

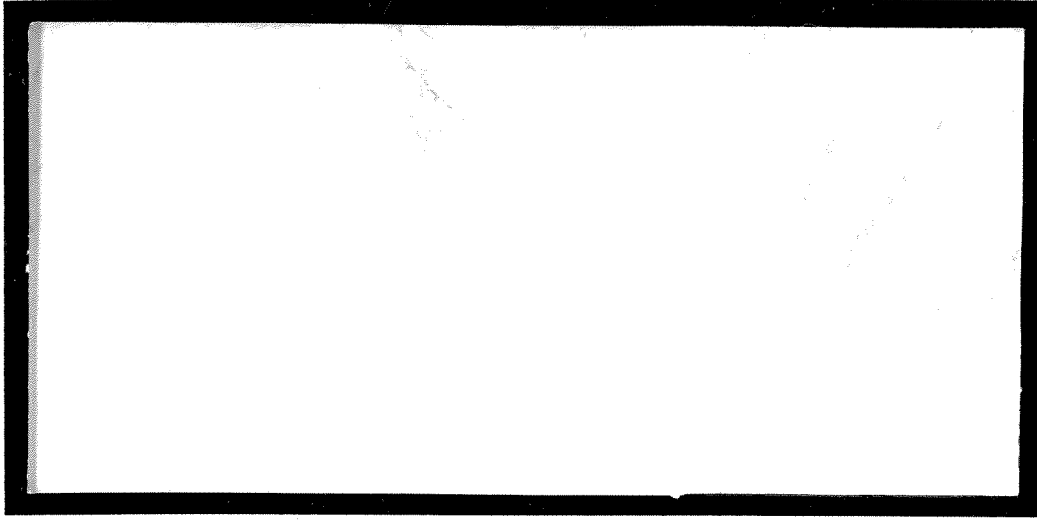
1999-74

DYP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

**PNÖMATİK LASTİKLERİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

PROJE NO: MİSAG-86

PROF. DR. Y. SAMİM ÜNLÜSOY

**OCAK 1999
ANKARA**

ÖNSÖZ

Kara araçlarında doğrultu kontrolü kalitesini ve dinamik stabiliteyi belirleyen astikler, emniyet açısından en önemli elemanlar arasında ön sırada yer almaktadır. Son derecede karmaşık yapıya sahip olan lastiklerin araç dinamiğini doğrudan etkileyen karakteristikleri, günümüzde hala ancak prototip aşamasında deneysel olarak belirlenebilmektedir. Ancak lastik modellerinin kapsam ve içerdiği ayrıntıları, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak hergün daha ileri gitmektedir. Böylece günümüzde sözkonusu karakteristiklerin prototip aşamasından önce tasarım çalışmaları sırasında belirlenmesi gerçekçi bir öneri olarak ortaya çıkmıştır. Literatürden, özellikle yurtdışında çok sayıda üniversite ve araştırma kurumunda pnömatik lastiklerin modellenmesi konusunda yoğun araştırmalar yürütülmekte olduğu, ancak henüz yeterli düzeyde ve gerçekçi bir modelin geliştirildiğini gösteren yayınların mevcut olmadığı görülmektedir.

Proje temelde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanacak lastik modelleriyle lastik karakteristiklerinin daha tasarım aşamasında belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışmanın ilk aşamasıdır. Bu ilk aşamada lastik yapısı ve malzemesi ile ilgili bilgiler kullanılarak lastik yan (viraj) kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Projenin daha sonraki aşamalarında, lastiklerin dinamik karakteristiklerinin lastik yapısı ve kullanılan malzeme özellikleriyle ilişkisi belirlenerek; tasarım aşamasında geometrik özellikler, kuru ve ıslak yollarda çekiş ve aşınma özellikleri ve yeterli yan (viraj) kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesi de gözönüne alınabilecektir.

Ayrıntılı bir model, daha uzun ömürlü lastiklerin geliştirilmesinde önemli rol oynayacaktır. Böylece üretimde kullanılan enerjinin ve atık lastik sayısının azaltılmasıyla çevre kirliliğinin de olumlu yönde etkilenmesi beklenmektedir. Ayrıca model, daha düşük yuvarlanma dirençli lastiklerin geliştirilmesinde de kullanılabilir. Böylece araç yakıt sarfiyatının ve dolayısı ile oluşan çevre kirlenmesinin azaltılması mümkün olacaktır. Ayrıntılı bir model, yeni lastik

malzemelerinin geliştirilmesinde de faydalı olacaktır. Değişik malzemelerin lastik karakteristiklerine olan etkisinin tasarım aşamasında belirlenebilmesi, tasarım sürecini kısaltacak, test sayı/süresini azaltacaktır.

Diğer taraftan lastik viraj kuvvetlerinin geliştirilmesi, araçlarda doğrultu kontrolü ve stabilitenin, dolayısı ile de sürüş emniyetinin artmasını getirecektir. Bu da trafik kazaları ve bu kazaların neden olduğu can ve mal kaybını azaltmakta etkili olacaktır.

Bu proje, TÜBİTAK MİSAG Genel Sekreterliğince sağlanan destek sayesinde gerçekleştirilebilmiştir. Proje, çeşitli aşamalarında ayrıca ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, ODTÜ Araştırma Fonu ve ODTÜ-BİLTİR merkezi tarafından da desteklenmiştir. Sayılan kurum ve kuruluşlara teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ii

İÇİNDEKİLER iv

Tablo Listesi vii

Şekil Listesi viii

ÖZ x

ABSTRACT xi

BÖLÜM

I GİRİŞ 1

I-1. Giriş 1

I-2. Projenin Amacı 4

I-3. Projenin Kapsamı 5

I-4. Projenin Yöntemi 6

II LASTİK DENEY DÜZENEĞİ 7

II-1. Lastik Deney Düzenegi 7

II-1.1 Lastik Deney Düzeneginin Konstruksiyonu 4

II-2. Static Lastik Deneyleri 12

II-3. Yan Kuvvet Deneyleri 15

II-4. Deneysel Verilerdeki Belirsizlikler 16

II-5. Deneyler 17

II-5.1 Düşük Hız Deneyi 17

II-5.2 Şişirme Basıncının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi 18

II-5.3 Yol Hızının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi 19

III LASTİK STATİK SONLU ELEMANLAR MODELİ	20
III-1. Kaba Ağılı Model	21
III-1.1 Şişirme Analizi	23
III-1.2 Yol Temas Analizi	24
III-1.3 Lastik Diş Deseninin Etkisi	29
III-2. İnce Ağılı Model	30
III-2.1 Şişirme Analizi	31
III-2.2 Yol Temas Analizi	32
III-2.3 Lastik Diş Deseninin Etkisi	33
III-3. Daha Gelişmiş Modeller	35
III-3.1 Eksenel Simetrik Şişen ve Janta Oturan Modeller	36
III-3.2 Değişik Jantlar Üzerinde Şişirme	40
III-3.3 Yol Temas Modeli	41
III-4. Statik Lastik Modellerinin Değerlendirilmesi	44
IV DÖNEN VE YÖNLENDİRİLEN LASTİĞİN MODELLENMESİ	45
IV-1. Sanki-Statik Lastik Modeli	45
IV-2. Tambur Üzerinde Dönen Kaba Örgülü Lastik Modeli	47
IV-3. Sanki-Statik Lastik Modelinin Değerlendirilmesi	54
V SONUÇ	
V-1. Lastik Deney Düzeneği	
V-2. Statik Lastik Modelleri	
V-3. Dinamik Lastik Modelleri	
V-4. Projenin Amaç ve Kapsamına Göre Değerlendirilmesi	
V-5. İleriye Dönük Çalışmalar	
V-5.1 Modelin Hassasiyetinin Arttırılması İçin Öneriler	
V-5.2 Hesaplama Veriminin Arttırılması İçin Öneriler	
V-5.3 Deney Düzeneğinin Geliştirilmesi İçin Öneriler	
KAYNAKLAR	57

TABLO LİSTESİ

TABLO

	<u>Sayfa</u>
III-1 155 R 13 78 S Lastiğin Özellikleri	19
III-2 Malzeme Özellikleri	23
III-3 Lastiğin Mooney-Rivlin Malzeme Katsayıları	35
III-4 Takviye Malzemelerinin Elastik Özellikleri	36
III-5 Takviye Malzemelerinin Geometrik Özellikleri	37

ŞEKİL LİSTESİ

ŞEKİL

	<u>Sayfa</u>
I-1 Radyal Lastiğin Yapısı	2
II-1 Lastik Deney Düzeneginin Genel Görünüşü	8
II-2 Kayma Açısının Ayarlanması	9
II-3 Kayma ve kamber açılarının ayarlanması için alt T-yuvaları	10
II-4 Hız Kontrol Ünitesinin Kontrol Paneli	10
II-5 Yan Kuvvet Testinde Lastik Deformasyonu	11
II-6 155 R 13 Lastiğin Statik Yük Altındaki Davranışı	12
II-7 155 R 13 Lastiğin Yol Temas Yüzeyi	13
II-8 Eski ve Yeni 155 R 13 Lastiklerin Statik Yük Altındaki Davranışı (tambur)	13
II-9 175/70 R 13 Lastiğin Yan Kuvvet Karakteristikleri	14
II-10 Deneysel noktaların karakteristikler üzerindeki dağılımı	15
II-11 155R13 lastiğin yan kuvvet karakteristikleri	16
II-12 Soğuk şişirme basıncının Yan Kuvvet Karakteristiklerine etkisi	17
II-13 Yüksek hız, büyük kayma açısı deneyinde lastik hasarı	18
II-14 Yol Hızının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi	18
III-1 Kaba Ağılı Model – Yarım Kesit	20
III-2 Çelik Kuşaklı Radyal Lastiğin Karkas ve Karkas+Kuşak Elemanlarının Yapısı	21
III-13 Kaba Ağılı Statik Lastik Modeli	22
III-4 155 R 13 Lastiğin Yük-Deformasyon Karakteristikleri (Kaba Ağılı Model)	24

III-5	155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristiğı ($\pm 10^\circ$ Çelik Kuşak)	25
III-6	Tekstil Kuşaklı Radyal Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristiğı	25
III-7	Diyagonal Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri	26
III-8	Değişik Lastik Modellerinde Yol Temas Yüzeyi Basınç Dağılımları	27
III-9	195/70 R 14 Lastiğın Deneysel Statik ve Düşük Hız (75 mm/s) Temas Yüzeyi Basınç Dağılımı	27
III-10	Diş Desenli 155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri	28
III-11	Diş Desenli ve Desensiz Modellerden Elde Edilen Sonuçların 180 kPa Şişirme Basıncında Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması	29
III-12	İnce Ağılı Model – Yarım Kesit	30
III-13	İnce Ağılı Statik Lastik Modeli	31
III-14	155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri (İnce Ağılı Model)	32
III-15	Oluşturulan Taban Diş Deseni	33
III-16	Diş Desenli 155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri	33
III-17	Düz Tabanlı ve Diş Desenli Modellerin Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması	34
III-18	Eksenel Simetrik Lastik Modeli	35
III-19	Lastikte Kauçuk Matris Malzemenin Konumu	36
III-20	Lastik Modelinde Takviye Malzemelerinin Konumları	37
III-21	4, 4.5, 5 ve 5.5 inç Jant Üzerinde Şişirilen 155 R 13 Lastikte Oluşan Gerilmeler ve Deformasyon	39
III-22	4.5 ve 5 inç Jantlar Üzerinde Şişirilen 0° Tekstil Kuşak İlaveli 155 R 13 Lastik	39
III-23	4.5 ve 5 inç Jantlar Üzerinde Şişirilen Dört Tekstil Kuşaklı 155 R 13 Lastik	40
III-24	Yol Temas Analizi İçin Lastik Kesit Modeli	41
III-25	Yol Temas Analizi İçin Çeyrek Lastik Modeli	41
III-26	Basit Taban Diş Deseni	42

III-27	Geliştirilmiş Modelin Analizinden ve Lastik Deney Düzeninde Elde Edilen Yük-Deformasyon Karakteristikleri	43
IV-1	Yan Kuvvetin, Lastiğin Yuvarlanma Mesafesi ile Değişimi (2° Kayma açısı, 180 kPa Şişirme Basıncı, 2kN Düşey Lastik Yüğü)	45
IV-2	Tambur Üzerinde Lastik Kesit Modeli	46
IV-3	Tambur Üzerinde Lastik Modelinin Kaplanmış Görüntüsü	47
IV-4	Kaba Örgü	48
IV-5	Tamburu Sabit Lastik Etrafında Döndüren Kinematik Evirim	49
IV-6	Tamburun dönme merkezini belirleyen iki düğüm noktasının yörüngesi	50
IV-7	155 R 13 Lastiğin Modelin Analizinden Elde Edilen Deformasyonu (2kN Düşey Yük, 2° Kayma Açısı)	52
IV-8	Modelin Analizinden Elde Edilen Yan Kuvvetlerin Deneysel Karakteristikler Üzerindeki Konumu (10km/saat, 180 kPa)	52

ÖZ

PNÖMATİK LASTİKLERİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Otomobil lastiklerinin yan (viraj) kuvvet karakteristiklerini tasarım aşamasında belirlemek için ayrıntılı bir sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Kauçuk malzemenin doğrusal olmayan malzeme davranışı, lastiğin içinde bulunan karkas malzemesi, normal çalışma sırasında görülen büyük yer değiştirme ve gerinmelerle yerle lastik arasındaki sürtünmeli temas modellenmiştir. Modelden alınan sonuçların sınanması için tamburlu bir lastik deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur.

İlk olarak statik bir lastik modeli hazırlanmış, elde edilen düşey yük-sehim ve temas alanı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sanki-statik yuvarlanan lastik modeliyle düşük hızlarda lastiğin viraj davranışı modellenmiştir. Lastik üzerine merkezkaç yük uygulanmasıyla hızın artmasının etkisi de modele katılmıştır.

Bilgisayar modelinden alınan sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, sonlu elemanlar yönteminin lastiklerin yan kuvvet karakteristiklerinin tasarım aşamasında kestirilebilmesi için kullanılabileceğini, böylelikle prototip üretimi ve deneyler için harcanan zaman ve gayretin azaltılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Lastik Yan Kuvvet Karakteristikleri, Pnömatik Otomobil Lastiği, Lastik Deneyleri, Nonlineer Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

FINITE ELEMENT MODELING OF PNEUMATIC TIRES

To predict the cornering force characteristics of pneumatic tires during the design stage, a detailed finite element model of the tire is constructed. The nonlinear stress-strain relationship of rubber, the reinforcement of the tire, large displacements and strains induced during normal service conditions, frictional contact with ground are modeled. To check the validity of the computer model, an external drum type tire testing setup is designed and constructed.

A static tire model is constructed first and its vertical force-deflection characteristics and contact patch shape are compared with those of an experimental tire to check the accuracy of the finite element model. Quasi-static cornering tire model is constructed to simulate the low-speed cornering behavior. Centrifugal load is added to the model to simulate the medium speed cornering behavior.

Comparison of computer model results and tire test results show that finite element modeling can be used to predict the cornering force characteristics of a tire during early design stages, reducing the time and effort for prototyping and testing.

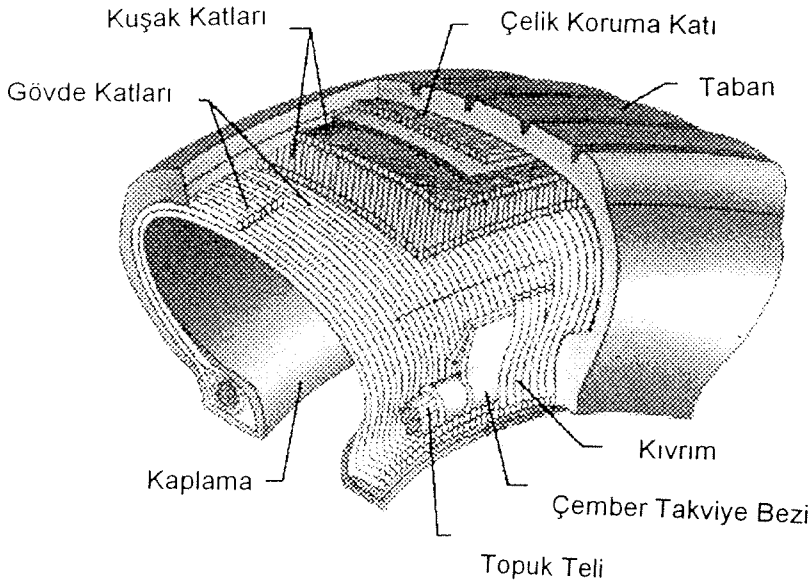
Keywords: Tire Cornering, Cornering Force, Pneumatic Tires, Tire Testing, Nonlinear Finite Element Analysis

BÖLÜM I

GİRİŞ

I-1. Giriş

Pnömatik lastik yol taşıtlarında, taşıt ve yol arasındaki tek arayüzü oluşturan, taşıtın ağırlığını taşıyan ve 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 I/1, ve malzeme özelliklerinin karmaşıklığı ve üretilen lastikten beklenen özelliklerin birbirleri ile çelişkili gereksinimleri nedeniyle tasarım parametrelerinin ne olması gerektiği konusunda net kurallar henüz oluşturulamamıştır. Bu nedenle prototip üretimi ve denenmesi, yeni bir lastiğin tasarımı ve üretiminde en uzun, zahmetli ve masraflı aşamayı oluşturmaktadır. Günümüzde, özellikle pnömatik lastiklerin araç doğrultu kontrolü ve stabilitesini etkileyen yan kuvvet özelliklerini belirlemede kullanılan tek yöntem, lastikler üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarına dayanmaktadır. Ancak bu deneyler için gereken deney düzenekleri karmaşık ve pahalıdır. Bu durumda, pnömatik lastiklerin yapısını mümkün olacak tüm ayrıntıları ile kapsayacak bir bilgisayar modelinin, prototip üretimi ve denenmesi ile ilgili zorlukları ve masrafı minimuma indirmekte önemli bir araç olacağı açıktır. Böyle bir bilgisayar modeli ayrıca lastik içinde güvenilir ölçümlerin yapılmasının son derecede zor olduğu iç kritik bölgelerdeki önemli parametrelerin değişiminin gözlenmesinde de faydalı olacaktır.



Şekil I/1 Radyal Lastiğin 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 simulasyonu için de kullanılabilir. Ancak polimerlerin lineer olmayan karakteristikleri, bir lastikte birkaç tip polimerin kullanılması, lastik içindeki tekstil ve/veya çelik katların elastik modüllerinin birbirlerine göre çok farklı olması, asimetrik çalışma koşulları, normal çalışma koşullarında büyük yerdeğişmelerin oluşması ve yer ile kuru sürtünme teması gibi özellikler nedeniyle gerçekçi bir lastik modelinin yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Pnömatik lastiklerin modellenmesinde, literatürde mevcut yaklaşımlar

1. Empirik
2. Analitik
3. Fiziksel

olmak üzere üç genel grupta toplanabilir (Tönük, 1998).

Empirik lastik modelleri, lastik deney düzenekleri kullanılarak elde edilen verilere uydurulan eğrilerden oluşur (Nordeen ve Cortese, 1964; Dugoff ve Brown, 1970, Bergman, Cimet ve Sheth, 1971, Bird ve Martin, 1971, Allen, Rosenthal ve Szostak, 1987, Maalej, Guenther ve Ellis, 1989). Genelde eğri parametrelerinin fiziki anlamları açık olmamakla beraber, literatürde yarı-empirik olarak tanınan bazı modellerde eğri parametreleri ile lastiklerin özellikleri arasında bir bağ kurulmaya çalışılmıştır. Empirik modeller, kısa sürede ve hassas sonuç vermeleri açısından çekici olmalarına karşılık, eğri parametrelerinin belirlenebilmesi için çok sayıda deneysel veri gerektirirler. Bu nedenle empirik modeller, araç modellerinin içinde lastik davranışının eklenmesi için veya lastiğin deneysel veriler dışında kalan davranışlarının enterpolasyonunda kullanılırlar. Bu modeller lastik davranışının ayrıntılı incelenmesi için uygun değildir.

Analitik modeller (Dugoff, Fancher ve Segel, 1970, Stribersky ve Fancher, 1989, Gim ve Nikravesh, 1990, Gim ve Nikravesh, 1991a, Gim ve Nikravesh, 1991b, Fancher ve Bareket, 1993, Pacejka ve Bakker, 1993), genellikle gerçek lastik yapı ve davranışının son derecede basitleştirilmesini gerektirmektedir. Bu modeller kapalı çözümleri bulunabilen analitik denklemlerden oluşur ve az sayıda, fiziki anlamları belirgin parametreler gerektirirler. Bu nedenle kullanımları kolaydır ve kısa sürede çözüm elde edilebilmektedir. Özellikle araç modellerinin içinde lastik davranışının eklenmesi için yaygın olarak kullanılan analitik modeller de, içerdikleri varsayımlar, kapsamalarının darlığı ve yapılan basitleştirmeler nedeniyle lastik davranışının ayrıntılı incelenmesi için uygun değildir.

Fiziksel modeller (Kennedy ve Patel, 1981, Huncler, Yang ve Soedel, 1983, Padovan ve Paramadilok, 1985, Ridha, Satyamurthy ve Hirscheft, 1985, Rothert ve

diğerleri, 1985, Richards, Charek ve Scavuzzo, 1986, Kennedy ve Padovan, 1987, Nakajima ve Padovan, 1987, Faria ve diğerleri, 1992, Helnwein ve diğerleri, 1993, Becker ve Seifert, 1997, Du ve Wei, 1998, Turner ve diğerleri, 1998), lastiğın fiziki yapısı ve malzeme özellikleri gözönüne alınarak yazılan denklem sistemlerinden oluşur. Lineer olmayan bu bağlaşık denklem sistemlerinin uygun sınır şartları kullanılarak çözümleri genellikle nümerik olarak (özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi gibi ileri diskritizasyon teknikleri kullanılarak) gerçekleştirilir. Fiziksel modeller kuramsal olarak istenilen tüm ayrıntıları içerebilmekle beraber, çözüm süresi ve mevcut bilgisayar kaynakları tarafından sınırlanırlar.

