

# OTOMOBİL LASTİKLERİNİN YAN KUVVET KARAKTERİSTİKLERİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMIYLE BELİRLENMESİ

Ergin Tönük, Y. Samim Ünlüsoy

\*Dr. Öğretim Görevlisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği  
Bölümü

\*Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü

## ÖZET

*Bu çalışmada, önce tipik bir küçük otomobil lastiğinin ayrıntılı modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada, lastiğin yan (viraj) kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesi için, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tasarım ve imalatı yapılan tamburlu lastik deney düzeneğinde elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.*

## Anahtar Sözcükler

*Otomobil lastikleri, viraj karakteristikleri, doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümü, lastik deneyleri*

## ABSTRACT

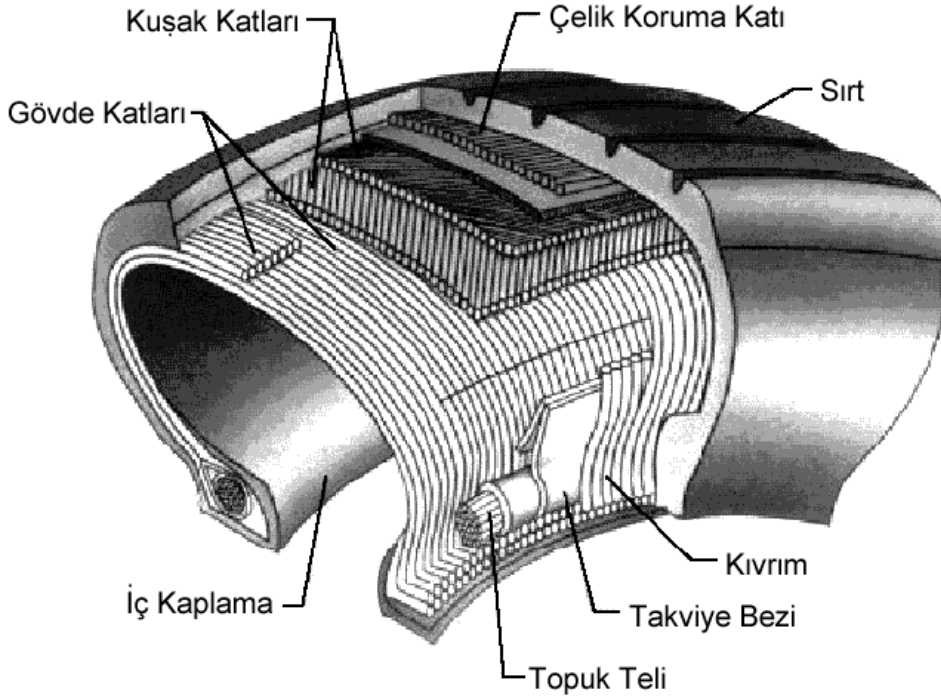
*A detailed finite element model of a typical compact car tire has been constructed to determine the cornering force characteristics. The results obtained from the computer model have been verified experimentally.*

## Keywords

*Pneumatic tires, cornering force characteristics, nonlinear finite element analysis, tire testing*

## GİRİŞ

Pnömatik lastik, yol taşıtlarında taşıt ve yol arasındaki tek arayüzü oluşturan, taşıtın ağırlığını taşıyan, taşıtın doğrultu ve hız denetimini sağlayan önemli bir elemandır. Lastiğin tasarımı, prototipinin hazırlanması, denenmesi ve nihayet piyasaya sürülmesi zor, uzun ve masraflı bir süreçtir. Lastik yapısının, (Şekil 1), ve malzeme özelliklerinin karmaşıklığı; lastikten beklenen özelliklerin birbirleri ile çelişkili olması nedeniyle lastik tasarım parametrelerinin belirlenmesi konusunda henüz net kurallar oluşturulamamıştır. Bu nedenle prototip üretimi ve denenmesi, yeni bir lastiğin tasarım ve üretim sürecinde en uzun, zahmetli ve masraflı aşamayı oluşturmaktadır. Günümüzde pnömatik lastiklerin, araç doğrultu kontrolü ve kararlılığını etkileyen, yan kuvvet karakteristiklerini belirlemede kullanılan tek yöntem karmaşık ve pahalı deney düzenekleri kullanılarak yapılan deneylerdir. Bu durumda, pnömatik lastiklerin yapısını mümkün olacak tüm ayrıntıları ile kapsayacak bir bilgisayar modelinin, prototip üretimi ve denenmesi ile ilgili zorlukları ve masrafı en aza indirmekte önemli bir araç olacağı açıktır. Böyle bir bilgisayar modeli ayrıca lastik içinde güvenilir ölçümlerin yapılmasının son derecede zor olduğu kritik yerlerdeki parametrelerin değişiminin gözlenmesinde de faydalı olacaktır.

