiminin mümkün olduğu ve daha spesifik olarak darbe yüklemesine maruz kalma durumunda enerji yayılımını çatlama yolundan ziyade geri sekme mekanizması (rebounding) veya deforme olma suretiyle gerçekleştirebilecek yeni nesil kompozitlerin üretilebileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8: N10/PA6-UNR-IR basınç-deplasman grafiği.

PA6 malzemesinin dayanım seviyeleri ve yükleme altındaki gösterdiği deplasman değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiş ve PA malzemesinin özellikleri hakkında bilgiler verilmişti. Yukarıdaki grafikte ise, PA6 malzemesine UNR ve IR katkıları eklenmiş ve dayanım testi gerçekleştirilmiştir. N10/PA6-UNR-IR grafiğinin sonuçları değerlendirildiğinde sadece PA6 hammaddesi ile yapılan N4 / PA6 plakasına göre aynı deplasman değerlerini elde etmesine rağmen yarı yarıya dayanım konusunda zayıflık göstermiştir. Yine hemen hemen her grafikte gözlemlendiği gibi ilk yükleme anında hızlı deformasyon göstermiş, ardından malzeme pekleşmeye başlamıştır. Malzemeye eklenen IR katkısının olumlu etkisi bir önceki paragrafta aktarılmış olup içeriği bilinmeyen ve üretici firma tarafından bizimle paylaşılan UNR katkısı malzemenin daha yumuşamasına, hatta plakayı el ile bükebilecek bir kıvama getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9: N11/PP-LGF30 basınç-deplasman grafiği.

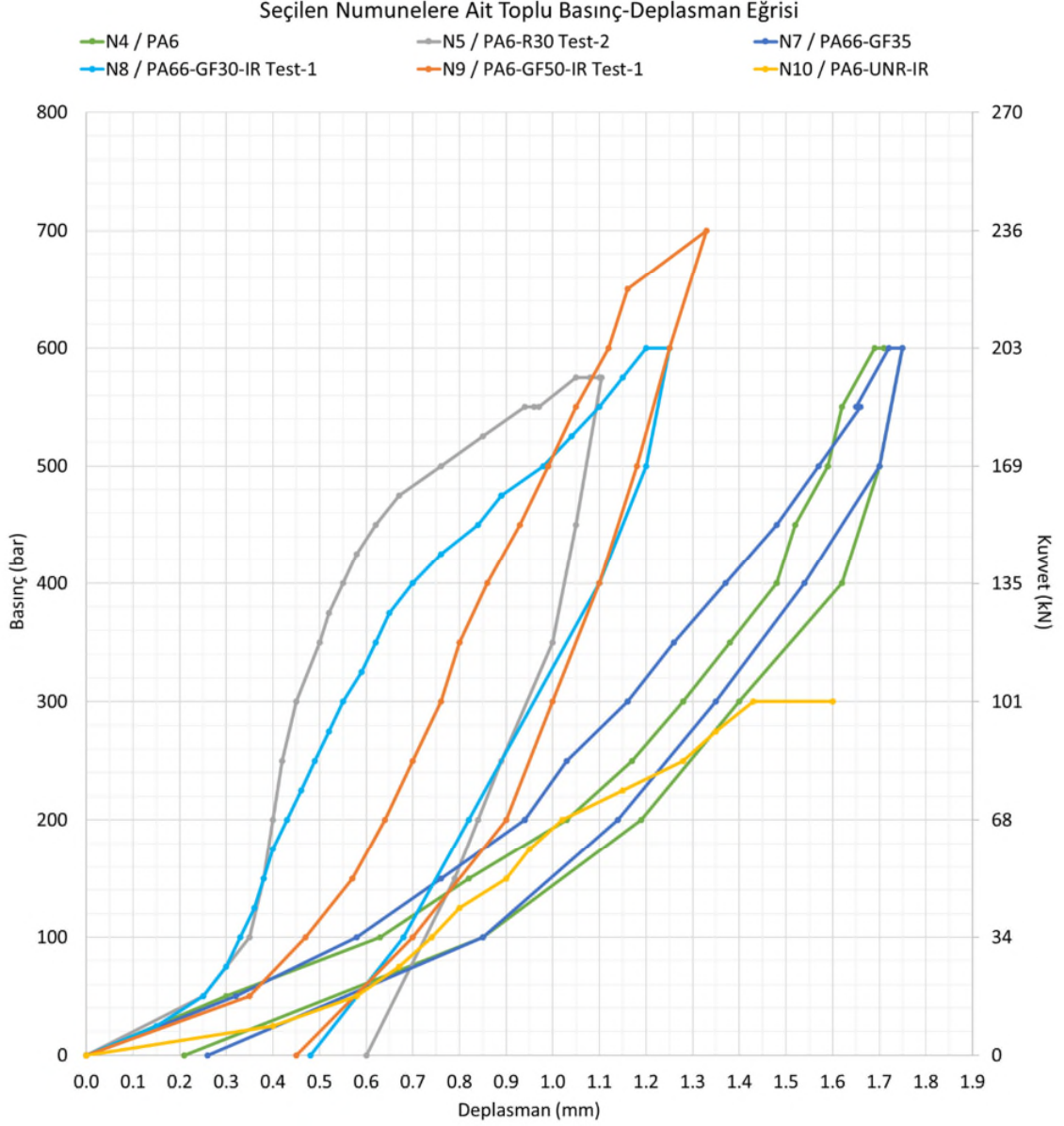
Yapılan testlerin sonucusu olan ve hammaddesi Polypropylene olan N11/PP-LGF30 numunesinin, yükleme testindeki performansı malzemenin dayanım mertebesi açısından yetersiz kalmıştır. Fakat mevcut plakanın komparatörlü testi gerçekleştirilememiş olan N1/PP malzemesine ait Tablo 4.2’de sunulan dayanım değerlerine LGF katkısı ile ulaşamamış olması beklenen bir davranış değildir. Bu şekilde bir davranışın gözlenmesinin muhtemel nedenleri arasında uzun elyafın numune içindeki dağılımı ve yönelimleri gösterilebilir. İç yapısı homojen bir şekil almayan numune, test sırasında beklenen mekanik performansı gösteremeyebilir. Uzun elyaflarda özellikle narinlik oranı (aspect ratio) faktörü malzemenin yükleme davranışı açısından kritik önem arz etmektedir. Yine bu numune özelinde uzun elyaflar konumlanma gereği yükleme sırasında mikro çatlaklar oluşurken gerilmeyi karşılamada rol oynayabilir. Açıklanan tüm bu olasılıksal nedenlerden dolayı bu numunenin verimli bir örnek olmadığı düşünülmektedir.