Analitik ve empirik lastik modellerinin kullanımı, uzun çözüm süreleri ve büyük bilgisayar olanakları gerektirmedikleri için araç dinamik simülatörleri gibi lastiğın 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 model çalışmalarında elde edilen sonuçların, daha önce elde edilmiş ve güvenilir sonuçları bulunan bir test örneği kullanılarak kontrol edilmesi gereklidir. Ancak pnömatik lastik konusunda böyle genelde kabul edilmiş ve yerleşmiş bir test örneği bulunmamaktadır. Bu nedenle modelin kabul edilmesi için deneysel bir düzeneğın tasarım ve imalatının yapılarak, deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması kaçınılmazdır.

I-2. Projenin Amacı

Bir önceki bölümde belirtilen hususların ışığında, projenin amacı mevcut ve/veya yeni tasarlanan pnömatik lastiklerin yan kuvvet karakteristiklerinin prototip aşamasından önce belirlenmesinde kullanılmak üzere, mümkün olduğunca ayrıntılı ve gerçekçi fiziksel bir bilgisayar modelinin hazırlanması ve bu modelin çözümünden elde edilecek sonuçların, tasarlanıp üretilecek bir deney düzeneğinden elde edilecek sonuçlarla sınılanması olarak belirlenmiştir.

I-3. Projenin Kapsamı

Tanımlanan pnömatik lastik modeli kullanılarak küçük ek ve değişikliklerle, değişik lastik karakteristiklerinin (yan kuvvet, yuvarlanma direnci, aşınma, vb.) elde edilebileceği açıktır. Ancak bu proje çalışmaları, ilk adım olarak sadece lastik yan kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesini kapsamaktadır. Diğer taraftan, geliştirilecek modelin deneysel olarak sınılanması ve doğrulanması için bir deney düzeneğinin tasarlanması ve üretilmesi de proje kapsamı içindedir. Deney düzeneğinin tasarımında, daha ileride diğer karakteristiklerin de incelenmesini sağlayacak özellikleri taşımasına dikkat edilmiştir.

I-4. Projenin Yöntemi

Proje çalışmalarının “Deney düzeneğinin tasarımı, montajı, devreye alınması ve deneylerin yapılması” ve “Pnömatik lastik Sonlu Elemanlar Modelinin oluşturulması ve denenmesi” olmak üzere iki ana grupta, eş zamanlı olarak yürütülmesi öngörülmüştür.

Pnömatik lastik modelinin hazırlanmasında ve model kullanılarak yan kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla mevcut sonlu elemanlar analizi yazılımları incelenmiş ve ODTÜ-Biltir Merkezinde ve ODTÜ-Bilgi İşlem Merkezinde mevcut Abaqus ve Marc yazılımlarının proje amaçlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

Lastik deney düzeneğinin tasarımında öncelik, mümkün olduğunca basit, ucuz ve modüler olmasına ve kullanım kolaylığına verilmiştir. Ayrıca alınacak verilerin bilgisayar ortamına aktarılarak işlenmesi ve karşılaştırmalar için hazır deneysel yan kuvvet karakteristiklerinin çizilebilmesi için bir ard işlemci yazılması da öngörülmüştür.

BÖLÜM II

LASTİK DENEY DÜZENEĞİ

Proje çalışmaları “Deney Düzeneginin tasarımı, montajı, devreye alınması ve deneylerin yapılması” ve “Pnömatik lastik Sonlu Elemanlar Modelinin oluşturulması ve denenmesi” olmak üzere iki ana grupta, eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Bu bölümde öncelikle “Lastik Deney Düzenegi” ile ilgili çalışmalar sunulacaktır.

II-1. Lastik Deney Düzenegi

Pnömatik lastiklerin yan kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan deney düzeneklerinin tümünde ortak olan belli özellikler vardır. Bunlar arasında deney lastiğine istenilen deney yükünü uygulayacak ve belirlenen kayma açısının verilmesini sağlayacak mekanizmalar, istenen hızda yuvarlanmasını sağlayacak tahrik sistemi, gerekli lastik kuvvet ve momentlerini ölçecek algılayıcılar sayılabilir. Değişik deney düzenekleri arasındaki temel farklılık ise yol görevi gören elemanın şeklindedir. Bu esasa göre literatürde mevcut deney düzenekleri dört gruba ayrılabilir (Turner ve diğerleri, 1998).

1. Düz Yatak Lastik Deney Makinaları (Nordeen ve Cortese, 1964, Pottinger, Marshall ve Arnold, 1976).
2. Düz Yüzey Lastik Deney Makinaları (Bird ve Martin, 1973, Stocker, 1991).
3. Tambur Tipi Lastik Deney Makinaları

- a) Dış Tambur Tipi Lastik Deney Makinaları (Zegelaar ve Pacejka, 1996, Leister, 1997).
 - b) İç Tambur Tipi Lastik Deney Makinaları (Bergman, Cimet ve Sheth, (1971).
4. Yol Tipi (Mobil) Lastik Deney Makinaları (Dugoff ve Brown, 1970, Holloway, Drach, ve Mohanty, 1991).

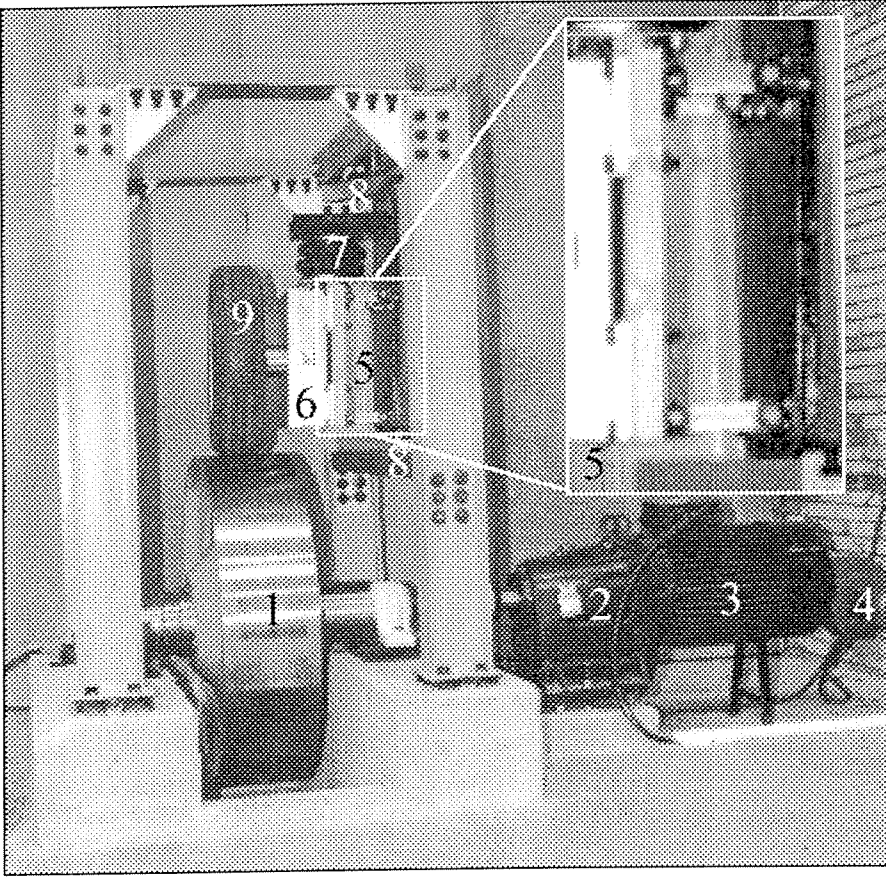
Proje kapsamında zaman, malzeme, parasal destek ve işçilik olanakları gözönüne alınarak en uygun deney düzeneği tipinin "Dış Tambur" tipi olduğuna karar verilmiştir. Mevcut olanaklara uygun, basit ancak geliştirilecek bilgisayar modelinden elde edilecek sonuçların kontrolünde kullanılacak lastik yan kuvvet karakteristiklerini yeterli hassasiyette ölçebilecek yetenekte bir düzenek tasarlanmıştır. Satın alınan ve üretilen parçalar Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Otomotiv Laboratuvarında monte edilmiş, denenmiş ve devreye alınarak lastik deneylerinde kullanılmıştır.

II-1.1 Lastik Deney Düzeneğinin Konstrüksiyonu

Lastik Deney Düzeneğinin genel görünüşü Şekil II-1 de verilmiştir. Düzeneğin temel elemanları, şekil üzerinde verilen numaralarla aşağıda sıralanmaktadır.

1. Tambur
2. Dişli Kutusu
3. Elektrik Motoru
4. Soğutma Motoru ve Fan

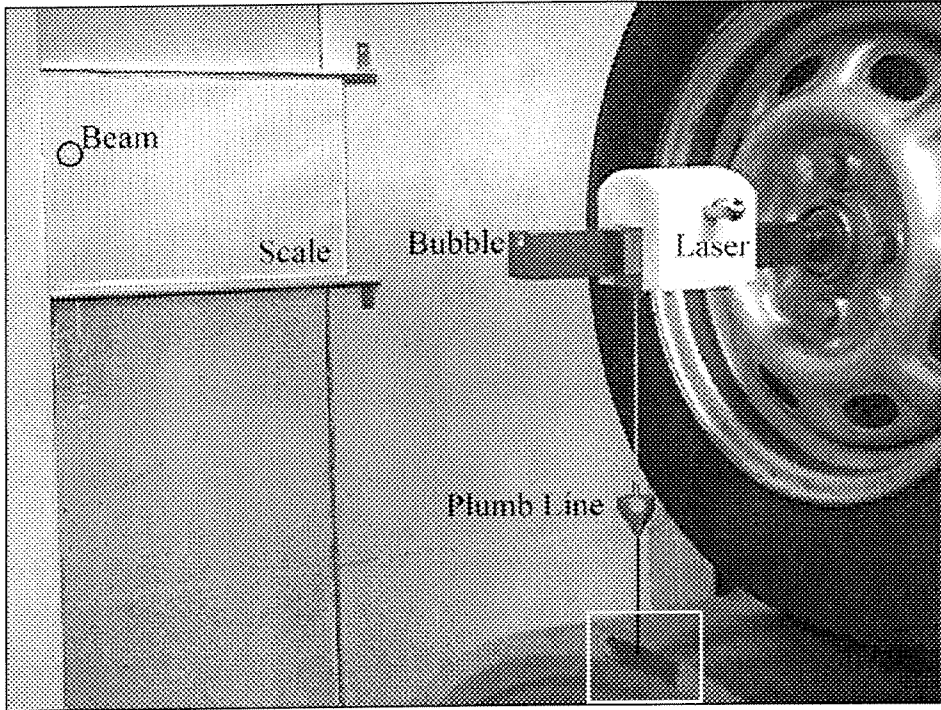
5. Paralel Çubuk Mekanizması
6. Altı-Eksen Kuvvet Algılayıcı
7. Hava Körüğü
8. Üst ve Alt T-yuvaları
9. Deney Lastiği
10. Hız Kontrol Ünitesi (Şekil II-1 de görünmüyor !)



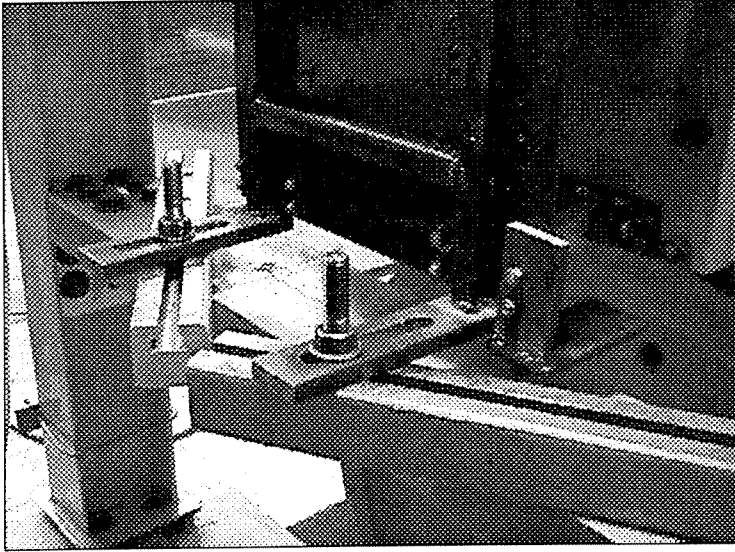
Şekil II-1 Lastik Deney Düzeneyinin Genel Görünüşü

Deney düzeneyinin temel elemanı olan tambur iki adet lokomotif tekerleği birbirine kaynatılarak oluşturulmuştur. Tambur çapı 0.979 m ve genişliği 0.258 m dir. Tambur 30 kW gücünde bir AC elektrik motoru ve hız oranı 1:3.8 olan bir dişli kutusu tarafından tahrik edilmektedir. Elektrik motorunun hızı elektronik frekans kontrolü ile

ayarlanmaktadır. Motor tamburu araç üzerinde 0.05- 148 kph hızlarına karşı gelen 0.26-780 d/dak hız aralığında döndürebilmektedir. Tambur, elektrik motoru ve dişli kutusunu da taşıyan beton bir blok üzerine oturtulmuştur. Aynı beton blok üzerinde lastiği istenilen konumda tutabilmek için çelik bir kafes yerleştirilmiştir. Lastik üzerindeki düşey yük bir hava körüğü tarafından uygulanmaktadır. Lastik çelik kafese değişik yükleme koşullarında kamber açısını sabit tutan bir paralel çubuk mekanizması ile bağlanmıştır. Lastiğin kayma ve kamber açıları, bir lazer işaretleyicinin kullanıldığı düzenek (Şekil II-2) ve kafes üzerindeki T-yuvaları (Şekil II-3) ile kuvvet algılayıcıya bağlı yuvalar sayesinde ayarlanabilmektedir.



Şekil II-2 Kayma Açısının Ayarlanması



Şekil II-3 Kayma ve kamber açılarının ayarlanması için alt T-yuvaları

Lastik kuvvet ve momentlerinin altı bileşeni, dört direği üzerinde gerinme telleri ve bir yükseltici bulunan altı eksen kuvvet algılayıcı tarafından ölçülmektedir. Elde edilen veriler 12-bit ayrışıklı bir veri toplama kartı ile saklanmak üzere bilgisayara aktarılmaktadır.

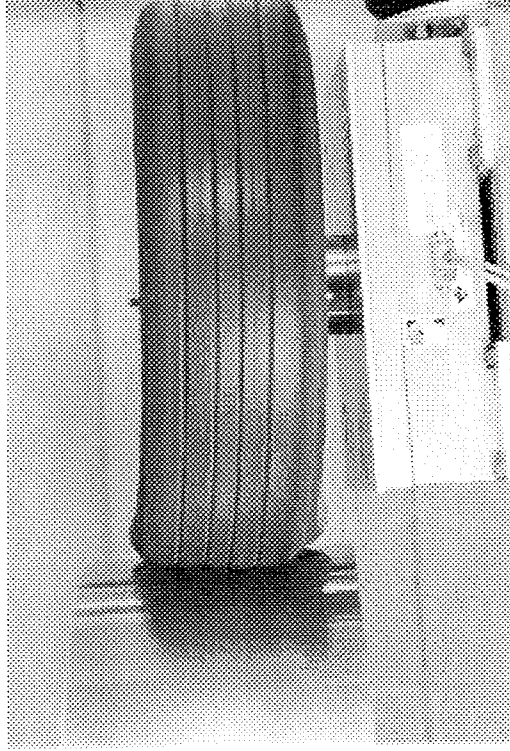
Hız kontrol ünitesi, standart AC motorlar için elektronik frekans kontrolü uygulamaktadır. Şekil II-4 teki kontrol paneli kullanılarak tamburu istenilen hıza getirmek veya hız değişimini programlamak mümkündür.



Şekil II-4 Hız Kontrol Ünitesinin Kontrol Paneli

Ayrıca deney sırasında veriyi alan, saklayan ve işleyerek anlamlı halde sunan yazılım Microsoft Visual BASIC ile hazırlanmıştır. Program, deney öncesi kuvvet ölçüm sistemini kalibre etmekte, ham veriyi almakta, veriyi önce kuvvet ölçüm sistemi koordinatlarında kuvvet ve moment bileşenlerine, ardından tekerlek (SAE) koordinat sistemi kuvvet ve moment bileşenlerine çevirmekte, verinin istatistiksel özelliklerini belirlemekte ve grafikler halinde sunmaktadır.

Bir yan kuvvet deneyi sırasında kayma açısının etkisi ile oluşan lastik deformasyonu Şekil II-5 te açık bir şekilde görülebilmektedir.



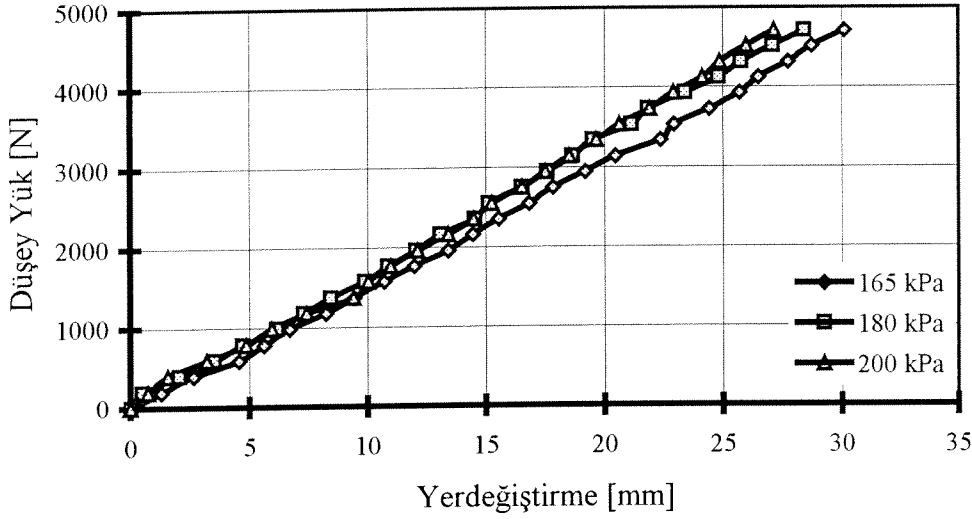
Şekil II-5 Yan Kuvvet Testinde Lastik Deformasyonu

II-2. Statik Lastik Deneyleri

Lastik Deney Düzeneği'nin tasarım sürecinde, yürütülmekte olan sonlu elemanlar statik lastik modelinin denenmesi için düşey statik yük altında

deformasyon ve yol temas yüzeyi özelliklerini elde etmek üzere bazı deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde kullanım sonucu diş derinliği 3 mm ye düşmüş bir 155 R 13 78 S otomobil lastiği kullanılmıştır.

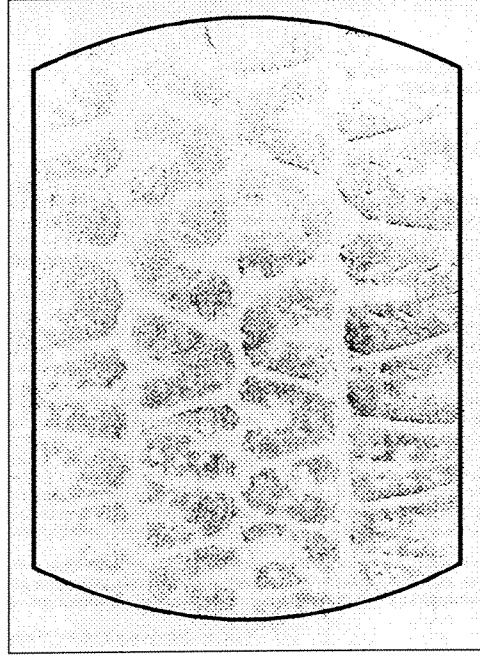
Lastik sırasıyla 165, 180 or 200 kPa basınca şişirilmiş, her basınç için üzerine kuvvet uygulanarak tekerlek göbeğinin düşey yerdeğiştirmesi ölçülmüştür. Yol temas yüzeyinin elde edilmesi için lastik ve bastırıldığı yüzey arasına yerleştirilen kömür tozu ve kağıt kullanılmıştır. Lastiğın belirtilen şişirme basınçlarında ve statik yük altındaki davranışı ve elde edilen tipik bir yol temas yüzeyi Şekil II-6 ve II-7 de gösterilmiştir.



