

KAYA BULONU PLAKALARINDA MÜHENDİSLİK PLASTİĞİ UYGULAMALARI: DENEYSEL ve SAYISAL İNCELEMELER

THE USE OF ENGINEERING PLASTIC IN ROCK BOLT PLATES: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS

Baturalp ŞENTÜRK¹, M. Kubilay KELEŞOĞLU², Savaş ERDEM³,
M. Gökhan KORKMAZ⁴, Mustafa ARMAĞAN⁴, Gökhan ÜSTÜNYER⁴, Rifat KOÇ⁵

ÖZET

Bu çalışma kapsamında tünel uygulamalarının önemli bir parçası olan kaya bulon imalatında kullanılan çelik plaka yerine, alternatif olarak kullanılabilecek ve mühendislik plastiğinden üretilen plakaların tasarlanarak 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 özelliklere sahip 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 gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dayanım ve sünme verileri farklı plastik malzemeler için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ölçülen basınç değerlerine göre, güçlendirilmiş poliamid içerikli plastik plakaların 20 ila 25 ton arasında yük değerlerine kadar ulaşabildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ansys, kaya bulonları, mühendislik plastiği, plastik plaka, solidworks

¹ İnşaat Mühendisi, Fugro, baturalpsenturk@gmail.com (Sorumlu yazar) {Yazışma yapılacak yazar}

² Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, kelesoglu@iuc.edu.tr

³ Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, savas.erdem@iuc.edu.tr

⁴ Teknofor İnşaat Taahhüt Ltd. Şti., info@teknofor.com

⁵ Tisan Mühendislik Plastikleri San. Tic. Ltd. Şti., tisan@tisan.com.tr

ABSTRACT

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.

Keywords: *ansys, engineering plastic, plastic plate, rockbolt, solidworks*

1. GİRİŞ

Kaya bulonları özellikle tünel inşaatının 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 bildiri 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.

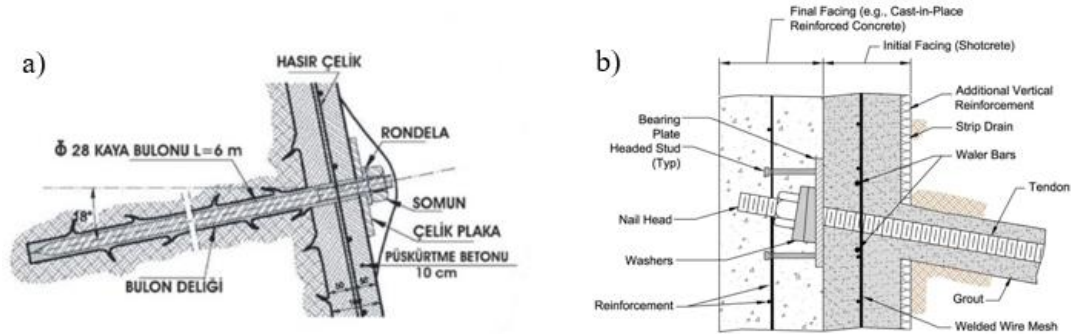
Kaya bulonları tünel yapıları için bir numaralı destek sistemidir. Bulonlar için aranan kapasite, bulon üzerinde etkili olan kuvvet ile ilgilidir. Bu kuvvet sayısal analizler sonucu elde edilmektedir. Bulon boyu ise, yapılan analizde hesaplanan plastik bölge çapı ile belirlenmektedir. Bulonların, tünel çevresindeki bu yenilme alanının dışına uzanması istenmektedir. Analizlerde bulon uzunluğu, aralığı ve çapı değiştirilerek optimum bulon yerleşimi belirlenmektedir.



Şekil 1. Kaya bulonları

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’de klasik bir kaya bulonunun 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. Kaya Bulonu Uygulaması ve Düzenliği a) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), 2013 b) FHWA Soil Nail Walls Reference Manual, 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

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

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 görülme bile, bulon veya zemin çivisi plakasının tüneller haricinde kullanılmaya çalışıldığı ve metal olmayan bir malzemeden 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.