Testler sonucunda elde edilen maksimum dayanım ve deplasman değerleriyle birlikte malzemelerin yenilme sırasında nasıl bir yenilme mekanizması gösterdiğini özetleyen veriler PA66-GF30 haricinde Tablo 4.2’de sunulmaktadır.

Tablo 4.2: Numunelere ait elde edilen dayanım, deplasman ve yenilme mekanizmaları

Numune No	İsmlendirme	İçerik	Katkı Oranı	Test1 Maksimum Kuvvet	Yenilme Davranışı
Numune 1	PP	% 100 PP	-	Ultimate: 110kN Yield: 100kN	Gevrek
Numune 2	HDPE(O)	Orijinal %100 HDPE	-	Ultimate: 130kN Yield: 80kN	Sünek
Numune 3	HDPE(RC)	Geride Dönüştürülmüş %100 HDPE	-	Ultimate: 130kN Yield: 80kN	Sünek
Numune 4	PA6	% 100 Polyamide	-	Ultimate: 180kN Yield: 180kN	Gevrek
Numune 5	PA6-R30	Polyamide + Kauçuk	%30 Kauçuk	Ultimate: 220kN Yield: 220kN	Gevrek yenilme ile birlikte patlama etkisi gözlemlendi.
Numune 7	PA66-GF35	Polyamide + Cam Elyaf	%35 Cam Elyaf	Ultimate: -kN Yield: 170kN	Numuneler kırılmadı. Çatlama sesi gelince deney sonlandırıldı.
Numune 8	PA66-GF30- IR	Polyamide + Cam Elyaf + Darbe Dayanımı	%30 Cam Elyaf	Ultimate: -kN Yield: 230kN	Kriko basınç gücü yetmediği için deney sonlandırıldı.
Numune 9	PA6-GF50-IR	Polyamide + Cam Elyaf + Darbe Dayanımı	%50 Cam Elyaf	Ultimate: -kN Yield: 230kN	Kriko basınç gücü yetmediği için deney sonlandırıldı.
Numune 10	PA6-UNR-IR	Polyamide + UNR + Darbe Dayanımı	-	Ultimate: 200kN Yield: 170kN	Sünek
Numune 11	PP-LGF30	Uzun Cam Elyaf	%30 Cam Elyaf	Ultimate: 60kN Yield: 50kN	Göbek bölgesi zımbalanarak kesme kuvveti neticesinde ezildi. Sünek yenilme.

Elde edilen tüm deplasman ve dayanım değerleri değerlendirme altına alınmıştır. Bu numuneler arasında N1/PP, N2/HDPE(O) ve N6/PA66-GF30 (koparatörlü test ve nihai yük gözlem testi dahil) numunelerine ait testler test kurulumu ve/veya teste uygun numune yetersizliği nedeniyle test edilememiştir. Bu noktada dayanım ve malzeme davranışı olarak en uygun görülen N4/PA6, N5/PA6-R30, N7/PA66-GF35, N8/PA66-GF30-IR, N9/PA6-GF50-IR, N10/PA UNR-IR grafikleri daha kolay bir karşılaştırma yapılabilmesi için Şekil 4.10’da toplu şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.10: Seçilen numunelerin toplu sonuçlarının gösterimi.

Karşılaştırmalı grafiklerden elde edilen sonuçlar neticesinde kimi sonuçlar net şekilde ortaya koyulmaktadır. İlgili sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- N4/PA6 ile N5/PA6-R30 numunelerine ait test grafikleri karşılaştırıldığında zaman aynı hammaddeye sahip bu iki numune arasındaki kauçuk katkının etkisi çok net bir şekilde gözlemlenmektedir. Kauçuk katkı PA6 üzerinde deplasmanları azaltmak için çok etkili bir katkı olmakla birlikte yenilme mekanizmasını ciddi seviyede gevrek hale getirmiştir.

Aynı zamanda kauçuk etkisiyle numune ilk yüklemeyi aldıktan sonra (somunun sıkışıp plakaya zımbalanma yüklemesi) yüksek elastisite modülü etkisiyle gerinme değerlerini limitlemiştir. Bu katkı yüksek dayanım gerektiren senaryolarda gayet amaca hizmet ederek kullanılabilceği gibi patlama etkisinin çok sert olmasından dolayı kullanım alanlarında dikkat edilmesi gerekecektir. Aynı zamanda kauçuk katkısı malzemenin nihai ve yenilme dayanımını arttırmıştır (Tablo 4.2).

- Benzer yükleme grafiği eğrileri sergileyen N5/PA6-R30 ve N8/PA66-GF30-IR sonuçları karşılaştırıldığı zaman, kauçuk katkısının tek başına aynı oranda kullanılan cam elyaf katkısına göre gerinmeye karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada kauçuk katkılı numune hem daha az deplasman gösterirken cam elyaf katkılı numune daha yüksek dayanım seviyelerine ulaşabilmiştir.
- Katkının varlığının net şekilde görüldüğü N4/PA6 ve N9/PA6-GF50-IR numunelerine ait grafikler incelenmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere, N4/PA6'nın yükleme altındaki gösterdiği şekil değiştirme değerleri katkılı numune olan N9/PA6-GF50-IR'ye göre daha fazla olup taşıyabildiği yük kapasitesi de sınırlı kalmıştır. Cam elyaf katkısının numunenin şekil değiştirmesine doğrudan etkisi bu iki karşılaştırma ile görülebilmektedir.
- N4/PA6 ile N7/PA66-GF35 eğrileri incelendiği zaman sonuçların birbirine çok da uzak olmadığı gözlenmiştir. Yine de N7/PA66-GF35'in maksimum yüklemeye alana kadar daha az şekil değiştirme gösterdiği fakat en yüksek mertebede yine de maksimum deplasmanı yakaladığı gözlenmiştir. Yine katkılı olan N9/PA6-GF50-IR ile N7/PA66-GF35 arasında bu denli farkın ortaya çıkmasının nedeni olarak cam elyaf oranının farklılığı ve N9'a eklenen darbe dayanımı arttırıcı katkıların olması söylenebilir.
- N9/PA6-GF50-IR ile N10/PA6-UNR-IR numuneleri aynı hammaddeye sahip olup içlerinde darbe dayanımı arttırıcı katkı bulduklarına rağmen asıl farkları cam elyaf katkısında ortaya çıkmaktadır. %50 oranında cam elyaf içeren N9'un yükleme altında çok az şekil değiştirme göstermesine karşın, N10/PA6-UNR-IR numunesi ciddi şekilde deplasman göstermiş ve yük mertebelerinde ise üst sınırları görememiştir. Burada oluşan farkın cam elyaf kadar içeriği açıklanmayan UNR katkısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu düşünceye kanıt niteliğinde bir eğri çizen katkısız numune N4/PA6 görüldüğü gibi 300bar mertebelerine kadar N10/PA6-UNR-IR ile benzer bir eğri çizmiştir. 50-150bar arasındaki yüklemelerde numune içerisindeki IR katkısı etkisi