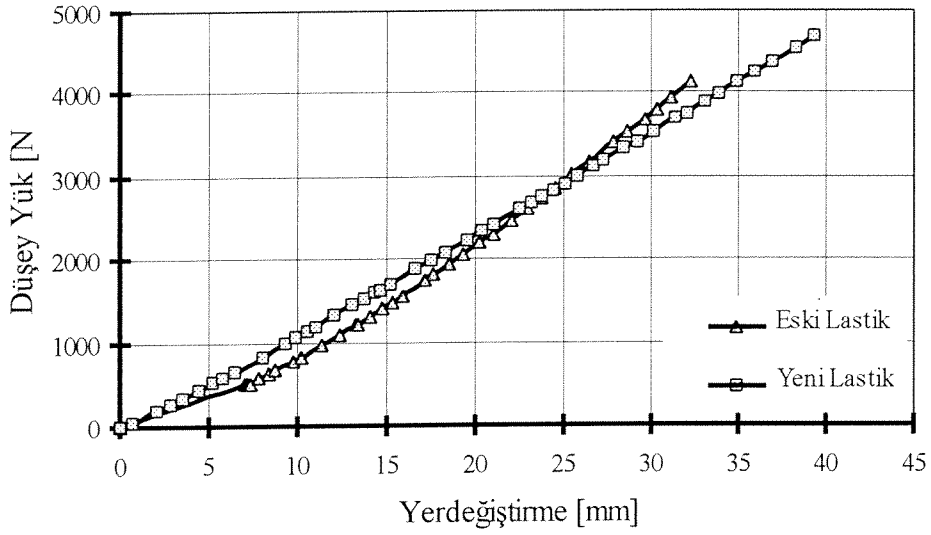
Şekil II-6 155 R 13 Lastiğın Statik Yük Altındaki Davranışı

Lastik Deney Düzenegi'nin tamamlanmasından sonra ilk deneylerde kullanılan eski lastik ve aynı lastiğın hiç kullanılmamışı (kullanılmış lastik diş derinliği 3 mm – yeni lastikte 7.5 mm) tekrar statik yük altında denenmiştir. Şekil II-8 eski ve yeni lastikler için elde edilen karakteristikleri göstermektedir. Eski lastiğın düşük yüklerde az da olsa daha yumuşak olduğu, yüksek yüklerde ise diş derinliğinin azlığı

nedeniyle rijitleştiği görölmektedir. Yeni lastik ise hemen hemen lineer bir değişim göstermektedir.



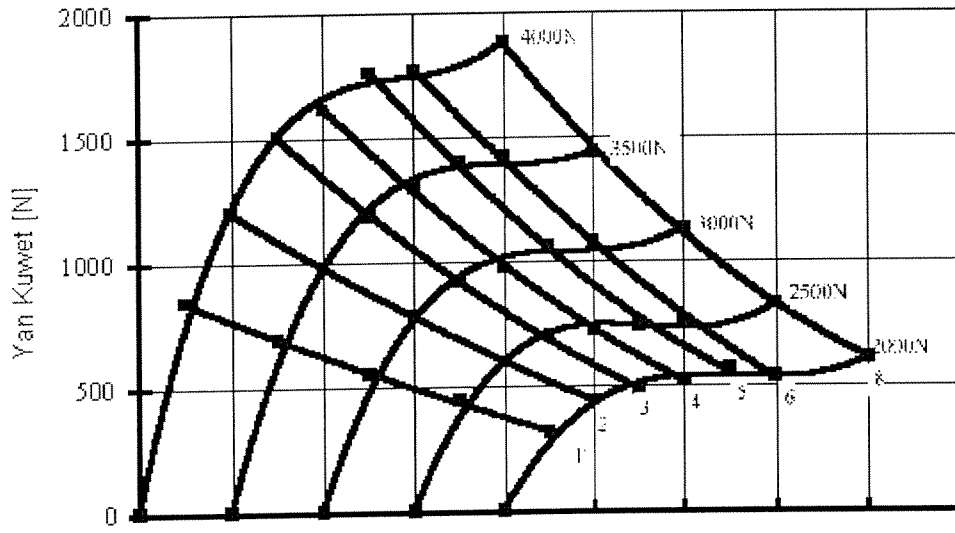
Şekil II-7 155 R 13 Lastiğin Yol Temas Yüzeyi
(Şişirme Basıncı : 180 kPa, Düşey Yük : 4160 N)



Şekil II-8 Eski ve Yeni 155 R 13 Lastiklerin Statik Yük Altındaki Davranışı (tambur)

II-3. Yan Kuvvet Deneyleri

Lastik Deney Düzeneği'nde yapılan ilk yan kuvvet deneylerinde, 4 mm dış derinliği olan 175/70 R 13 lastik 180 kPa (26 psi) a şişirilmiş, 2, 3 ve 4 kN düşey kuvvet uygulanmış ve 7.4 and 24.6 km/h hıza karşı gelen 150 ve 500 d/dak tambur hızında döndürülmüştür. Deneylerde kayma açısı 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 8 dereceye ayarlanmıştır. Deney sonuçları Şekil II-9 da sunulmuştur.



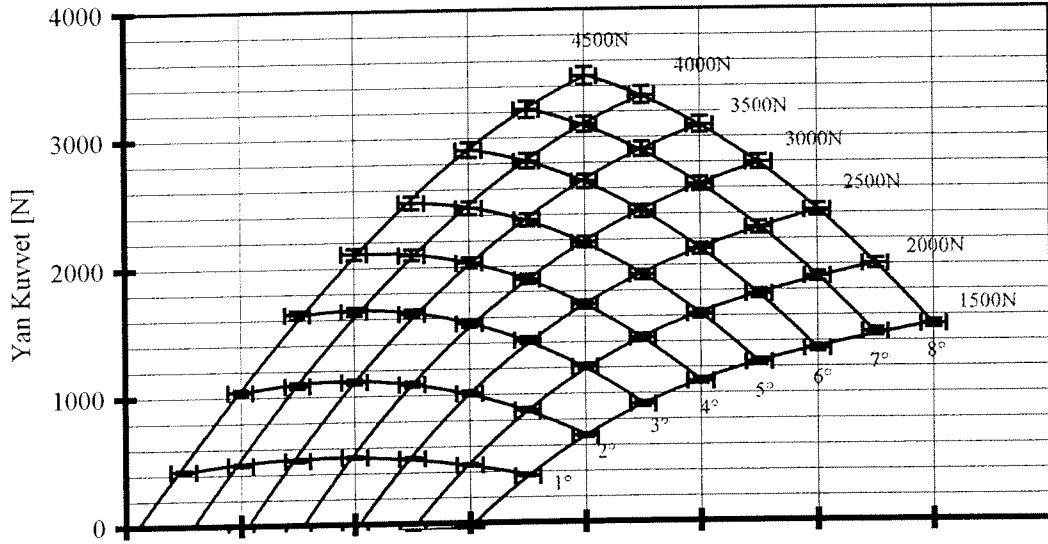
Şekil II-9 175/70 R 13 Lastiğin Yan Kuvvet Karakteristikleri

Şekil II-9 da sunulan karakteristiklerde özellikle 8 derece kayma açısı için elde edilen değerlerde belirgin bir problem olduğu gözlenmektedir. Yapılan incelemede sorunun deney düzeneğindeki bazı civataların gevşemesiyle oluştuğu belirlenmiş ve gerekli tedbirler alınarak sorun giderilmiştir.

II-4. Deneysel Verilerdeki Belirsizlikler

Deney düzeneği kullanılarak alınan verilerde oluşan belirsizliklerin temel kaynakları aşağıda sıralanmış ve elde edilen veriler üzerindeki toplam etkileri Şekil II-10 daki karakteristikler üzerinde gösterilmiştir.

1. Lastiğin konumu
2. Kuvvet algılayıcının hassasiyeti
3. Sinyallerdeki gürültü
4. Analog-Digital çevirme hassasiyeti
5. Bir verinin eğri üzerinde konumunun hassasiyeti



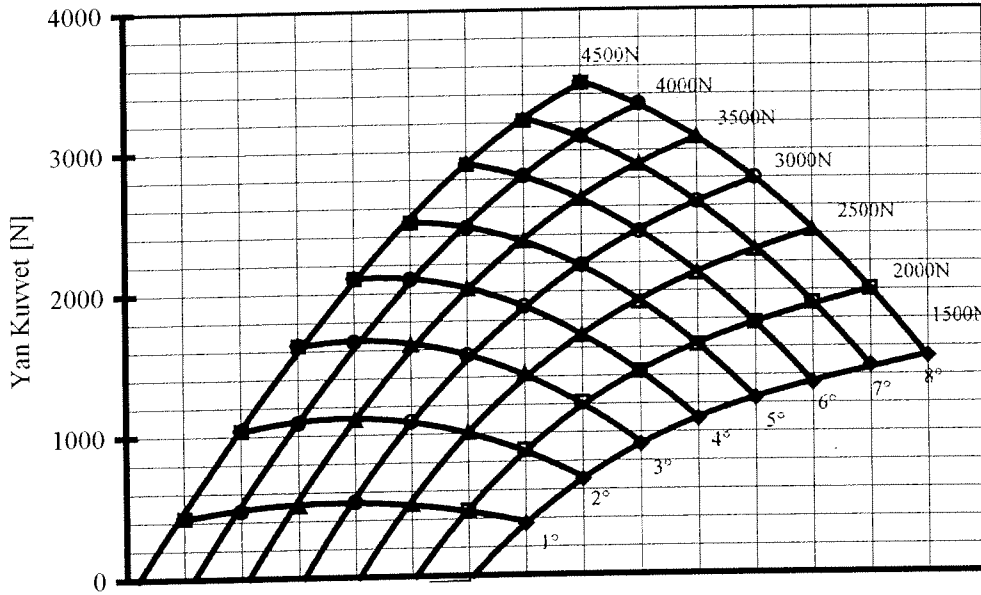
Şekil II-10 Deneysel noktaların karakteristikler üzerindeki dağılımı (155 R13, 180 kPa şişirme basıncı ve 10 km/saat deney hızı)

II-5. DeneYler

Deneme alışmaları sonucunda deney düzeneğinde karşılaşılan problemler halledilmesinden sonra ve 155 R 13 lastik kullanılarak, Sonlu Elemanlar Modelinden çıkacak sonuçların karşılaştırılacağı deneysel yan kuvvet karakteristikleri elde edilmiştir.

II-5.1 Düşük Hız Deneyi

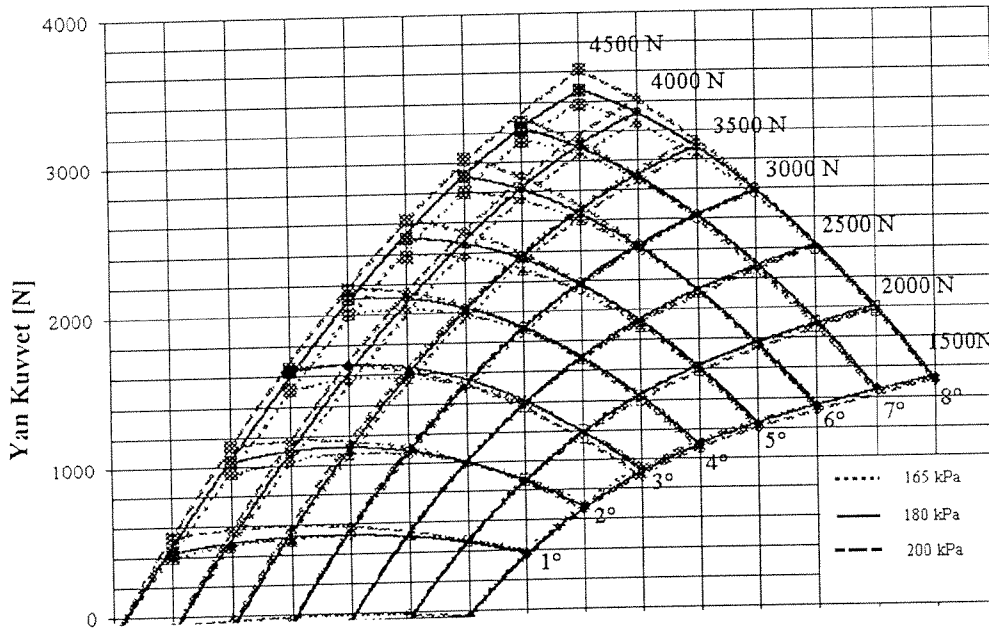
Bu deney 180 kPa (26 psi) a şişirilen 155 R 13 lastikle 10 km/saat yol hızında yapılmıştır. Deneyde lastik yükü 1500 – 4500 N arasında 500 N aralıklarla, kayma açısı ise 0 – 8 derece arasında 1 derece aralıklarla değiştirilmiştir. Elde edilen yan kuvvet karakteristikleri şekil II-11 de verilmektedir.



şekil II-11 155R13 lastiğin yan kuvvet karakteristikleri (180 kPa soğuk şişirme basıncı ve 10 km/saat Yol Hızı)

II-5.2 Şişirme Basıncının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi

Şişirme basıncını nominal basıncın (180 kPa) %10 altına (165 kPa) indirerek ve %10 üstüne (200 kPa) çıkararak yapılan deneylerin sonuçları Şekil II-12 de verilmiştir. Aynı lastik yükü ve kayma açısı için, yüksek şişirme basıncının yan kuvveti attırdığı, düşük basıncın ise azalttığı ve bu etkinin özellikle yüksek lastik yüklerinde daha belirgin olduğu görülmektedir.

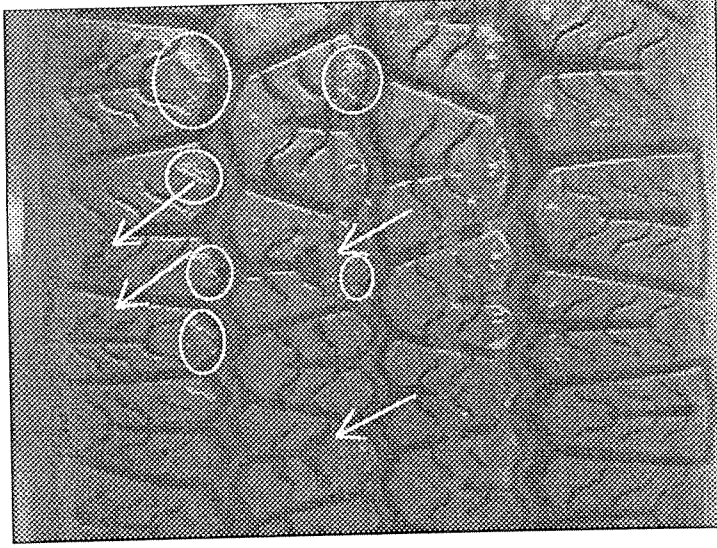


Şekil II-12 Soğuk şişirme basıncının Yan Kuvvet Karakteristiklerine etkisi

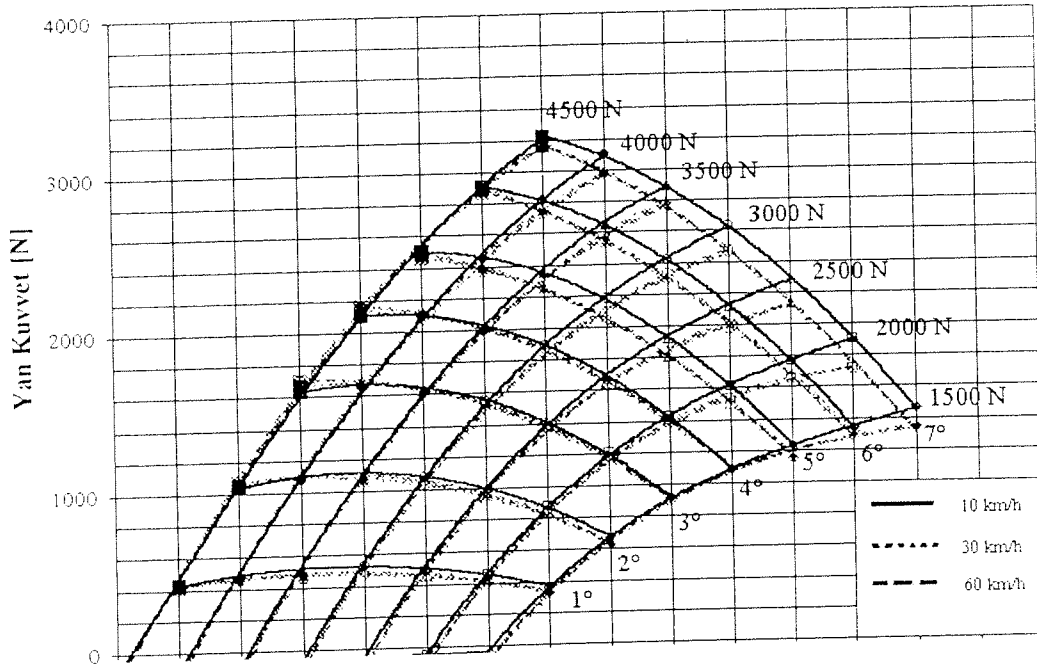
II-5.3 Yol Hızının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi

Yol hızının Yan Kuvvet Karakteristiklerine etkisini gözlemek üzere deneyler 30 kph ve 60 kph yol hızlarında tekrarlanmıştır. Yüksek lastik yükü ve büyük kayma açılarında, lastiğin aşırı ısındığı ve Şekil II-13 te gösterildiği gibi kalıcı hasara uğradığı gözlenmiştir. Bu nedenle deneylerde kayma açısı 7 dereceyle sınırlanmıştır. Elde edilen yan kuvvet karakteristikleri Şekil II-14 te verilmiştir. Yol hızının yaklaşık 5

derecelik kayma açısının üzerindeki belirgin yan kuvvet kaybının, yüksek sıcaklıklar ve lastikteki kalıcı hasar ve deformasyon nedeniyle olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil II-13 Yüksek hız, büyük kayma açısı deneyinde lastik hasarı
(Oklar : bloklardan kopmalar, Elipsler : lastiğe yapışan kauçuk)



Şekil II-14 Yol Hızının Yan Kuvvet Karakteristiklerine Etkisi

BÖLÜM III

LASTİK STATİK SONLU ELEMANLAR MODELİ

Dönen bir lastiğin modellenmesine girmeden önce, statik bir modelin analizi iki açıdan faydalıdır. Statik modelin verdiği sonuçlardan, kullanılan malzeme özelliklerinin yeterliliği hakkında fikir edinmek mümkün olduğu gibi lastiğin modellenmesi sırasında ortaya çıkan temel problemlerin göreceli olarak daha basit bir model üzerinde çözülmesi sağlanacaktır.

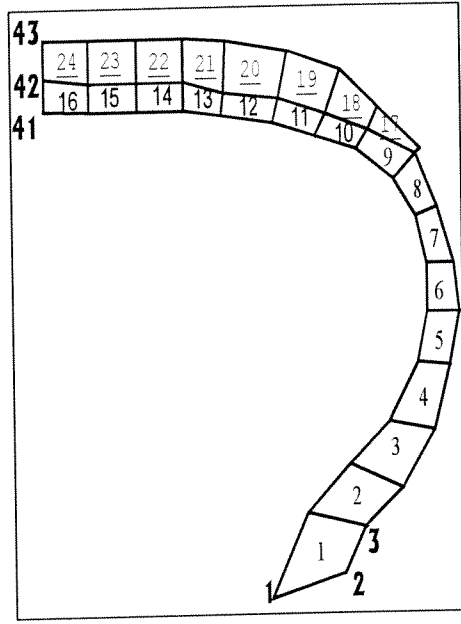
Lastik modelinin hazırlanmasında, tipik bir küçük otomobil lastiği olan 155 R 13 78 S lastiğin geometrisi ve yapısını temel alınmıştır. Bu lastiğin üretici firma kataloğundan alınan özellikleri Tablo III-1 de verilmektedir.

Tablo III-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
Maksimum yük	4220 N (430 kgf)
Maksimum şişirme basıncı	220 kPa (32 psi)

III-1. Kaba Ağılı Model

Şekil III-1 de gösterildiği gibi, statik yükleme durumunda problem simetrik olduğu için, uygun sınır şartları kullanılarak lastik kesidinin sadece yarısı modellenmiştir. Kullanılan ilk model ağı lastiğin kesidinin yarısı için 24 elemandan oluşmaktadır.



Şekil III-1 Kaba Ağılı Model – Yarım Kesit

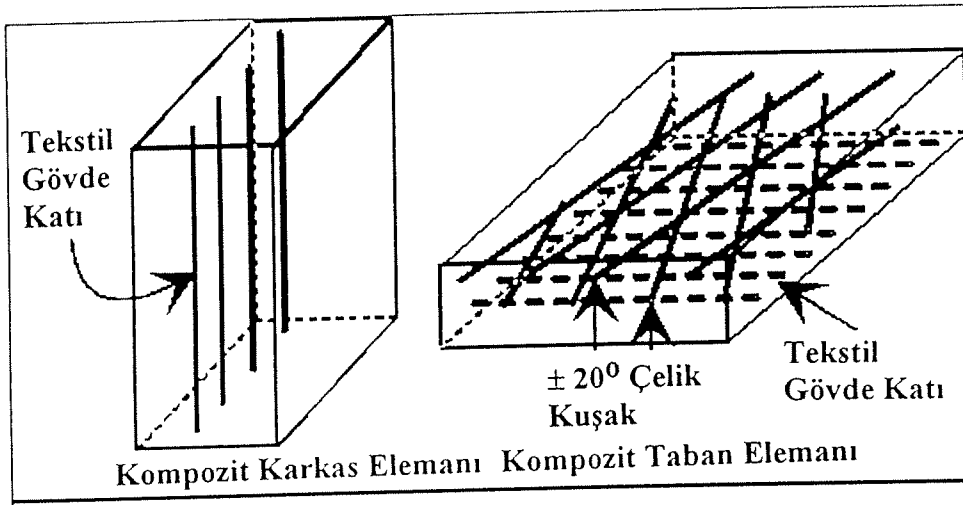
1 den 9 a kadar olan elemanlar tekstil kordların kauçuğa gömülmesiyle elde edilen yanak elemanlarıdır. 1 numaralı eleman gerçekte topuk telini de içermekle beraber, bu modelde topuk teli ihmal edilmiştir. Ayrıca karkas katlarının topuk teli etrafında dönüşü ve burada yeralan dolgu da modele katılmamış ve bu bölge tek bir kat gibi modellenmiştir. 10 - 16 numaralı elemanlar taban kauçuğunun altında kalan katları oluşturmaktadır. En iç kat topuk telinden itibaren yanakları dolaşan karkas katıdır. Bu katın üzerinde ayrıca iki çelik kordlu kuşak katı yer almaktadır. Çelik kordlar çevresel çizgiyle $+20^{\circ}$ ve -20° lik açı yapar. Çelik kordlu kuşaklar 2 mm

kalınlığında olup, 1.32 mm aralıkla yerleştirilmiş 0.25 mm çapında 4 çelik tel içermektedir. Çelik kuşaklı radyal lastiğin karkas yapısı Şekil III-2 da şematik olarak gösterilmiştir. 17 – 24 numaralı taban elemanları sadece kauçuk malzeme içermektedir. Bu aşamada taban diş deseni ihmal edilerek, taban yüzeyi tamamen düz olarak alınmıştır.

