



Araç lastiklerinde kord-kauçuk kompozit malzemelerin konstrüksiyon yapısının ve lastik davranışına etkisinin incelenmesi

Investigation of the construction structure of cord-rubber composite materials and their effects on tire behavior in vehicle tires

Onur Karaçay^{1*}, Süleyman Kılıç²

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 40000 Kırşehir, TÜRKİYE
²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 40000 Kırşehir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 25/07/2022

Kabul / Accepted: 21/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

Öz

Günlük hayatımızda ulaşım başta olmak üzere birçok alanda lastik kullanılmaktadır. Kullanılan aracın özelliklerine bakılmaksızın araç lastiği emniyet açısından kritik bir öneme sahiptir. Dolayısıyla araç lastiğinin iç yapısı, konstrüksiyonu, lastik taban izi vb. parametrelerin analizinin doğru yapılarak lastiğin emniyetli ve verimli çalışması sağlanmalıdır. Lastiğin yapısı içerisinde yer alan kord ve elastomer malzemeler yük altında farklı mekanik gerinim özelliklerine sahiptirler. Oluşan gerinimin kordun mekanik özellikleri ve yapışma performansına etkisi yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu derlemede, literatürdeki lastik iç yapısında temel bileşen olan kord-kauçuk yapısının mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deney ve çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca kord kauçuk kompozit malzemesinin makro ve mezoskopik mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Lastik yapısının analizi, sonlu elemanlar yöntemi ile lastik kordunun mekanik özellikleri, lastik davranışının yol şartlarında modellenmesi, lastik basıncı değişikliği ile zemin teması üzerine çalışmalar incelenmiştir. İnceleme sonucunda, kord-kauçuk yapısı içinde yer alan malzemelerin mekanik özellikleri, malzeme yapısını analiz etmede kullanılan test yöntemleri, lastik yapısının modellenmesi, kord kauçuk yapışma analizi, kord gerinim analizi, lastik zemin ilişkisi konuları üzerine bir derleme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Araç lastiği, kord, kauçuk, konstrüksiyon, lastik davranışı”

Abstract

In our daily life, tires are used in many areas, especially transportation. Regardless of the characteristics of the vehicle used, the vehicle tire has a critical importance in terms of safety. In order for the tire to work safety and efficiently, the internal structure of the tire, its construction, the tire footprint etc. The analysis of the parameters must be done correctly. The cord and elastomer materials in the tire structure have different mechanical strain properties under load. The effect of the resulting strain on the mechanical properties and adhesion performance of the cord has been proven by studies. In this study, the experimental and simulation studies to determine the mechanical properties of the cord-rubber structure, which is the main component in the tire inner structure, are mentioned. In addition, examples from the studies on the macro and mesoscopic mechanical properties of the cord rubber composite material are given. In the analysis of the tire structure, studies on the mechanical properties of the tire cord, the modeling of the tire behavior under road conditions, the change in tire inflation pressure and the ground contact were examined with the finite element method. As a result of the examination, a review was made on the mechanical properties of the materials in the cord-rubber structure, the test methods used to analyze the material structure, the modeling of the tire structure, the cord rubber adhesion analysis, the cord strain analysis, the tire-ground relationship.

Key Words

“Tire, cord, rubber, construction, tire behavior”

1. Giriş

Kompozit malzemeler ve malzeme analizinde kullanılan test yöntemleri gelişen teknoloji ile birlikte büyük önem kazanmıştır. Araç lastiklerinin modellenmesi, lastiğin yapısal davranışlarının incelenmesi, kord-kauçuk kaplama yapısı konularında çalışmalar yapılmaktadır. Kord-kauçuk kaplama yapısı deney ve simülasyon yardımıyla analiz edilerek kompozit malzemenin iç yapısındaki bozulma incelenmiştir (Su vd., 2021a). Lastik iç yapısının temel bileşeni olan kord-kauçuk kompozit yapısı, lastik modellemesinde kritik bir öneme sahiptir. Lastik üzerine gelen yük miktarı, lastiğin kullanım yeri, lastiğin saklama koşulları, lastik kullanım süresi gibi birçok parametre lastik iç yapısını etkilemektedir. Günümüzde lastik iç yapısını analiz etmede bazı test yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu testlerin başında Rubber Cord Adhesion Inflation Test (RCAIT) lastik kauçuk-çelik kord kırılmasını inceleyen test gelmektedir. Yapılan çalışmalar, kauçuk davranış modelleme ve tanımlama test yöntemi RCAIT sırasında ortaya çıkan SERR (Strain Energy Release Rate) değerinin güvenilir bir sonucu olduğunu göstermektedir (Kane vd., 2021a).

Literatürde malzeme kuvveti, gerinimi kavramını kullanarak kord takviyeli elastomerlerin dayanıklılık analizi üzerine çalışmalar mevcuttur. Malzemenin mekanik özelliklerini incelemeye sonlu elemanlar modelleme yöntemi temel alınarak analiz çalışması yapılmaktadır. Lastik üretim aşaması zor ve maliyetli olduğundan sonlu elemanlar simülasyon yöntemi, yapılan çalışmalarda kritik bir öneme sahiptir. Lastik davranışını ve lastik iç yapısındaki bileşenleri modelleme sırasında doğru tanımlayarak gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek mümkündür. Zhao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; sonlu eleman simülasyon yöntemi ile kauçuk-kord kompozitlerinin tek eksenli gerinim verilerinin karşılaştırılması ve kord açısının, kauçuk kord kompozitinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda anizotropik hiperelastik yapı modeli kauçuk-kord kompozitinin gerinim özelliğini doğru tahmin eden sonuçlar elde edilmiştir (Zhao vd., 2020a).

Lastik bileşenlerini analiz etmede malzeme modellemesi önemli bir etkiye sahiptir. Malzemelerin şekillendirme özellikleri, bileşik oluşturma kabiliyetleri, mukavemet değerleri modelleme sırasında doğru tanımlanmalıdır. Lastik modellemesinde özellikle Yeoh ve Marlow modellemeleri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar özellikle lineer olmayan Marlow modelinin avantajlarını göstermektedir. Marlow modeli parametrelerinin tanımlanması ve lastik FEA'nın (Finite Element Analysis) hesaplama verimliliğinde önemli gelişmeler sağlamıştır (Korunović vd., 2019a).

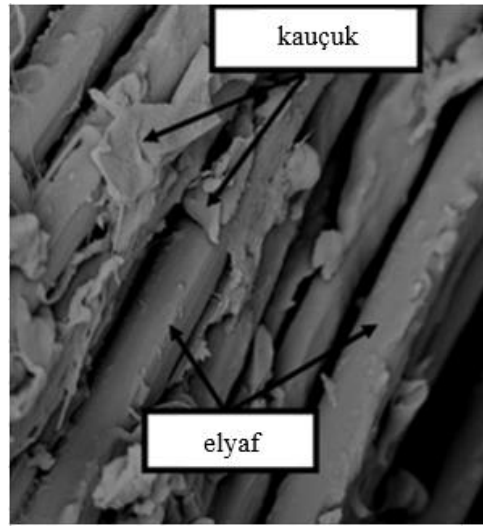
Bu çalışma 8 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kord-kauçuk yapısının mekanik özellikleri, ikinci bölümde kord-kauçuk test yöntemleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde kord-kauçuk yapısını oluşturan malzemeler, dördüncü bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısına değinilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde yapısal model oluşturma, altıncı bölümde yapışma analizi, yedinci ve sekizinci bölümde sırasıyla lastikte gerinim analizi ve lastik zemin teması incelenmiştir.