ile yükleme eğrisinde dikleşme görülmüş ve numune basınca karşı tepki vermeye başlamıştır. Ancak bu direnç 300bar sonrasında kırılmış ve numune göçmeye başlamıştır. Fiziksel olarak da çok daha esnek olan bu numune çok zorlandığı takdirde el ile bükülebilecek bir kıvamdadır. Bu nedenlerden dolayı, sadece N10/PA6-UNR-IR numunesinde kullanılan UNR katkısının malzemeye özel bir dayanım özelliği kazandırmadığı tespit edilmiştir.

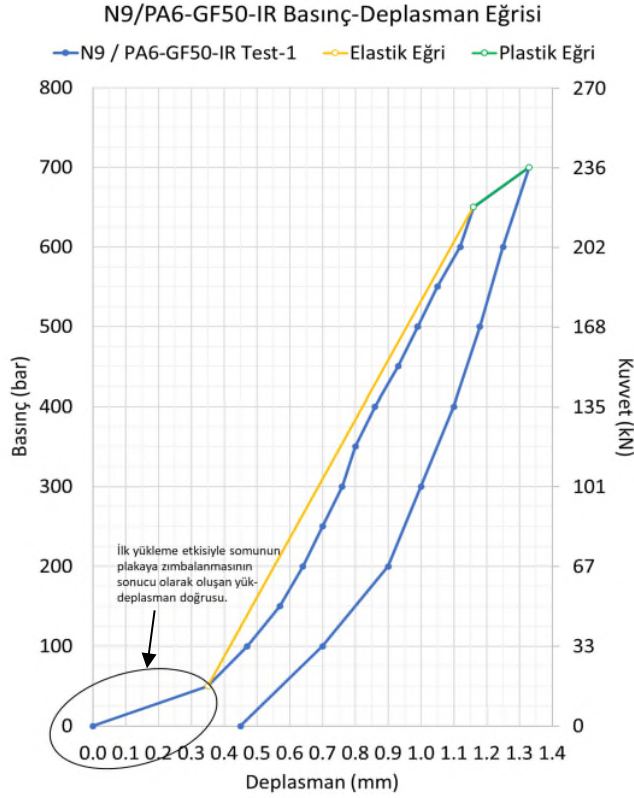
4.2. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bir önceki bölümde çalışılan numunelerin basınç-kuvvet-deplasman grafiği sunulmuştu. Mevcut laboratuvar çalışmalarından sonra ön çalışma aşamasındaki gibi elde edilen sonuçların nümerik ortamda modellenmesi yapılmıştır. SOLIDWORKS aracılığıyla modellenen yeni plaka tasarımının analizleri ANSYS aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. ANSYS analizlerinde malzeme özellikleri atanırken N9/PA6-GF50-IR'den yola çıkılmış ve bu numuneye ait malzeme mukavemet özellikleri modele atanmıştır. N9/PA6-GF50-IR'ye ait malzeme özelliklerinin olduğu form tarafımıza TİSAN A.Ş. tarafından ulaştırılmış ve bu değerlere sadık kalınarak veri girişi yapılmıştır. Modelleme sırasında N9/PA6-GF50-IR'nin laboratuvar testi göz önünde bulundurularak aşağıdaki maddelerde açıklanan hususlarda analiz sırasında veri değişikliğine gidilmiştir.

1. N9/PA6-GF50-IR'ye ait plakanın ilk yüklemeyi karşılamaya başladığı andan itibaren oluşan ve somunun plakaya tam oturmasından kaynaklı olan 0.35mm değerindeki yer değiştirme göz ardı edilerek toplam deplasman $1.33-0.35=0.98\text{mm}$ olarak kabul edilmiştir.
2. Plakanın arka tarafı tamamen ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
3. Somun alanında uygulanan yük N9/PA6-GF50-IR'ye ait ölçülen en yüksek dayanım yükü olan 236kN olarak verilmiştir. Ancak bu yükleme zamana bağımlı bir şekilde kademe kademe arttırılmış ve deney süresi gerçeğe en yakın olacak şekilde yapılmıştır. Analizlerde her bir yük kademesinde 4dk bekleme süresi tanımlanmış ve iki yük kademesi arasındaki artış süresi 10sn olarak belirlenmiştir.
4. Mevcut kriko özelliklerinden kaynaklı olarak en yüksek yükleme mertebelerinde bile plakada herhangi bir çatlama veya yenilme belirtisi gözlenmemiştir. Bu sebepten dolayı plakanın tarafımıza iletilen elastisite modülü değerlerine (13.500 – 14.500MPa) ulaşmamış olduğu kabulü yapılarak elde edilen eğriden geri analiz yoluyla elastisite

modülleri elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak hammadde testlerinde elde edilen ve tarafımıza iletilen föylerde yer alan bu elastisite modülleri, plakanın üretiminden sonra ve plakanın maruz kaldığı yükleme koşulları uyarınca yanılıcı olabilmektedir. Yükleme sonrası geri analiz ile elde edilen elastisite modülü ile föyde yer alan değer arasında yarı yarıya fark olduğu tespit edilmiştir (7341MPa). Hammadde özelinde sunulan elastisite modüllerinin maddenin şekil aldıktan sonra maruz kaldığı yüklemeye göre değiştiği ve yapılan sayısal analizlerde bu değerlerin kullanılması gerekliliği belirlenmiştir.

5. Şekil 4.11’te görüldüğü üzere plaka önce elastik bölgede yükü karşılamış ardından plastik bölgeye doğru eğimini değiştirmiştir. Ancak testler sırasında kullanılan krikonun çıkabildiği basınç değerleri limitli olduğu için plastik eğrinin devamlılığı gözlenememiştir. Bu noktada, şekilde çizildiği gibi iki adet elastisite modülü oluşturulmuştur (sekant ve tanjant). Elastisite modülleri belirlenirken tasarlanan modele ait orta göbek bölgesindeki yükseklik olan 40mm ve somunun yükleme alanı $0,00136m^2$ hesaplarda kullanılmıştır.



