



Modüler kompozit enerji direklerinde farklı bağlantı tiplerinin çalışılması ve yekpare betonarme enerji direği ile karşılaştırılması

Study of different connection types in modular composite energy poles and comparison with monolithic reinforced concrete energy poles

Mustafa AKOĞLU^{1*}, Babür DELİKTAS¹, Okan OTUZ², Ayşe POLAT¹

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
mustafa.akoglu05@gmail.com, bdeliktas@uludag.edu.tr, aysepolat@uludag.edu.tr

²Mercedes Benz Türk, İstanbul, Türkiye.
okan.otuz@daimlertruck.com

Geliş Tarihi/Received: 01.02.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 05.09.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.08.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.62362
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada enerji direklerinin yapımında standart olarak kullanılan betonarme direklerin yerine daha hafif ve maliyeti az olan kompozit ve termoplastik malzeme kullanıldı. Montaj ve kullanım kolaylığı açısından daha avantajlı olduğu için modüler tasarım yapıldı. Bu çalışmada modüler olarak yapılan kompozit enerji direklerinin modülleri arasındaki bağlantı elemanları çalışıldı. Üç farklı bağlantı tipi ve bu bağlantı tiplerinin baz alındığı analizler yapıldı. Yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan maksimum deplasman ve maksimum gerilme sonuçları incelendi ve karşılaştırıldı. Çalışmada kullanılan kompozit direklerin analizi sonlu elemanlar yöntemi gerçekleştirilip, analizler Abaqus programı ile çalıştırıldı.

Anahtar kelimeler: Sonlu Elemanlar, Kompozit Malzeme, Bağlantı Elemanları.

Abstract

In this study, lighter and less costly composite and thermoplastic materials were used instead of reinforced concrete poles used as standard in the construction of energy poles. A modular design was made as it is more advantageous in terms of assembly and ease of use. In this study, the connection elements between the modules of the modular composite energy poles were studied. Three different connection types and analyzes based on these connection types were performed. The results of the maximum displacement and maximum stress that emerged as a result of the analyzes were examined and compared. The analysis of the composite poles used in the study was carried out by the finite element method and the analyzes were run with the Abaqus program.

Keywords: Finite Elements, Composite Materials, Connectors.

1 Giriş

Ahşap, çelik ve beton gibi geleneksel malzemeler, elektrik iletim ve dağıtım direklerinin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ahşap direklerin kirliliği, kısa ömür beklentileri ve çeşitli çevresel kaygılar, hidroelektrik hizmet şirketlerini uygun maliyetli bir alternatif aramaya teşvik etmiştir. Ahşap direkler sürekli olarak hava koşullarına, mantarlara, ağaçkakanlara vb. maruz kalır ve bu da zamanla yük taşıma kapasitelerinin çok önemli bir şekilde bozulmasına neden olmaktadır. Ahşap direklerin kullanım ömrü yaklaşık 20 yıldır (Baghmishes ve ark., 2021).

Bu nedenlerden dolayı, ahşap direklerin enerji hatlarında kullanım oranı yıllar geçtikçe azalmış ve yerine beton veya betonarme direkler kullanılmaya başlanmıştır. Enerji hatlarında kullanılan beton direklerde ise montaj maliyetlerini önemli ölçüde artıran ağırlıklar ve davranışını etkileyen çevresel etkilerden dolayı oluşan kimyasal etkiler önemli sorunlar oluşturmaktadır. Örneğin korozyona maruz kalan beton direklerin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilenmektedir (Polyzois ve ark., 1999).

Kompozit direkler de ise yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyona karşı direncin yüksek olması, diğer direk çeşitlerine göre ise daha düşük kurulum ve daha düşük bakım maliyetine sahip olması gibi avantajlar mevcuttur. Bu özelliklerinden

dolayı elyaf takviyeli polimerin (FRP) enerji hatlarında kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Saboori ve ark., 2011). Fiberle Güçlendirilmiş Polimer (FRP) direkleri 1960'lı yıllarda Hawaii'de Maui adasında kullanılmıştır. Ortalama 45 yıl kullanıldıktan sonra bazı direklerde deformasyonlar olduğu tespit edilmiştir. Bu meydana gelen deformasyonların direklerin yapısı ile ilgili değil UV ışınlarına karşı yeterli korumaya sahip olmadıkları için zarar gördükleri belirtilmiştir (Sarmiento ve ark., 2006).

Kompozit direk üreticileri, direklerini UV ışınlarının zararlı etkilerinden korumak için kompozit direk üzerine kaplama uygulayarak sorunu çözmeye çalışmışlardır. Daha sonrasında poliüretan reçinelerdeki gelişmeler sayesinde kompozit direklerde iyileşmeler gerçekleştiği ve kullanım ömrü 80 yıla kadar yaklaştığı görülmektedir.