2. Kord-Kauçuk Yapısının Mekanik Özellikleri

Kord-kauçuk bütünleşik yapısı kauçuk ürünlerin güvenlik performanslarını doğrudan etkileyen kord-kauçuk kompozit malzemesinin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynar. Su ve arkadaşları (Su vd., 2021b) yaptıkları çalışmada; mekanik özellikler için deney ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kord-kauçuk kompozit malzemesi için bindirme yapısının kırılma mekanizmasını analiz eden bir kohezyon bölgesi modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda lastik içindeki kord-kauçuk kompozit yapısının iç yapısındaki bozulmanın gerilmede önemli bir etkiye sahip olduğu ve kord-kaplama yapısının sertlik değerinin kırılmadan bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan bir diğer çalışmada (Dong vd., 2019); farklı sıcaklıklarda karmaşık kord kauçuk kompozitin makro ve mezoskopik mekanik özellikleri incelenmiştir. Tabiatıta yer alan tüm yapılar makroskopik, mikroskobik ve mezoskopik olarak üç ana gruba ayrılır. Makroskobik yapılarda, parçacık hareketleri istatistiksel olarak tanımlanabilecek boyutlara sahiptir. Mikroskobik yapıların boyutları atomik mertebededir. Mezoskopik yapılar ise mikroskobik ve makroskobik yapıların boyutları arasındaki ara ölçüde yer alır. Kauçuk kompozit yapısının iç kısmı normal gerilmeleri ağısı yapıdadır. Anizotropik hiperelastik yapı modelinde, farklı sıcaklıklar altında karşılık gelen hiperelastik malzeme parametreleri elde edilir. Deneysel sonuçlarla tutarlı gerinim denklemleri, yüzeydeki kordun temsili hacim elemanı kauçuk kompozit oluşturulmuştur. İlgili homojenizasyon anizotropik yapısal parametreler farklı sıcaklıklarda sayısal olarak elde edilebilmektedir. Karmaşık kompozit kauçuğun mekanik özellikleri farklı sıcaklıklarda, sayısal simülasyon ve deney yoluyla karakterize edilebilmektedir. Yapılan çalışmalar, gelişmiş kord tasarımı için yol gösterici öneme sahip olan karmaşık kumaş kauçuk kompozitinin farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklerini analiz etmede etkili bir yöntem sunmaktadır. Yapılan kord kauçuk kompozitler için mekanik özelliklerini karakterize etmede anizotropik hiperelastik modellemeler kullanılmıştır. Kordun makroskopik mekanik özellikleri sayesinde farklı sıcaklıklarda kauçuk kompozit elde edilmektedir. Anizotropik hiperelastik modelden daha sonra mezoskopik yüzey kord kauçuk kompozitinin mekanik modeli oluşturulmuştur. Farklı sıcaklıklarda homojenizasyon anizotropik yapı parametreleri elde edilmiştir. Son olarak, farklı sıcaklıklarda kordun kauçuk kompozitin mekanik özellikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Kauçuk malzemenin nominal geriniminin, aynı gerinim büyüklüğü altında sıcaklığın artmasıyla arttığı görülmektedir. Yüzey kumaş kauçuk kompozitine uygulanan farklı sıcaklıklarda sayısal simülasyon sonuçlarının, deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, analiz sonuçlarına göre sıcaklığın artmasıyla kord malzemesinin modülünün azaldığı görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla kauçuk malzemenin mekanik özellikleri artmaktadır. Kord-kauçuk yapısında, yüzey kordunun yoğun dağılımı nedeniyle, yüzey kord kompozit malzemesinin mekanik özellikleri, kauçuk malzemeye göre daha fazla etkiye sahiptir.

Silika takviyeli elastomerler, çeşitli kauçuk uygulamalarında, lastik yapısı içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal protein polimerinin, silika takviyeli kauçuğun mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Kimyasal yapıda oluşan kürlenme süresinde artan hidrolize protein eklenmesiyle çapraz bağ yoğunluğu oluşmaktadır. Alkali protein, asidik silisin vulkanizasyon üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Kauçuk içeren kompozit yapıların havada 200°C'ye kadar stabil olduğu yapılan termal testlerde ortaya konmuştur. Silika ve hidrolize protein kauçukta tamamlayıcı bir etkiye sahiptir. Hidrolize protein partikülleri; silika ve polimer ile etkileşimlerinden dolayı silika takviyeli kauçuk kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. Kauçuk kompozitlerin çapraz bağlanması sürecinde, kompozit yapıya silika ve polimer parçacıklarının eklenmesi kürlenme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde %20 silikanın, silika polimer partikülleri ile değiştirilmesi ile kompozit yapıda çapraz bağ yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Jong, 2019).

Kord-kauçuk kompozit yapısı, dögüsel yüklere maruz kaldığında kritik yorulmalar oluşabilmektedir. Tonatto ve arkadaşları yaptıkları çalışmada polyeester ve poliamid malzemede dögüsel sıkıştırma/çekme şekil değıştirme davranışını Şekil 1'de olduğu gibi incelemiştir. Çalışmada çekme kuvvetinin, frekansının ve gerinim seviyesinin izlenmesine, kontrolüne izin veren özel bir döner kasnak ekipmanı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda hibrit kordların, polyeester ve poliamid kordlara göre daha yüksek kalıntı mukavemeti gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, kordların morfolojik analizinde, oluşan hasarın sıkıştırma gerinimine maruz kalan kordlarda mikro bükülmeden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

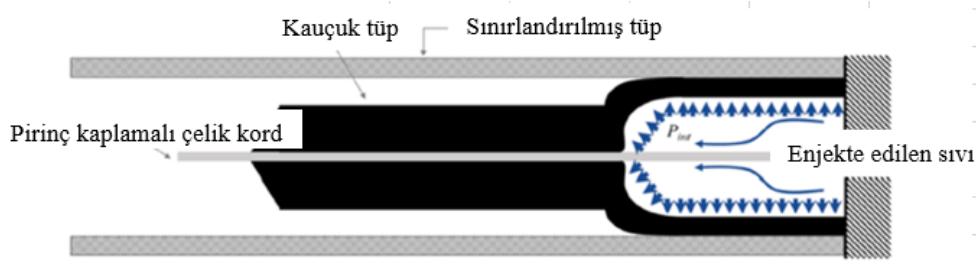


Şekil 1. Kord-kauçuk kompozit yapısı (Tonatto vd., 2017)

Literatürde, takviyeli ve düz polimer formülasyonlarının mekanik davranışı, eğilme ve basınç testleri ile çalışmalar mevcuttur. Eğilme ve basınç dayanımı iyileştirmeleri, güçlendirilmiş PM (Polymer Mortar) deneme formülasyonu için önemli bir etkiye sahiptir. Lastikte kullanılan kauçuk elyafların miktarının, mekanik özelliklerde daha yüksek artışlara sebep olabileceği düşünülmektedir (Sousa vd., 2017).

3. Kord-Kauçuk Test Yöntemleri

Kord-kauçuk kompozit yapısını analiz etmede farklı test yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Rubber Cord Adhesion Inflation Test (RCAIT) lastik kauçuk-çelik kord ayrılmasını incelemek için son yıllarda önerilen bir test yöntemidir. Kauçuk-metal yapışmasında doğrusal olmayan malzemelerin analizinde ve lastik endüstrisinde standart prosedürler olarak çeşitli kırılma mekaniği testleri önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu testler temel olarak tel çekme testleri ve soyma testleri olarak iki gruba ayrılır. Kane ve arkadaşları Şekil 2'de görüldüğü gibi RCAIT'in testini açıklamış ve testin temsili sonuçlarını paylaşmışlardır.

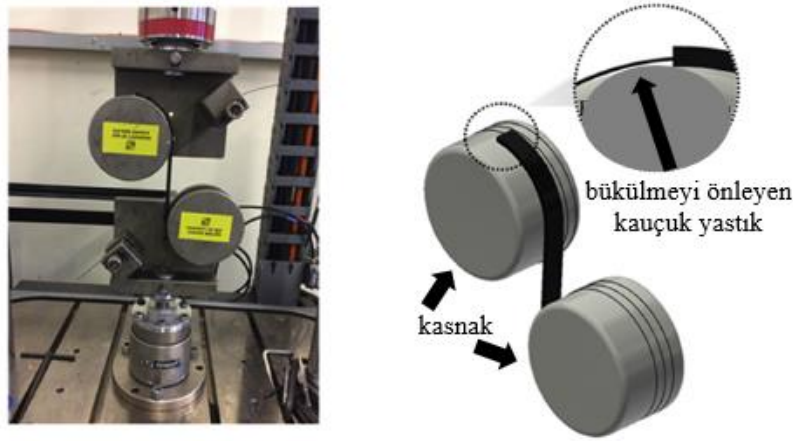


Şekil 2. Kord-kauçuk yapışma şişirme testinin şematik gösterimi (Kane vd., 2021b)

Test, iki tip kauçuk karışımı ve iki tip kord dikkate alınarak farklı sistemlerin yapışkan performansını değerlendirmek için kullanılır. Ek olarak, akışkan enjeksiyon hızının, çatlak ilerlemesini tetikleyen akışkan basıncı üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deney kauçuk davranışının gerinim hızına duyarlılığı ile ilişkilidir. Bu sonuçlar, test sisteminin kapasitesini göstermektedir. Farklı kauçuk-metal kord sistemlerinin yapışkan performansını ayırt etmek ve ölçmek için RCAIT uygulanır. Özellikle kauçuk modelinde G'nin hesaplanmasına duyarlılığı ve yükleme hızının çatlak yayılımı üzerindeki etkisi konularında doğrulayıcı sonuçlar vermektedir. Test (RCAIT) sırasında meydana gelen ayrılma enerjisi G olarak ifade edilir.