Williams’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.

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.

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 üretilcek plakalar, çelik plakaya yakın performans gösterebilmekte; fakat burada plakadan beklenen yük hedefleri ve plakaya ait mühendislik parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır.

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

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Mevcut Plaka Çalışmaları

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 4).



Şekil 4. Singapur'dan getirilen örnek numune

Numunenin High Density Polyethylene (HDPE) malzemeden üretildiği ifade edilmiş ve malzemeye ait mukavemet testleri ilgili şirket tarafından daha önce yapıp sonuçları bizimle paylaşılmıştır (Tablo 1).

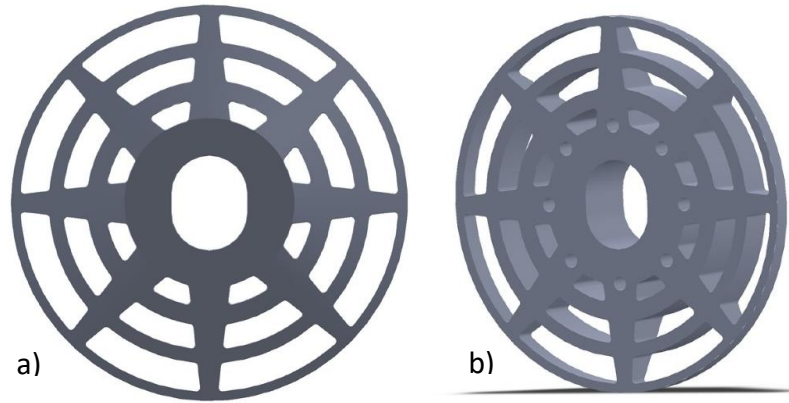
Tablo 1. Malzemeye ait test sonuçları

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 (127MPa). 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.

2.1. Yeni Plaka Çalışmaları

Yeni plaka çalışmaları kapsamında ilk olarak plakanın geometrisine odaklanılmıştır. 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 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Yeni plakanın SOLIDWORKS modeline ait a) ön görünümü b) arka görünümü

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 Polyetylene, Polypropylene ve Polyamide olarak seçilmiştir. Bu ana malzemelerin yanı sıra plastiğin mekanik davranışlarının istenilen yönde gelişmesi adına gerekli katkı ve üretim detayları da değerlendirme altına alınmıştır. Bu hedef doğrultusunda %50 cam elyaf ve darbe dayanımı katkılı bir numune daha üretilmiştir. Üretilen numune listesi Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Üretilen numunelerin listesi ve özellikleri

Ürün	Kullanılan Malzeme	İçerik	Katkı Oranı
PP	PP (Polypropylene)	%100 PP	-
HDPE(O)	HDPE (High Density Polyethylene)	Orijinal %100 HDPE	-
HDPE(RC)	HDPE (High Density Polyethylene)	Geri Dönüştürülmüş %100 HDPE	-
PA6	PA6 (Polyamide6)	%100 Polyamide	-
PA6-GF50-IR	PA6 (Polyamide6) + (%50-Cam Elyaf) + Darbe Dayanımlı	Polyamide + Cam Elyaf + Darbe Dayanımlı	%50 Cam Elyaf

Numunelerin üretimleri sırasında malzemenin gerekliliği ve hammadde firmalarının önerileri doğrultusunda kütleme işlemleri yapılmış üretim hattında gerekli tüm detaylara önem verilmiştir. Üretimde kullanılan Haitan marka enjeksiyon makinesi, TÜBİTAK’ın 1002 kodlu Hızlı Destek Programı kapsamında sağladığı destek ile üretilmiş ve plaka geometrisine göre kalıp oluşturulmuştur. Plakaların arkasında bulunan ve Şekil 5b’de de görünen 8 adet delik, plastiğin üretim sonrasında hızlı bir şekilde soğuyup şekil bozuklukları yaşamaması için tasarlanmıştır. Üretilen numunelerden daha sonra yükleme grafikleri de paylaşılacak olan HDPE(RC) ve PA6-GF50-IR numunelerinin görselleri Şekil 6’da sunulmaktadır.