İlk günlerden beri kompozit direk teknolojisinde malzeme, tasarım ve imalat alanlarında birçok önemli ilerleme kaydedilmiştir. Daha güçlü, daha dayanıklı malzemeler geliştirilmiş, modüler tasarımlar çok daha fazla kutup seçeneği sunarak kompozit direklerin çok daha büyük güç aktarım yapılarında kullanılmasına imkân vermiş, direk üretim oranları artmış ve genel direk kalitesi iyileştirilmiştir (Sarmiento ve diğ., 2006).

İbrahim ve arkadaşlarının (2000) yaptıkları çalışmada cam takviyeli kompozitler ile ahşaptan üretilen enerji direklerin

*Yazışılan yazar/Corresponding author

karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 6.1m (20 ft) ve 18.3m (60 ft) uzunluğunda iki farklı cam fiber takviyeli kompozit için eğilme testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda kompozit direklerle ahşap direklerin nihai yüklerinin eşdeğer olduğu gözlemlenmiştir dolayısıyla kompozit direklerin yük kapasitesi-ağırlık açısından da ahşap direklere karşı önemli bir avantaj sağladığı görülmüştür.

Girum Urgessa ve Sara Mohamadi (2016) çeşitli özelliklerin FRP direklerinin genel yapısal tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için ABAQUS'de konik FRP direklerinin sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu özellikler arasında geometrik özellikler, fiber oryantasyonu, koniklik oranı, katman sayısı, lamina kalınlığı ve enine yükün konumu yer almıştır.

Bu çalışma kapsamında kompozit direklerin enerji hatlarında uygulanabilir olduğunu ve kompozit direklerin geliştirilebilir olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada kullanılan model tasarımı şu anda kullanılabilecek bir tasarımdır ve bu çalışmada da konik yapıda çalışılmıştır.

Kompozit direklerin nakliye ve kurulum avantajlarını geliştirmek için modüler kompozit direk çalışılabilir. Ayrıca tek bir parça olarak üretilen direklerde herhangi bir hasar olması durumunda direği tamamen değiştirilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı üretilen direklerin modüler olması durumunda sadece hasar gören modülü değiştirmemiz yeterli olacağından bu çalışmada yapılacak kompozit direkler modüler olarak tasarlandı.

Miguel Sarmento and Brian Lacoursiere (2006) yaptıkları çalışmada kompozit direkleri modüler olarak tasarlamıştır. Bu modüler direkler 8 modül olarak tasarlanmıştır.

Tasarladıkları modüler kompozit direkler için üretim yöntemlerini filament winding ve pultrüzyon olarak belirlemişler. Modüler olarak tasarlanan kompozit direklerin modülleri arasındaki bağlantıyı da sıkı geçme yapacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda sonlu elemanlar programları ile veya fiziksel bir test sonucu ile modüler kompozit direğin davranışının incelenmesine rastlanmamıştır.

Modüler olarak tasarlanmış kompozitlerin tasarım kriterlerinin daha iyi belirlenebilmesi ve davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için sonlu elemanlar çatısı altında doğru ve güvenilir sayısal modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Modeller tasarımlarda en önemli noktalarından biri ise bağlantı detaylarıdır. Bu yapıların gerçekçi simülasyonları, bağlantı noktalarının sayısal modelde doğru tanıtılmasına ve uygun temas algoritmalarının kullanılmasına bağlıdır. Bu nedenle çalışma kapsamında farklı modüler yapılar sahip kompozit direklerin ABAQUS sonlu elemanlar çatısında sayısal modelleri bağlantı detayları ve uygun temas algoritmaları tanımlanarak yük taşıma kapasiteleri ve deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kompozit direklerin boyutlandırılması için Enton Test Tutanağı ve Santrifüj Direkleri Teknik Şartnamesinden faydalanılmış ve belirlenen modeller betonarme direkten yola çıkarak belirlenmiştir.

Kompozit direk tasarımında modüller arasında bağlantı için üç farklı bağlantı tipinin sayısal modelleri oluşturularak sayısal analizleri yapılmıştır. Bu bağlantı tipleri:

- a- Aparat (Manşon) bağlantısı
- b- Sıkı geçme
- c- Fens teli kullanımı ile sıkı geçme

a- Aparat bağlantısı: Bu modelde 12 m direk iç kısmında

termoplastik, dış kısmında ise kompozit malzeme şeklinde tasarlanmıştır. İç astarda termoplastik malzeme rotasyon plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ve dış kısmında kullanılan kompozit için ise üretim yöntemi olarak filament winding seçilmiştir. Bu sayede farklı sarım açılarla ile sarım yapılabilecek olup farklı yönlerden gelen yüklere karşı dayanım sağlanabilecektir. Modüller arasında yerleştirilecek olan manşon ile ilgili parçalara ait termoplastikler kısımlar arasında bağlantı sağlanacaktır.