Ayrıca çalışmada deneysel veriler kullanılarak kritik SERR (Strain Energy Release Rate) değeri belirtilmiştir. Daha sonra, basit bir deneysel veri setinden kauçuk ve tüp şişirme davranışını belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Hiperelastik kalın duvarlı silindirin şişmesini tahmin etmeye yönelik ve çok çeşitli hiperelastik modellere uygulanabilen çözümleme tekniği sunulmuştur. Bu model, çatlak sırasında ölçülen durağan basıncın fonksiyonunu ortaya çıkartır. Yapılan çalışmalarda kauçuk davranış modelleme ve tanımlama test yöntemi RCAIT sırasında ortaya çıkan SERR (Strain Energy Release Rate) değerinin güvenilir bir sonucu olduğunu göstermek için tasarlanmıştır. Yapılan testte bir model oluşur ve bu model, çatlak sırasında ölçülen durağan basıncın bir fonksiyonu olarak teorik kritik SERR'yi (Strain Energy Release Rate) değerlendirmek için kullanılır.

Yorulma testi, kord-kauçuk kompozit malzemelerinden üretilen bileşenler tipik tekrarlanan yüklere maruz kaldığından, önemli bir ilgi konusu olmuştur. Literatürde yer alan çalışmada, tek bir karbon kord takviyeli hidrojene nitril üzerinde ilk yorulma testleri uygulanmıştır. Bütadien kauçuk (CC-HNBR) model kompozit, kord-kauçuk kompozitlerinin yorulma testi için rutin olarak kullanılan geleneksel kamalı çeneler ile yapılmıştır. Tao ve arkadaşları Şekil 3'te görüldüğü gibi kord-kauçuk yorulma testini uygulamışlardır. Test sırasında çekme yorulma davranışını karakterize etmek için toplam uzunluğu 240 mm olan kord-kauçuk numuneleri kullanılarak kordon uçları her bir kasnakta 2,5 tur dolanacak şekilde kullanılmıştır. Ayrıca kenar bölgelere bükülmeyi önlemek için kauçuk yastık uygulaması yapılmıştır. Malzemede oluşan deformasyon termal görüntüleme kullanılarak izlenmiştir. Meydana gelen yapı sonrasında modlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analizi yapılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde laboratuvar yorulma testi sırasında kord deformasyonunu hâkim olduğu çekme yorulma davranışı gözlenmiştir. Geliştirilen test metodolojisinin kord-kauçuk kompozitlerinin içsel yorulma davranışının karakterizasyonu için uygun olduğu görülmüştür (Tao vd., 2018).



Şekil 3. Kord-kauçuk yorulma testinin şematik gösterimi (Tao vd., 2018)

4. Kord yapısını oluşturan malzemeler

Kordun yapısını oluşturan malzemelerin seçiminde, malzemenin mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi doğru materyali seçmede önemli bir yer tutmaktadır. Aramid elyaflar (aromatik poliamidler), yüksek performanslı mühendislik elyafları arasındadır. Poliamidler arasında yüksek mukavemet, yüksek modül, iyi ısı ve alev direnci özelliklerine sahiptir. Yüksek performanslı aramid elyafların sunduğu özellikler ve kullanıldıkları çok sayıda uygulama göz önüne alındığında, bu elyafların ileri ve modern teknolojilerde tercih sebebi olmaktadır. Akato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mühendislik tasarımı ve malzeme seçimi için aramid elyaflardan Kevlar, Nomex, Technora ve Twaron malzemelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Kevlar malzemesinin çok sert zincirlere sahip bir paraamid elyaf türü ve olağanüstü mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu özellikler, malzemenin yüksek anizotropisinden dolayı yalnızca bir yönde oluşmaktadır. Kevlar yapısının aksine, Nomex ise tamamen aromatik bir poliamid yapıya sahiptir. Nomex aleve veya yüksek ısı kaynağına maruz kaldığında termal ve boyutsal olarak

kararlı bir yapı gösterir. Technora ise kopolimer zincirlerinin daha yüksek esnekliği ile bilinmektedir. Diğer aramid elyaflara göre gevşek kristal yapısı nedeniyle daha düşük kristallığe sahiptir. Twaron, yüksek performanslı elyaflar arasında yoğunluk değeri en yüksek olan malzemedir. Diğer önemli özelliği ise yanma ve erimeye karşı diğer elyaflara olan üstünlüğüdür. Kevlar ve Nomex'e ile kıyaslanan mekanik özelliklere ve maliyet etkinliğine sahip alternatif elyafları değiştirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Moleküler ağırlık, diğer birçok faktörden etkilendiğinden, özellikle iyileştirilmesi açısından birçok araştırmaya konu olmuştur (García vd., 2010). Örneğin; sert çubuk polimerden elde edilen ve Magellan Systems International tarafından üretilen M5 elyafları yüksek basınç dayanımına sahiptir. Literatürde yer alan çalışmalarda iki hidroksil grubu tarafından oluşturulan hidrojen bağları Kevlar'ın basınç dayanımının iyi olmaması, sınırlama faktörleri ve onu iyileştirme çabaları bilinmektedir. Yeni yüksek performanslı elyafların bir başka örneği, ticari olarak Zylon olarak bilinen poli (p-fenilen-2,6 benzobisoksazol - PBO)'dur. Yanabilirlik verileri, PBO'nun tutuşma süresinin Twaron'dan üç kat, Nomex'den dört kat daha iyi olduğunu göstermektedir. Minimum ısı yayma oranına sahip Nomex'in bu özellikleri PBO elyafların olağanüstü elastisite modülü ve çekme mukavemeti sağlar. Polyester bazlı elyaflar, kabul edilebilir gerilme modülüne sahip aramid elyaflara kıyasla maliyet açısından tercih sebebidir. Tablo 1'de mekanik özelliklerine göre yüksek performanslı aramid malzemeler kıyaslanmıştır.

Tablo 1. Yüksek performanslı elyafların mekanik özelliklerinin karşılaştırması (Akato & Bhat, 2017)

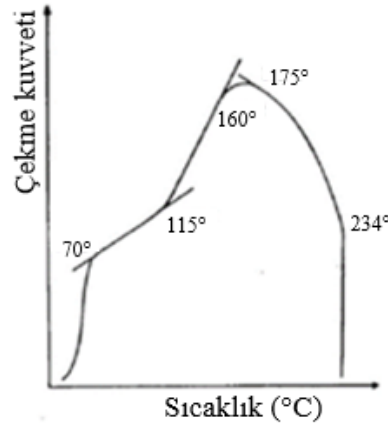
Özellik	Kevlar	Nomex	Technora	Twaron
Yoğunluk (g/cc)	1.44	1.38	1.39	1.45
Su kullanım hızı / nem oranı (%)	3.9	5.2	4.0	5.01
Gerilme (GPa)	2.9-3.0	0.59-0.86	3.4	2.4-3.6
Elastisite Modülü (GPa)	70-112	7.9-12.1	72	60-120
Uzama (%)	2.4-3.6	20-45	4.6	2.2-4.4
Yanıcılık (O ₂ index)	29	29	25	29-37

Naylon elyafların, kimyasal yapılarındaki poliamid bağları arasındaki hidrojen bağları sayesinde moleküller arası çekimlerde kuvvetli elyaflar oluşturmaktadır. Hidrojen bağları malzemenin iç yapısında çekirdeklenme bölgeleri oluşturmaktadır. Naylonların geçiş sıcaklığı 40°C ile 60°C arasındadır. Naylon elyafların gerilme miktarı termo mekanik analiz ile tespit edilmektedir. Naylon elyaf üretiminin çoğunu Naylon-6 ve Naylon-66 reçineleri oluşturur. Naylon elyaflar birçok alanda kullanılmaktadır. Halılar, tekstiller, iplikler, misinalar ve lastik kordları gibi birçok uygulamada bulunur. Naylon elyaflar, sürekli organik yapıdadır. 1947 yılından günümüze ticari lastiklerde kullanılmaktadır. Nylon ve polyester malzemeler diğer elyaflara göre nemden daha az etkilenmektedir. Kevlar malzemesine göre Nylon-66 ve polyester daha düşük maliyetlere sahiptir. Polyester ve Nylon-66 malzemelerinin olumsuz yanı ise diğer elyaflara göre yüksek sıcaklık değerlerinde daha çok kısalmalarıdır.