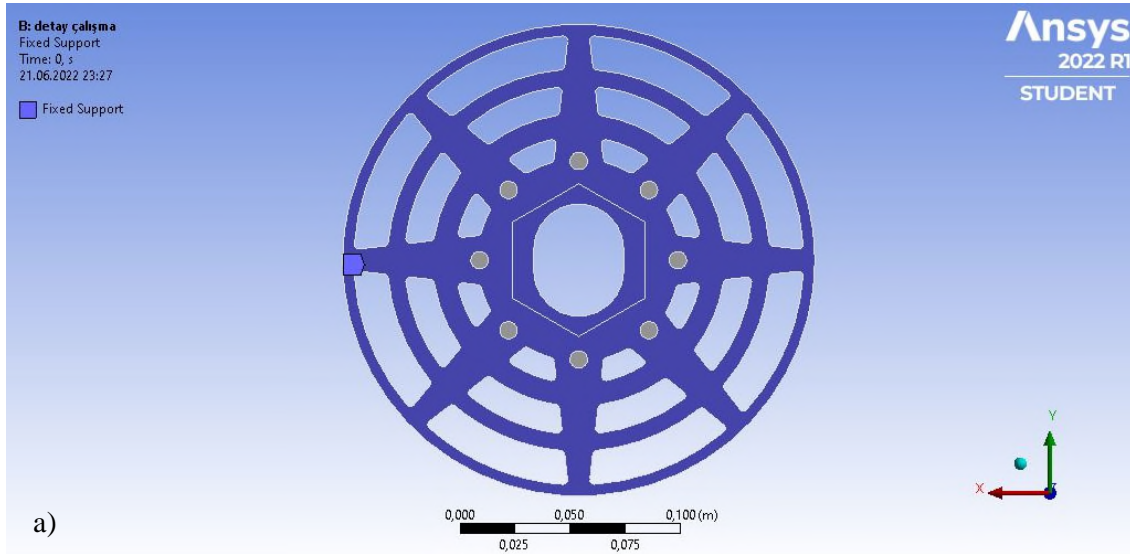
Şekil 4.11: N9/PA6-GF50-IR’ye ait sekant ve tanjant elastisite modüllerinin gösterimi

6. Bir önceki maddede bahsedilen elastisite modüllerinin varlığı nedeniyle ANSYS analizleri Bilinear Isometric Hardening bünye modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada elde edilen elastisite modülleri ve TİSAN A.Ş. tarafından sağlanan diğer bilgiler ANSYS girdi parametresi olarak tanımlanmış ve Tablo 4.3’de sunulmuştur.

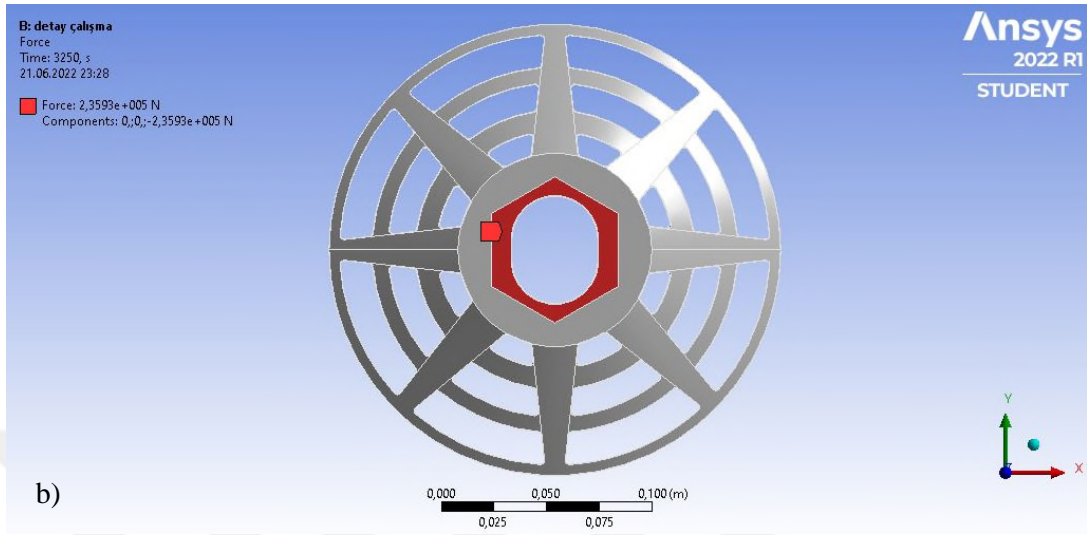
Tablo 4.3: ANSYS programına ait girdi parametreleri.

Properties of Outline Row 4: PA6 %50 Darbe - N9				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,535	g cm ⁻³	
4	Melting Temperature	225	C	
5	Isotropic Elasticity			
6	Derive from	Young's Modu...		
7	Young's Modulus	7341	MPa	
8	Poisson's Ratio	0,35		
9	Bulk Modulus	8,1567E+09	Pa	
10	Shear Modulus	2,7189E+09	Pa	
11	Bilinear Isotropic Hardening			
12	Yield Strength	165	MPa	
13	Tangent Modulus	2919	MPa	
14	Tensile Yield Strength	165	MPa	

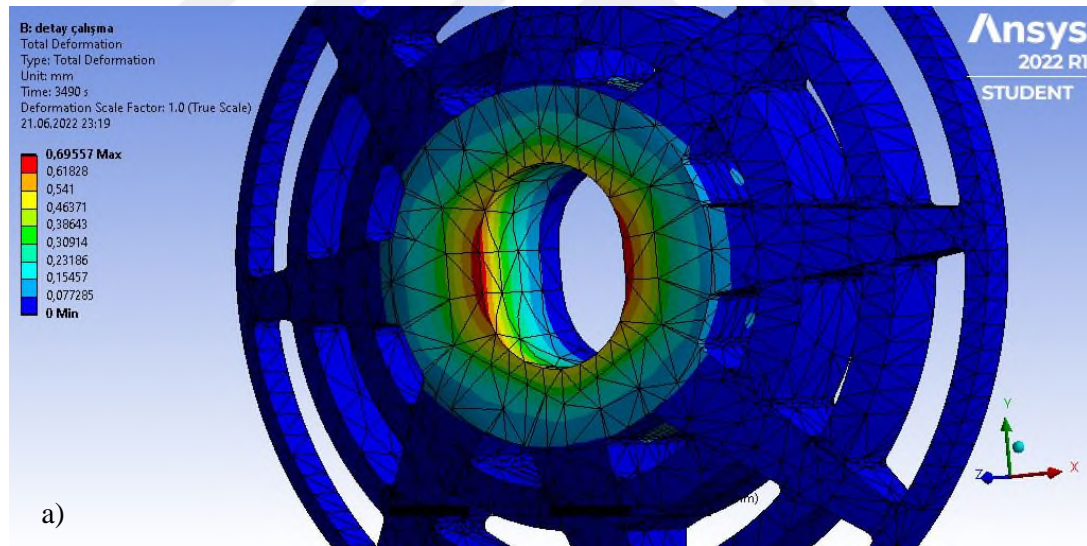
7. Numunenin modellenmesi sırasındaki uygulanan ankastre mesnet ve somun etki alanının modellendiği yükleme bölgesi Şekil 4.12’de, nümerik analizler sonrasında elde edilen deplasman sonuçları ise Şekil 4.13’te sunulmaktadır.