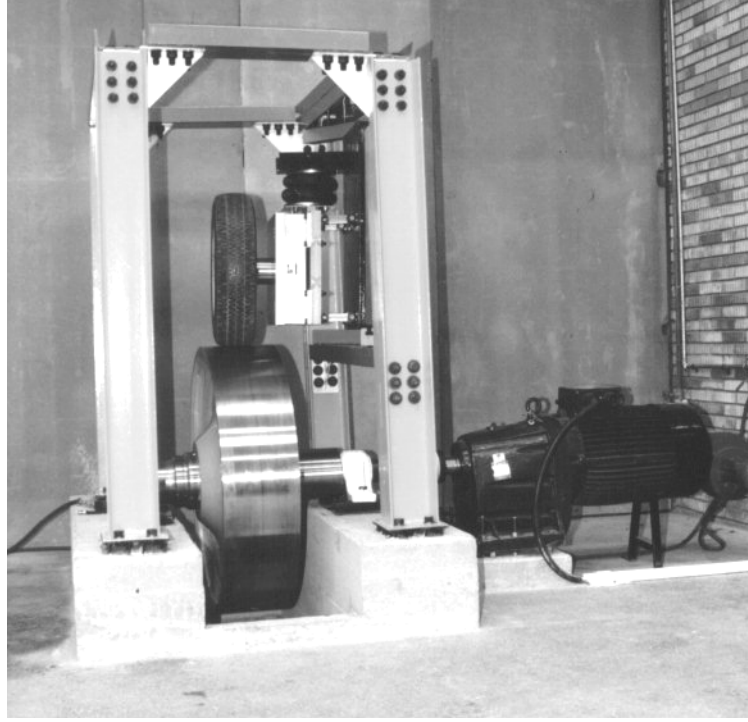


Şekil 1 Radyal Lastiğin İç Yapısı

Gerçeğe uygun veya en azından gerçeğe yakın sonuçların alınabileceği bir bilgisayar modeli, tasarımcılara daha iyi lastiklerin geliştirilmesi sürecinde yardımcı olacağı gibi, yol araçlarının değişik yol koşullarında hareketinin simülasyonu için de kullanılabilir. Ancak polimerlerin doğrusal olmayan malzeme özellikleri, bir lastikte birkaç tip polimerin kullanılması, lastik içindeki tekstil ve/veya çelik katların elastik modüllerinin birbirlerine ve polimer malzemeye göre çok farklı olması, asimetrik çalışma koşulları, normal çalışma koşullarında büyük yer değiştirmelerin oluşması ve yer ile kuru sürtünmeli temas gibi özellikler nedeniyle gerçekçi bir lastik modelinin yapılması zorlaşmaktadır.

Literatürde, pnömatik lastiklerin yan kuvvet özelliklerinin modellenmesinde empirik, analitik ve fiziksel olmak üzere üç farklı tip yaklaşıma rastlanmaktadır [1-3]. Analitik ve empirik lastik modellerinin kullanımı, kısa çözüm süreleri sayesinde, araç dinamik simülatörleri gibi lastiğin daha büyük bir sistemin parçası olduğu uygulamalarda yaygındır. Fiziksel ve bir ölçüde empirik lastik modelleri ise daha çok lastik davranışının incelenmesi ve performans optimizasyonunda kullanılmaktadır.

Tüm modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçların, daha önce elde edilmiş ve güvenilir sonuçları bulunan bir deney örneği kullanılarak kontrol edilmesi gereklidir. Ancak pnömatik lastik konusunda genel kabul görmüş ve yerleşmiş bir deney örneği bulunmamaktadır. Bu nedenle bilgisayar modelinden alınan sonuçların güvenilirliğinin denemesi için deneysel bir doğrulama yapılması kaçınılmazdır. Bu çalışmada deneysel doğrulama, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Otomotiv Araştırma Laboratuvarında tasarlanan ve imal edilen tamburlu lastik deney düzeneği (Şekil 2) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2. Tamburlu Lastik Deney Düzenegi