Sınır şartları olarak aşağıdaki uygulamalar yapılmıştır.

- Jant tamamen rijit olarak alınmış ve lastiğin janta tamamen yapıştığı varsayılmıştır. Böylece 1, 2 ve 3 numaralı düğüm noktaları birbirine dik üç yönde de sabitlenmiştir.

- Statik yükleme durumunda lastik simetrik olduğu için, yatay doğrultuda simetri sınır şartları kullanılmış ve 41, 42 ve 43 numaralı düğüm noktalarında yatay hareket engellenmiştir.



Şekil III-2 Çelik Kuşaklı Radyal Lastiğin Karkas ve Karkas+Kuşak Elemanlarının Yapısı

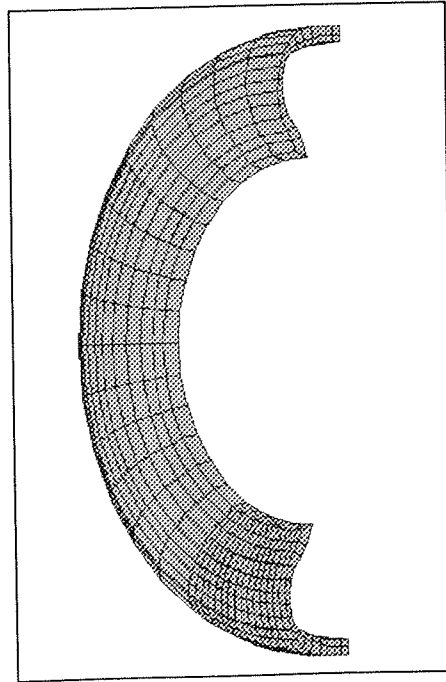
Lastiğin yerle olan temasının da modellenebilmesi için Şekil III-1 de verilen yarım kesidin 180° döndürülmesi gerekmektedir. Yer temasının beklendiği ilk 30° için ince bir ağ sağlamak üzere 2° lik aralıklar, kalan 150° lik kısımda ise 10° lik aralıklar

uygulanmıştır. Elde edilen model Şekil III-3 te gösterilmektedir. Bu modelde de yatay doğrultuda simetri sınır şartları kullanılarak uç düğüm noktalarında yatay hareket engellenmiştir.

Tekstil kordlar sadece çekme yükü taşıyan ve basma yükü almayan linear elastik malzeme olarak modellenmiştir. Çelik kordlar ve karkas yapısı büyük gerilmeleri engellediği için lastik, linear elastik malzeme olarak modellenmiştir. Kullanılan malzeme özellikleri Tablo III-2 de verilmektedir.

III-1.1 Şişirme Analizi

Statik analizinde ilk adım lastiğin şişirilmesidir. Lastiğin nominal şişirme basıncı, üretici tarafından 180 kPa olarak belirlenmiştir. Lastiğin şişirilmesi için, lastik modelinin en alt katında yer alan elemanların iç yüzeylerine sınır şartı olarak basınç uygulanmıştır. Büyük deformasyon analizinde basınç daima eleman yüzeyine dik kalmaktadır. Şişirme işlemi nominal şişirilme basıncının % 10 altı ve % 10 üstü olan 165 kPa ve 200 kPa için de ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil III-3 Kaba Ağılı Statik Lastik Modeli

Tablo III-2 Malzeme Özellikleri

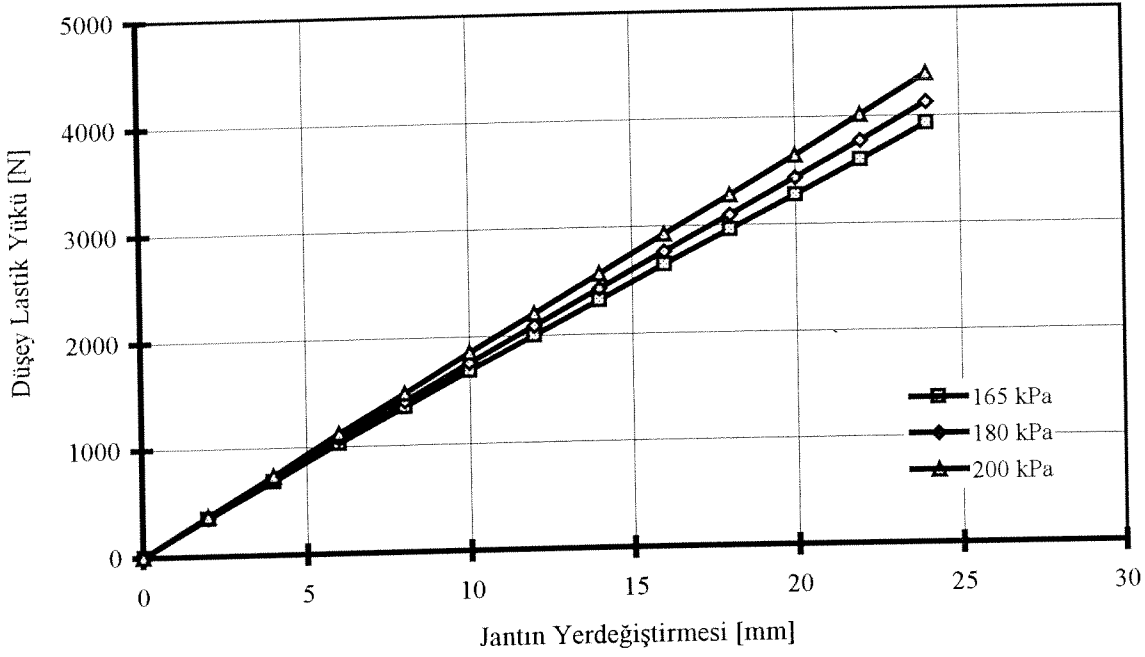
Taban		Yanak		Tekstil Kuşak (Sadece Çekme)				Çelik Kuşak ($\pm 20^\circ$)			
E	ν	E	ν	E	ν	Kordlar arasındaki mesafe	Kord kesit alanı	E	ν	Kordlar arasındaki mesafe	Kord kesit alanı
14 MPa	0.45	5.5 MPa	0.45	3.4 GPa	0.3	1.05 mm	0.126 mm ²	200 GPa	0.3	0.33 mm	0.126 mm ²

III-1.2 Yol Temas Analizi

Lastiğin statik analizinde ikinci ve son adım yol temas analizidir. Bu analizde şişirilmiş lastik düz ve rijit bir yüzey üzerine bastırılmaktadır. Lastik ve yol arasında kuru (Coulomb) sürtünme varsayılarak sürtünme katsayısı 0.8 alınmıştır. Sınır şartlarının belirlenmesinde, tekerlek göbeğinde belirlenen düşey yükü oluşturacak kadar bir düşey yerdeğiştirme uygulanması veya belirlenen düşey yükün doğrudan lastik üzerine uygulanması olmak üzere iki yaklaşım kullanılabilir.

Yol temas analizinden elde edilen iki önemli çıktı lastiğin yük-deformasyon karakteristiği ve lastikle yol arasında oluşan basınç dağılımıdır. Modellenen 155 R 13 çelik kuşaklı radyal lastiğin yük-deformasyon eğrisi Şekil III-4 te verilmiştir.

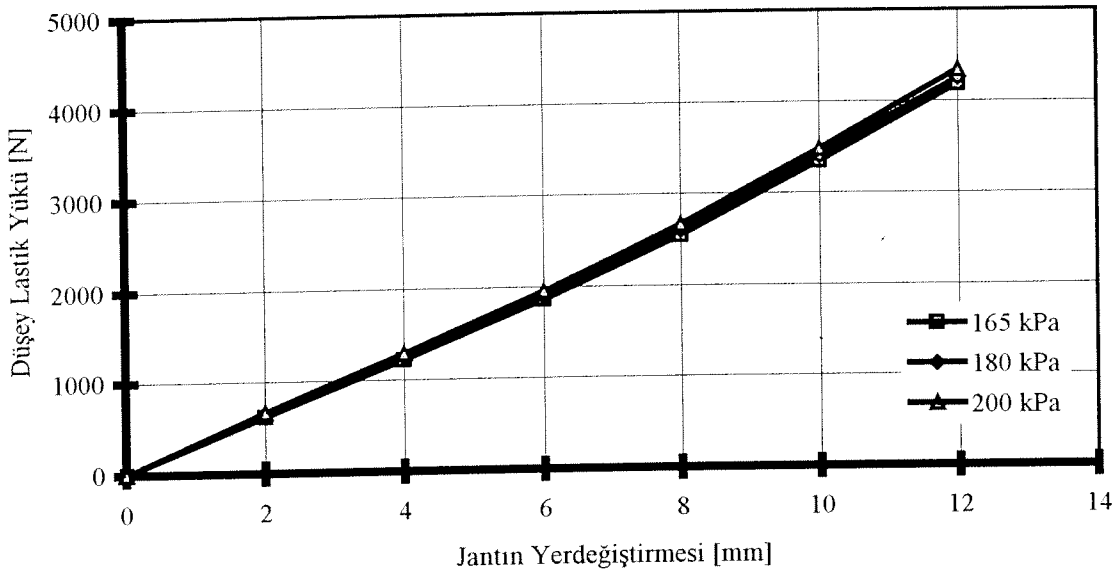
Çelik kordlu kuşağın kord açısı 20° yerine 10° alındığında, lastiğin düşey direngenliğinin artması ve şişirme basıncının etkisinin azalması beklenen bir sonuçtur. Şekil III-5 te sunulan ve aynı lastiğin çelik kord açılarını $\pm 10^\circ$ olarak elde edilen sonuçlar da bu beklentiyi doğrulamaktadır.



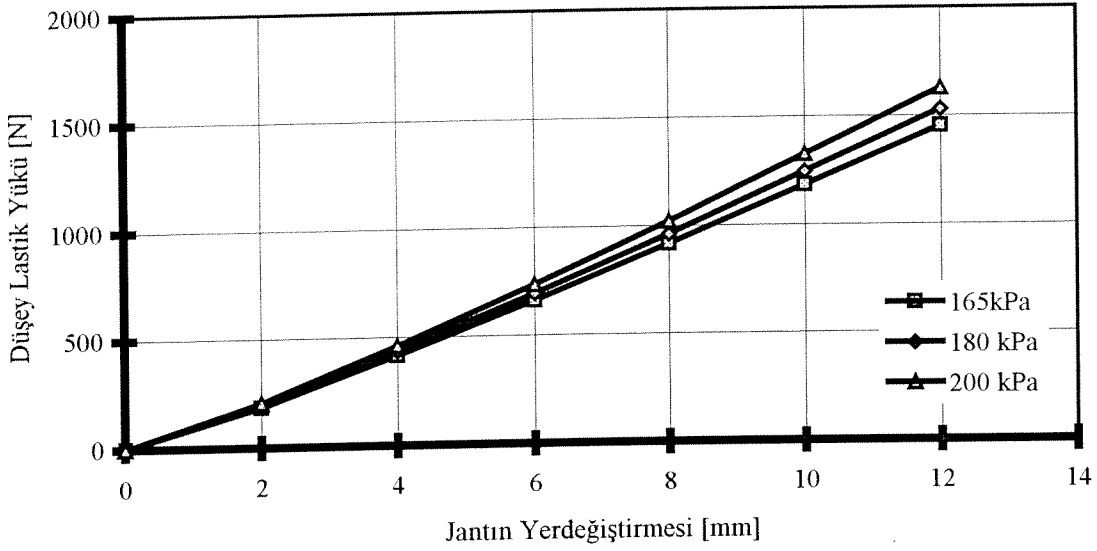
şekil III-4 155 R 13 Lastiğin Yüğü-Deformasyon Karakteristikleri (Kaba Ağlı Model)

Tekstil kuşaklı lastiklerde, genellikle iki çelik kordlu kuşak katı yerine dört tekstil kordlu kuşak kullanılmaktadır. Kord çapını 0.5 mm, kordlar arasındaki mesafeyi 1 mm ve kord açısını $\pm 20^\circ$ olarak oluşturulan modelin, değişik şişirme basınçları için analizinden elde edilen sonuçlar şekil III-6 da verilmiştir. Bu şekildeki yük-deformasyon karakteristiği, tekstil kuşaklı lastiğin çelik kuşaklı lastiğe göre belirgin bir şekilde yumuşak olduğunu göstermektedir.

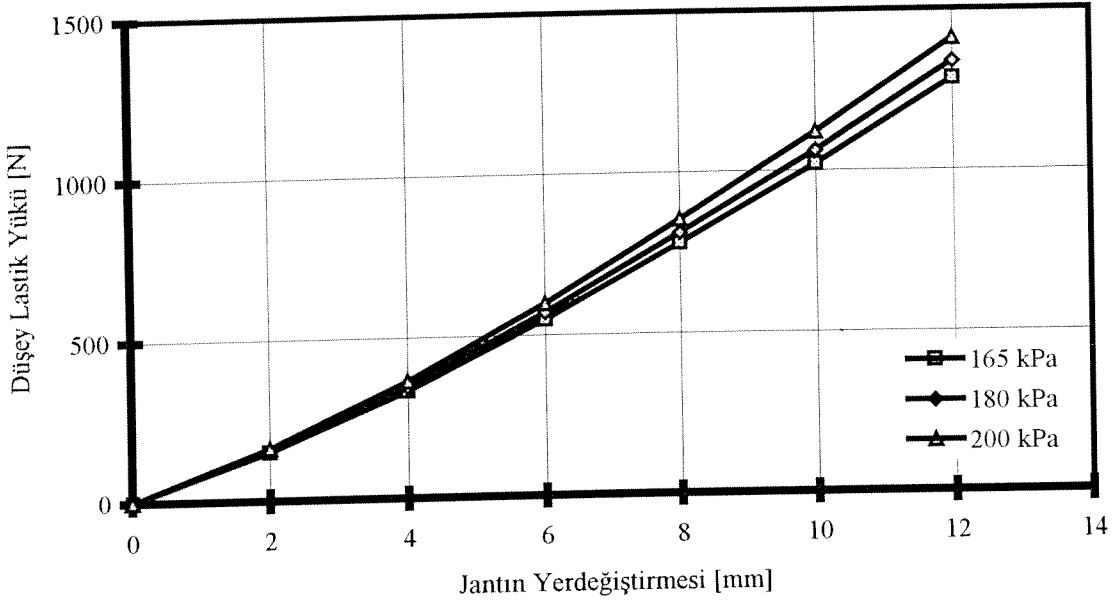
155 R 13 lastiğin geometrik özelliklerinde, $\pm 35^\circ$ tekstil kordlu diyagonal lastiğin modellenmesi ve analizinden elde edilen yük-deformasyon karakteristikleri ise şekil III-7 de verilmektedir. Diyagonal lastikler, katlar arasındaki sürtünme nedeniyle genellikle radyal lastiklere göre daha yüksek direngenliğe sahiptir. Ancak model bu olayı içermediği için, diyagonal lastik modelinin gerçekdişi düzeyde yumuşak olduğu gözlenmektedir.



Şekil III-5 155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristiğı
(±10° Çelik Kuşak)

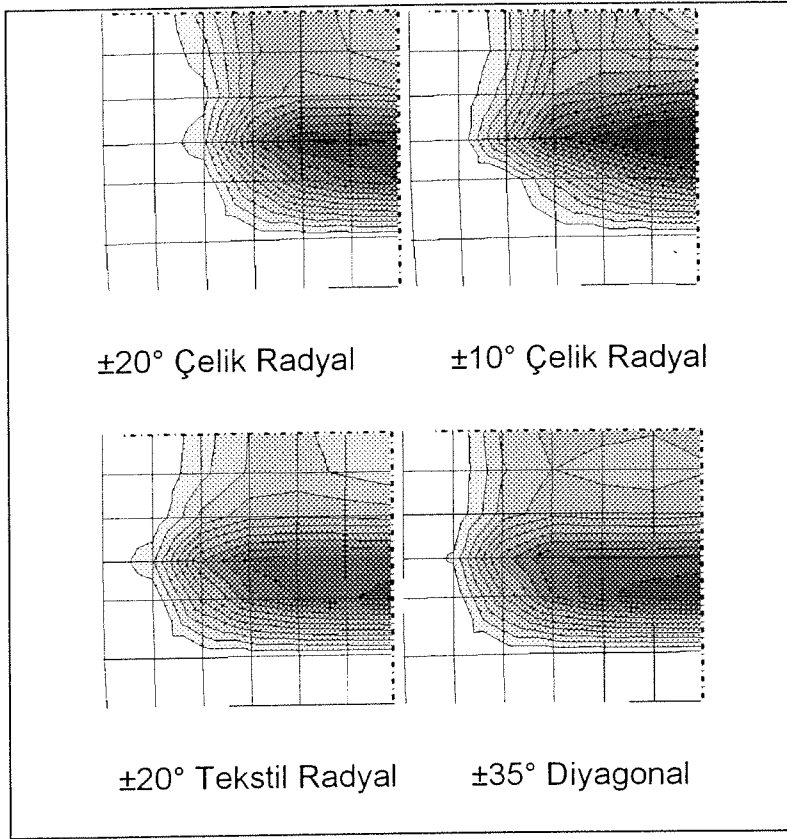


Şekil III-6 Tekstil Kuşaklı Radyal Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristiğı

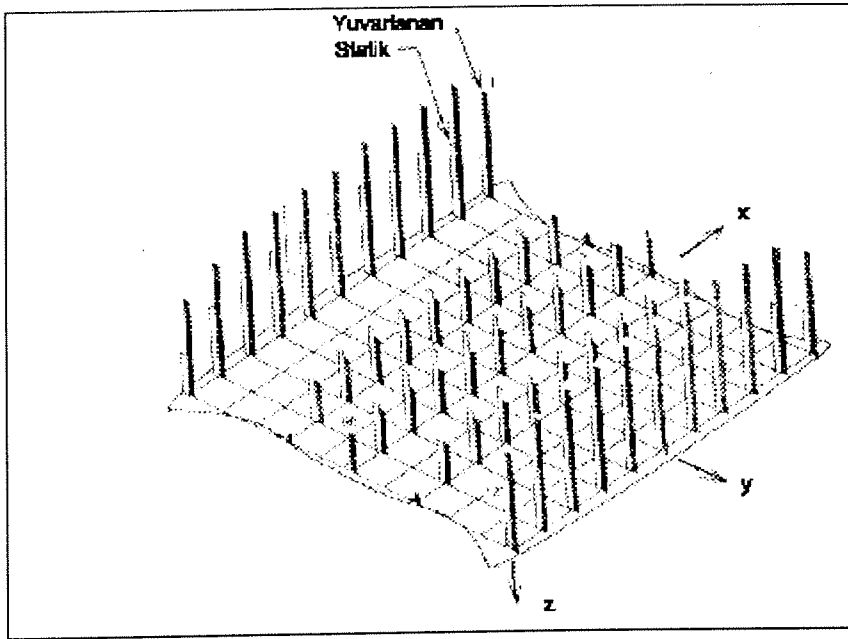


Şekil III-7 Diagonal Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri

2200 N düşey yük altında ve 180 kPa a şişirilmiş $\pm 20^\circ$ çelik kuşaklı radyal, $\pm 10^\circ$ çelik kuşaklı radyal, $\pm 20^\circ$ tekstil kuşaklı radyal ve $\pm 35^\circ$ diyagonal lastiklerle yol yüzeyi arasındaki basınç dağılımı elde edilerek, çeyrek temas yüzeyleri şeklinde Şekil III-8 de sunulmuştur. Temas yüzeyi basınç dağılımı lastik yanaklarına doğru artan ve temas yüzeyinin ortasında azalan özellikleriyle, benzer bir radyal lastik kullanılarak elde edilen ve Şekil III-9 da verilen deneysel basınç dağılımıyla (Pottinger, 1992) uyum göstermektedir.