b- Sıkı geçme bağlantısı: 12 m direk için yalnızca e-glass epoksi'den üretilmiş kompozit kullanılmış olup iki modül belirli oranda iç içe geçecek şekilde oluşturulmuştur. Bu modelde kullanılacak kompozitte filament winding yöntemi kullanılarak üretilen şekilde tasarlanmıştır.

c- Fens teli bağlantısı : 12 m direk için iç astarda termoplastik, termoplastiğin dışında fens teli ve en dış kısmında ise kompozit kullanılmıştır. Termoplastik ve kompozit kısımlarda modüller iç içe geçebilecek şekilde, birbirlerine sıkı geçme yapacak durumda tasarlanmıştır.

Bu çalışmaya referans olması açısından ilk önce klasik olarak tasarlanan betonarme direk için Abaqus ile sonlu elemanlar çatısında modellenerek yük analizi yapılmıştır. Tepe noktasındaki gerçekleşen sehim ve maksimum gerilmenin olduğu noktalar belirlenmiş ve kompozit direklerin farklı bağlantı tipleri ile modüler tasarlandığındaki deplasman ve gerilme değerleri incelenmiştir. Betonarme ve kompozit direklerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

2 Teori ve yöntem

2.1 Betonarme model analizi

Abaqus sonlu elemanlar bünyesinde betonarme direk, boyu 12 m, tepe çapı 270 mm ve dip çapı 450 mm olacak şekilde tek parça olarak modellendi. Betonarme direk için Tablo 1'de malzeme özellikleri verilen C25 betonu ve S420 çeliği kullanıldı.

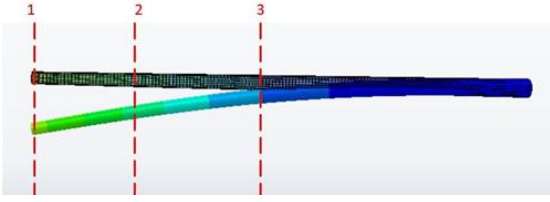
Tablo 1. Malzeme Özellikleri.

Table 1. Material Properties.

	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
C25 Betonu	30 GPa	0.2
S420 Çeliği	200 GPa	0.3

Betonarme direk ve kompozitler direkler için gerçekleştirilen yük analizlerinde, kuvvetler direk tepe kuvveti olarak uygulanmıştır. Direk tepe kuvveti, direğin tepesinden 25 cm aşağıya direk ekseninde uygulanan kuvvettir. Kullanılan kuvvetler düşey yönde travers ağırlığı, montör ağırlığı, buz yüklü ağırlık, bağlantı elemanları ağırlıkları; dikey yönde ise rüzgâr yükü ve iletken çekme yükü şeklinde uygulandı. Bu yüklere göre hesaplanan toplam yük ise direğe dikey yönde 11230 N, direğe düşey yönde 3455 N olarak hesaplanmıştır. Betonarme direk için ankraj boyu 2.2 m olarak belirlenmiştir. Analiz esnasında elemanlar için C3D8R elemanı kullanılmış olup lineer elastik bir analiz gerçekleştirilmiştir.

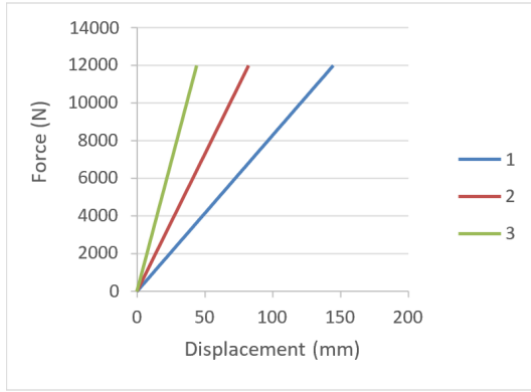
Sonlu elemanlardan elde edilen betonarme modelin deplasman kesiti Şekil 1 de gösterilmiştir. Yapılan yek pare betonarme direk analizi sonucunda üç farklı noktadan deplasmanlar belirlenmiştir. Seçilen noktalar betonarme direğin tepe noktası (1), yer değiştirmenin belirgin şekilde gözlemlendiği direğin orta noktası (3) ve bu iki nokta arasındaki bir noktadan (2) oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Betonarme model deplasman kesiti.

Figure 1. Reinforced concrete model displacement section.