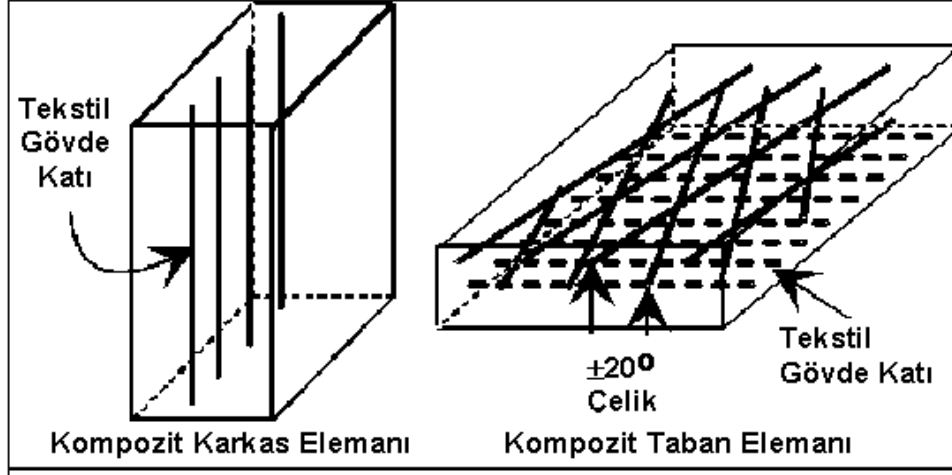
## LASTİK MODELİ

Lastik modelinin hazırlanmasında, tipik bir küçük otomobil lastiği olan 155 R 13 78 S lastiğin geometrisi ve yapısı temel alınmıştır. Bu lastiğin üretici firma kataloğundan alınan özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1 155 R 13 78 S Lastiğin özellikleri

Önerilen jantlar	4.50 Bx13 veya 5.00 Bx13
Şişirilmiş kesit genişliği	157 mm
Şişirilmiş dış çap	578 mm
Azami yük	4220 N (430 kg <sub>f</sub> )
Azami şişirme basıncı	220 kPa (32 psi)

Lastik üzerinde yapılan inceleme karkas ve taban elemanlarındaki takviye malzemelerinin Şekil 3'te gösterildiği yönlerde yerleştirildiğini ve Tablo 2'de verilen geometrik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 3 Karkas ve Taban Elemanlarında Takviye Yönü

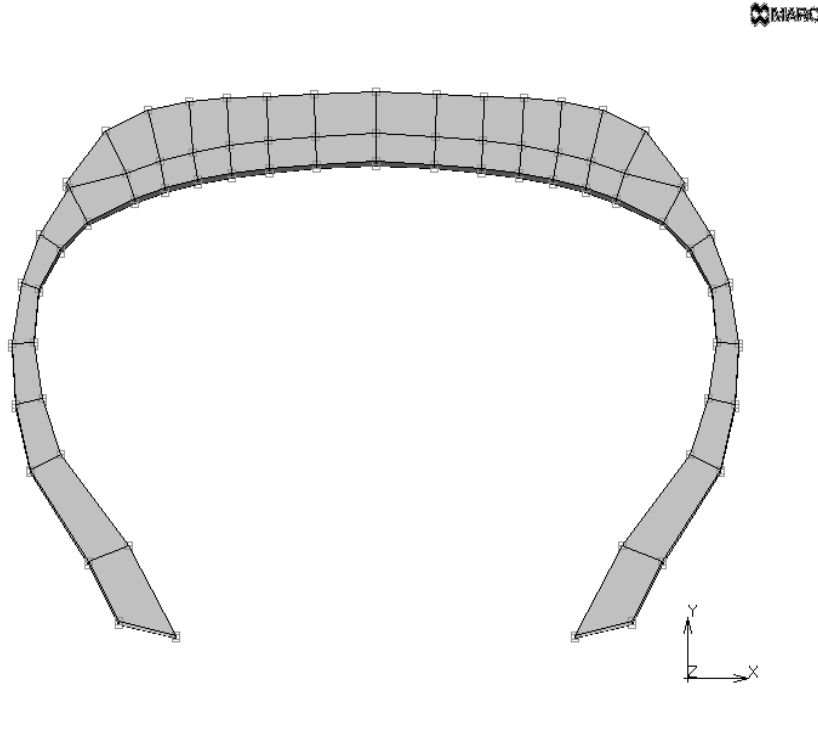
Tablo 2 Takviye Malzemelerinin Geometrik Özellikleri