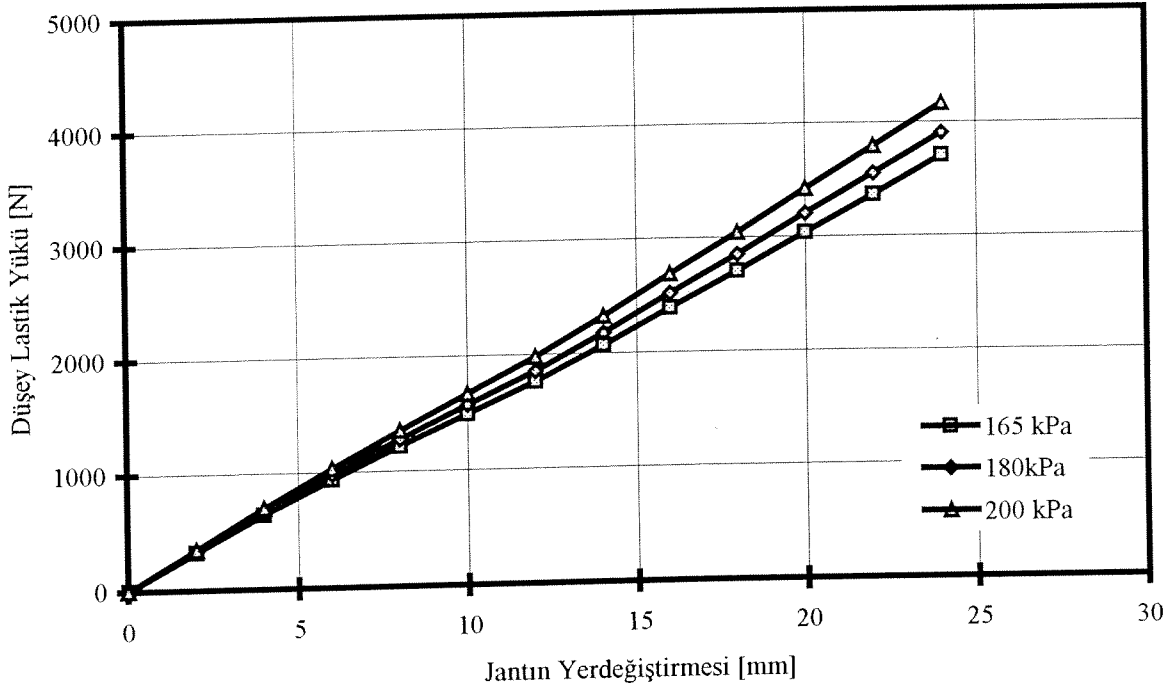
Şekil III-8 Değişik Lastik Modellerinde Yol Temas Yüzeyi Basınç Dağılımları



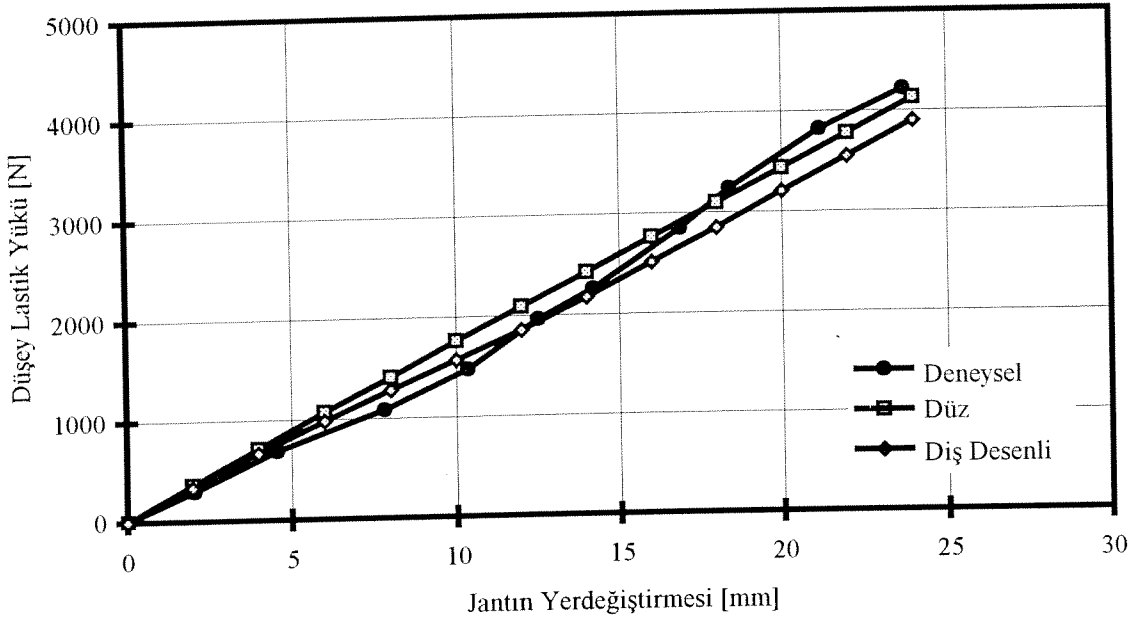
Şekil III-9 195/70 R 14 Lastiğin Deneysel Statik ve Düşük Hız (75 mm/s) Temas Yüzeyi Basınç Dağılımı

III-1.3 Lastik Diş Deseninin Etkisi

Bu aşamaya kadar, lastik modellerinde eksik kalan en önemli geometrik özellik lastik diş deseninin modellenemeyip, lastik tabanının tamamen düz bir yüzey olarak alınmasıdır. Kullanılan ağ yeterince ince olmadığı için, diş deseni tasarımını kabaca oluşturmak amacı ile Şekil III-1 te gösterilen modelin temas yüzeyinde yer alan 21 ve 24 numaralı taban elemanları modelden çıkarılmıştır. Diş deseninin oluşturulmasından sonra, 155 R 13 lastiğinin bir adet tekstil kat ve iki adet çelik kuşak katlı modeli kullanılarak değişik şişirme basınçlarında yük-deformasyon karakteristikleri elde edilmiş ve Şekil III-10 da verilmiştir. Şekil III-11 de ise diş desenli ve düz lastiklerin nominal şişirme basıncında yük-deformasyon karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, düşük yüklerde desenli lastik daha yumuşak bir karakteristik gösterirken, yüksek yük altında diş deseninin etkisi kaybolunca yumuşaklığını da belli bir düzeyde kaybetmektedir.



Şekil III-10 Diş Desenli 155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri

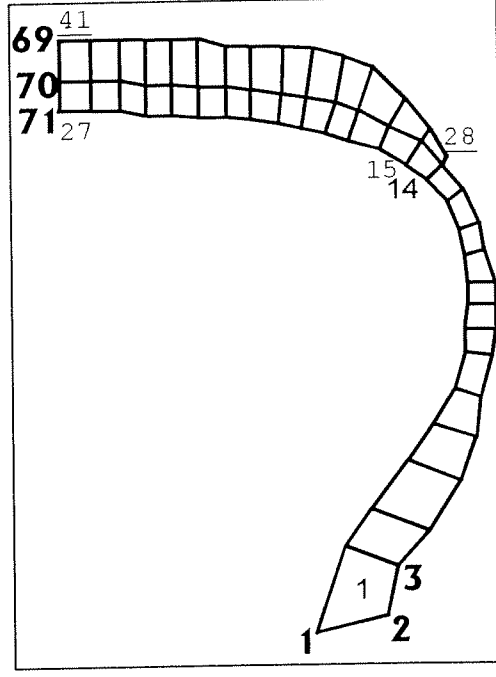


Şekil III-11 Diş Desenli ve Desensiz Modellerden Elde Edilen Sonuçların 180 kPa Şişirme Basıncında Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

III-2. İnce Ağılı Model

Kaba ağılı model kullanıldığında, özellikle bir düğüm noktasının temas yüzeyine giriş veya çıkışında sonuçlarda gözlenen değışikliklerin daha ince bir ağı kullanılmasının gerekli olduğunu gösterecek düzeyde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ağıın sonuçlar üzerindeki etkisinin de incelenebilmesi amacı ile yarım kesidi 41 elemandan oluşan ince ağılı bir model hazırlanmıştır. Model Şekil III-12 de gösterilmiştir.

1 den 15 e kadar olan elemanlar karkas katlarını, 16 dan 27 ye kadar olan elemanlar hem karkas hem de kuşak elemanları, 28 den 41 e kadar olan elemanlar ise taban elemanlarıdır. Sınır şartlarının uygulanmasında, rigid jant bağlantısı olarak 1, 2 ve 3 numaralı düğüm noktaları her yönde sabitlenirken, simetri sınır şartı olarak 41, 42 ve 43 numaralı düğüm noktalarının yatay hareketi engellenmiştir. Şişirme sırasında tüm lastik içyüzeyine basınç uygulanmıştır.



Şekil III-12 İnce Ağılı Model – Yarım Kesit

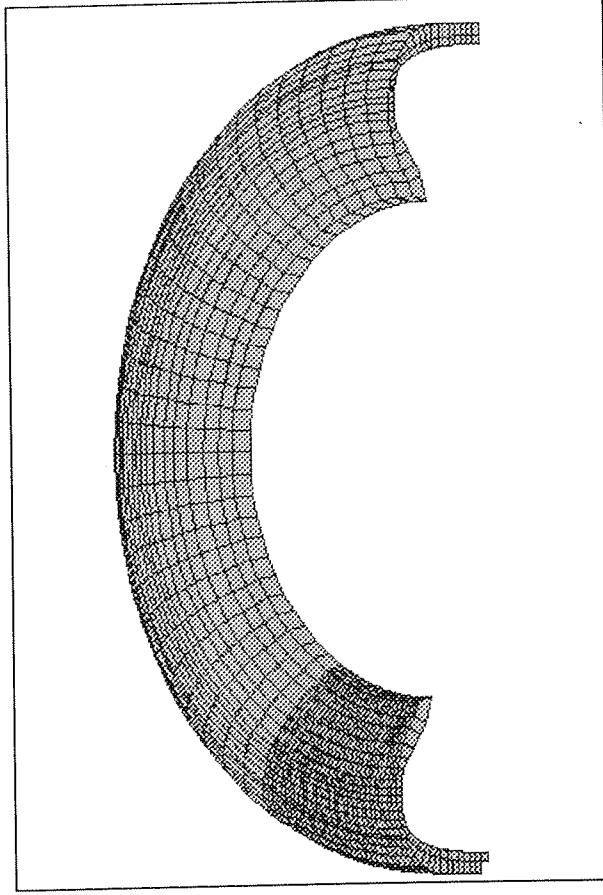
Lastiğin üç boyutlu modelinin oluşturulmasında ise, kesit modeli yolla temas etmesi beklenen ilk 30° lik bölgede 1° lik aralıklarla kalan bölgede ise 5° lik aralıklarla döndürülmüştür. Şekil III-13 te gösterilen ince ağılı model toplam 4331 düğüm noktası olan 2460 8-düğüm noktalı tuğla elemanlardan oluşmaktadır.

Bu modelde de Tablo III-2 de verilen malzeme elastik özellikleri kullanılmıştır. Karkas ve karkas+kuşak elemanlarının yapısı da Şekil III-2 de gösterildiği gibidir.

III-2.1 Şişirme Analizi

Lastiğin şişirilmesi için, lastik modelinin en alt katında yer alan elemanların iç yüzeylerine sınır şartı olarak basınç uygulanmıştır. Şişirme işlemi 180 Kpa nominal şişirilme basıncı için ve bu basıncın % 10 altı ve % 10 üstü olan 165 kPa ve 200 kPa için ayrı ayrı uygulanmıştır.

Ayrıntılı bir inceleme yapılmamakla birlikte, bilgisayar modelinde şişirilen lastikte oluşan deformasyonun gerçek lastiklerde oluşan deformasyonla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

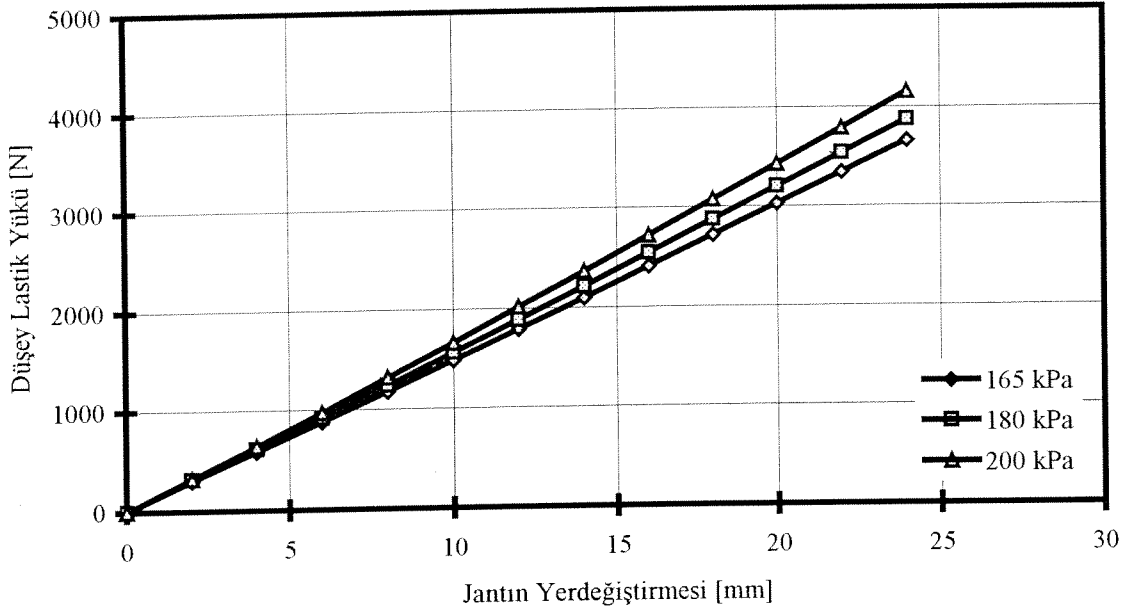


Şekil III-13 İnce Ağılı Statik Lastik Modeli

III-2.2 Yol Temas Analizi

Yol temas analizinde, şişirilen lastik rijit bir yüzeye tekerlek göbeğinde belirlenen düşey yükü oluşturacak kadar bir düşey yerdeğiştirme uygulanarak yol tepki kuvveti elde edilmektedir. Çelik kuşaklı 155 R 13 78 S lastik için yük-deformasyon karakteristikleri üç ayrı şişirme basıncı için elde edilmiş ve Şekil III-14 de sunulmuştur. Sonuçlar, Şekil III-4 de kaba ağılı model için elde edilenlerden çok az

bir fark göstermektedir. Farklılık ince ağılı modelin analizinin daha yumuşak bir lastik özelliğinin çıkmasındadır.

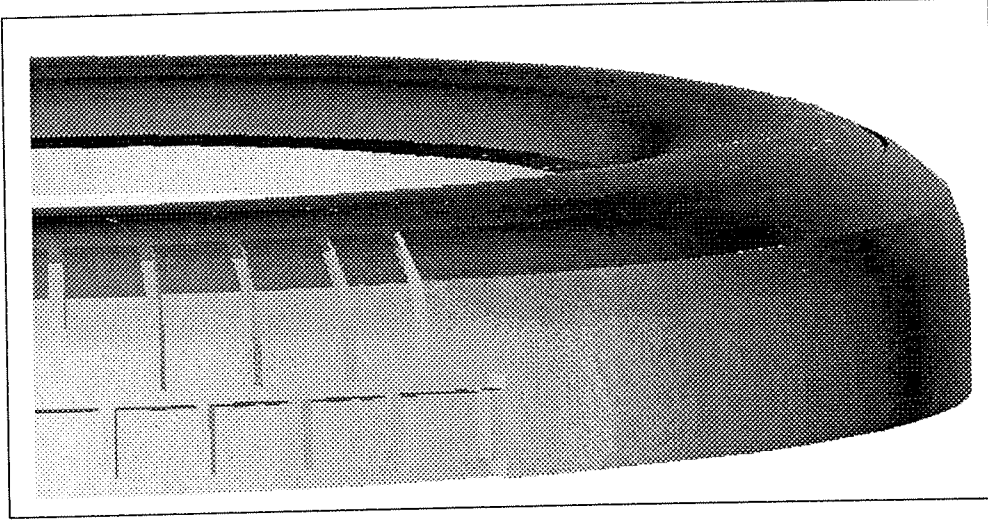


Şekil III-14 155 R 13 Lastiğın Yük-Deformasyon Karakteristikleri (İnce Ağılı Model)

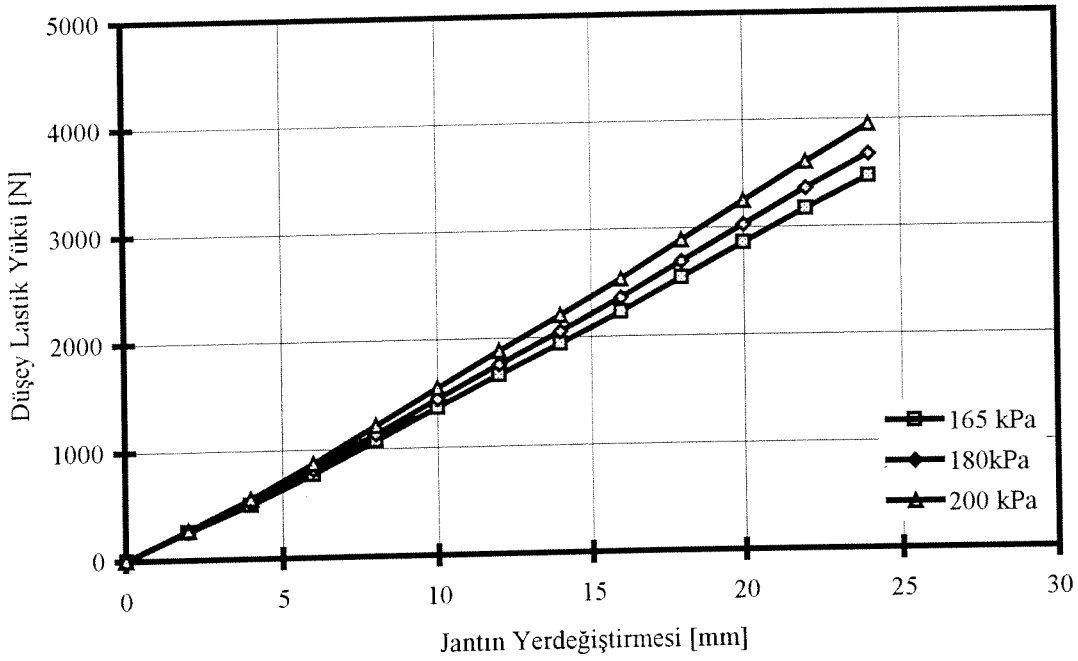
III-2.3 Lastik Diş Deseninin Etkisi

İnce ağılı modelin bir diğeri avantajı da, kaba ağılı modele göre daha karmaşık bir taban diş deseninin oluşturulabilmesidir. Çevresel oluklara ek olarak, sadece temas yüzeyinde Şekil III-15 te görüldüğü gibi ilave taban elemanlarının modelden çıkarılması ile yanıl oluklar da açılmıştır. Bu modelin analizinden elde edilen yük-deformasyon karakteristikleri Şekil III-16 da sunulmuştur. Şekil III-17 de ise, düz tabanlı ve diş desenli modellerin analizinden elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Deneysel sonuçlar, lastik deformasyonunun yaklaşık 12 mm. nin altında olduğı durumda diş desenli lastik gibi göreceli olarak yumuşak olduğunu, ancak daha yüksek deformasyonlar için lastiğın yumuşaklığını kaybettiğini göstermektedir. Model analizleri de düz tabanlı ve diş

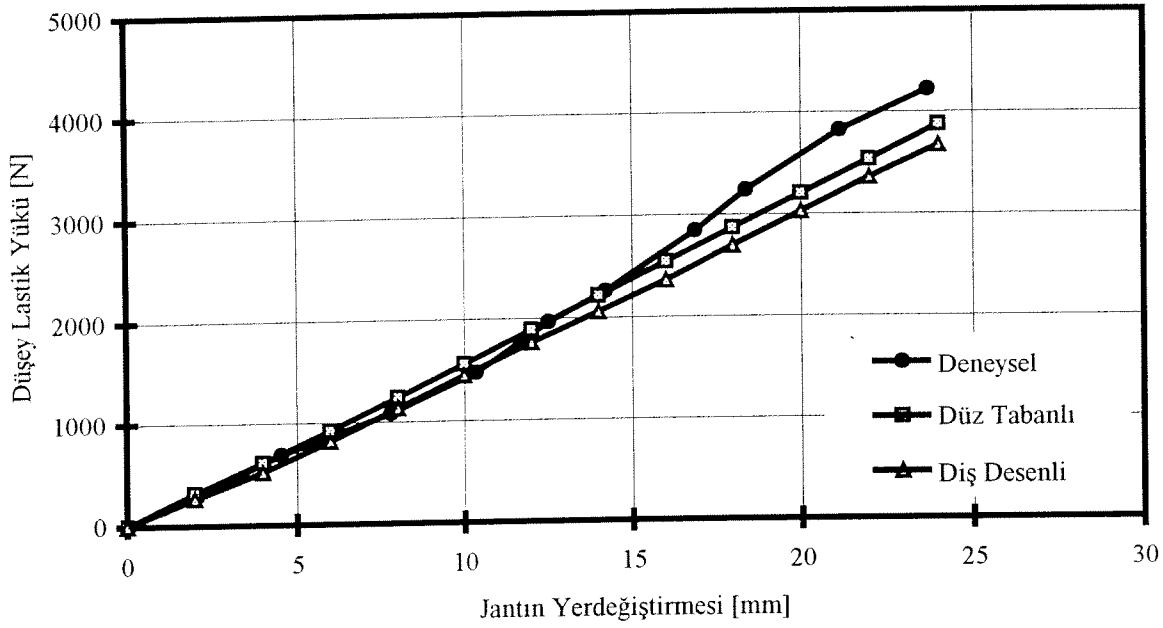
desenli modellerin direngelikleri arasındaki farklılığı en azından nitelik açısından doğru olarak vermektedir.