Tablo 2. Lastik kordlarında kullanılan elyaf malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması (DuPont, 1971)

Özellik	Kevlar49	Nylon-66	Polyester	HS Polyethylene
Yoğunluk (lb/in)	0.052	0.042	0.050	0.065
Çekme kuvvetine karşı direnç (10 ³ psi)	435	143	168	375
Elastisite Modülü (10 ⁶ psi)	16.3	0.8	2.0	17
Kopma anında uzama (%)	2.4	18.3	14.5	3.5
Kopma esnekliği (10 ⁶ in)	8.37	3.4	3.36	10.7
Ayrışma Sıcaklığı (°C)	472-482	254	256	149

Judovits ve arkadaşları yaptıkları çalışmada diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC) ile Naylon-6.6 malzemesinin sıcaklık ve çekme kuvveti ilişkisini incelemiştir. Polimer yapılarında olduğu gibi Nylon-6.6 malzemesi de sıcaklık ve çekme kuvveti etkisiyle uzama davranışı göstermektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi Nylon-6.6 malzemesi 70°C'ye kadar yüksek bir çekme oranına sahiptir. 70°C ile 115°C aralığında ise daha yavaş bir çekme oranı olduğu görülmüştür. Plastik şekil değişimi ise 175°C'den 234°C'ye kadar izlenmiştir. Bu durum naylon elyafların kristal boyutları ile ilişkilidir. Termal analiz test sonuçları; malzeme içeriğindeki daha düşük naylon sayısının, malzemede daha yüksek erime noktasına neden olduğunu göstermektedir. Diğer yapılan testlerde ise tek sayılı naylonların, sıralı çift sayılı naylonlara kıyasla daha yüksek bir erime noktasına sahip olduğu kanıtlanmıştır.



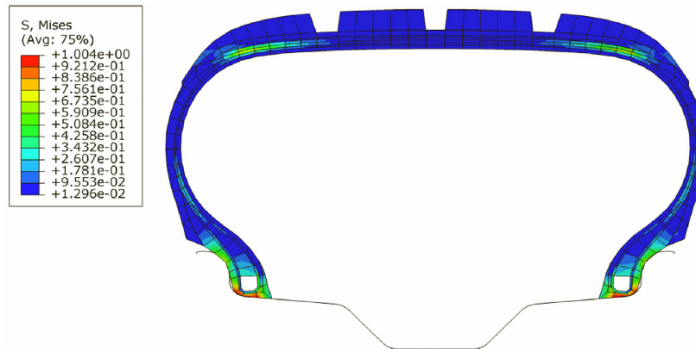
Şekil 4. Naylon-6.6 sıcaklık ile çekme kuvveti ilişkisi (Judovits, 2020)

Elastomer malzemelerin molekülleri zincire benzer yapıdadır. Molekül yapısı ısıya maruz kaldığında vulkanizasyon etkisiyle kimyasal değişim meydana gelir. Elastomerlerin mekanik yapısı ve performansında vulkanizasyon prosesi önemli bir etkiye sahiptir. Vulkanizasyon, çapraz bağlanma etkisiyle kauçuğun yapısında kimyasal olarak geri dönüşümsüz elastik özelliklerde bir yapı oluşmasıdır. Lastik yapısında sırt kauçuğu vulkanizasyonunun özellikle arazi (OTR) lastikleri için önemli olduğu bilinmektedir. Zirai alanda bulunan anızlar kesilme, kopma gibi araç lastiklerine zarar verebilmektedir. Dolayısıyla zirai araç lastikleri anız direncine karşı dayanıklı olmalıdır. Literatürde yapılan çalışmada, lastik sırt vulkanizasyon işleminin anız direnci üzerinde, kısa aramid elyafı ve iki farklı reçinenin etkisi incelenmiştir. Lastik yapısı içinde aramid elyaf oranının artırılması bileşiğin modülünü artırdığını ortaya çıkarmıştır. Reçine dolgulu bileşimler, esnek bir yapıda olduğu için zincir oryantasyonu yoluyla lastik üzerindeki gerinimi dağıtmaktadır. Elyaf dolgulu bileşimler ise reçine dolgulu bileşimlere göre daha iyi kesilme direnci göstermiştir (Saha vd., 2021).

Literatürde yerini alan bir diğer çalışmada, yüksek performanslı elyaflardan kevların anti-darbe mekanizmasını araştırılmıştır. STF (Shear Thickening Fluid) emdirilmiş Kevlar (STF/Kevlar) kumaşın mekanik özelliği ve enerjiyi absorbe etme gücü Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) sistemi kullanılarak yüksek gerilme hızında gerçekleştirilmiştir. STF kumaş numunesinin sayısı ve darbe hızının, STF/Kevlar kompozit yapısının mekanik performansını etkilediği görülmüştür. Çalışmanın sonucunda, STF kumaşının yüksek viskozitesi nedeniyle kumaş iplikleri arasındaki sürtünmeyi artırdığı görülmüştür (Cao vd., 2017).

5. Sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısının incelenmesi

Lastik iç yapısının incelenmesinde ve lastik hareketini tahmin etmede sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bilindiği gibi lastikler, güçlendirilmiş elastomerlerden yapılmış kompozit bir yapıya sahiptirler. Lastik ve benzeri kompozit yapıların performansını tahmin etmede sonlu elemanlar analizi zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Bu analizleri doğrulamak için lastik bileşenlerinin mekanik davranışını tanımlamada seçilen malzeme modellerinin geçerli olması gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, lastik kompozit yapısının malzeme modellemesinde, Yeoh ve Marlow gibi çeşitli malzeme modelleme analizleri kullanılmaktadır. Korunovic ve arkadaşları Şekil 5'de gösterildiği gibi doğrusal olmayan malzeme modellerinden Marlow modelinin avantajlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir.

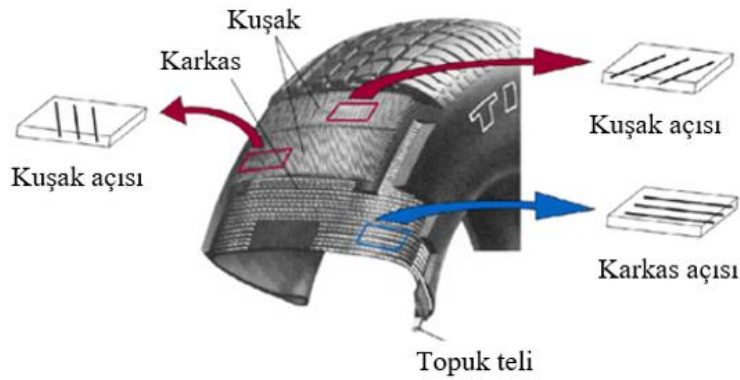


Şekil 5. Marlow malzeme modellemesi ile lastikte gerinim analizi (Korunović vd., 2019b)

Sonlu elemanlar analizinde; Yeoh modeli kullanılarak elde edilen gerilme değerleri ile Marlow modeli kullanılarak elde edilen gerilme değerleri kıyaslandığında fark %50 kadardır. Bu farkın komşu karkasın farklı bir davranışından kaynaklandığı analiz

edilmiştir. Marlow malzeme modelinde tek eksenli hacimsel davranışı tanımlayan test verisi ile analiz yapılmıştır. FEA(Finite Element Analysis) yazılımında malzeme modeli parametreleri doğrudan belirtilebilir veya yazılımın uygun matematiksel değerleri otomatik olarak seçmesi sağlanabilir. Lastikler araç altında genellikle tek eksenli gerilmeye maruz kalırlar. Bu nedenle Marlow modelinde girdi olarak yalnızca tek eksenli test verileri kullanılır. Yeoh modelinde benzer şekilde tek eksenli davranış incelenmiştir. Yeoh yazılımında Marlow'a benzer şekilde malzeme katsayılarını programa tanımlayabilir veya programın otomatik olarak belirlemesi sağlanabilir. Tek eksenli Marlow modeli test verilerini doğru bir şekilde takip ettiği için en doğru sonuçları verdiği değerlendirilmiştir. Günümüzde sonlu elemanlar analizi yardımıyla lastik kord modelleri, lastiklerin ayrıntılı analizi ve kord modellerinin performansını doğrudan karşılaştıran çalışmalar yapılmaktadır. Aramid kordlar, çelik kordlara alternatif olarak hafiflik avantajı ile tercih sebebidir.