Takviye Tipi	Kord Açısı [°]	Kord Çapı [mm]	Desimetrede Uç Sayısı	Eşdeğer Kalınlık [mm]
Topuk Teli	0	1	-	-
Karkas Katı	90	0.68	79	0.120
Çelik Kuşak	± 20	0.25	330	0.162

Çalışmanın temel amacı pnömatik otomobil lastiklerinin yan kuvvet karakteristiklerinin mümkün olduğunca az bilgi girişiyle, daha lastiğin tasarım aşamasında belirlenmesidir. Bu amaca ulaşmak için en basit bilgisayar modeli ile başlanmış, atalet kuvvetleri ve polimer malzemeden kaynaklanan viskoelastik özellikler ihmal edilmiştir. Ancak dönme ve yan kuvvet özelliklerinin elde edilebilmesi için lastiğe verilmesi gereken kayma açısı (diyagonal hareket) gözönüne alındığında, çalışma koşulları tamamen asimetric olmakta ve lastiğin tümüyle modellenmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Lastiğin tümüyle modellenmesi ise en basit modelde bile gerekli çözüm süresini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle dönen lastik modelinin belirlenmesinde kullanılacak ayrıntıların düzeyi, istenen hassasiyet ve kabul edilebilir çözüm süresi tarafından belirlenecektir.

Çözüm süresinin daha kısa olması nedeniyle statik lastik modeli üzerinde yapılan ilk denemelerde [3, 5], lastik kesiti üzerinde Şekil 4'te gösterilen ağ örgüsünün

hassasiyet ve çözüm süresi açılarından uygun olduğu görülmüştür. Yine bu denemelerde lastik üzerindeki gerinimlerin, takviye malzeme nedeniyle en fazla % 20 civarında olduğu görülmüştür. Bu durumda polimer malzemenin empirik, doğrusal olmayan (Mooney-Rivlin) veya doğrusal elastik malzeme modeliyle modellenmesi arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Buna karşın doğrusal olmayan malzemenin kullanıldığı modelde gerekli çözüm süresi doğrusal modelle karşılaştırıldığında daha uzundur. Lastik içindeki takviye malzemeler çoğu sonlu elemanlar yazılımında bulunan ve ilk kez beton içindeki demir takviyeleri modellemek için kullanılan rebar (REinforcement BARS) elemanlar kullanılarak modellenmiştir [6-11]. Rebar elemanları, üzerine eklendikleri dolu elemanlara (burada polimer malzeme) takviye yönünde, takviye malzemesinin sağladığı kadar ek çekme ve basma direngenliği sağlar.

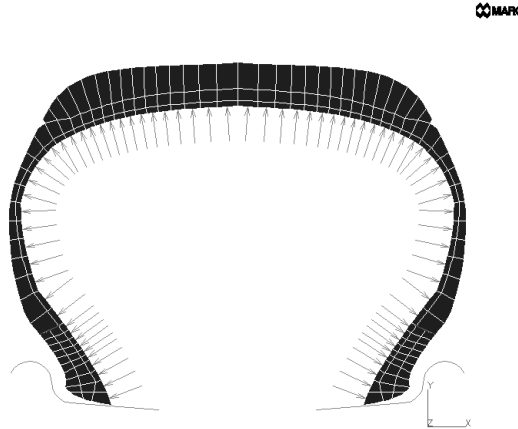


Şekil 4 Üç Boyutlu Lastik Modeli Kesitinde Ağ Örgüsü

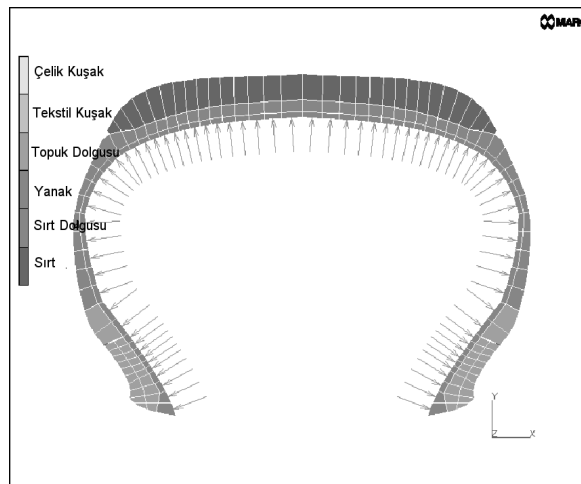
## SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Lastik modelinin sınanması için önce aksenal simetrik bir lastik modeli yaratılmış ve Şekil 5'te gösterilen daha ince bir ağ örgüsü kullanılmıştır. Modelde tipik bir otomobil lastiğinde bulunan polimer ve takviye malzemeleri uygulanmıştır, (Şekil 6). Sonlu elemanlar analizi yoluyla, ilk olarak üretici tarafından tavsiye edilen veya izin verilebilen jantlara takıldığında oluşan şekil değişiklikleri ve iç gerilmeler gözlenmiştir. Daha sonra, aynı lastiğe tekstil sıfır katı eklendiğinde