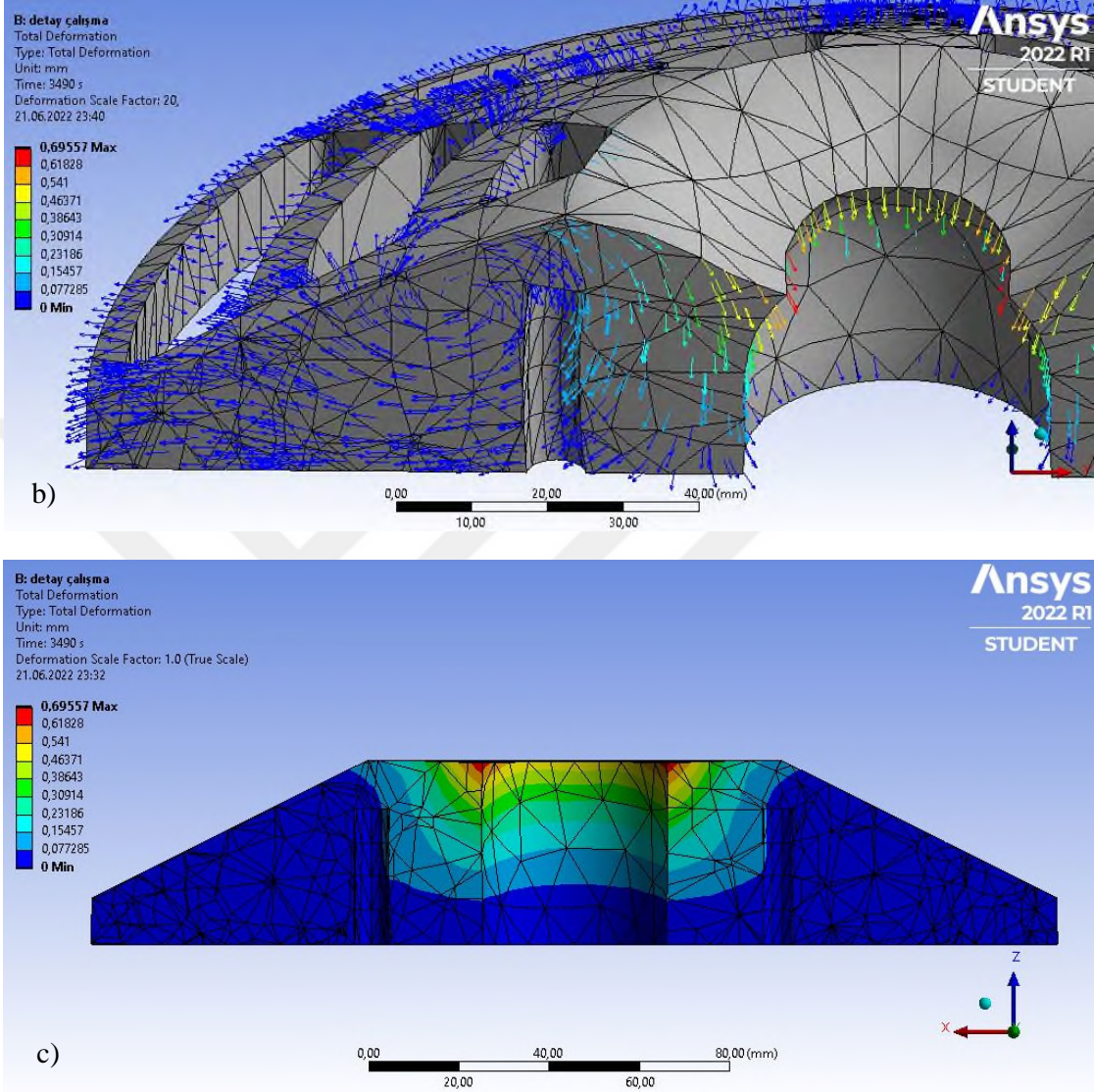
Şekil 4.12: a) N9/PA6-GF50-IR’ye ait modele tanımlanan ankastre mesnet b) Yükleme bölgesi.



Şekil 4.12 (devam): a) N9/PA6-GF50-IR'ye ait modele tanımlanan ankastre mesnet b) Yükün uygulandığı bölge.