Literatürde, lastik yapısının doğrusal olmayan ve doğrusal kord malzeme modellemesi yöntemi kullanılarak analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Gerçekçi bir lastik modeli üzerinde gerçekleştirilen örneklerle FEA kullanılarak lastik kordu modellemesi ve ilgili temel ilkelerin yanı sıra, lastik kordunun tipik mekanik özellikleri açıklanabilmektedir. Doğrusal malzeme modelleme, basit ve hızlı hesaplama yöntemi ile yapısal analizi ortaya çıkarmaktadır. Fakat kordun doğrusal olmayan davranışını analiz etmede bu yöntem yetersiz kalmıştır. Yeoh modellemenin; düzgün uyum sağlayan eğrileri, doğrusal olmayan davranış gösterdiği görülmüştür. Ancak sıkıştırmada lastik kordunun gerilme-gerinim eğrisinin spesifik şeklini doğru bir şekilde tahmin edemediği görülmüştür. Marlow modelleme ise yalnızca gerinim verilerine dayalı olarak doğru veriler ortaya koymaktadır. Marlow modelleme, daha fazla hesaplama kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Marlow model parametrelerinin tanımlanması sırasında verileri sadeleştirme seçeneğinin kullanılması, lastik FEA'nın hesaplama verimliliğinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Bu nedenle, lastik modellemesi için yapılan hesaplamalarda doğrusal olmayan kord malzeme modellerinin kullanımı önemli bir etkiye sahiptir. Radyal yapıda bir otomobil lastiğinde Şekil 6'da görüldüğü gibi karkas, topuk teli, kuşak temel bileşenleri bulunmaktadır. Lastik gövde katlarında genellikle nylonndan yapılmış tek filamentli kord yapısı kullanılır.



Şekil 6. Radyal lastiğin yapısal bileşenleri (Korunović vd., 2019b)

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir başka çalışma konusu da yol teması olmayan lastiklerde davranış modellemesi olmuştur. Araştırmacılar tarafından seçilen kamyon lastikleri 9.00R20 ve 9.00-20 için karmaşık sonlu eleman modelleri geliştirilmiş sonlu elemanlar modellemesi üzerine çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada; lastiklerin radyal titreşimleri için rezonans frekanslarının değerleri elde edilmiştir. Rezonans frekans değerleri yardımıyla lastiklerin radyal model davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, rezonans frekansları ve mod sırası arasındaki ilişki neticesinde radyal lastiğin birinci dereceden frekansı dışında yarı doğrusal olduğu görülmüştür. Yol temasının olmadığı, lastiklere şişirme basınçları uygulanan durumda iki farklı lastik yapısı radyal ve çapraz konstrüksiyonda rezonans frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Çapraz konstrüksiyona sahip olan lastiğin, artan dikey sertlik nedeniyle daha yüksek rezonans frekans değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Moiescu vd., 2018).

Gupta ve arkadaşları (Gupta vd., 2021) yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile kauçuk lastik – ray temas davranışının sayısal analizini yapmışlardır. Çalışmada ANSYS yazılım programı aracılığıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmanın amacı sonlu elemanlar analizi yapmak, şişirme basıncını değiştirerek lastik ve janttaki eşdeğer gerilme verilerinin belirlenmesidir. Von-Misses gerilmeleri yorumlanarak kauçuk lastik – ray arasındaki eşdeğer sürtünme gerilmeleri analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar modellemesi ile elde edilmiş sonuçlar, lastiğin modelini doğruladığı belirlenmiştir. Ayrıca analiz verilerine göre gerilmelerin ve deformasyon değerlerinin mühendislik değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonlu elemanlar yöntemi ile lastik zemin davranışının incelenmesi literatürde bir başka araştırma konusu olmuştur. Yapılan çalışmada lastikte güç kaybı olduğunda, lastiğin şişirme basıncına ve toprak nem içeriğine etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak lastikteki güç kaybını analiz etmek için lastik-zemin etkileşiminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda lastik üzerindeki dikey yükün artmasının lastiğin toprakla temas hacmini artırdığı ispatlanmıştır. Ayrıca lastik üzerinde oluşan dikey

yüklerin, kayma yüzdesini azaltmada ve yuvarlanma direncini artırmada etkili olduğu görülmüştür (Farhadi vd., 2020). Binek araç lastiklerinde yuvarlanma gürültüsü değeri dB birimi cinsinden lastik etiketinde bulunmak zorundadır. Lastik yuvarlanma gürültü değeri aralığı uluslararası lastik otoriteleri tarafından belirlenmiştir. Örneğin; düşük ses seviyesinde çalışan lastiklerde bu değer 67-71 dB gürültü aralığındadır. Literatürde, sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yuvarlanma gürültüsünün simülasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Lastiklerden yayılan gürültünün analizi için fiziksel tabanlı bir hesaplama modeli oluşturulmuştur. Lastik dinamiği ve ses radyasyonunun incelenmesi için temel sayısal yöntemlerin kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Oluşturulan hesaplama modeline ek olarak, lastik/yol sisteminin ayrıntılı bir analizi, lastiğin yapısal parametreleri, sürüş hızı, yol pürüzlülüğü, vb. tüm bileşenlerin doğru bir şekilde tanımlanması gerekliliği değerlendirilmiştir (Farhadi vd., 2020).

6. Kord-kauçuk kompozitleri için yapısal model oluşturma

Kompozit yapılarda yapısal modelleme ile malzemenin mekanik davranışları tahmin edilebilmektedir. Farklı çalışma koşullarında, doğrusal olmayan anizotropi ile kauçuk malzemenin mekanik davranışlarını karakterize etmek için, kauçuk ve kord arasındaki etkileşime yapısal bir model geliştirilmiştir. Toplam gerinim enerjisi üç parçaya ayrıştırılır. Kauçuktan, korddan ve kauçuk ile kord arasındaki etkileşimden gelen gerinim enerjisidir. Parçacık sürüş optimizasyonu ve Newton yineleme yöntemine dayalı olarak, model parametreleri için bir optimizasyon algoritması önerilmiştir. Parçacık sürüş optimizasyonu bir problemi çözebilmek amacıyla sürüdeki her bir parçayı çözüm olabilecek şekilde değerlendirir. Sürüdeki en iyi sonucu veren parçacık, sürünün içinde en iyi olarak tanımlanır. Newton yineleme yöntemi ise sonuca ulaşabilecek gerçek köke yakın bir değeri tahmin ederek başlar. Sonrasında ise karmaşık fonksiyon ve denklemler ile sistem genişletilerek devam eder. Elde edilen parametreler ile kauçuk-kord kompozitlerinin mekanik davranışları geliştirilen model ile tahmin edilmekte ve tahmin sonuçları test verileri ile iyi bir uyum göstermektedir. Bilim insanları tarafından önerilen model, sonlu eleman simülasyon sonuçları ile kauçuk-kord kompozitlerinin tek eksenli gerinim verilerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır (Zhao vd., 2020b).