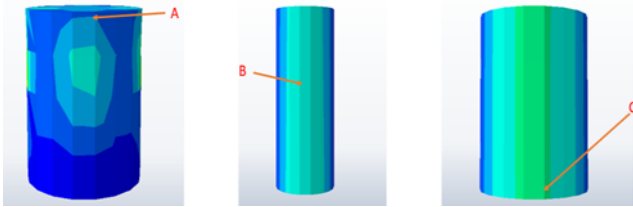
1 noktasında okunan deplasman 144.9 mm, 2 noktasında okunan deplasman 82.47 mm ve 3 noktasında okunan deplasman 43.72 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Betonarme model Force-Deplasman grafiği.

Figure 2. Reinforced concrete model Force-Displacement graph.

Yapılan betonarme direk analizinde gerilme değerleri üç farklı elementten okundu. Bu üç element; betonarme direğin tepesi (A), betonarme direğin ortası (B) ve ankraj bölgesinin üstündeki (C) elementleridir (Şekil 3).

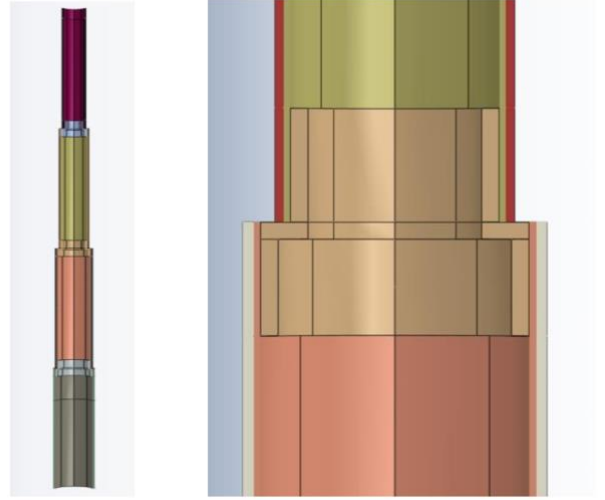


Şekil 3. Deplasman değerlerinin okunduğu noktalar.

Figure 3. Point where displacement values are read.

2.2 Manşonlu Model Analizi

Manşonlu kompozit direk, tepe çapı 274 mm ve dip çapı 480 mm olacak şekilde 12m boyunda 4 parça olarak modellendi. Kompozit direğin dış kısmında e-glass epoksi malzemesi iç astarda ise HDPE esaslı termoplastik malzeme kullanılmıştır. İki modül arasındaki bağlantıyı sağlayacak olan manşonlar 400 mm boyutunda olup alüminyum malzeme kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Manşonlu direk tasarımı.

Figure 4. Sleeved pole design.

İç astarda kullanılan termoplastik kısmının et kalınlığı en alt modülde 11 mm, 2, 3 ve 4. modüldeki et kalınlıkları sırasıyla 9.8, 9.7, 9.1 mm olarak tasarlanırken dış kısımda kullanılacak olan kompozit katmanın ilk iki katmanı 15 mm, sonraki iki katmanda 12 mm et kalınlığında olarak tasarlandı. Modele gelen yükler ise betonarme direkte olduğu gibi dikey yönde 11230 N, düşey yönde 3455 N olarak hesaplandı. Modelde ankraj boyu betonarme direğe uygun olarak 2.2 m olarak kullanıldı. Analiz esnasında elemanlar için C3D8R elemanı kullanılmış olup lineer elastik bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Abaqus sonlu elemanlar bünyesinde kompozit direğin malzeme özellikleri iç astarda kullanılan termoplastik ve manşonlarda kullanılan alüminyum malzemeler için Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme Özellikleri.

Table 2. Material Properties.

	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
Alüminyum	68.9 GPa	0.33
HDPE	1 GPa	0.46

Dış kısımda kullanılan e-glass epoksi malzemenin malzeme sabitleri ise Tablo 3'te verilmiştir.

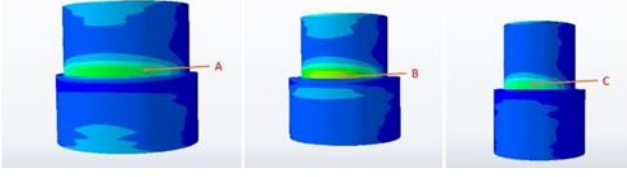
Tablo 3. Kompozit malzeme özellikleri.

Table 3. Composite material properties.

	E ₁	E ₂	E ₃
	45 GPa	45 GPa	10 GPa
	ν ₁₂	ν ₁₃	ν ₂₃
	0.3	0.3	0.4
	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
	5 GPa	5 GPa	5 GPa

Yapılan manşonlu kompozit direk analizinde gerilme değerleri üç farklı elementten okundu. Bu elementler manşondan seçildi. Bunun sebebi çıkan gerilmeler kompozit üzerinde değil manşon üzerinde yığılmasıydı. Bu üç element; kullanılan ilk

manşon üzerinden(A), ikinci manşon üzerinden (B) ve üçüncü manşon (C) elementleridir (Şekil 5).