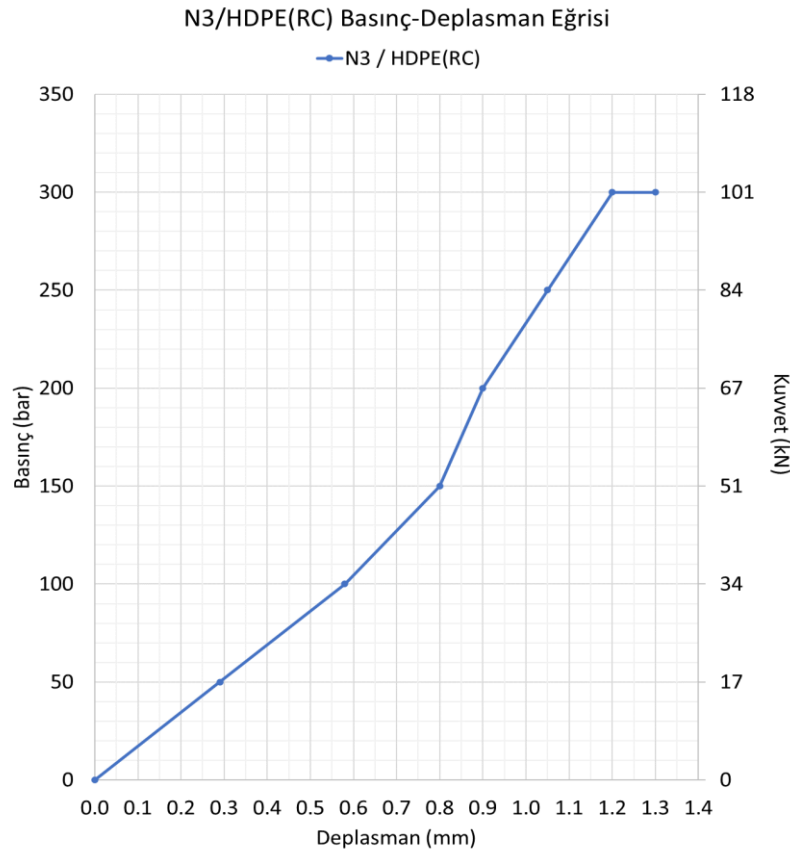
HDPE(RC)

PA6-GF50-IR



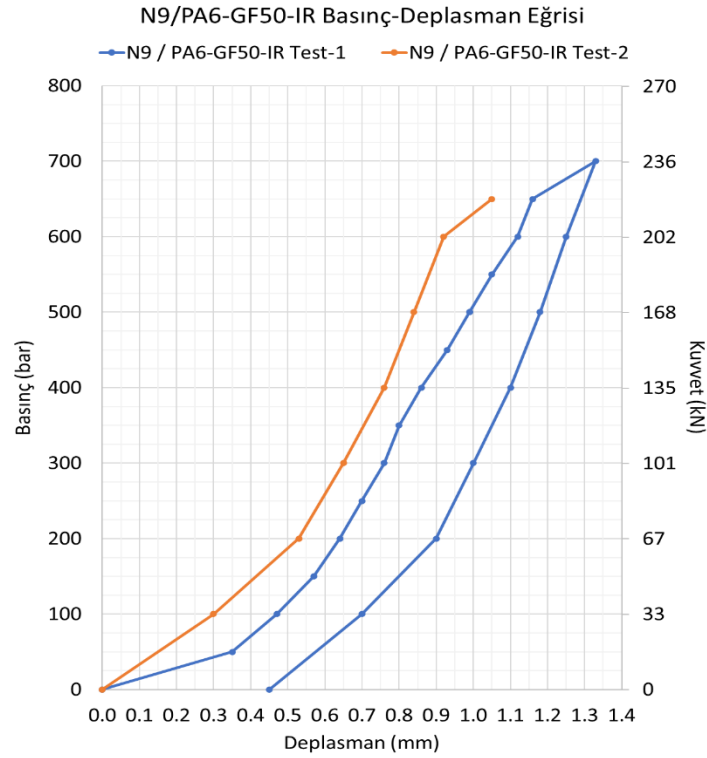
Şekil 6. Üretim sonrası örnek numuneye ait görsel