Kord-kauçuk kompozit yapısının kırılma duyarlılığı üzerindeki etkisini belirlemek için farklı tipte çelik kord takviyeleri kullanılmaktadır. Kırılma duyarlılığı, malzemenin çekme kuvvetine maruz kaldığında göstermiş olduğu tepki olarak tanımlanır. Elastomerler düşük elastisite modülüne sahip kauçuklardan meydana gelir. Bu elastomer yapılar farklı tipte çelik kord takviyeleri ile güçlendirilmiş yapı elde edilebilir. Örneğin; 3+7*0.22 çelik kord takviye yapısı yedi adet 0.22mm çapında üç demet teli ifade eder. Günümüzde kullanım amacına göre farklı tipte çelik kord takviyeli yapılar tercih edilebilir. Çelik kord takviye yapısının analizinde Neo-Hooke malzeme modeli geniş uygulanabilirliği ve düşük sayıda malzeme parametresi girdisi nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Neo-Hooke modelinde malzemenin gerinim-gerilim tepkisini tespit etmek için enerji fonksiyonu kullanılır (Eşitlik 1) (Popa vd., 2020).

$$\psi(\bar{\mathbf{b}}) = \frac{\mu}{2} \cdot \left(I_{\bar{\mathbf{b}}} - 3 \right), \quad (1)$$

Modelde μ : kayma modülü, $I_{\bar{\mathbf{b}}}$: Cauchy-Green sabiti, $\bar{\mathbf{b}}$: Kirchoff gerilim değerini ifade eder. Cauchy-Green sabiti, malzemenin hareketiyle ilgili nicelik değeridir. Malzeme hareket alanını sağ ve sol olarak tanımlar. Kirchoff gerilim değeri malzeme davranışını simetrik olarak kabul etmez, asimetric yapıda malzeme hareketlerini ifade eden indeks değeridir.

Kompozit, bükülmüş takviye kordlarının karmaşık geometrisini belirlemek için genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir. Malzeme yapısına göre modelleme yapılırken basit bir sayısal algoritma oluşturma önemlidir. XFEM (Extended Finite Element Method), yardımı ile kord üretim tekniği ve malzeme kuvveti konseptine dayalı bir yapı oluşturulabilir. Günümüzde araştırmacılar kord takviyesi tipinin kompozitin genel kırılma davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için yerel modellerle statik analizler yapmaktadırlar. Doğrulanmış deneyler ve verilerle problemi analiz etmek için yapısal model oluşturma iyi bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Araç lastiği kordlarının şekillendirme sırasındaki mekanik davranışlarını anlamak için birçok araştırma yapılmıştır. Barry ve arkadaşları (Barry vd., 2020) yaptıkları çalışmada, şekillendirme işlemi sırasında örgülü bir kordun mekanik davranışına katkıda bulunan faktörleri incelemişlerdir. Malzeme özellikleri LS-DYNA programı ile modellenmiş olup ortotropik malzeme modelinin eksenel çekme testi yapılmıştır. Elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış gerçek test sonuçlarının deneysel verilerle iyi bir ilişki içinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, deneyde meydana gelen düşük gerinimlerdeki doğrusal olmayan verilerin, doğrusal malzeme modelleme ile elde edilemeyeceği ispatlanmıştır.

Kord takviyeli kauçuk kompozitlerin anizotropik hiper-viskoelastik davranışları literatürde araştırma konusu olmuştur. Yapılan çalışmada, ağısı kumaş takviyeli kauçuk kompozitler için anizotropik hiper-viskoelastik yapı modeli geliştirilmiştir. Yapı modeli oluştururken sıcaklığın etkisi de dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, kord takviyeli kauçuk kompozitlerin farklı sıcaklıklarda hiperelastik ve viskoelastik davranışlarını karakterize etmede etkili bir model sunmuşlardır (Yang vd., 2018). Malzeme davranışını

tahmin etmede hiperelastik modelin gerçeğe yakın sonuçlar ortaya çıkardığı gösterilmiştir. Kauçuk kompozitlerin viskoelastik davranışını temsil eden matematiksel model Prony serisi Eşitlik 2’de görülmektedir (Yang vd., 2018).

$$W_{hyperelastic} = C_{10}(I_1-3) + C_{01}(I_2-3) + \frac{k_1}{2k_2} \sum_{j=4,6} \left[e^{k_2(I_j-1)^2} + \frac{k_2}{4}(I_j-1)^2-1 \right] \quad (2)$$

Viskoelastik davranış eşitliğinde C_k , g_i , malzeme sabit değerlerini ifade etmektedir, τ_i malzemenin gevşeme süresidir. N Prony serisindeki terim sayısıdır. Viskoelastik davranışı temsil eden malzeme modeli Prony serisinde sıcaklık etkisi dikkate alınmamıştır. Kauçuk kompozitlerin hiperelastik davranışının matematiksel modellemesi Eşitlik 3’te belirtilmiştir (Yang vd., 2018).

$$C_k(t) = C_k^0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right] \quad (3)$$

$$C_k^\infty = C_k^0 \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i \right)$$

Hiperelastik davranış eşitliğinde C_{10} , C_{01} , g_i malzeme sabiti değerlerini, k_1 , MPa biriminde gerilmeyi ifade ederken k_2 ise boyutsuz bir parametre değeridir.

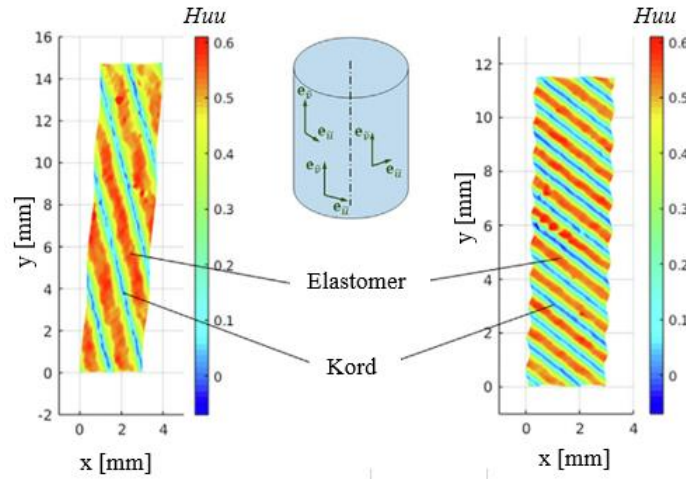
Literatürde yer alan bir diğer çalışmada kord kauçuk contanın kesit şekli tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Kord kauçuk contanın temel performansına göre optimizasyon kısıtlamaları değerlendirilmiştir. Optimizasyon hedefi ve ilgili hesaplama yöntemleri çapraz kordun kauçuk contanın kesit şekilleri, gaz basınç farkları, sıcaklıklar ve çok amaçlı optimizasyon tasarımı altında elde edilmektedir. Sonuçlar şekil optimizasyon yönteminin, kord kauçuk contanın tasarımı ve üretimi için önemli bir kılavuza sahip olduğunu göstermiştir (Dong vd., 2021).

7. Kord-kauçuk yapışma analizi

Kauçuk kaplı kumaşlar, işlenebilirlik kabiliyetleri ve mekanik özellikleri nedeniyle birçok alanda tercih sebebi olmaktadır. Kauçuk kaplı bir kumaşın yapışma mukavemetinin iyileştirilmesi, kuru üç bileşenli bir sistemin hidratlı silikat (HRH), nitril kauçuğun (NBR) bir naylon korda yapışması üzerindeki etkisi Darwish ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Darwish vd., 2000). Literatürde yer alan çalışmalarda polyesterin hidrofobik doğası nedeniyle etilen propilen dien monomer (EPDM) ve polyester kumaş arasındaki yapışma mukavemetinin düşük olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca uzun yağlı alkid reçinesinin (LAR) EPDM kauçuk ve polyester kumaş için en iyi yapışma artırıcı olduğunu bilinmektedir. Bununla birlikte, LAR kullanımı, yüksek gaz geçirgenliği, düşük termal kararlılık, yüksek yanıcılık ve ultraviyole (UV) ışınlar karşı bozulmasına karşı düşük direnç gibi bazı dezavantajları vardır. Polimerin üstün bariyer özellikleri, alev geciktiriciliği vb. özellikleri mevcuttur. Morfolojik çalışmalara dayanarak, nano dolgu maddelerinin bir polimer matrisi içine dağılmasında iki farklı faz bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda; nano kilin hidrofobik bir EPDM elastomeri ile uyumsuzluk gösterdiği bildirilmiştir. Bu nedenle, EPDM ve nanokil arasındaki daha iyi etkileşim için, polimerin maleik anhidrit ile aşılması gerektiği ortaya konmuştur. Lastiğin yapısındaki kauçuk ile metal kordlar arasındaki yapışma önemli bir etkiye sahiptir. Kauçuk-metal yapışmasını değerlendirmek için kullanılan standart testler, lastik yapısının iç ara yüzey davranışını tahmin etmede yetersiz kalmaktadır.