iç gerilmelerde meydana gelen değişim izlenmiş, son olarak da çelik sırt kuşakđ yerine tekstil sırt kuşakđ kullanılması durumunda iç gerilmelere bakılmıştır.



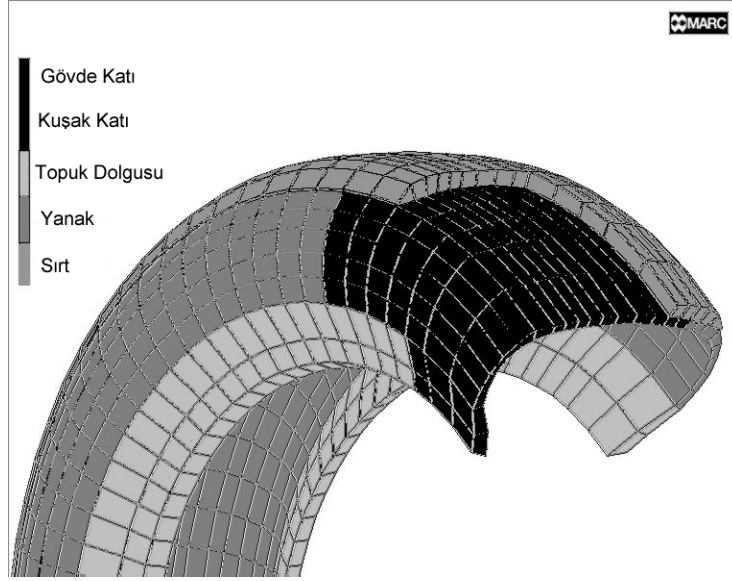
Şekil 5 Aksenal Simetrik Jantlı Lastik Modeli Ağ Örgüsü



Şekil 6 Aksenal Simetrik Jantlı Lastik Modeli Malzeme Dağılımı

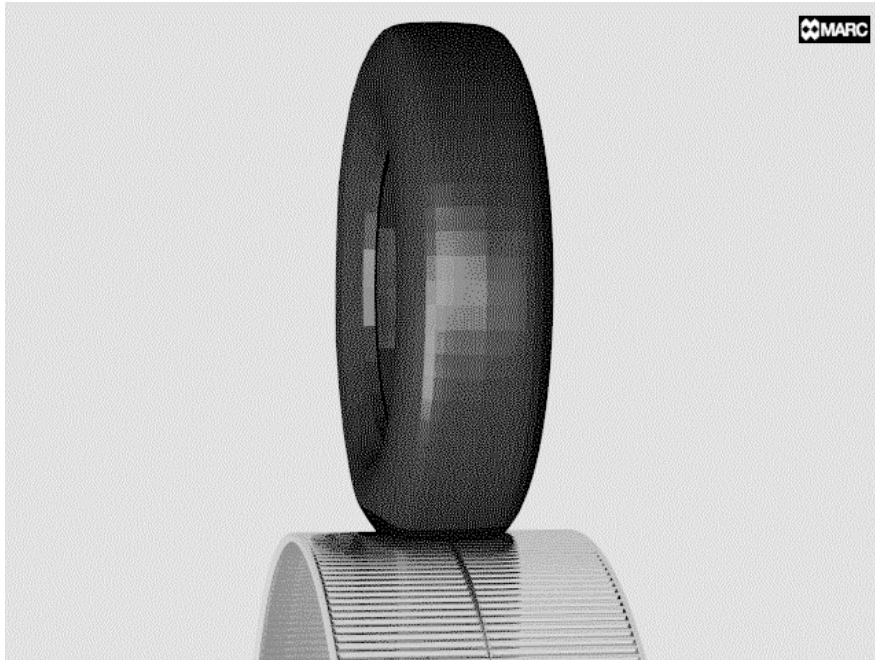
Üç boyutlu modelde ise dönen ve yönlendirilen lastik modelinin janta dokunan düğümleri kendi eksenini etrafında dönebilen rijit bir janta bağlanmış, lastiğın iç yüzeyine şişirme basıncı sınır koşulları uygulanmıştır. Dönme ve yerle temasın lastik üzerinde büyük yer değiştirmelere neden olması üzerine, ek bir yazılım hazırlanmıştır. Bu yazılımla, lastik modeli üzerinde takviyeyi modelleyen rebar elemanlarının bağlı olduğu düğümlerin o anki koordinatlarını her çözüm aşamasında hesaplanıp, bu düğümlerin yer değiştirmesine göre takviyelerin yönü de her çözüm aşamasında güncellenmiştir [4]. Yine büyük yer değiştirmeler nedeniyle şişirme basıncının, her çözüm aşamasında lastiğın iç yüzeyine dik kalması için sonlu elemanlar yazılımındaki basıncın yüzey yer değiştirmelerini izlemesi seçeneği kullanılmıştır. Normal çalışma koşullarında lastiğın deformasyonu nedeniyle iç basıncındaki değişmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğundan [12], iç