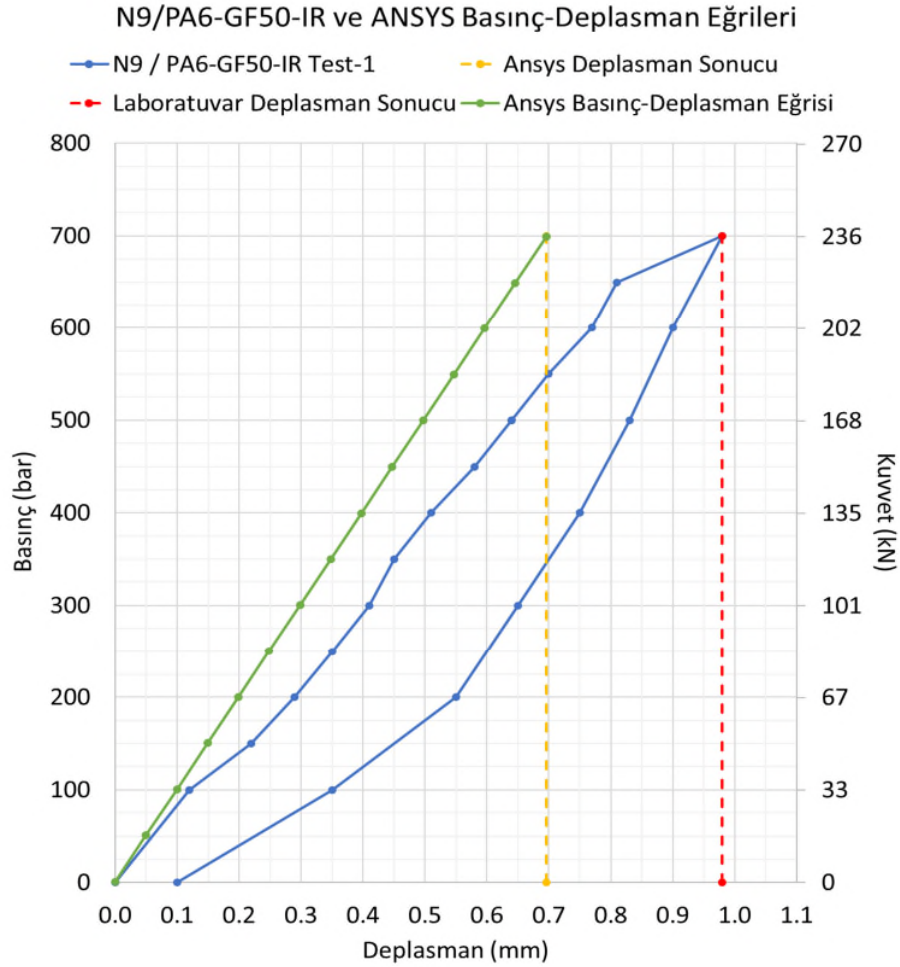


Şekil 4.13: N9/PA6-GF50-IR'ye ait analiz sonucunda a) elde edilen deformasyon (0.696mm) b) yüklemenin numune içindeki vektörel dağılımı c) numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.



Şekil 4.13 (devam): N9/PA6-GF50-IR'ye ait analiz sonucunda a) elde edilen deformasyon (0.696mm) b) yüklemenin numune içindeki vektörel dağılımı c) numune içindeki gözlenen deformasyon yayılımı.

ANSYS analizlerinde gözlenen sonuçlara göre numunenin laboratuvar eğrisi ile ANSYS yükleme eğrisi karşılaştırılmış ve aşağıdaki grafikte sunulmuştur. Bu sonuçlar bir hayli yaklaşık olarak değerlendirilebilir olmakla beraber daha hassas ölçümlerle yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen test sonuçları ile ANSYS programı çıktılarına daha yakın sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.14: Basınç-deplasman ilişkisinin laboratuvar test sonucuyla karşılaştırması.

Yukarıda grafikte sunulan sonuçların karşılaştırılması sırasında ANSYS programından elde edilen grafiğin bi-linear bir davranış gözlenmediği görülmektedir. Programa girilen hammadde özelliklerinden, yenilme dayanımına ait tarafımıza hammadde üreticisi tarafından verilen değerin yüksekliği nedeniyle (Yield Strength 165MPa) belirtilen 236kN yükleme değeriyle plakanın yenilme sürecinde plastik eğriye geçemediği tespit edilmiştir. Ancak yine de laboratuvar yüklemesinde 236kN mertebesinde yenilen numunenin yine bu yükleme sırasında ANSYS'te gösterdiği deformasyon, plaka yenilmese bile deplasman değerini göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında yapılan araştırmaların amacı tünellerde kullanılan elik kaya bulonu plakası yerine mühendislik plastiği kullanılarak üretilmiş bulon plakalarının mukavemet bakımından yeterliğinin incelenmesidir. Bu önerinin olası geçerliliğini sorgulamak amacıyla mevcut literatürde yapılan çalışmalar irdelenmiş ve mevcut çalışmalardan alınan bilgilerden elde edinildiği ölçüde tüneller özelinde detaylı bir çalışmanın yapılmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tez kapsamında incelenmesi planlanan ve benzer bir plastikten üretilmiş plaka rneği yurt dışından ithal edilerek temin edilmiştir. Bu numune üzerinde laboratuvar basınç deneyleri yapılmış ve oldukça düşük dayanımlı olduğu ve ancak birkaç ton yük taşıma kapasitesine sahip olabileceği grlmştir. İthal numuneye ait maksimum dayanım değerisiyle birlikte yenilme mekanizması da gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular göz önünde bulundurularak ithal edilmiş numunenin SOLIDWORKS modeli oluşturulmuş ve ANSYS yazılımı kullanılarak laboratuvarda yapılan basınç testi modellenemeye çalışılmış ve makul derece yakın sonuçlar elde edilmiştir.

İthal numunenin yenilme deneyleri sırasında gözlemlenen davranış ve mevcut plakanın zafiyetleri tespit edilerek elde edilen tüm veriler ışığında dayanımı daha yüksek bir plaka geometrisi için çalışma yapılmıştır. Çeşitli geometrik yaklaşımlar neticesinde elde edilen nihai tasarım Şekil 3.11’de sunulmuştur. Bu tasarımın retilbilmesi için metal kalıp hazırlanmıştır. Yeni tasarım ile plakanın göbek bölgesinin basıncı karşılaması sonrasında yanal yayılma hareketi yapması nedeniyle kolları arasındaki açıyı genişletmeye çalıştığı ve iki kol arasındaki hattan kırılmayacağı senaryo mümkün olduğu kadar engellenmeye çalışılmıştır. Burada geometri ile kullanılan malzemenin çok büyük önemi olduğu dşnlmş ve buna göre yeni malzeme eşitleri işbirlikçi şirketlerin de tavsiyeleri neticesinde oluşturulmuştur. Toplamda 11 adet malzeme opsiyonu kullanılarak, yeni ve tek bir geometri için enjeksiyon makinesinde seri üretim yapılmıştır. Yeni plakanın seri retilimi için kullanılan kalıp, 2021 yılı içinde TÜBİTAK 1002 projesi kapsamında alınan maddi destek ile üretilmiştir.

Elde edilen yeni plaka örneklerinde yine aynı basınç testleri bir veya birden çok kere tekrarlanmış ve sonuçları kayıtlara geirilmştir. Numuneler arasındaki farklılıklar ve elde edilen sonuçlarla birlikte, plaka yenilme mekanizmaları ve dayanımları Bölüm 4’te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarda katkı maddelerinin plastik üzerindeki dayanıma olan etkisi