8. Kord gerinim analizi

Kord ve elastomer malzemeler yük altında farklı mekanik gerinim özelliklerine sahiptirler. Poliamid kord takviyeli kord-kauçuk kompozitlerini kapsayan bir çalışmada; Lehmann ve arkadaşları numunelere iç basınç, sıkıştırma ve burulma içeren bir yükleme prosedürü uygulaması ile kord-kauçuk gerinim analizi yapmışlardır (Lehmann&Ihlemann, 2020). Numunelerin yüzeyindeki deformasyon analizleri Şekil 7’de görüldüğü gibi 3D dijital görüntü korelasyonu uygulanmıştır.



Şekil 7. Gerinim dağılımı (sol: kord açısı 10° / sağ: kord açısı 35°) (Lehmann&Ihlemann, 2020)

Teğetsel gerinim değerleri, DIC (Dijital Image Correlation) nokta verilerinin B-spline yaklaşımı kullanılarak özel bir değerlendirme prosedürü ile belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde kord ve elastomer bölümleri arasında büyük gerinim farklılıkları olduğu analiz edilmiştir.

Tekstil kordların üretimi sırasında kord üzerinde çözülme gerinimi meydana gelir. Üretimde meydana gelen bu gerinim, kordun fiziksel, büzülme özelliklerini ve yapışma performansını etkiler. Ayrıca, kord geriniminin lastik homojenliği üzerinde etkisi olduğu da bilinmektedir. Lastik endüstrisinde en yaygın kullanılan tekstil malzemeler poliamid, polyester, aramid ve rayondur. Elyaf uygulamaları ve aromatik poliamidler veya alifatik poliamidler olarak sınıflandırılabilir. PA6.6 (POLIAMID 6.6) en çok kullanılan yüksek modüllü, düşük modüllü çeşitleri ile yorulmaya dayanıklı ve yapışkan sentetik ipliktir. Kordların kullanım amacı hasarlara ve yorulmaya karşı direnci arttırmaktır. Herhangi bir tekstil malzemesinin işlenmesinde gerinim en önemli parametrelerden birini temsil etmektedir.

Literatürde tekstil kordların üretim sürecinde oluşan çözülme kuvveti değerleri üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada 0.27m çapında poliyamid kord malzemeleri iki grup halinde bobine sarılmıştır. Test çalışması iki grup halinde yapılmış ve farklı çekme kuvvetleri uygulanmıştır. Kordun çözülme kuvveti değerlerini elde etmek için test makinesindeki kelepçelere kord numuneleri bağlanarak tekstil kordlar kopana kadar çekme kuvveti uygulanmıştır. Test sonucunda birinci grup altı adet kord numunesinin ortalama çözülme kuvveti değerinin 14,17 N olduğu görülmüştür. İkinci grup tekstil kordlarda dört adet numunenin ortalama çözülme kuvveti değerinin ise 21.32 N olduğu görülmüştür. Birinci grup için 14,17 N ortalama kord çözülme kuvveti için küçük şerit üzerindeki kauçuk boşluklar tespit edilmiştir. İkinci grup için ise 21,32 N'luk çözülme kuvveti değerlerine ulaşıldığında ise özellikle şerit uçlarında kauçuk kopmaları meydana geldiği tespit edilmiştir (Costa vd., 2019).

9. Lastik konstrüksiyonu ve şişirme basıncının lastik zemin temasına etkisi

Araç lastiklerinde zeminle temas eden yüzey, lastiğin sırt bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Zeminle direk temas halinde olan sırt bölgesinin kimyasal bileşimi, konstrüksiyon yapısının lastiğin mukavemetinde etkisi büyüktür. Lastik şişirme basınç değeri de lastiğin zeminle temasını doğrudan etkileyen parametredir. Araç lastiklerinde ideal lastik kullanım basıncı değeri lastik yüzeyinde belirtilmektedir. Bazı araçlarda bu değer kapı iç kısmında bulunmaktadır. Lastik basınç değeri, aracın taşıma kapasitesi, aracın maksimum ulaşabileceği hız vb. parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir. Literatürde lastik şişirme basıncının lastiğin zeminde bıraktığı iz (taban izi) ile ilişkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Damme ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, modern geniş konstrüksiyona sahip lastiklerin düşük şişirme basıncı altında toprak zeminde bıraktığı izi incelemişlerdir. Lastik ve zemin arasındaki etkileşim zemin üzerinde oluşan gerinim dağılımı için önemlidir. Çalışmada benzer boyutlara sahip üç tip geniş, düşük şişirme basınçlı lastiğin zemin üzerinde oluşturduğu iz (taban izi) profili incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında taban izinin belirli lastik yapısından etkilenmediği görülmüştür. İkinci aşamada ise lastik için önerilen en düşük şişirme basıncında test yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise benzer çekiş gücüne sahip lastiklerin farklı ağırlık ve çekiş gücü altında testleri yapılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, lastik konstrüksiyon yapısının lastiğin zemin üzerinde bıraktığı izde sınırlı bir etkisinin olduğu görülmüştür. Lastik merkez bölgesi altında hiçbir fark olmadığı fakat arka akstaki lastiklerde +0,2m derinlikte +0,3m taban izi farkı olduğu test edilmiştir. Lastik yükünün azaltılması ve buna bağlı düşük şişirme basıncının zeminde oluşan taban izinde küçülme analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, toprak gerilmesini azaltmak için lastik tasarımının ve kullanımının geniş bir temas alanına sahip olması gerektiği, lastikte düşük şişirme basıncında çalışması gerektiği değerlendirilmiştir (ten Damme vd., 2020). Günümüzde zirai alanda ağır tonajlı tarım makinelerinin kullanımı, toprak zeminde istenmeyen büyüklükte sıkıştırmaya sebep olabilmektedir. Bu

durum zirai mahsuller için bir risk oluşturmaktadır. Lastik ile zemin arasındaki temas, gerinme dağılımı kontrol altında olmalıdır. Lastiği oluşturan bileşenler ve konstrüksiyon yapısı özellikleri toprak gerilmesini etkilemektedir. Benzer yapıda olan lastikler incelendiğinde; yeni lastiğin eski lastiğe (kullanılmış lastik) oranla toprak sıkıştırma miktarının daha az olduğu ispatlanmıştır. Benzer boyutlara ve şişirme basınçlarına sahip ancak farklı yapıya sahip lastikler için toprak sıkıştırma miktarının farklı olacağı değerlendirilmiştir. Oluşan toprak gerilmesinin lastiğin genişliği, uzunluğu ve şişirme basıncıyla ilişkili olduğunu bilinmektedir. Ayrıca zemindeki gerilme dağılımının; lastik konstrüksiyon yapısı çapraz, radyal gibi belirli lastik yapısıyla veya bir lastiğin çelik kuşaklı olması durumuyla ilgili olduğu düşünülmektedir (ten Damme vd., 2019).

Günümüzde lastik zemin arası gerilme dağılımını FRIDA modeli yardımıyla analiz etmek mümkündür. FRIDA modellemesinde lastik zemin temas alanı elips bir yapı olarak değerlendirilir ve bu yöntemle lastik zemin teması ilişkisinin doğru bir şekilde tanımladığı görülmüştür. Schjønning ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, FRIDA modelleme yardımıyla iki farklı yapıda olan; çekiş gücü yüksek (traction) ve standart tarım uygulamaları (implement) lastiklerin zemin temasını incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, tavsiye edilen şişirme basıncında çekiş gücü yüksek lastiklerin yüzey teması %14 iken, standart tarım uygulamaları (implement) lastiklerin zemin yüzey temasının %18 olduğu görülmüştür (Schjønning vd., 2015).