Şekil III-15 Oluşturulan Taban Diş Deseni



Şekil III-16 Diş Desenli 155 R 13 Lastiğin Yüğü-Deformasyon Karakteristikleri



şekil III-17 Düz Tabanlı ve Diş Desenli Modellerin Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

III-3. Daha Gelişmiş Modeller

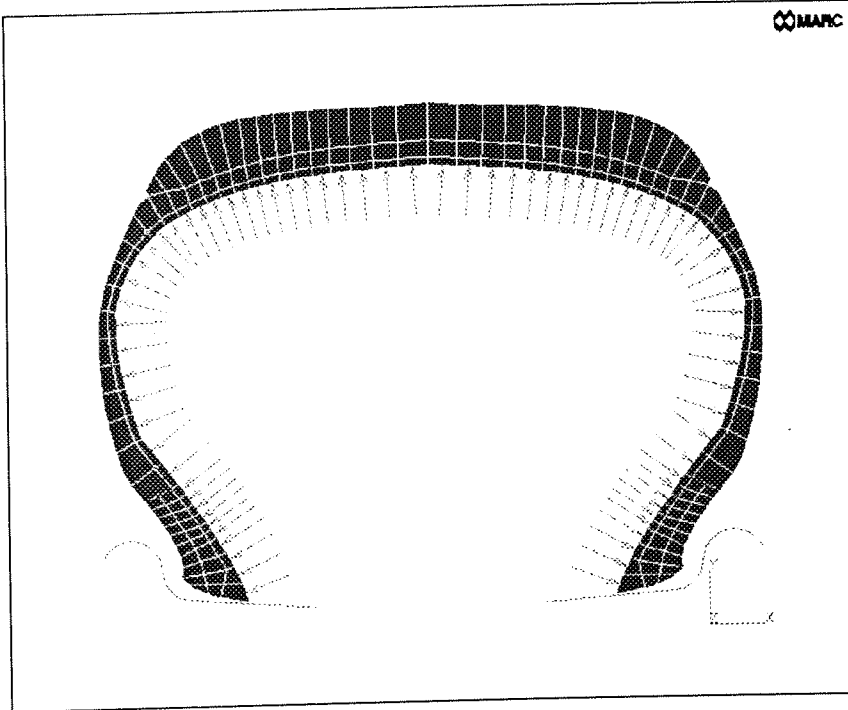
Bu aşamaya kadar oluşturulan pnömatik lastik modellerinde iki temel açıdan gelişme sağlamak mümkün görölmektedir. Lastiğın en temel malzemesi olan kauçuk için lineer elastik malzeme yerine, polimerler ve sıkıştırılmayan malzemeler için başarıyla uygulanan Mooney-Rivlin malzeme modeli (Osswald ve Menges, 1996), kullanılabilir. Ayrıca Poisson oranı için çözüm yönteminin dikte ettiğı 0.45 değerinin kullanılması yerine sıkıştırılmayan (Hermann Formölasyonu, Herrmann, 1965) elemanların kullanılması da modellerin gerçekçiliğine katkıda bulunacaktır. Bu iki önemli gelişmeye ek olarak yeni modellerde, ağıın daha da inceltmesi, lineer elemanlardan ikinci mertebeden interpolasyon polinomlarının kullanıldığı kuadratik elemanlara geçilmesi gibi sonuçların hassasiyetini arttırabilecek değişikliklere de yer verilmiştir.

III-3.1 Eksenel Simetrik Şişen ve Janta Oturan Modeller

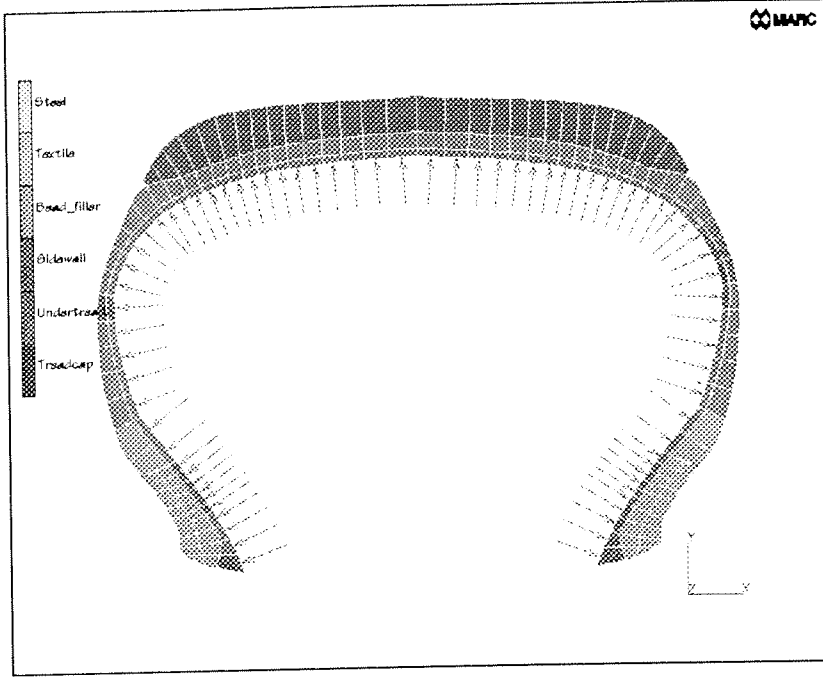
Şekil III-18 de gösterilen eksenel simetrik modelde, kauçuk matris 198 adet 8 düğüm noktalı, sıkıştırılmayan eksenel simetrik elemandan oluşmaktadır. Değişik bölgelerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo III-3 te ve matris elemanların model ağı üzerindeki konumları Şekil III-19 da verilmektedir.

Tablo III-3 Lastiğin Mooney-Rivlin Malzeme Katsayıları

Kauçuk Malzeme	C_{10}	C_{01}
Topuk Dolgusu	14.14 MPa	21.26 MPa
Yanak	171.8 kPa	830.3 kPa
Tabanaltı	140.4 kPa	427 kPa
Taban	806.1 kPa	1.805 MPa



Şekil III-18 Eksenel Simetrik Lastik Modeli



Şekil III-19 Lastikte Kauçuk Matris Malzemenin Konumu

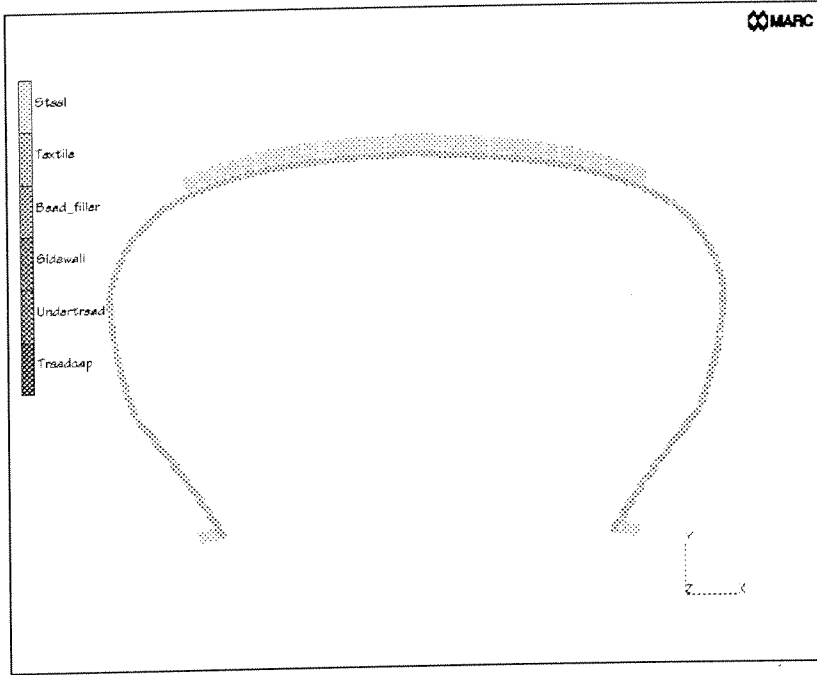
Lastiğin takviye bölümleri ise tek yönlü takviye elemanları için özel olarak hazırlanan 8 düğüm noktalı “rebar” elemanları ile modellenmiştir. “Rebar” elemanları, kauçuk matris elemanları ile aynı bağlantı ancak farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Takviye elemanlarının malzeme özellikleri Tablo III-4 te, geometrik özellikleri Tablo III-5 te ve model ağında konumları ise Şekil III-20 de sunulmuştur.

Tablo III-4 Takviye Malzemelerinin Elastik Özellikleri

Karkas Malzemesi	Çekme Modülü	Basma Modülü
Tekstil Gövde Katları	3.97 GPa	198.5 MPa
Çelik Kuşak Katları	200 GPa	100 GPa

Tablo III-5 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
Tekstil Kuşak	±20	1.0	112	0.878
Kuşak (Sıfır)	0	0.68	100	0.363



Şekil III-20 Lastik Modelinde Takviye Malzemelerinin Konumları

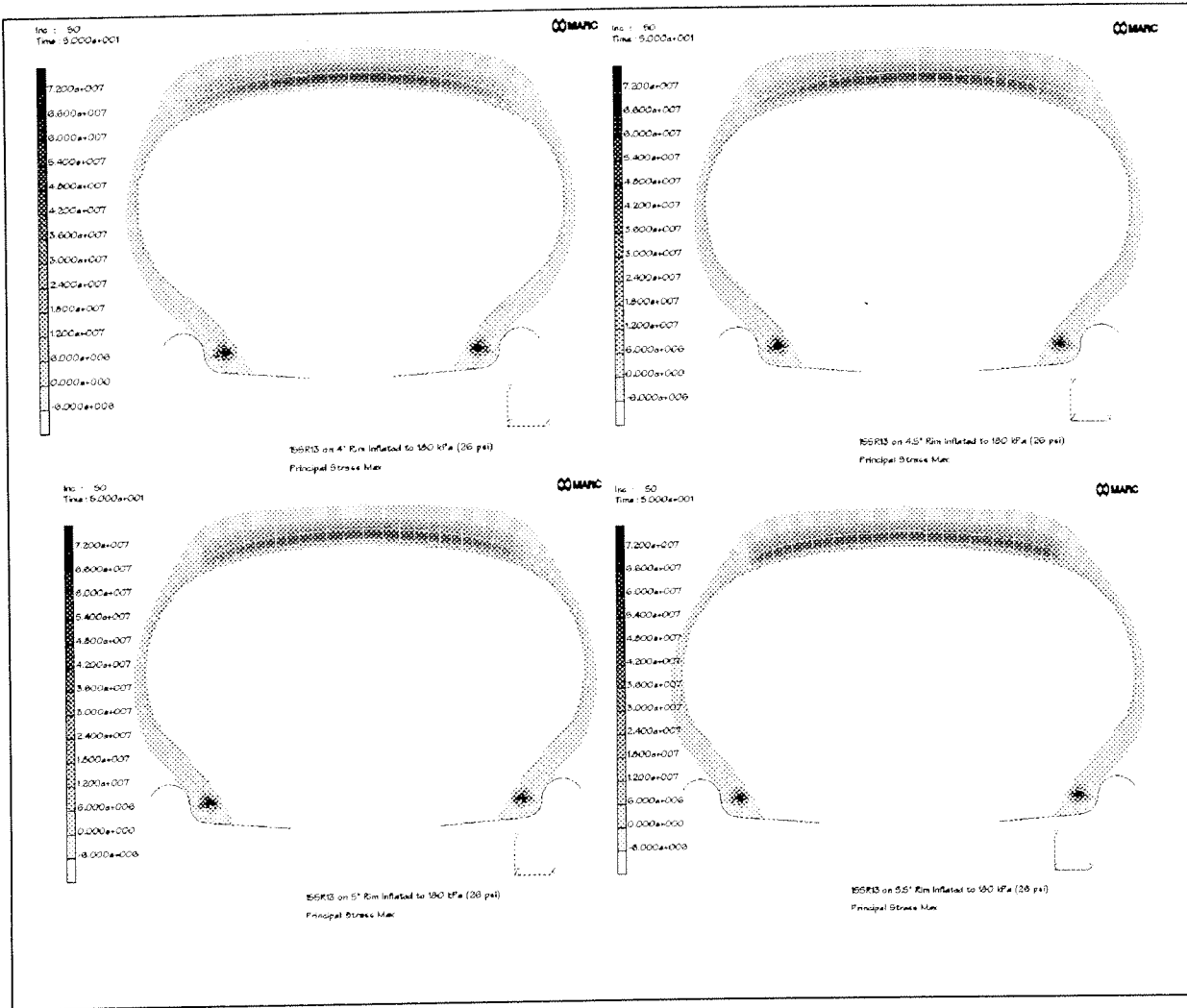
III-3.2 Değişik Jantlar Üzerinde Şişirme

Ölçüleri değişik jantlar üzerine takılan ve şişirilen lastiklerde oluşan gerilmelerin incelenmesi için üç ayrı analiz yapılmıştır.

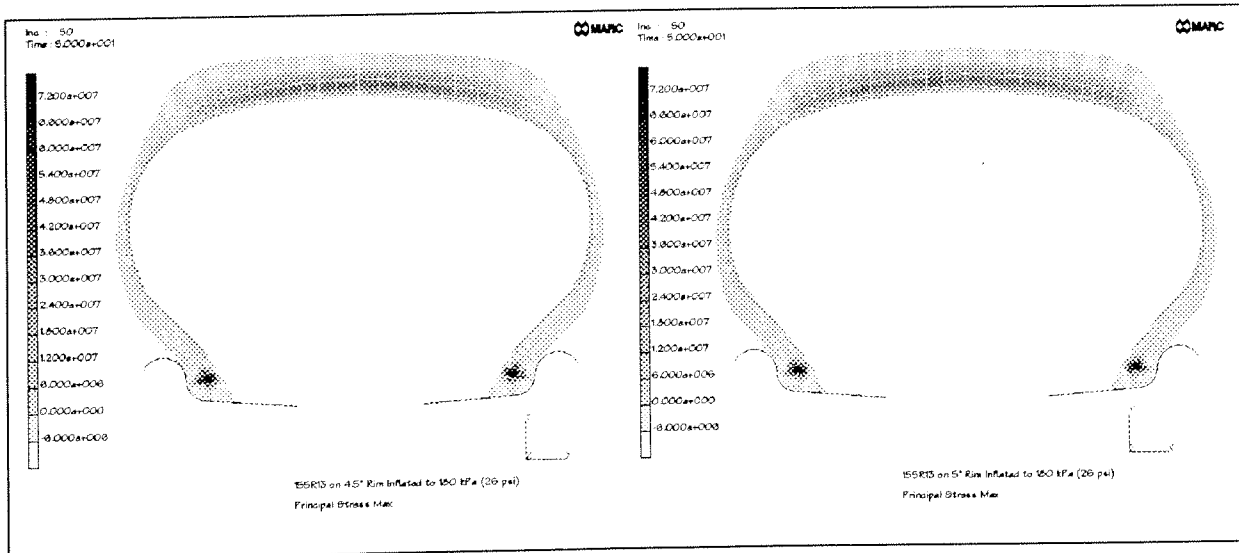
İlk analizde tek tekstil gövde katt ve iki çelik kuşak katından oluşan bir 155 R 13 lastik, 4, 4.5, 5 ve 5.5 inç jant üzerine oturtularak 180 kPa basınca şişirilmiş ve oluşan gerilmeler ve deformasyon Şekil III-21 de sunulmuştur. Bu lastik için 4.5 ve 5 inç jantlar üretici şirket tarafından önerilmekte, 4 ve 5.5 inç jantlara da müsaade edilmektedir. Bu analizin sonuçları daha sonraki analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak alınacaktır.

İkinci analizde ise, bazı lastik üreticileri tarafından yapılan bir uygulama yı incelemek üzere, 155 R 13 lastik iki çelik kuşak katı üzerine 0° açılı tek bir tekstil kuşak katı ekleyerek modellenmiştir. 4.5 ve 5 inç jantlar üzerinde şişirilen bu lastiğin analizinden elde edilen gerilmeler ve deformasyon Şekil III-22 de verilmiştir. 0° açılı kuşağın ilavesinin, diğer kuşaklardaki gerilmeleri azalttığı gözlenmektedir.

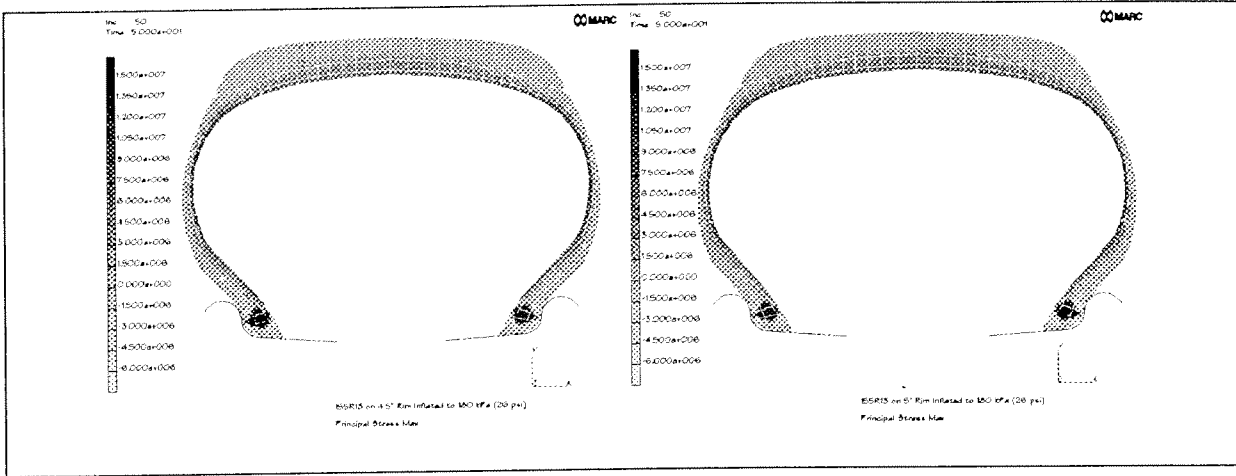
Son olarak, 155 R 13 lastik iki çelik kuşak katı yerine dört tekstil kuşak katı kullanılarak modellenmiş ve 4.5 ve 5 inç jantlar üzerinde şişirilmiştir. Elde edilen gerilmeler ve deformasyon Şekil III-23 te verilmiştir. Çelik kuşaklara göre daha yumuşak olan tekstil kuşaklar nedeniyle, lastikte gerilmelerin azaldığı, deformasyonun ise arttığı gözlenmektedir.



Şekil III-21 4, 4.5, 5 ve 5.5 inç Jant Üzerinde Şişirilen 155 R 13 Lastikte Oluşan Gerilmeler ve Deformasyon



Şekil III-22 4.5 ve 5 inç Jantlar Üzerinde Şişirilen 0° Tekstil Kuşak ilaveli 155 R 13 Lastik

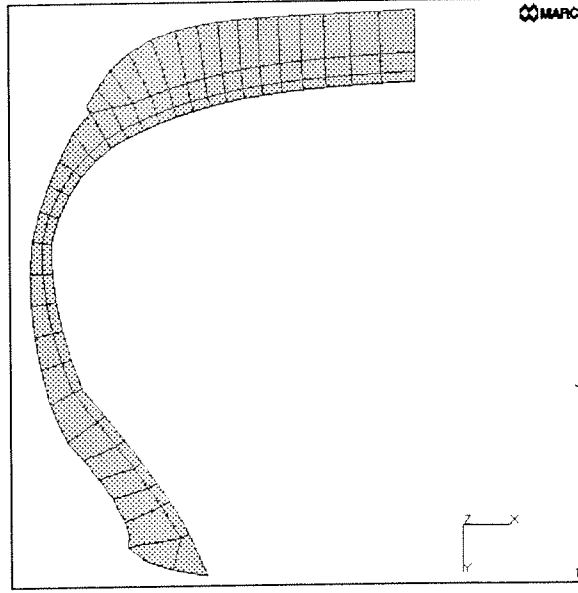


Şekil III-23 4.5 ve 5 inç Jantlar Üzerinde Şişirilen Dört Tekstil Kuşaklı 155 R 13 Lastik

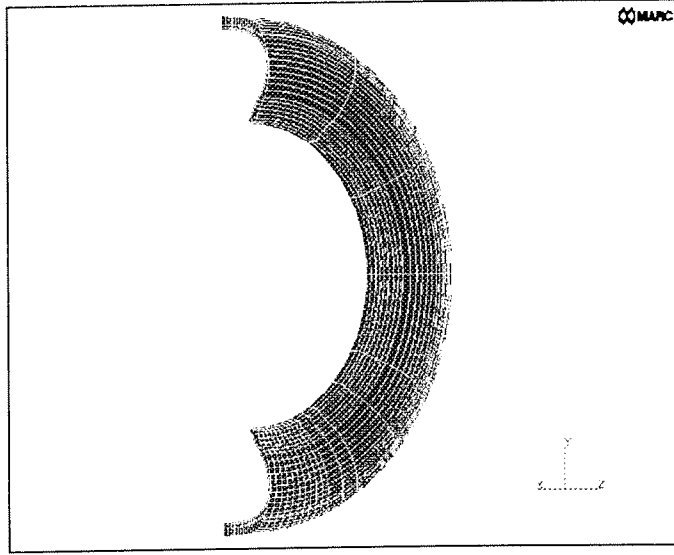
III-3.3 Yol Temas Modeli

Daha önceki statik modellerde, 8 düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlarda üç-lineer (trilinear) interpolasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu modelde eski elemanlar, üç-kuadratik (triquadratic) interpolasyon fonksiyonlarının kullanıldığı 20 düğüm noktalı, Hermann formülasyonlu sıkıştırılmaz katı elemanlarla değiştirilmiştir. Kauçuk malzeme için de polimerler için önerilen iki katsayılı Mooney-Rivlin malzeme modeli kullanılmıştır.

Lastik kesit örgüsü, Şekil III-18 de verilen aksenal simetrik modelin örgüsüne benzemektedir. Modeli basitleştirmek için, simetri düzleminde simetri sınır şartları alınmıştır. Aynı nedenle, jant temas yüzeyinde sabitleştirilmiş düğüm noktaları kullanılarak bu bölgede ince örgü ve topuk telinin modellenme gereksinimi ortadan kaldırılmıştır. Elde edilen lastik kesit ve çeyrek lastik modelleri Şekil III-24 ve Şekil III-25 da verilmiştir. Malzeme özellikleri ve konumları Tablo III-3, Tablo III-4, Şekil III-21 ve Şekil III-22 de verilenlerle aynıdır.