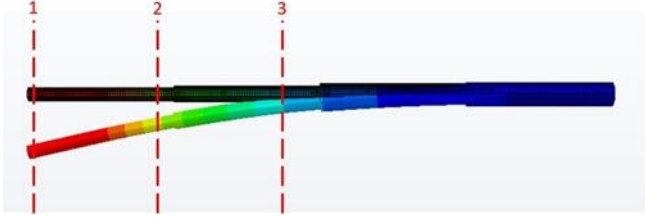


Şekil 5. Manşonlu model gerilme kesiti.

Figure 5. Model stress section sleeved.

A elementindeki gerilme 79 MPa, B elementindeki gerilme 104.90 MPa ve C elementindeki gerilme 68.16 MPa olduğu gözlemlendi.

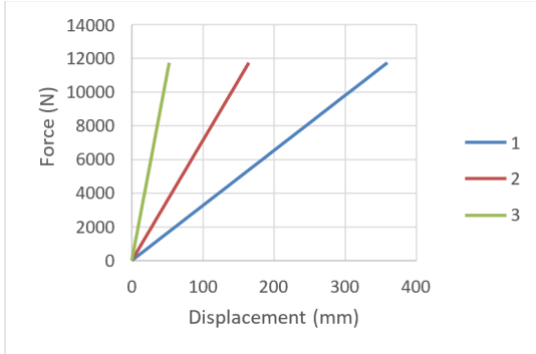
Manşonlu kompozit direğin deplasmanları ise üç farklı noktadan okundu. Seçilen noktalar manşonlu kompozit direğin tepe noktası (1), yer değiştirmenin belirgin şekilde gözlemlendiği direğin orta noktası (3) ve bu iki nokta arasındaki bir noktadan (2) oluşmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Manşonlu model deplasman kesiti.

Figure 6. Displacement section of the sleeved model.

Şekil 6'da gösterilen, 1 noktasında okunan deplasman 359.77 mm, 2 noktasında okunan deplasman 164.18 mm ve 3 noktasında okunan deplasman 52.23 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Manşonlu model Force-Deplasman grafiği.

Figure 7. Sleeved model Force-Displacement graph.

2.3 Kompozit Sıkı Geçmeli Model Analizi

Sıkı geçmeli kompozit direk 12 m olacak şekilde 8 parça olarak belirlendi, tepe çapı 235 mm ve dip çapı 480 mm olacak şekilde modelleme yapıldı. Kompozit sıkı geçmeli model için Abaqus'de sonlu elemanlar analizi yapıldı, modelde ankraj boyu manşonlu ve betonarme direkt olduğu gibi 2.2 m olarak kullanıldı. Modele gelen yükler ise betonarme ve manşonlu modellerde olduğu gibi dikey yönde 11230 N, düşey yönde 3455 N olarak hesaplandı. Analiz esnasında elemanlar için C3D8R elemanı kullanılmış olup lineer elastik bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan model kompozit kısım olarak tasarlanmış olup kompozit katmanın ilk dört katmanı 15 mm et kalınlığında sonraki dört katman da 12 mm et kalınlığında olacak şekilde tasarlandı. Modüller arası bağlantı sıkı geçme ile yani modüllerin birbiri içine geçmesi ile sağlandı. Modelde kullanılan kompozitlerin farklı yönlerden gelen darbelere karşı dayanıklı olması için filament winding yöntemi ile üretilmesi öngörüldü.

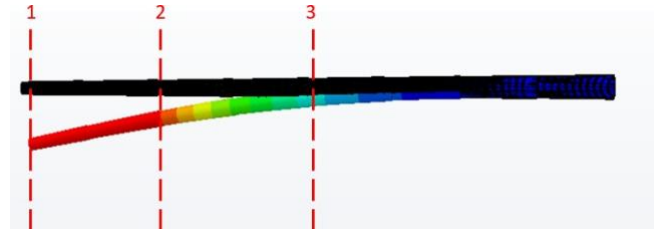
Bu modelde kullanılan kompozit e-glass epoksi olup malzeme özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kompozit malzeme özellikleri.

Table 4. Composite material properties.