basıncın sabit olduğu varsayılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar lastik modelinin kesit görüntüsü ve malzeme dağılımı Şekil 7’de sunulmuştur.



*Şekil 7 Sonlu Elemanlar Lastik Modeli Malzeme Dağılımı*

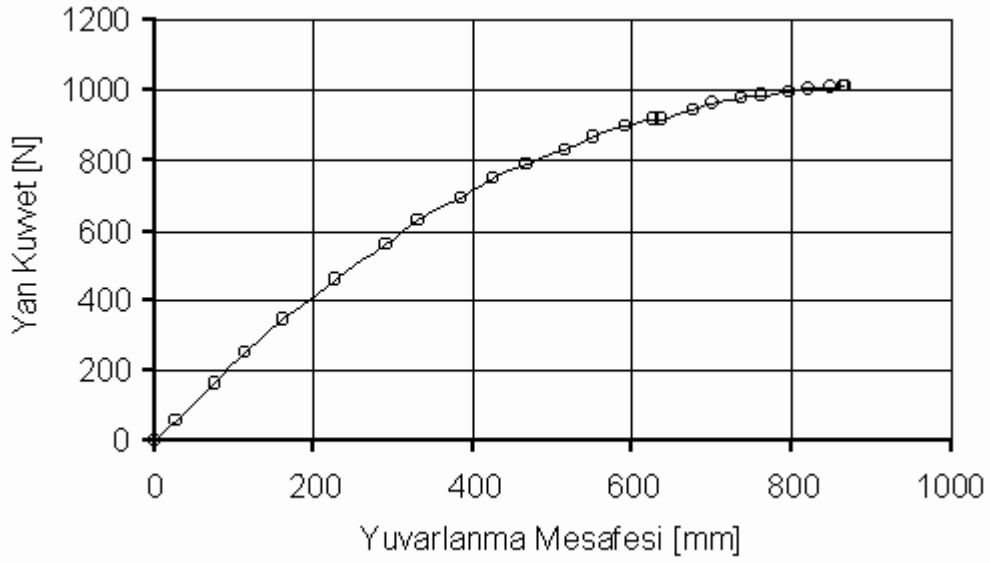
Lastik modelinden elde edilen sonuçların deneysel doğrulaması tamburlu deney düzeneği üzerinde yapılacağı için yönlendirilmiş lastiğin modellenmesi de deney düzeneğindeki koşullara uygun olarak yapılmıştır, (Şekil 8).