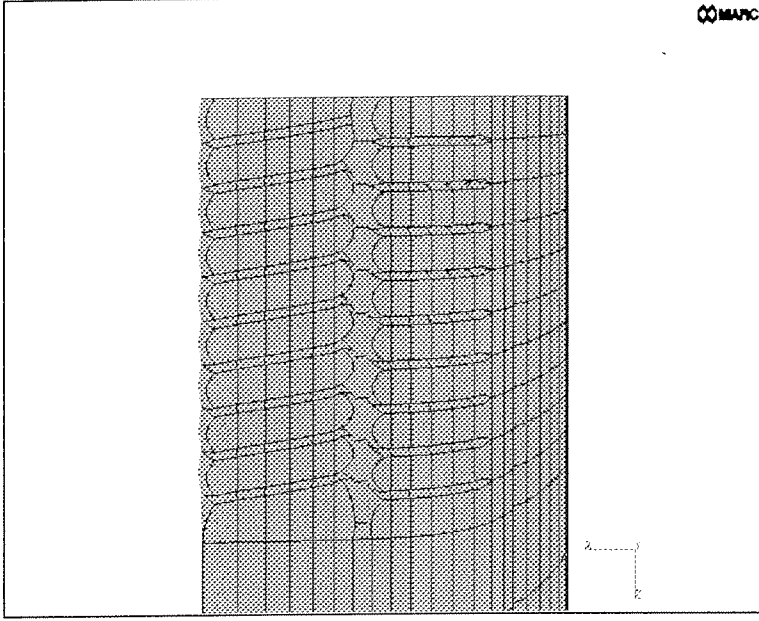
Şekil III-24 Yol Temas Analizi İçin Lastik Kesit Modeli



Şekil III-25 Yol Temas Analizi İçin Çeyrek Lastik Modeli

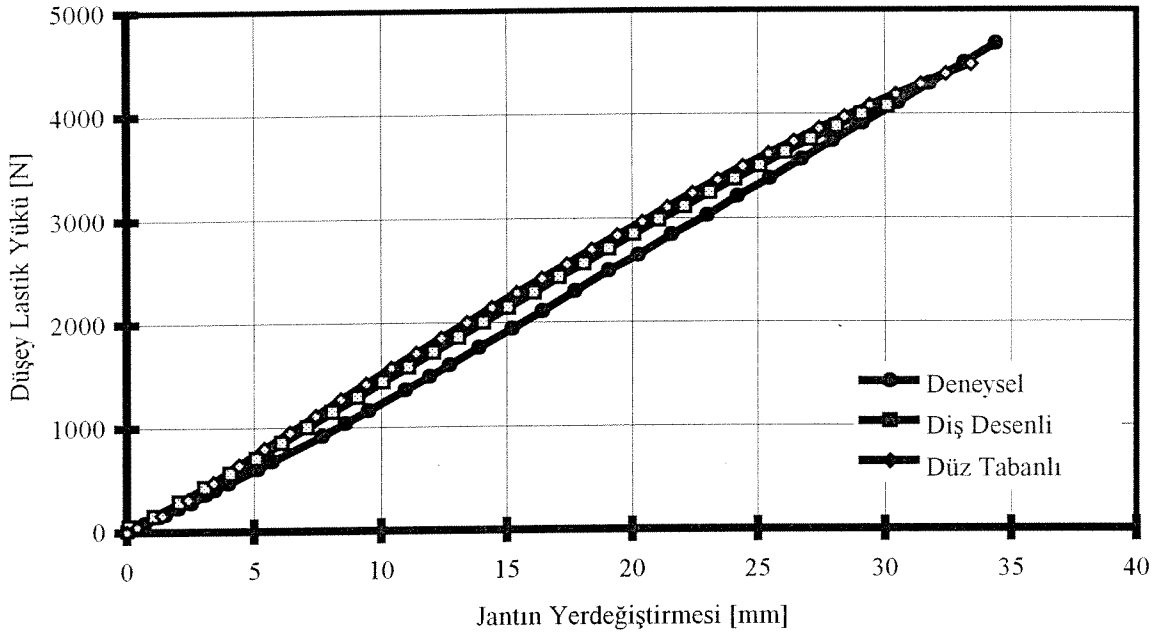
Şekil III-25 te gösterilen lastik modeli 2448 eleman ve 7922 düğüm noktasından oluşmaktadır. Bu modele gelinceye kadar yapılan yol temas analizlerinde, lastik düz bir yüzey üzerine bastırılmaktaydı. Ancak deneysel sonuçların alındığı Lastik Deney Düzeneği'nde gerçek lastik silindirik bir tambur üzerine bastırılmaktadır. Kullanılan modelin hassasiyeti öngörülen en üst derecede olduğundan, deneysel sonuçlarla karşılaştırmada da herhangi bir fiziksel farklılığa

neden olmamak için analizde lastik düz bir yüzey yerine, Lastik Deney Düzenegi'nin tamburuyla aynı çapta bir rijit silindir üzerine bastırılmıştır. Kullanılan ince örgü sayesinde, lastiğin taban diş deseninin de Şekil III-26 da gösterildiği gibi daha gerçekçi olarak modellenmesi mümkün olmuştur.



Şekil III-26 Basit Taban Diş Deseni

Düz tabanlı ve tabanı diş desenli modellerin analizinden yük-deformasyon karakteristikleri Şekil III-27 de 3 mm diş derinliğine sahip lastik kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, analiz ve deney sonuçları arasında yeterli bir uyum sağlandığı gözlenmektedir.



Şekil III-27 Geliştirilmiş Modelin Analizinden ve Lastik Deney Düzeneğinde Elde Edilen Yük-Deformasyon Karakteristikleri

III-4. Statik Lastik Modellerinin Değerlendirilmesi

Pnömatik otomobil lastiklerinin gerçeğe yakın bir şekilde modellenenilmesi için, göreceli olarak basit modellerle başlanmış; daha sonra bu modeller hem gerçek lastiklerle fiziksel ve davranış benzerliği, hem de çözümler hassasiyetini arttıracak şekilde geliştirilmiştir. Statik analizlerde elde edilen sonuçlar (yük-deformasyon karakteristikleri, yol temas yüzeyi basınç dağılımı), genelde deneysel sonuçlarla ve benzer lastikler için literatürde mevcut sonuçlarla yeterli uyum göstermiştir. Bu aşamada statik modellerden elde edilen sonuçlar modellerin, kullanılan kauçuk matris malzeme özellikleri, takviye elemanlarının yapısı ve malzeme özellikleri ve modelin örgüsü açılarından uygun olduğunu göstermektedir. Böylece bir sonraki aşamaya, dönen ve viraj alan bir lastiğin modellenmesine geçmek için temel deneyim ve birikim çalışmaları tamamlanmış olmaktadır.

BÖLÜM IV

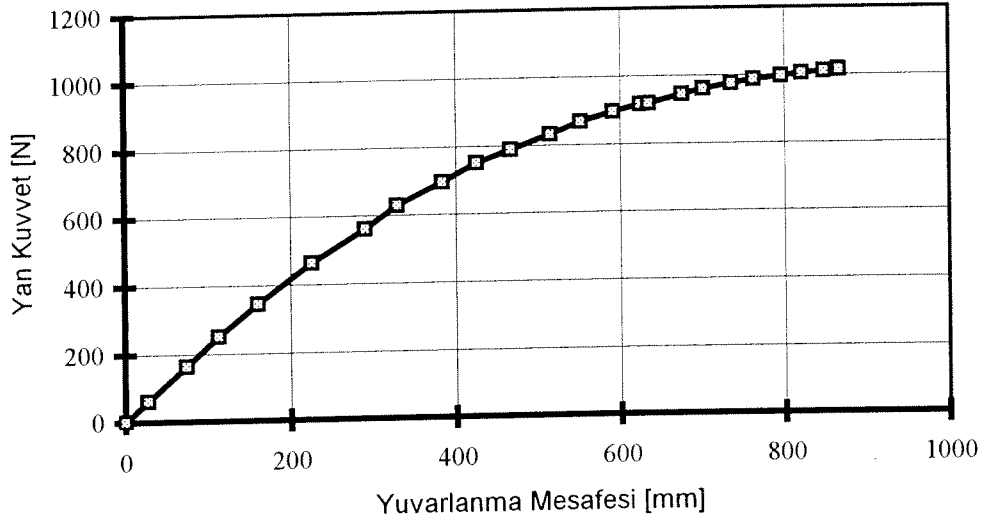
DÖNEN VE YÖNLENDİRİLEN LASTİĞİN MODELLENMESİ

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 ve atalet ve viskoelastik özellikler ihmal edilerek, statik lastik modellerine benzer bir model kullanılmıştır. Ancak dönme ve yan kuvvet karakteristiklerinin elde edilebilmesi için lastiğe verilmesi gereken kayma açısı (diyagonal hareket) gözönüne alındığında, statik modellerde kullanılan ve analizi önemli ölçüde kolaylaştıran simetri koşulları artık geçerli olmamaktadır. Lastiğin tümüyle modellenmesi ise en basit modelde dahi gerekli çözüm süresini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle dönen lastik modelinin belirlenmesinde kullanılacak ayrıntıların düzeyi, istenen hassasiyet ve kabul edilebilir çözüm süresi tarafından belirlenecektir.

IV-1. Sanki-Statik (Quasi-Static) Lastik Modeli

İlk dönen ve yönlendirilen lastik modeli ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak hazırlanmış; daha önce kullanılan, Şekil III-1 de gösterilen ve yarım kesidinde 24 eleman olan kaba örgülü statik lastik modeli başlangıç noktası olarak alınmıştır. Yuvarlanma hızının düşük olduğu varsayılarak, malzeme özellikleri için statik modelde kullanılan değerler aynen alınmış ve kütle ve sönüm değerleri kullanılmamıştır. Önce yarım kesit tüm kesit haline getirilmiş ve bu kesit 52 defa kopyalanarak lastik modeli oluşturulmuştur. Lastiğin taban yüzeyinde 5 adet temas elemanı kullanılmıştır. Sabit bir kayma açısında yuvarlanan lastiğin oluşturduğu yan

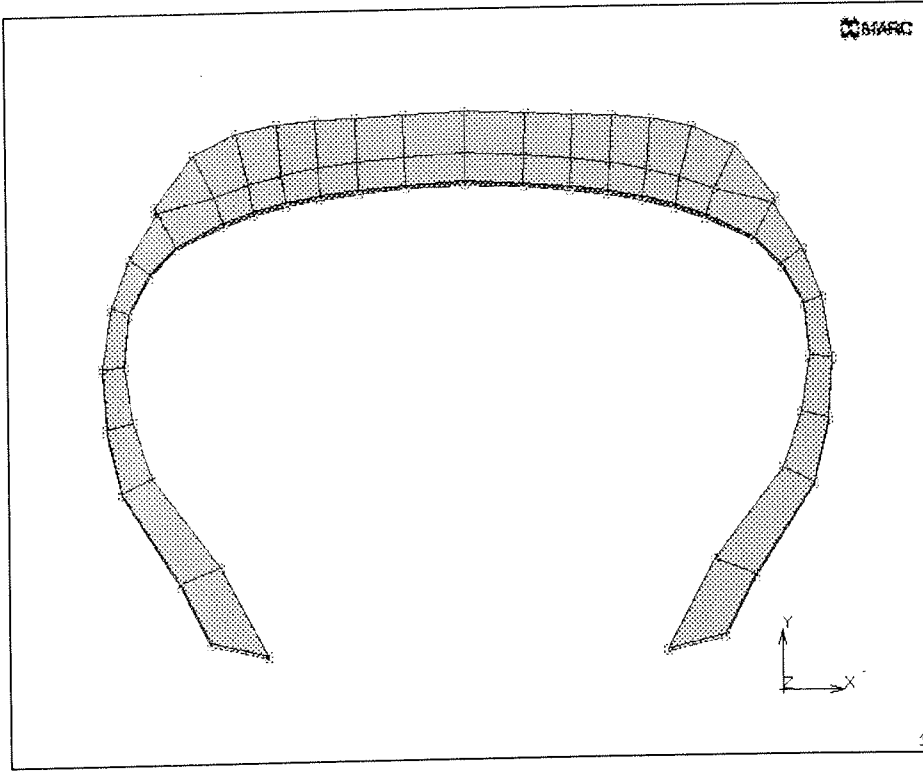
kuvvetin sürekli rejim değerini alabilmesi için lastik belli bir mesafe yuvarlanmalıdır (Loeb ve diğerleri, 1990). Lastiği yuvarlayabilmek için rijit elemanlar kullanılarak lastik yuvarlanma ekseninde dönebilen bir jant oluşturulmuştur. Daha sonra lastik 180 kPa iç basınca şişirilmiş ve rijit bir yüzeye lastik üzerinde yaklaşık 2 kN düşey yük oluşturacak şekilde bastırılmıştır. Statik analizden farklı olarak, lastik rijit yol yüzeyinin hareket ettirilmesi sonucu 2° kayma açısı ile yuvarlanmıştır. Lastik üzerine etki eden yan kuvvetin, lastiğin yuvarlanma mesafesi ile değişimi Şekil IV-1 de gösterilmiştir. Yan kuvvet lastiğin yuvarlanmaya başlaması ile artarak, lastik yarım tur döndükten sonra 1015 N luk bir değere ulaşmakta ve sabit kalmaktadır. Yan kuvvetin bu değişimi, kullanılan HP 715/50 iş istasyonu üzerinde 26 günde (gerçek zaman) elde edilebilmiştir.



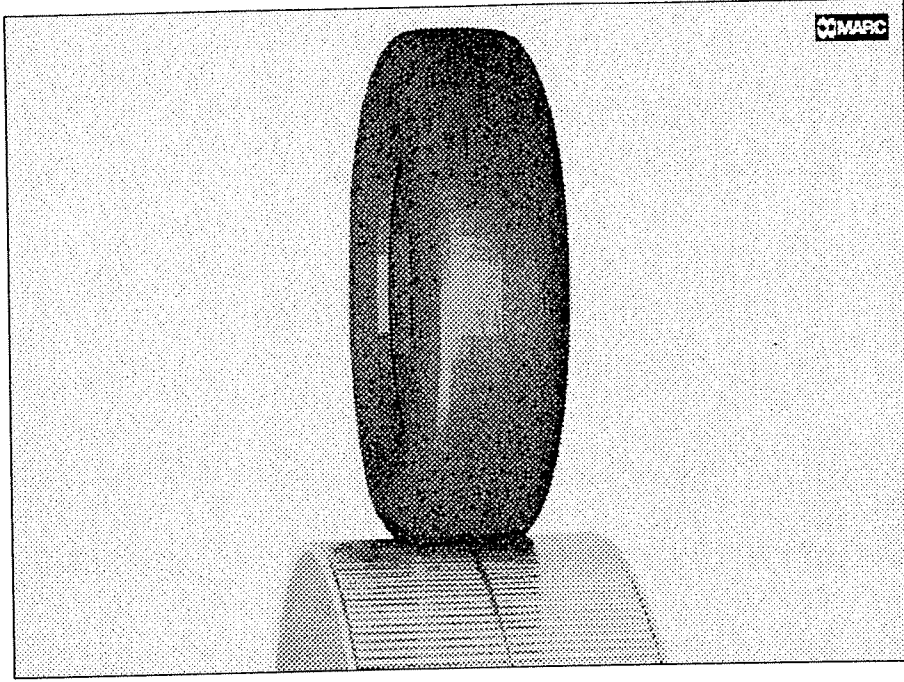
Şekil IV-1 Yan Kuvvetin, Lastiğin Yuvarlanma Mesafesi ile Değişimi (2° Kayma açısı, 180 kPa Şişirme Basıncı, 2kN Düşey Lastik Yüğü)

IV-2 Tambur Üzerinde Döner Kaba Örgülü Lastik Modeli

Deneysel sonuçlarla yapılacak karşılaştırmaların gerçekçi olabilmesi için, lastiğin düz bir yüzey yerine "Lastik Deney Düzenegi"nin tamburuyla aynı çapta bir silindirik bir yüzey üzerine bastırılması daha anlamlı olacaktır. Bu amaçla MARC sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak hazırlanan ve Şekil IV-2 de gösterilen ilk model, 42 kauçuk matris elemanı, 28 tekstil karkas elemanı ve 12 çelik kuşak elemanından oluşturulmuştur. Lastik modelinin tambur üzerinde kaplanmış (rendered) görünümü Şekil IV-3 te gösterilmiştir.



Şekil IV-2 Tambur Üzerinde Lastik Kesit Modeli

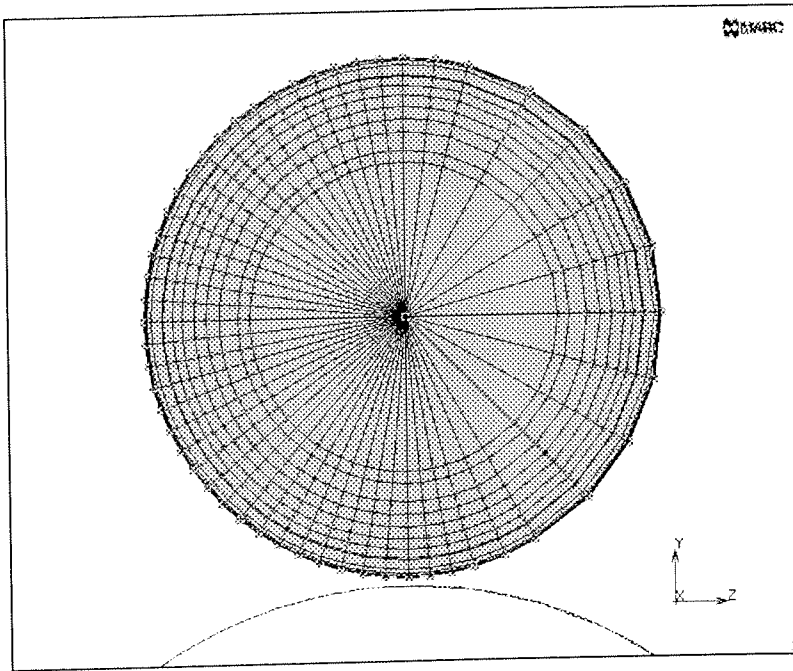


Şekil IV-3 Tambur Üzerinde Lastik Modelinin Kaplanmış Görüntüsü

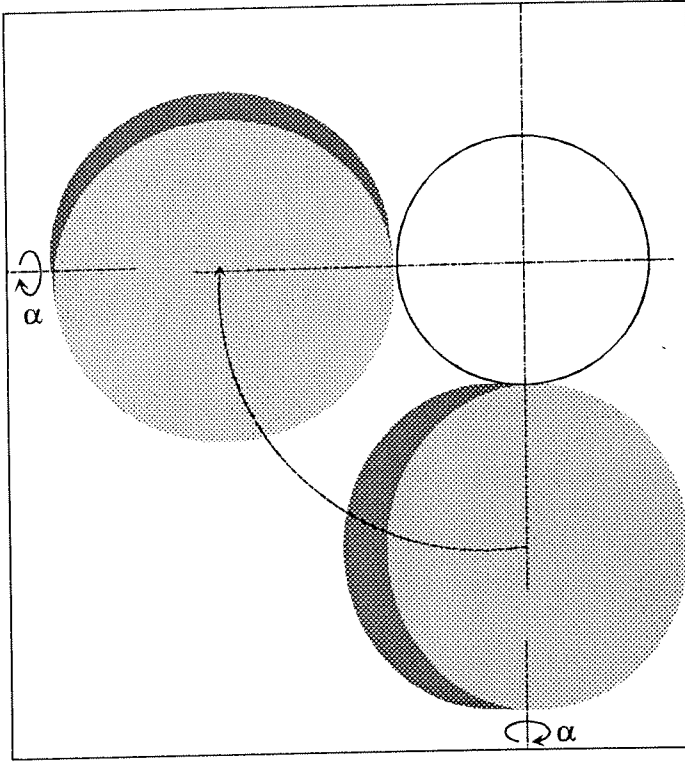
Örgünün oluşturulması sırasında, lastiğin tambur ile temas bölgesinde düğüm noktaları 5'er derece arayla yerleştirilmiş, temas bölgesinin bitimindeki geçiş bölgelerinde 7.5 derece ve lastiğin tambura temas etmeyen kısımlarında 15'er derecelik aralıklar kullanılmıştır. Model 4430 eleman ve 3800 düğüm noktasını içermektedir. Kaba olarak nitelendirilen bu örgü Şekil IV-4 te gösterilmiştir.