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 katkılar değerlendirme altına alınmıştır. Katkılarının ilk PA6 üzerinde uygulanması ile bir numune daha hazırlanmış ve HDPE(RC) ile bu numunelerde komparatörlü testler gerçekleştirilmiştir. Komparatörlü testi yapılan numuneler hakkında yorumlara grafiklerin altında yer verilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 7. HDPE(RC) basınç-deplasman grafiği

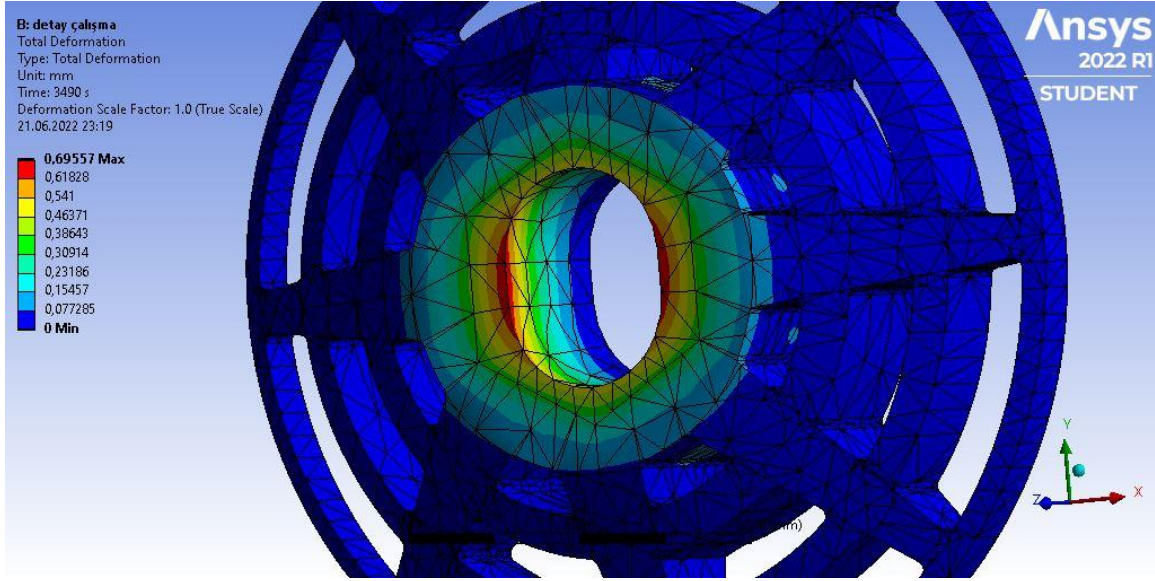
HDPE(RC) malzemesi geri dönüştürülmüş bir yüksek yoğunluklu polietilen malzemedir. Malzemenin davranışı grafik üzerinde incelendiği zaman yüksek seviyelerde sünme davranışı gösteriyor olmasına karşın dayanım seviyeleri beklenen seviyelere (250kN civarı) çıkamamıştır. Yükleme altındaki grafiğin oluşumu 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 krio üzerinden basınç artırımı yapılmasına rağmen malzeme yenildiği için grafikte bir değişiklik gözlenmemiştir. HDPE(RC) bu proje kapsamında yeterli mukavemet özelliklerini göstermemiş olmasına karşın malzemelerin karşılaştırılmasında bir mertebe belirtmesi adına grafiklere eklenmiştir.