*Şekil 8 Deney Düzeneği Tamburu Üzerindeki Lastik Modelinin Kaplanmış Görüntüsü*

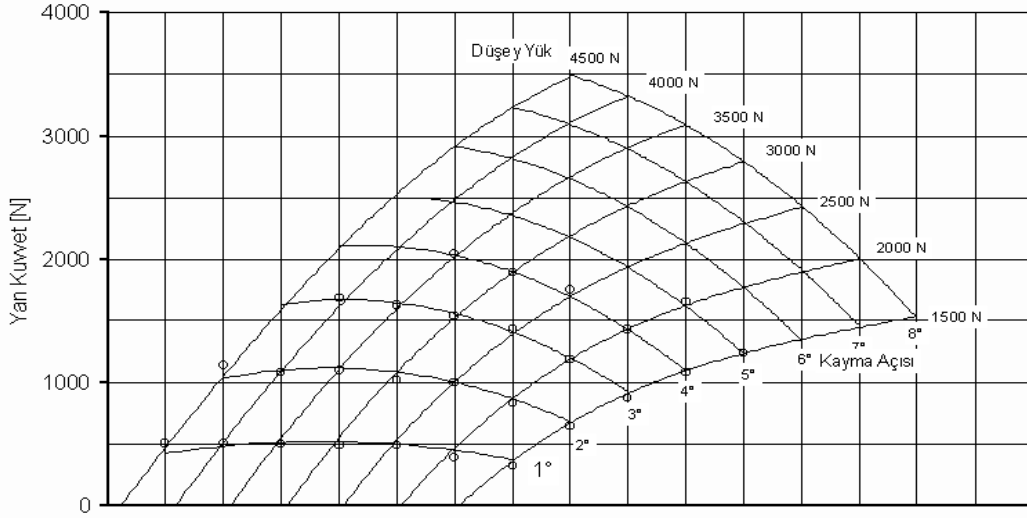


Belirli bir şişirme basıncı, düşey yük ve kayma açısı değerinde yan kuvveti elde edebilmek için lastik tambura değmeden istenen basınca birkaç adımda şişirilmiştir. Şişirilmiş lastik istenen kayma açısı ile çok adımlı olarak istenen düşey yük değerine ulaşılan kadar tambura bastırılır. Son aşama olarak tambura dönme hareketi verilerek; kayma açısı ile yuvarlanan lastiğin jantındaki tekerlek yuvarlanma eksenini yönündeki reaksiyon kuvvetinin kararlı bir değere ulaşması beklenmiştir [12], (Şekil 9). Böylece elde edilen kararlı reaksiyon kuvveti değeri, anılan şişirme basıncı, düşey yük ve kayma açısı değerinde lastiğin oluşturduğu yan kuvvettir.



*Şekil 9 Yan Kuvvetin Yuvarlanma Sırasında Kararlı Duruma Ulaşması*

Anılan inceleme deney yapılan şişirme basınçları, düşey yükler ve kayma açıları için tek tek yapıldığında Şekil 10'da deneysel eğriler üzerine işlenmiş olan noktalar elde edilmiştir.



*Şekil 10 Deneyel (Eğriler) ve Bilgisayar Modelinden (Çemberler) Elde Edilen Yan Kuvvetler*

Normal kullanım koşullarını kapsayan bölümde sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlarla çok yakın uyum içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da görüldüğü gibi bilgisayar modeli grafiğın belirli bir bölgesi (büyük kayma açıları ve yüksek dikey yükler) için sonuç alınamamıştır. Bu bölgede kararlı yan kuvvet değerine ulaşılardan bilgisayar modelindeki hata birikmesinden dolayı lastikte gerçekçi olmayan şekil değiştirmeler olmaya başlamakta, yan kuvvet değerlerinde de deneylerde görülmeyen değişimler oluşmaktadır.

## DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada radyal kuşaklı otomobil lastiklerinin yan kuvvet karakteristiklerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modeli, deney koşullarına uygun koşullarda çalıştırılmış ve deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar alınmıştır. Ancak, bilgisayar modeli büyük yer değiştirmeler ve yer ile kuru sürtünmeli temas nedeniyle doğrusal değildir, çok adımlı ve yinelemeli bir çözüm gerektirmektedir. Çözümün her adımında izin verilen sonlu bir hata oranı kalmakta ve özellikle yüksek kayma açısı ve yük durumlarında hata birikerek çözümün kararsız hale gelmesine neden olabilmektedir.

Hata birikimini azaltmanın bir yolu her çözüm adımının tamamlanmış sayılması için gerekli, izin verilebilir en yüksek hata düzeyini azaltmak ve adım büyüklüğünü de bununla uyumlu biçimde küçültmektir. Ancak bu yöntem çözüm süresinin kabul edilebilir sınırların ötesinde uzamasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada sunulan sonlu elemanlar lastik modeli, otomobil lastiklerinin tasarım aşamasında yan kuvvet karakteristiklerinin kestirilmesi yoluyla, lastik tasarımı aşamasında hızlanma sağlayabilecektir. Ayrıca, belirli bir lastik tasarımında lastikteki çeşitli tasarım parametrelerinin değişim yönüyle elde edilen lastiğin yan kuvvet karakteristiklerinin değişim yönü hakkında tasarımcının edineceği bilgi, istenen özellikleri sağlayacak tasarım parametrelerini en iyilenmesini kolaylaştıracaktır.