gözlenmekle birlikte yenilme mekanizmaları ve plakaların gösterdikleri deplasmanlar özelinde de etkiler gözlenmiştir. Bu etkiler ve dayanım limitleri dikkate alındığı zaman, çalışmanın başında belirlenen hedeflere ulaşılmıştır. Mühendislik plastiği ile üretilen plakaların 20 tondan daha yüksek aksenal yük değerine kadar düşük şekil değiştirme değerleri ile dayanabildiği ölçülmüştür. Daha düşük dayanımlı olmakla birlikte yine de 10-20 ton arasında yük taşıyabilen farklı malzeme özelliklerine sahip plakalar da üretilmiştir. Bu plakalar farklı yük mertebelerinde farklı deplasman değerleri vermiştir. Dayanım seviyesi 236kN mertebesine ulaşan N9/PA6-GF50-IR malzemesi, maksimum elde edilen 700bar basınç seviyelerine kadar rahatlıkla ulaşabilmiştir. Bu seviyelerde malzeme gevrek bir malzeme olarak davranmış, hemen hemen hiç deplasman göstermemiştir. Fakat yine de mevcut çelik plakaların dayanım seviyelerine rahatlıkla ulaşmış hatta daha iyi bir performans göstermiştir. Bu malzeme özelinde GF50 ve IR katkılarının etkisi ile dayanım mertebelerinin artırılması hususu Bölüm 4.1’de ifade edilmiştir. Tüm bu yapılan çalışmalar özetinde, özellikle tünel gibi büyük yüklerin olduğu yapılarda kullanılacak olan plakalar için Polyamide hammaddesi önerilmekle birlikte bu hammaddenin cam elyaf (en az %30 oranında) ve/veya dayanım artırıcı katkılarla desteklenmesi önerilmektedir. 11 Numune arasında yaklaşık 24 ton dayanım seviyesi göz önünde bulundurulduğunda dayanım açısından N9/PA6-GF50-IR; 20 ton dayanım seviyesi göz önünde bulundurulup biraz daha deplasmana müsaade edilebilecek durumlarda ise N7/PA66-GF35 numunelerinin kullanılması önerilmektedir.

Proje özelinde, maliyetlerin göz önünde bulundurulması durumunda çok ciddi fiyat değişiklikleri yaratılabilmekte; ihtiyaç olan dayanım ve deplasman mertebeleri sağlandığı takdirde ise birçok plastik plaka opsiyonu ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin kilogram başına fiyatlarının sunulduğu veriler Tablo 5.1’de sunulmaktadır. Güncel piyasa fiyatları baz alındığı zaman çelik plakalar için bir bombeli IBO plaka (200mm x 200mm x 15mm) fiyatı 1,14\$/kg’dır (Temmuz 2022). Ancak bir IBO bulon plakası 4,8kg olup adet fiyatı 96₺ (17,5\$=1₺ kabulüyle) olmaktadır. Örnek verilecek olursak, yoğunluğu 1,52gr/cm³ olan N9/PA6-GF50-IR ile üretilmiş bir adet numune 870gr ağırlığa sahiptir. Bu durumda bir adet plastik plaka için ortalama fiyat yaklaşık 55₺ olmaktadır. Bu fiyat, daha düşük dayanım mertebelerinde tercih edilebilecek olan daha uygun fiyatlı ve mühendislik parametreleri daha düşük plastiklerde daha da düşecektir.

Tablo 5.1: Çalışma kapsamında kullanılan 11 numuneye ait fiyat tablosu (2020 son çeyreği ile 2022 ilk çeyreği arasında muhtelif dönemlerde satın alımlar gerçekleşmiştir).

Numune No	İsimlendirme	Fiyat (\$/kg)
Numune 1	PP	1,90
Numune 2	HDPE(O)	1,50
Numune 3	HDPE(RC)	1,20
Numune 4	PA6	3,15
Numune 5	PA6-R30	2,66
Numune 6	PA66-GF30	5,50
Numune 7	PA66-GF35	5,70
Numune 8	PA66-GF30- IR	5,40
Numune 9	PA6-GF50-IR	3,60
Numune 10	PA6-UNR-IR	4,47
Numune 11	PP-LGF30	3,50

Çok kaba bir fiyat analizi gerçekleştirilecek olursak aşağıdaki örnek yerinde bir karşılaştırma olacaktır:

Raunt boyu 1,5m olan, B3 sınıfı kayada açılan bir tünelde, bir rauntta kullanılan IBO tipi bulon adedi 22 tane olsun. 500m ilerlemede 1,5m'lik iksa yerleştirilmesiyle raunt sayısı 333 (500/1,5) olarak bulunmaktadır. 333 raunt x 22 bulon = 7326 bulon sayısı demektir. Kısaca, B3 kaya sınıfında 500m ilerlemek için yaklaşık 7400 tane bulon kullanılabilir. 3km uzunluğunda bir tünel tüpü için bulon sayısı 44.400, çift tüp için ise 88.800 olarak verilebilir. 3km'lik çift tüp tünel için yaklaşık 90.000 tane çelik plaka kullanılması durumu ile yukarıda verilen fiyatlarla 40€'lik maliyeti olan malzemenin kullanılması arasındaki fiyat farkı oluşturulduğunda, IBO bulon için plastik bulon plakası kullanılması 3.600.000€ kâr anlamına gelmektedir.

Proje boyunca elde edilen tüm sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Tüneller özelinde başlayan bu çalışmanın ilerlemesi ile görülmüştür ki, sadece tünelde değil; bu tarz plakaların kullanıldığı birçok stabilize ve şev desteği amaçlı kullanılan çivi veya bulon uygulamalarının hepsinde plastik temelli üretilen katkılı veya katkısız plakalar imalat aşamasında kullanılabilir potansiyelde yer almaktadırlar.
- Plakaların proje bazlı kullanım detayı proje içinde gereksinim duyulan maksimum dayanım ve deplasman değerlerine göre değişkenlik gösterebilir. Aynı şekilde plakanın geometrik olarak gelişimi veya değişimi de yine mümkündür.