10. Sonuç

Bu çalışmada, kord-kauçuk kompozit malzemelerin araç lastikleri konstrüksiyon yapısı ve lastik davranışına etkisi konularında yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları derlenmiştir. Lastik yapısında kritik öneme sahip olan kord-kauçuk kompozit yapısının analizinde kullanılan test yöntemleri incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde kauçuk içeren kompozit yapıların havada 200°Cye kadar stabil olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca silika ve hidrolize proteinin kauçukta tamamlayıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Günümüz lastik teknolojisinde hidrolize protein partikülleri; silika ve polimer ile etkileşimlerinden dolayı silika takviyeli kauçuk kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde sonlu elemanlar yöntemi ile lastik yapısının incelenmesinde Yeoh ve Marlow gibi çeşitli malzeme modelleme analizlerinin kullanıldığı belirtilmiştir. Marlow modeli test verilerinin doğru sonuçları verdiği değerlendirilmiştir. Günümüzde sonlu elemanlar analizi yardımıyla lastik kord modelleri, lastiklerin ayrıntılı analizi ve kord modellerinin performansını doğrudan karşılaştıran çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde tarım faaliyetlerinde kullanılmakta olan lastiklerde şişirme basıncının lastiğin zeminde bıraktığı iz (taban izi) ile ilişkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Damme ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, modern geniş konstrüksiyona sahip lastiklerin düşük şişirme basıncı altında toprak zeminde bıraktığı izi incelemiştir. Zirai lastik kullanımında, toprak gerilmesini azaltmak için lastik tasarımının ve kullanımının geniş bir temas alanına sahip olması gerektiği, lastikte düşük şişirme basıncında çalışması gerektiği değerlendirilmiştir. Zirai lastik üreticilerinin, düşük maliyet, zeminde daha geniş taban izi, düşük basınçta daha fazla yük taşıyabilmek amacıyla IF (Improved Flexion) ve VF (Very High Flexion) lastikler üzerinde arge çalışmalarının yapılması gerekliliği değerlendirilmiştir.

Referanslar

- Akato, K., & Bhat, G. (2017). High performance fibers from aramid polymers. In *Structure and properties of high-performance fibers* (pp. 245-266)
- Barry, C., Panerai, F., Bergeron, K., Stapleton, S. & Sherwood, J., (2020). Mesomechanical Modeling of Braided Cords. *Procedia Manufacturing*, 47 162-168.
- Cao, S., Chen, Q., Wang, Y., Xuan, S., Jiang, W. & Gong, X., (2017). High Strain-Rate Dynamic Mechanical Properties of Kevlar Fabrics Impregnated with Shear Thickening Fluid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100 161-169. 10.1016/j.compositesa.2017.04.015
- Costa, C., Silva, F., Campilho, R., Neves, P., Godina, R. & Ferreira, S., (2019). Influence of Textile Cord Tension in Cap Ply Production. *Procedia Manufacturing*, 38 1766-1774.
- Darwish, N., Lawandy, S., El-Shazly, S. A. & Abou-Kandil, A., (2000). Effect of Bonding Systems on the Adhesion of Nitrile Rubber to Nylon Cord. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 39 (5): 793-806.
- Dong, Y., Yao, X. & Xu, X., (2021). Cross Section Shape Optimization Design of Fabric Rubber Seal. *Composite Structures*, 256 10.1016/j.compstruct.2020.113047
- Dong, Y., Yao, X., Yan, H., Yuan, L. & Yang, H., (2019). Macro- and Mesoscopic Mechanical Properties of Complex Fabric Rubber Composite under Different Temperatures. *Composite Structures*, 230 10.1016/j.compstruct.2019.111510

DuPont. (1971). Technical Guide for Kevlar® Aramid Fiber.

Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi Malvajerdi, A. & Shahgholi, G., (2020). Tire and Soil Effects on Power Loss: Measurement and Comparison with Finite Element Model Results. *Journal of Terramechanics*, 92 13-22. 10.1016/j.jterra.2020.09.004

García, J. M., García, F. C., Serna, F. & José, L., (2010). High-Performance Aromatic Polyamides. *Progress in polymer science*, 35 (5): 623-686.

Gupta, A., Pradhan, S. K., Bajpai, L. & Jain, V., (2021). Numerical Analysis of Rubber Tire/Rail Contact Behavior in Road Cum Rail Vehicle under Different Inflation Pressure Values Using Finite Element Method. *Materials Today: Proceedings*, 47 6628-6635. 10.1016/j.matpr.2021.05.100

Jong, L., (2019). Improved Mechanical Properties of Silica Reinforced Rubber with Natural Polymer. *Polymer Testing*, 79 10.1016/j.polymertesting.2019.106009

Judovits, L. (2020). Thermal Analysis of Aliphatic Nylon Fibers. In *Thermal Analysis of Textiles and Fibers* (pp. 223-245).

Kane, K., Jumel, J., Lallet, F., Mbiakop-Ngassa, A., Vacherand, J. M. & Shanahan, M. E. R., (2020). Experimental Study of the Rubber Cord Adhesion Inflation Test. *Engineering Fracture Mechanics*, 224 10.1016/j.engfracmech.2019.106783

Kane, K., Jumel, J., Mbiakop-Ngassa, A., Lallet, F., Vacherand, J.-M., & Shanahan, M. E. (2021). Rubber cord adhesion inflation test: Effect of constitutive rubber model on evaluation of Gc. *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 107547.

Korunović, N., Fragassa, C., Marinković, D., Vitković, N. & Trajanović, M., (2019a). Performance Evaluation of Cord Material Models Applied to Structural Analysis of Tires. *Composite Structures*, 224 111006.

Lehmann, T. & Ihlemann, J., (2020). Strain Analysis of Cord-Rubber Composites Using Dic. *Materials Today: Proceedings*, 32 183-186. 10.1016/j.matpr.2020.04.537

Moisescu, A.-R., Anghelache, G. & Cristea, G., (2018). Investigation of Radial Modal Behaviour Using Finite Element Analysis for Truck Tyres without Road Contact. *Procedia Manufacturing*, 22 99-106.

Popa, C., Gebhardt, C., Raje, N., Steenwyk, B., & Kaliske, M. (2020). Investigation of cord-rubber composite durability by the material force method. *Engineering Fracture Mechanics*, 229, 106909.

Saha, S., Vineet, K., Bhowmick, A. K., Deuri, A. S. & Vaidya, D. M., (2021). Stubble Resistance of Rubber Vulcanizates: Influence of Short Fiber and Resin. *Polymer Testing*, 94 10.1016/j.polymertesting.2020.107048

Schjønning, P., Stettler, M., Keller, T., Lassen, P. & Lamandé, M., (2015). Predicted Tyre–Soil Interface Area and Vertical Stress Distribution Based on Loading Characteristics. *Soil and Tillage Research*, 152 52-66. 10.1016/j.still.2015.03.002

Sousa, S. P. B., Ribeiro, M. C. S., Cruz, E. M., Barrera, G. M. & Ferreira, A. J. M., (2017). Mechanical Behaviour Analysis of Polyester Polymer Mortars Reinforced with Tire Rubber Fibres. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29 (1): e162-e166. 10.1016/j.ctmat.2016.07.009

Su, B., Liu, S., Zhang, P., Wu, J. & Wang, Y., (2021a). Mechanical Properties and Failure Mechanism of Overlap Structure for Cord-Rubber Composite. *Composite Structures*, 274 114350.

Tao, Y., Windslow, R., Stevens, C. A., Bilotti, E., Peijs, T. & Busfield, J. J. C., (2018). Development of a Novel Fatigue Test Method for Cord-Rubber Composites. *Polymer Testing*, 71 238-247. 10.1016/j.polymertesting.2018.09.001

ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L. J. & Lamandé, M., (2019). The Contribution of Tyre Evolution to the Reduction of Soil Compaction Risks. *Soil and Tillage Research*, 194 10.1016/j.still.2019.05.029

ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L. J. & Lamandé, M., (2020). Construction of Modern Wide, Low-Inflation Pressure Tyres Per Se Does Not Affect Soil Stress. *Soil and Tillage Research*, 204 10.1016/j.still.2020.104708

Tonatto, M. L. P., Forte, M. M. C. & Amico, S. C., (2017). Compressive-Tensile Fatigue Behavior of Cords/Rubber Composites. *Polymer Testing*, 61 185-190. 10.1016/j.polymertesting.2017.05.024

Yang, H., Yao, X.-F., Yan, H., Yuan, Y.-n., Dong, Y.-F. & Liu, Y.-H., (2018). Anisotropic Hyper-Viscoelastic Behaviors of Fabric Reinforced Rubber Composites. *Composite Structures*, 187 116-121. 10.1016/j.compstruct.2017.12.026

Zhao, Z., Mu, X. & Du, F., (2020a). Constitutive Model Research for Rubber-Cord Composites Used in Rubber Track. *Materials Today Communications*, 23 100937.