Sonlu elemanlar yöntemlerinde yaşanan gelişmeler sonucu, dönen lastiklerin modellenmesi ve analizinde yararlı olabilecek bazı yöntemler, çeşitli sonlu elemanlar yazılımlarında yer almaya başlamıştır. Bu gelişmelerden lastik modelleme açısından en önemli olanı Gelişigüzel Lagrange Euler Formülasyonudur (Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation  $\square$  ALE). Bu formülasyonda lastiğin yuvarlanma yönünde sonlu elemanlar ağ örgüsü içinde akmasını sağlarken, diğer yönlerde ağ örgüsü malzeme ile birlikte deforme olabilmektedir [13]. Böylece lastik, statik bir modelmişçesine, sadece yere dokunan kısmı ince ağ örgüsüne sahip, diğer kısımlar kaba bir ağ örgüsüyle modellenebilmekte ve çözüm zamanından tasarruf edilebilmektedir. Çalışmalar, bu formülasyonun yapay sinir ağlarının bir parçası olarak kullanıldığı sistemlere doğru yönlendirilmiş görünmektedir [14].

## KAYNAKÇA

[1] Tönük, E, Ünlüsoy, Y. S., 1995.  $\square$ Taşıt Dinamiğini Modellemede Kullanılabilecek Basit Analitik Lastik Modelleri 1. Bölüm: Lastik Modelleri $\square$ , 7. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiri Kitabı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, sf. 606-614.

[2] Tönük, E, Ünlüsoy, Y. S., 1995.  $\square$ Taşıt Dinamiğini Modellemede Kullanılabilecek Basit Analitik Lastik Modelleri 2. Bölüm: Uygulama $\square$ , 7. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiri Kitabı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, sf. 615-623.

[3] Tönük, E., Ünlüsoy, Y. S., 1995.  $\square$ Otomobil Lastiklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Şişirme ve Yükleme Analizi $\square$ , Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, C. 3, S. 1, sf. 30-34.

[4] Tönük, E., 1998. "Otomobil Lastiklerinin Dinamik Davranışlarının Bilgisayarda Modellenmesi" Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı.

[5] Tönük, E., Ünlüsoy, Y. S., 1996. "Radyal Kuşaklı Otomobil Lastiklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Statik Modellenmesi", II. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Kongresi Bildiri Kitabı, sf. 101-110, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

[6] Ngo, D., Scordelis, A. C., 1967. "Finite Element Stress Analysis of Reinforced Concrete Beam", Journal of American Concrete Institute, Cilt 64, sf. 152-163.

[7] Watanabe, Y., Kaldjian, M. J., 1983. "Modeling and Analysis of Bias-Ply Motorcycle Tires". Computers and Structures, Cilt 17, sf. 653-658.

[8] Helnwein, P., Liu, Ch. H., Meshke, G., Mang, H. A., 1993. "A New 3-D Finite Element Model for Cord-Reinforced Rubber Composites-Application to Analysis of Automobile Tires". Finite Elements in Analysis and Design, Cilt 4, sf. 1-16.

[9] , 1995. "ABAQUS Theory Manual, Version 5.5", Hibbitt, Karlsson & Sonensen Inc., Pawtucket.

[10] , 1998. "ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.8 Draft", Kişisel Temas, Michael Snyman, Hibitt, Karlsson & Sonensen Inc.

[11] , 2000. "MSC MARC, Volume B, Element Library Version 2000", MSC Software Corporation, California.

[12] Loeb, J.S., Guether, D.A., Chen, H.H.F., Ellis, J.R., 1990. "Lateral Stiffness, Cornering Stiffness and Relaxation Length of Pneumatic Tire". SAE Yayın No: 900129.

[13] , 2000. "Tire Modeling Using ABAQUS", , Hibbitt, Karlsson & Sonensen Inc., Pawtucket.

[14] Nakajima, Y., Kadowaki, H., Kamegawa, T., Ueno, K., 1999, "Application of a Neural Network for the Optimization of Tire Design", Tire Science and Technology, c. 27, sf. 62-83.