Şekil 8. 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 düşümlere 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 sönmleme biçimleri çok farklıdır. Kompozitler malzemelerde plastik deformasyona uğrama yeteneği genelde sınırlı olduğu için darbe enerjisini büyük kırılma bölgeleri oluşturarak sönmeler ve bunun neticesinde de kompozitin dayanım ve sertliğinde azalmalar meydana gelir. Bu kapsamda, darbe dayanımı katkı (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.

ANSYS analizlerinde PA6-GF50-IR için analiz yapılmış ve bu numuneye ait malzeme mukavemet özellikleri modele atanmıştır. Laboratuvar testi eğrisinde gözlemlendiği gibi numunenin dayanım seviyesi 236kN olarak okunmuştur. Bu değer ANSYS analizi sırasında modele somun alanından etki ettirilmiştir. PA6-GF50-IR'ye ait malzeme özellikleri (TİSAN A.Ş.) esas alınarak malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Modelleme sırasında PA6-GF50-IR'nin laboratuvar testi göz önünde bulundurularak elastisite modülü değerleri yeniden değerlendirilmiş ve mukavemet özelliği burada malzeme formundan farklı kullanılmıştır. Şekil 9'da ANSYS analizi sonucu elde edilen deplasman değeri ve somunun zımbalanması nedeniyle oluşan gerilme etki alanı gözlemlenebilmektedir.



Şekil 9. N9/PA6-GF50-IR'ye ait analiz sonucunda elde edilen deformasyon (0.696mm)

Şekil 8’de gözlemlendiği gibi Test-1’in ilk yüklenmesi sırasında eğri yatay hareket etmiş ve bu sırada somunun plakaya oturduğu düşünülmüştür. Bu vesile ile aslında 1.3mm mertebesinde okunan deplasman değeri mutlak bir değer olarak değerlendirildiğinde 0.95mm olarak kabul edilmiştir. Şekil 9’da sunulan ANSYS analiz sonucundan elde edilen deplasman değeri ise 0.70mm olarak bulunmuştur. DeneySEL ve sayısal incelemeler sonucu elde edilen yük dağıtım davranışı ve nihai deplasman değerleri her iki yöntemde de birbirine hayli yakın bulunmuştur.

3. SONUÇLAR

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. Çalışma boyunca elde edilen tüm sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- 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 nihayetlendirilmiştir.
- 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 sağlamakta 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.
- 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 eksenel 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 üretilebilmiştir. Bu plakalar farklı yük mertebelerinde farklı deplasman değerleri vermiştir.
- Dayanım seviyesi 236kN mertebesine ulaşan 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.
- Tüm bu yapılan çalışmalar özetinde, özellikle tünel gibi büyük yüklerin olduğu yapılarda kullanılacak olan plakalar için Polyamide hammadde önerilmekle birlikte bu hammaddenin cam elyaf (en az %30 oranında) ve/veya dayanım artırıcı katkılarla desteklenmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

- 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.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, *Karayol Teknik Şartnamesi*, Kısım 350.
- 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.
- Li, C.C., 2017, *Rockbolting – principles and applications*, Butterworth-Heinemann - Elsevier, ISBN: 978-0-12-804401-8.
- Williams, K.M., 1998, Design, analysis and testing of non metallic rockbolt bearing plates, Doktora, Sheffield Hallam Üniversitesi.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
BS	British Standard (İngiliz Standartı)
FEM	Finite Element Model (Sonlu Elemanlar Modeli)
FHWA	Federal Highway Administration (Amerika Birleşik Devletleri Standartı)
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
O	Original (Orijinal)
PA	Polyamide (Poliamid)
PP	Polypropylene (Polipropilen)
RC	Recycle (Geri dönüştürülmüş)