	E ₁	E ₂	E ₃
	45 GPa	45 GPa	10 GPa
E-Glass Epoksi	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
	0.3	0.3	0.4
	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5 GPa	5 GPa	5 GPa

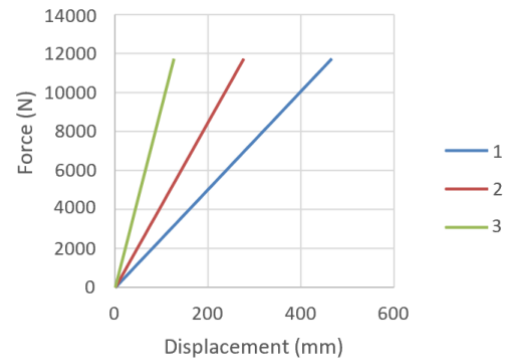
Yapılan kompozit sıkı geçme direk analizi sonucunda üç farklı noktadan deplasman okundu. Seçilen noktalar kompozit direğin tepe noktası (1), yer değiştirmenin belirgin şekilde gözlemlendiği direğin orta noktası (3) ve bu iki nokta arasındaki bir noktadan (2) oluşmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Kompozit sıkı geçmeli model deplasman kesiti.

Figure 8. Displacement section composite tight-fit model.

1 noktasında okunan deplasman 466.13 mm, 2 noktasında okunan deplasman 276.29 mm ve 3 noktasında okunan deplasman 127 mm'dir (Şekil 9).

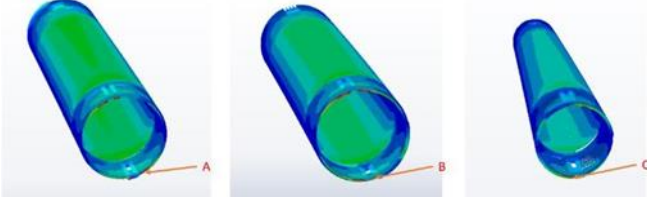


Şekil 9. Kompozit sıkı geçmeli model Force-Deplasman grafiği

Figure 9. Composite tight-fit model Force-Displacement graph.

Yapılan sıkı geçmeli kompozit direk analizinde gerilme değerleri üç farklı elementten okundu. Bu elementler kompozit üzerinde sıkı geçme elementlerinden seçildi. Bunun sebebi çıkan gerilmelerin sıkı geçme bölgelerinde yığılmasıdır. Bu üç element; ankraj üzerindeki ilk kompozit modülden (A), ankraj

üzerindeki ikinci modülden (B) ve ankraj üzerindeki üçüncü modülden (C) elementleridir (Şekil 10).



Şekil 10. Kompozit sıkı geçmeli model gerilme kesiti.

Figure 10. Stress section of composite tight-fit model.

A elementindeki gerilme 148.9 MPa, B elementindeki gerilme 136.2 MPa ve C elementindeki gerilme 119.8 MPa olarak okundu.

2.4 Fens Teli Kullanılarak Sıkı Geçmeli Kompozit Direk Model Analizi

Fens teli kullanılarak modellenen sıkı geçmeli kompozit direk 12 m olacak şekilde 3 parça olarak belirlendi, tepe çapı 185 mm ve dip çapı 365 mm olacak şekilde modelleme yapıldı. Fens teli kullanılarak sıkı geçmeli kompozit direkler için Abaqus'de sonlu elemanlar analizi yapıldı, modelde ankraj boyu diğer modellerde olduğu gibi 2.2 m olarak kullanıldı. Modele gelen yükler ise tasarlanan diğer kompozit direklerde olduğu gibi, dikey yönde 11230 N, düşey yönde 3455 N olarak hesaplandı. Analiz esnasında elemanlar için C3D8R elemanı kullanılmış olup lineer elastik bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan modelde en iç kısımda termoplastik kullanılmış olup, et kalınlığı 50 mm olacak şekilde belirlendi. Termoplastikler arasındaki bağlantı sıkı geçme ile yani iç içe geçecek şekilde tasarlandı ve üretim yöntemi olarak rotasyon plastik enjeksiyon yöntemi kullanılarak üretilecek şekilde planlandı. İçteki termoplastiğin dışında 20 mm et kalınlığında bir fens teli kullanıldı. Fens teli için DC04 çeliği tercih edildi. Fens telinin dışına da 10 mm et kalınlığında filament winding yöntemi kullanarak üretilmesi öngörülen %50 glass-fiber katkılı epoksili kompozit katmanı yerleştirildi. Modelde kullanılacak olan DC04 çeliği ve HDPE malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 5, e- glass katkılı epoksi malzemenin mekanik özellikleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Malzeme özellikleri.

Table 5. Material Properties.

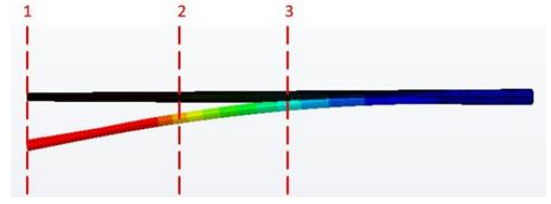
	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
DC04 Çeliği	210 GPa	0.3
HDPE	1 GPa	0.46

Tablo 6. Kompozit malzeme özellikleri.