- Bu çalışmada, ilk aşamada elimizde bulunan örümcek ağı formu plaka baz alınarak çalışmalar bu plakanın geliştirilmesi ve iyileştirilmesi özelinde gerçekleştirilmiş ve bu tasarımsal yaklaşımdan uzaklaşmamıştır.
- Farklı geometrik opsiyonlar yine de değerlendirilmiş olup, plakanın yükleme altındaki gerilme durumu ve bunun neticesinde göstereceği ezilme davranışı dikkate alınarak yuvarlak tasarım genel kapsamda daha makul görülmüş ve tasarım bu şekilde nihayetlenmiştir.
- Plastik plakanın göbek bölgesinin (somunun zımbalandığı bölge) güçlendirilmesi esas olarak yük taşıma kapasitesini arttıran unsur olarak düşünülmüştür. Bu tarz tasarımların, başka araştırmacılar veya AR-GE grupları tarafından yapılması durumunda da somun alanının kalınlaştırılarak veya başka mühendislik yöntemleriyle güçlendirilerek yapılması önerilmektedir.
- Plastik esaslı üretilen plakaların, tünellerde dahi kullanılan çelik bulon plakalarının dayanım mertebesine ulaştığı, hatta üstüne çıktığı bile gözlenmiştir. Bu noktada plakanın bulon donatısından önce yenilmesi gerekliliği göz önünde bulundurularak tasarım, hammadde ve katkı maddesi çeşitlendirilebilir ve daha optimum hallere getirilebilir. Bu çalışma özelinde plastiklerin çelikten çok daha uygun fiyatlarda üretilip temin edilebildiği sonucu elde edilmiş ve mühendislik kullanımlarında ciddi maliyet kazanımlarını getirdiği ortaya konulmuştur.
- Elde edilen plastik malzemenin suya karşı direnci vardır. Tünel kazılarında sıklıkla karşılaşılan suyun varlığı herhangi bir güç kaybına neden olmamakta ve plastik malzemeye zarar vermemektedir. Hatta, çelik plakalardaki korozyon oluşumu ile plakanın görevini yapamaz duruma gelmesi senaryosu tamamen ortadan kalkmaktadır.
- Plastik plakalar ağırlık olarak çelik plakaya göre çok daha hafif olduklarından dolayı sahada uygulama sırasında çalışma kolaylığı sağlamak ve köşeli-keskin noktalarının olmamasından dolayı iş güvenliği ve sağlığı unsurları için daha olumlu özellikler barındırmaktadır.
- Çalışma kapsamında yapılan laboratuvar deneyi çalışmaları ve nümerik analizler eşleştirilebilmiş ve deneylerin güvenilirliği konusunda yeterli veri oluşturulmuştur. Fiziksel olarak gözlenen yenilmelere neden olan plaka içinde oluşan iç kuvvetlerin dağılımları sayısal olarak ANSYS üzerinde gözlenmiş ve sunulmuştur.

Bu çalışmada karşılaşılan ve sonraki çalışmalarda tamamlanabilecek olan problemler ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Bu veya benzer konular hakkında yazılmış şartname/yönetmelikler dünya genelinde çok sınırlı sayıda olmakla birlikte bu plakalar hakkında özel bir tasarım esası ve matematiksel ifadeler bulunmamaktadır. Bu konu hakkında daha detaylı plaka çalışmalarının gerçekleştirilmesi akabinde literatüre katkı sağlanabilir.
- Plakanın boyutlandırılması (yükseklik, kalınlık, çap vb.) özelinde daha detaylı bir çalışma daha geniş bir çalışma süresinde gerçekleştirilebilir.
- Plaka için en uygun olabilecek deplasman davranışıyla birlikte dayanımı da sunan hammadde + katkı maddesi ikilisi için daha geniş kapsamlı çalışmalar yapılabilir ve özel karışım formülleri oluşturulabilir.
- Plaka için malzeme karışımı oluşturulurken tek çeşit elyaf yerine hibrit elyaf uygulaması tercih edilebilir (kısa cam elyaf + uzun cam elyaf karışımı gibi).
- Plakaların şev stabilitesi veya şev düzenleme problemlerinde kullanımlarıyla alakalı ek çalışmalar gerçekleştirilebilir ve uygulanacak mühendislik problemine göre birden çok hazır tasarımlar oluşturulabilir.
- Plakanın üretim aşamasındaki çelik plakaya kıyasla karşılaşılan zorluklar (kürleme, enjeksiyon makinesindeki üretim hızı, elektrik ve işçi giderleri vb.) daha çok optimize edilebilir ve üretim aşamasının daha pratik olabilmesi adına planlamalar yapılabilir. Plakaların özellikle tüneller için kullanılması durumunda ciddi sayıda plaka üretimi gerekliliği aşıkardır. Seri üretim hızı bu noktada önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problem özelinde kalıp makineleri büyütülebilir, 2 veya 3 gözlü makinelerin kullanımına geçilebilir, kalıp makinesi kalitesi artırılabilir veya işçi gücünün azaltılacağı üretim optimizasyonları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akın, M., 2019, *Killi zeminlerde NATM ile açılan tünellerin deformasyon tahmini*, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Amjadi, M., ve Fatemi, A., 2020, Tensile behavior of high-density polyethylene including the effect of processing technique, thickness, temperature and strain rate, *Polymers*, 12 (9), 1857.
- Awad, A.H., Gamasy, R.E., El Wahab, A.A. ve Abdellif, M.H., 2019, Mechanical and physical properties of PP and HDPE, *Engineering Science*, 4 (2), 34-42.
- British Standard (BS) 7861-1, 2007, *Strata reinforcement support system components used in coal mines – Part1: Specification for rockbolting*, 2nd ed., BSI, İngiltere, ISBN: 978-0-580-58550-0.
- Dryzek, E., Wrobel M. ve Juszynska-Galazka E., 2017, Free-volume and tensile properties of glass fibre reinforced polyamide6 composites, *Proc. 12th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry*, 28 Ağustos – 1 Eylül 2017 Lublin, Polonya, 132 (5), 1501-1505.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, *Karayol Teknik Şartnamesi*, Kısım 350.
- Kaymakçı, O., 2021, *Development of new generation, high performance polypropylene composites*, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Kotake, N., ve Sato, E., 2021, Bearing capacity of a flexible plastic plate for soil nailing, *International journal of physical modelling in geotechnics*, 21 (1), 26-39.
- Kömürlü, E., Kesimal, A. ve Aksoy, C.O., 2017, Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin dolgulu kaya saptaması malzemesi olarak kullanılabilirliği, *Yerbilimleri*, 38 (3), 241-258.
- Lazarte, C.A, Robinson, H., Gomez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. ve Berg, R., 2015, *Soil nail walls reference manual*, 7th ed., Washington DC, Rapor No: FHWA-NHI-14-007.

- Li, C.C., 2017, *Rockbolting – principles and applications*, Butterworth-Heinemann - Elsevier, ISBN: 978-0-12-804401-8.
- Maddah, H.A., 2016, Polypropylene as a promising plastic: A review, *American Journal of Polymer Science*, 6 (1), 1-11.
- Polat, D., 2010, *NATM metodu kullanılarak tünel tasarımı ve modellenmesi*, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Singh, B. ve Goel, R.K., 2006, *Tunneling in weak rocks*, Vol 5 1th ed., Elsevier, Londra, ISBN: 0-080-44987-5.
- Süzen, E., 2009, *4.Levent – Ayazağa (İstanbul) metrosu tünelindeki kazı ve sağlamlaştırma uygulamaları*, Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şentürk, C.H., 2016, Ordu Çevreyolu Projesi Viyadükler ve Tüneller, *Yer Mühendisliği*, 3 (7), 38-41.
- Williams, K.M., 1998, *Design, analysis and testing of non metallic rockbolt bearing plates*, Doktora, Sheffield Hallam Üniversitesi.