Table 6. Composite material properties.

	E ₁	E ₂	E ₃
E-Glass Epoksi	45 GPa	45 GPa	10 GPa
	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
	0.3	0.3	0.4
	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5 GPa	5 GPa	5 GPa

Yapılan fens teli kullanılarak sıkı geçmeli kompozit direk analizi sonucunda üç farklı noktadan deplasman okundu (Şekil 11).

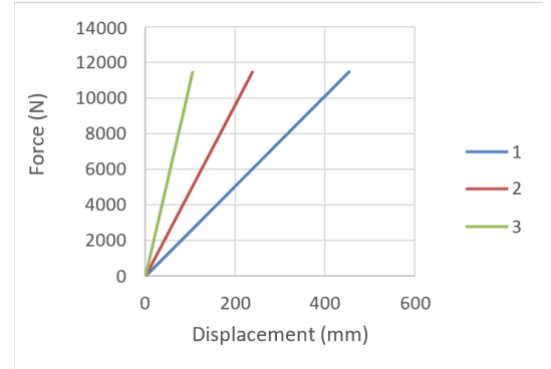


Şekil 11. Fens teli kullanılarak sıkı geçmeli model deplasman kesiti.

Figure 11. Displacement section of the tight-fit model using fens wire.

Seçilen noktalar betonarme direğin tepe noktası (1), yer değiştirmenin belirgin şekilde gözlemlendiği direğin orta noktası (3) ve bu iki nokta arasındaki bir noktadan (2) oluşmaktadır.

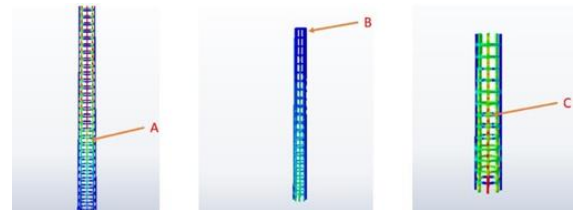
1 noktasında okunan deplasman 454.27 mm, 2 noktasında okunan deplasman 239.65 mm ve 3 noktasında okunan deplasman 106.11 mm'dir (Şekil 12).



Şekil 12. Fens teli kullanılarak sıkı geçmeli model Force-Deplasman grafiği.

Figure 12. Force-Displacement graph of tight fit model using fens wire.

Yapılan fens teli kullanılarak sıkı geçmeli kompozit direk analizinde gerilme değerleri üç farklı elementten okundu. Bu elementler fens teli üzerindeki elementlerden seçildi. Bunun sebebi çıkan gerilmelerin fens teli üzerinde yığılmasıdır. Bu üç element; ankraj üzerinden (A), fens telinin tepesinden (B) ve fens telinin ortasından (C) seçilen elementleridir (Şekil 13).



Şekil 13. Fens teli kullanılarak sıkı geçmeli model gerilme kesiti.

Figure 13. Tight-fit model stress section using fens wire.

A elementindeki gerilme 279.6 MPa, B elementindeki gerilme 39.26 MPa ve C elementindeki gerilme 222.2 MPa olarak okundu.

3 Bulgular ve öneriler

Günümüzde kullanılan tek parça betonarme direk ve bağlantı bölgelerinde değişik malzeme ve tasarımlar kullanılan kompozit modüler direk analizleri gerçekleştirilip karşılaştırıldı. Tek parça betonarme direk sonlu elemanlar analizi ile çalıştırıldığında 24.67 MPa maksimum gerilme elde edildi. Betonarme direk için akma dayanımı 40 MPa olduğu için limit sınırları içinde kaldı ve model üzerinde bir akma meydana gelmedi. Betonarme direk için maksimum 144.09 mm sehim gözlemlendi. Manşonlu modelde en yüksek gerilme değeri 104.9 MPa ve en yüksek sehim değeri 359.77 mm, Sıkı geçme modelde en yüksek gerilme değeri 148.9 MPa ve en yüksek sehim değeri 466.19 mm ve fens teli ile sıkı geçme yapılan modelde en yüksek gerilme değeri 279.6 MPa ve en yüksek sehim değeri 454.27 mm olarak hesaplandı. Tablo 7 'de her bir modelde çıkan gerilmeler gösterilmiştir.

Tablo 7. Maksimum gerilme ve maksimum deplasman.

Table 7. Maximum stress and maximum displacement.

Model Bilgisi	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Deplasman (mm)
Betonarme	24.67	144.09
Manşonlu	104.9	359.77
Sıkı Geçme	148.9	466.19
Fens Teli ile Sıkı Geçme	279.6	454.27

Analiz sonuçları betonarme model ve birbiri ile karşılaştırıldığında; kompozit malzemenin betonarme malzemeye oranla tokluğu yüksek olduğundan sehim oranlarının beklenen oranda arttığı gözlemlendi. Modelin modüler olarak tasarlanması ve malzeme değişimi göz önüne alındığında en yüksek sehim değerlerinde de artış görüldü.

Modüler kompozit direk tasarımındaki en önemli parametrelerden biri bağlantı bölgesinin tasarımı ve malzeme seçimidir, birleşim bölgeleri modüler direkler için bir tasarım kriteridir. Bu doğrultuda farklı birleşim tipleri ve farklı malzeme parametreleri ile elde edilen analizler sonuçlarında sıkı geçme ve fens teli ile sıkı geçme yapılan modellere kıyasla hem en yüksek gerilme hem de en yüksek sehim değerleri göz önüne alındığında manşonlu modelin daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Bağlantı tiplerinin incelendiği üç modelde; sehimin gözle görülür şekilde başladığı nokta, en yüksek sehim değerine ulaştığı nokta ve bu iki noktanın orta noktası hesaba katılarak kuvvet – yer değiştirme grafikleri elde edildi. Tablo 8'de her model için belirtilen noktalara ait sehim değerleri verildi.

Tablo 8. Kesitlerdeki deplasman değerleri.

Table 8. Displacement values in sections.

Model Bilgisi	Kesit 1'deki Deplasman Değerleri (mm)	Kesit 2'de Deplasman Değerleri (mm)	Kesit 3'deki Deplasman Değerleri (mm)
Manşonlu	359.77	164.18	52.23
Sıkı Geçme	466.13	276.29	127
Fens Teli ile Sıkı Geçme	454.27	239.65	106.11

4 Sonuçlar

Yapılan tüm analizler karşılaştırıldığında tek parça betonarme direk modelinde gerilme ve sehim değerlerinde en iyi sonuca ulaşıldığı görüldü. Fakat hem modüler tasarım hem de hafiflik parametreleri dikkate alındığında kompozit malzeme seçimi ve birleşim bölgesi tasarımı hesaba katıldı. Kompozit direk analizleri özelinde birleşim bölgelerindeki en yüksek gerilme değerleri incelendi. Ve belirlenen kesitlerde en yüksek sehim değerleri birbiriyle kıyaslandı. Sonuçlar dikkate alındığında manşonlu modelde diğer modellere göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

5 Conclusions

When all the analyzes were compared, it was seen that the best result was achieved in the stress and displacement values in the one-piece reinforced concrete pole model. However, considering both the modular design and the lightness parameters, the choice of composite material and the design of the joint area were taken into account. The highest stress values in the joint areas were examined in particular for composite pole analyses. And the highest displacement values in the determined sections were compared with each other. When the results are taken into account, it is seen that better results are obtained in the sleeved model compared to other models.

6 Yazar katkı beyanı

Yazar 1 makale yazımında, kaynak taramasında ve analizlerin oluşturulmasında, yazar 2 denetleme/danışmanlık aşamasında ve yazım kontrolünde, yazar 3 fikir/ kavram oluşturulmasında ve danışmanlık aşamasında, yazar 4 ise kaynak taraması ve makale yazımında katkı sağlamıştır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Baghmisheh, Amir G, and Mojtaba M. "Seismic performance and fragility analysis of power distribution concrete poles." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150, 1-15, 2021.
- [2] Polyzois, Dimos, et al. "Glass fiber-reinforced plastic poles for transmission and distribution lines: an experimental investigation." *12th International Conference on Composite Materials (ICCM-12), Paris, France, 1999.*
- [3] Saboori B, and SMR Khalili. "Static analysis of tapered FRP transmission poles using finite element method." *Finite Elements in Analysis and Design* 47.3, 247-255, 2011.
- [4] Sarmiento, Miguel, and Brian L. "A state of the art overview: composite utility poles for distribution and transmission applications." *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America.* IEEE, 2006.
- [5] Urgessa, Girum, and Sara M. "Structural assessment of fiber-reinforced polymer composite electric poles." *Procedia engineering* 145, 707-714, 2016.
- [6] Mohamed, Hamdy, and Radhouane M. "Design optimization of GFRP pole structures using finite element analysis." *American Composites Manufacturers Association Tampa, FL USA, COMPOSITES & POLYCON, 2009.*

- [7] Polyzois, D, IG Raftoyiannis, and S Ibrahim. "Finite elements method for the dynamic analysis of tapered composite poles." *Composite Structures* 43.1, 25-34, 1998.
- [8] Ibrahim, Sherif, Dimos P, and Sherif KH. "Development of glass fiber reinforced plastic poles for transmission and distribution lines." *Canadian Journal of Civil Engineering* 27.5, 850-858, 2000.