Fiziki durumu oldukça gerçekçi olarak temsil eden bu modelin MARC yazılımı kullanılarak yapılan analizinde gerçeğe uygun olmayan sonuçlar elde edilmiştir. İncelemeler sonunda bu durumun lastiğin dönmesi sırasında, uygulanan basıncın deformasyona uğrayan yüzeye dik olması ve basınç uygulanan yüzey şekil değiştirdikçe düğüm noktalarındaki eşdeğer kuvvetlerin yeniden hesaplanması gerekirken, MARC yazılımında bu işlemin yapılmadığı anlaşılmıştır. Bir önceki dönen lastik modelinin analizinde herhangi bir problem çıkmamasının nedeni, ABAQUS yazılımında bu işlemin hassas olarak gerçekleştirilmesidir. Söz konusu problemin,

MARC yazılımı kullanılarak çözümleri için lastiği sabit tutarak tamburun Şekil IV-5 te gösterildiği gibi lastik etrafında döndürülmesine karar verilmiştir. Görünüşte basit bir kinematik evirim (kinematik inversion) olan bu işlemin gerçekleştirilmesi ise MARC yazılımında mevcut bazı limitasyonlar nedeniyle oldukça zordur. MARC yazılımında, katı bir cismin hızı veya konumu önceden belirtilmek zorundadır ve cisim serbest bir hareket yapamaz. Bu nedenle tamburun şekil değiştiren elemanlarla oluşturulması gerekmektedir. MARC yazılımında analitik olarak tanımlanan katı cisimlerin her noktasında yüzey normali hassas olarak hesaplanabilmektedir. Böylece özellikle temas ve sürtünme kuvvetlerinin hesabı hassas olarak yapılabilmektedir. Halbuki, şekil değiştiren elemanlar için aynı özellik mevcut değildir. Sonuç olarak tamburun şekil değiştiren elemanlarla oluşturulması mecburiyeti, hesapların hassasiyetini olumsuz yönde etkilerken, gereksiz yere tambur elemanlarını da çözüme kattığı için hesaplama süresini de uzatmaktadır.



Şekil IV-4 Kaba Örgü



Şekil IV-5 Tamburu Sabit Lastik Etrafında Döndüren Kinematik Evrim

Tamburun dönme merkezini belirleyen iki düğüm noktasının yörüngesini belirleyebilmek için Şekil IV-6 da gösterilen konfigürasyon gözönüne alınmıştır.

Yuvarlanmanın başlama anında, düğüm noktalarının konumları

$$Y_{\text{ön}} = -\rho$$

$$Z_{\text{ön}} = d = \frac{w}{2} \sin(\alpha)$$

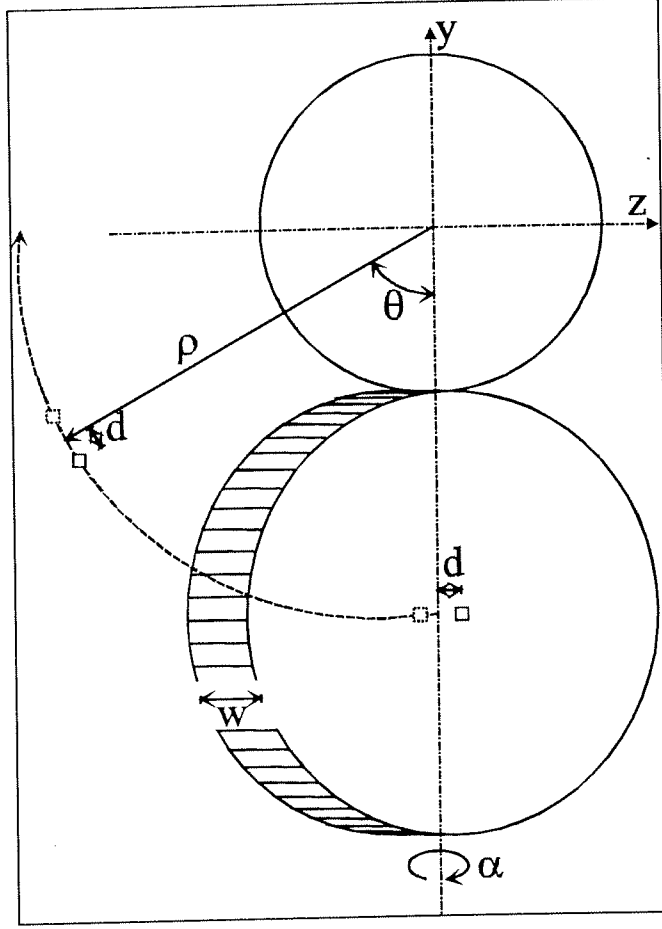
(IV-1)

$$Y_{\text{arka}} = -\rho$$

$$Z_{\text{arka}} = -d = -\frac{w}{2} \sin(\alpha)$$

ifadeleri ile hesaplanabilir. (IV-1) eşitliklerinde, "ön" x-koordinatı negatif (pozitif x-ekseni Şekil IV-5 te sayfanın içine doğru alınmıştır) ve "arka" x-koordinatı pozitif olan düğüm noktalarını belirtmektedir. Düşey yükün uygulanmasından sonra tambur

merkezi ile lastik merkezi arasındaki mesafe ρ , tambur genişliği w ve kayma açısı α ile gösterilmiştir.



Şekil IV-6 Tamburun dönme merkezini belirleyen iki düğüm noktasının yörüngesi

Herhangi bir t zamanında, düğüm noktalarının konumu

$$y_{\text{ön}} = -\rho \cos(\theta) - \frac{w}{2} \sin(\alpha) \sin(\theta)$$

$$z_{\text{ön}} = -\rho \sin(\theta) + \frac{w}{2} \sin(\alpha) \cos(\theta)$$

$$y_{\text{arka}} = -\rho \cos(\theta) + \frac{w}{2} \sin(\alpha) \sin(\theta)$$

$$z_{\text{arka}} = -\rho \sin(\theta) - \frac{w}{2} \sin(\alpha) \cos(\theta)$$

(IV-2)

ifadeleri ile belirlenmektedir. (IV-2) eşitliklerinde, ω lastiğin dönme hızı, t dönmenin başlamasından itibaren geçen zaman ve $\theta = \omega t$ olarak alınmıştır. Her yük adımında, tambur eksenini belirleyen iki düğüm noktasına uygulanacak sınır şartları, böylece

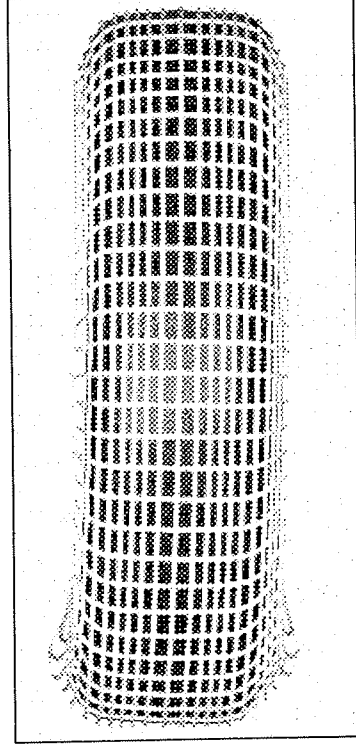
$$\begin{aligned}
 \Delta x_{\text{ön}} &= 0 \\
 \Delta y_{\text{ön}} &= \rho(1 - \cos(\theta)) - \frac{w}{2} \sin(\alpha) \sin(\theta) \\
 \Delta z_{\text{ön}} &= -\rho \sin(\theta) - \frac{w}{2} \sin(\alpha)(1 - \cos(\theta)) \\
 \Delta x_{\text{arka}} &= 0 \\
 \Delta y_{\text{arka}} &= \rho(1 - \cos(\theta)) + \frac{w}{2} \sin(\alpha) \sin(\theta) \\
 \Delta z_{\text{arka}} &= -\rho \sin(\theta) + \frac{w}{2} \sin(\alpha)(1 - \cos(\theta))
 \end{aligned} \tag{IV-3}$$

olarak belirlenir.

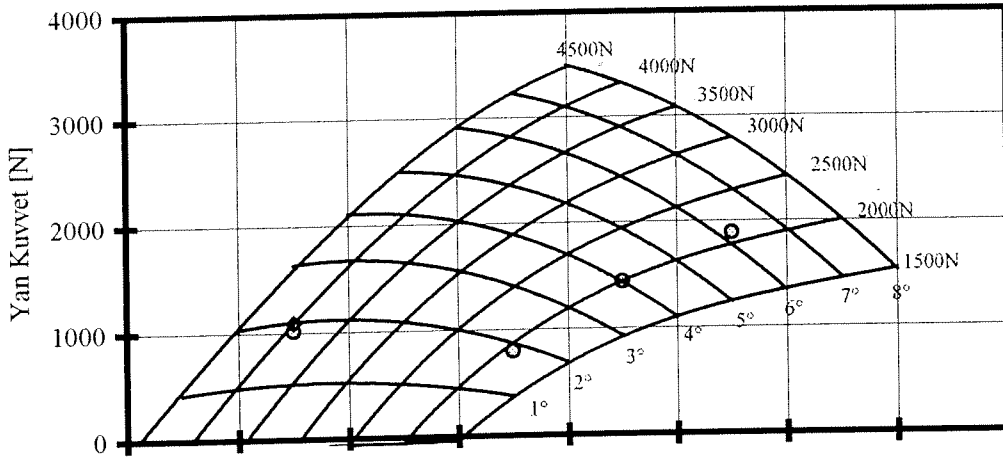
Açıklanan yaklaşım, lastiğin deney düzeneği üzerinde değişik düşey yükler ve kayma açıları için davranışının simülasyonu için gerekli koşulları sağlamaktadır. Modelin analizi sonucunda elde edilen, 2 kN düşey yük altında ve 2 derece kayma açısıyla dönen bir lastikte oluşan deformasyonlar Şekil IV-7 de gösterilmiştir. Lastik tabanında oluşan ve gözle izlenebilen deformasyon, deneyler sırasında izlenenlerle, Şekil II-5, uyumludur.

Modelin analizinden 2 kN düşey yük için 2, 4, 6 derece kayma açıları ve 4 kN düşey yük için 2 derece kayma açısı için elde edilen yan kuvvet değerleri, Şekil IV-8 de deneysel olarak elde edilen yan kuvvet karakteristikleri üzerinde gösterilmiştir. Bu noktalardan daire ile gösterilenlerin hesaplanmasında herhangi bir dinamik parametre veya etken kullanılmamış, ancak üçgen ile gösterilen noktanın hesaplanmasında

astiğın dönmesi nedeniyle oluşan merkezkaç kuvveti de tüm elemanlar üzerine uygulanmıştır.



Şekil IV-7 155 R 13 Lastiğın Modelin Analizinden Elde Edilen Deformasyonu (2kN Düşey Yük, 2° Kayma Açısı)



Şekil IV-8 Modelin Analizinden Elde Edilen Yan Kuvvetlerin Deneysel Karakteristikler Üzerindeki Konumu (10km/saat, 180 kPa)

IV-3 Sanki-Statik Lastik Modelinin Değerlendirilmesi

Geliştirilen lastik modelinin elde edilen sonuçlara göre gerçekçi olarak değerlendirilebilmesi için, deneysel olarak elde edilen yan kuvvet karakteristiklerinin, aynı şartlarda modelin analizinden elde edilerek birbirleri ile karşılaştırılması gereklidir. Ancak her bir noktanın elde edilme süresinin bir hafta mertebesinde olması nedeniyle karşılaşılan süre problemi nedeniyle, geliştirilen modelin değerlendirilmesinin hesaplanan 5 noktadan sonra (şimdilik) yapılmasını gerektirmiştir. Şekil IV-8 de gösterilen sonuçlardan, 2 kN düşey lastik yükünde üç ayrı kayma açısı için hesaplanan noktaların genelde deneysel sonuçlarla kabul edilebilir bir uyum içinde olduğu gözlenmektedir. Ancak, bu uyumun yüksek kayma açısında daha yüksek, düşük kayma açısında ise daha düşük hesaplanan yan kuvvet değerleri nedeniyle göreceli olarak bozulduğu da açıktır. Hesaplanan ve deneysel sonuçlar arasında oluşan bu farklılığın olası nedenleri arasında yer alabilecek hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı : Geliştirilen modellerde, tek bir sürtünme katsayısı içeren kuru (Coulomb) sürtünme modeli kullanılmıştır. MARC yazılımı içinde daha karmaşık sürtünme modellerini uygulamak mümkündür. Lastikle tambur yüzeyi ile arasındaki sürtünme katsayısı ise basit bir kayma deneyi ile elde edilmiştir. Kullanılan sürtünme katsayısı ve modelinin sonuçları etkilemesi beklenebilir.

- Lastiğin malzeme özellikleri : Bir otomobil lastiğinin çeşitli kısımlarında değişik kauçuk malzeme kullanılmaktadır. Her kauçuk malzemenin de içerdiği elemanların oranına göre elastik özellikleri farklıdır. Yapılan çalışmada, kullanılan

kauçuk malzeme özellikleri literatürden ve değişik üreticilerden elde edilen tipik değerlerdir. Bu nedenle kullanılan kauçuk malzeme özelliklerindeki belirsizliklerin ve denenen lastikte kullanılan malzemelerin gerçek özellikleri ile olan farklılıkların, hesaplanan yan kuvvet değerlerine de yansması kaçınılmazdır.

Diğer taraftan, kauçuğun elastik özellikleri sıcaklıkla belirgin olarak değişmektedir. Lastik deneylerinde, kauçuğun önce sürekli rejime girmesi sağlandıktan sonra veri toplanmaya başlanmaktadır. Sürekli rejimde lastiğin çeşitli bölgelerinde sıcaklık dağılımı ise bu çalışmada ölçülmemektedir. Bu nedenle sadece tek bir standart sıcaklığa ait olan tipik malzeme özelliklerinin kullanılması da hesaplanan sonuçların deneysel sonuçlardan farklı çıkmasının nedenlerinden biri olması beklenir.

- Lastiğin takviye modeli : Lastiğin karkas ve kuşak katlarındaki takviye elemanları olan tekstil ve çelik kordlar, eğilmeye ve basmaya çalışmayan elemanlar olarak modellenmiştir. Özellikle çelik kordların eğilme direngenliği önemli olabilecek düzeydedir (Padovan ve Ni, 1998). Ayrıca değişik katlar arasındaki etkileşim de ihmal edilmektedir.

Problem lineer olmadığı gözönünde tutularak, hesaplanan ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu daha da iyileştirmek için, yukarıda belirtilen hususların sonuçlara etkisinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. İlerde gerçekleştirilecek çalışmalarda daha ayrıntılı modellerin geliştirilmesinde, sonuçlara etkisi en fazla olan ayrıntıların kullanılması öngörülmektedir.

BÖLÜM V

SONUÇ

Proje çalışmalarının tamamlanmasından sonra elde edilen sonuçlar Lastik Deney Düzeneği, Statik Lastik Modelleri ve Dinamik Lastik Modelleri için ayrı ayrı verilmiş, projenin amaçlarına ulaşıp ulaşmadığı tartışılmış ve önerilen ileriye dönük çalışmalar sıralanmıştır.

V-1. Lastik Deney Düzeneği

Proje kapsamı içinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Otomotiv Laboratuvarında kurularak devreye alınan Lastik Deney Düzeneği otomobil lastikleri üzerinde lastik yan kuvvet karakteristikleri ve yuvarlanma direncinin ölçülmesi için tasarlanmıştır. Projenin tamamlanmasından sonra, aynı test düzeneği lastik yan kuvvet karakteristikleri konusunda ve proje kapsamında yer almayan yuvarlanma direnci ile ilgili çalışmalarda herhangi bir ek gerektirmeden kullanılabilir düzeydedir. Tambur çapı ve motor gücü olarak oldukça küçük olmakla beraber, Lastik Deney Düzeneği ulaşılabilen maksimum yol hızı, maksimum lastik yükü ve maksimum kayma açısı özellikleri ile dünya'da mevcut sayılı profesyonel deney düzenekleri arasında oldukça iyi bir konumda bulunmaktadır. Deney düzeneği temel amacı olan yan kuvvet ve yuvarlanma direnci karakteristiklerinin dışında, yuvarlanan bir lastiğin deformasyonunun görsel olarak incelenmesine de katkıda bulunmaktadır.

V-2. Statik Lastik Modelleri

Statik lastik modelleri, pnömatik otomobil lastiklerinin elastik davranışının anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Lastiğin karmaşık yapısının modellenmesinde önemli bir sınaama aşaması, statik olarak şişirilen ve yola bastırılan bir lastikte oluşan deformasyonların model lastikte elde edilebildiğinin gösterilmesidir. Statik modeller, malzeme özelliklerinin ve takviye elemanlarındaki mikrobuckling (microbuckling) oluşumunun kalibre edilmesi ve kullanılan örgü sıklığının sonuçlara etkisinin araştırılmasında kolaylık sağlamaktadır. Değişik karkas yapılarının ve değişik jantların etkileri de en ekonomik biçimde statik modeller kullanılarak yapılabilmektedir. Hazırlanan modellerden elde edilen sonuçların gerçeğe yakınlığı deneysel olarak incelenmiş ve kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

V-3. Dinamik Lastik Modelleri

Otomobil lastiklerinin yan kuvvet karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan sanki-statik dönen lastik modelleri, içerdikleri tüm basitleştirmelere karşın deneylerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Çözüm süresinin uzunluğu nedeniyle tüm karakteristikleri belirleyebilecek sayıda deney noktası yerine sadece belli sayıda nokta elde edilmesi ile yetinilmiştir. Ancak, zaman içinde modeller ve bilgisayar teknolojisinde kaydedilecek gelişmelerle projenin nihai amacına ulaşılacağı, yani pnömatik otomobil lastiklerinin yan kuvvet karakteristiklerinin tasarım aşamasında belirlenmesinin sağlanarak prototip ve deneme çalışmalarının en aza indirilebileceği gösterilmiştir.

V-4. Projenin Amaç ve Kapsamına Göre Değerlendirilmesi

Proje kapsamında alınması öngörülen temel makina-teçhizatın tümü alınmış, deney düzeneğini oluşturacak tüm parçalar üretilmiş, deney düzeneği montaj aşaması tamamlanarak devreye alınmış ve deneyler yapılmıştır. Statik ve dinamik lastik modelleriyle ilgili çalışmalar tamamlanmış ve açık literatüre göre ilk defa otomobil lastiklerinin kuramsal yan kuvvet karakteristikleri üzerinde noktalar sınırlı sayıda da olsa, sonlu elemanlar modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar konuyla ilgili bir yurtiçi ve en önemli bir yurtdışı konferansta sunularak duyurulmuş ve uluslararası hakemli bir yayında sunulabilecek duruma getirilmiştir. Proje amaçlarına büyük ölçüde ulaşmıştır.

V-5. İleriye Dönük Çalışmalar

Proje çalışmasının daha da ileri götürülebilmesi için yapılabilecek ek çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

V-4.1 Modelin Hassasiyetinin Arttırılması İçin Öneriler

Bir pnömatik otomobil lastiğinin modellenmesinde

- i) model için gerekli bilgiler,
- ii) kullanılan teori ve yazılan denklemler, ve
- iii) modelin anlamlı sonuçlar verecek kapsamda fakat analizi ve değerlendirmeyi mümkün kılacak basitlikte olması için yapılan varsayımlar ve basitleştirmeler

olmak üzere üç kritik husus gözönüne alınmalıdır.

Model için gerekli bilgiler, lastiğin temel geometrik ölçüleri, takviye özellikleri, en az üç ayrı çeşit kauçuğu ve takviyeleri içeren malzeme özellikleridir (modelin hassasiyetini arttırmak için 8 ayrı kauçuk kullanan kaynaklar da mevcuttur, Helnwein ve diğerleri, 1993). Bu özellikler konusunda literatürde sağlıklı bilgiye ulaşmak çok zordur. Bu nedenle, lastiklerin geometrik ölçülerini ve kullanılan kauçuk çeşitlerinin ölçülmüş özelliklerini veya denenmek üzere örneklerini sağlayabilecek bir lastik üretim firması ile işbirliği yapılmasında yarar görülmektedir. Modelin gerçekçiliğini sağlamakta özellikle gerekli bir veri de kauçuğun temas ettiği yüzeylerle arasındaki sürtünme özellikleridir. Ayrıca çalışma sıcaklığının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmesi gerekli bir husustur.

Kullanılan fomülasyonda, linear elastik ve Mooney-Rivlin malzeme modellerinin karşılaştırılmasında fayda görülmektedir. Diğer taraftan takviyelerin modellenmesinde kullanılan "rebar" elemanların içerdiği varsayımlar da gözden geçirilmeli ve gerektiğinde aşırı basitleştirici varsayımlar çıkarılmalıdır. Örnek olarak tekstil kordlardan oluşan takviye elemanlarında geçerli olan kord ile kauçuk arasında mükemmel bir bağ olduğu varsayımı gösterilebilir. Bu varsayım özellikle çelik kordların kullanıldığı ve kullanılmış lastikler için geçerli değildir. Benzer şekilde, rebar elemanların eğilme direngenliğinin olmadığı varsayımı tekstil kordlar için geçerli olurken, çelik kordların kullanıldığı durumda gerçeğe çelişmektedir (Padovan, 1998).

Sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında kullanılan örgünün özellikle lastik-yol temas yüzeyinde inceltirilerek eleman ve nod sayılarının artırılması, lastiğin dış desenleri gibi geometrik ayrıntılarının modellenmesinde önem

kazanmaktadır. Ancak inceltelen örgünün çözüm süresini uzattığı ve bellek gereksinimini arttırdığı unutulmamalıdır. Bu açıdan yuvarlanan pnömatik lastiklerin modellenmesinde “Arbitrary Eulerian-Lagrangian” formülasyonun uygulanmasının kolaylık getireceği umulmaktadır. Bu formülasyonda, lastik yuvarlandıkça, malzeme sabit bir örgünün içine ve daha sonra da dışına akmaktadır. Böylece temas yüzeyinde ince bir örgü kullanılmakta, lastiğin diğer kısımlarında ise kaba bir örgü yeterli olmaktadır. Lastik deformasyonunda ise “Lagrangian” formülasyonu kullanılarak, örgünün lastik malzemesi ile deformasyonu sağlanmakta ve malzeme akışı ile örgü içinde boşluk oluşması engellenmektedir. Mevcut belli başlı Sonlu Elemanlar paket programlarının bir sonraki sürümlerinde, pnömatik lastikler gibi aksenel simetrisi olan yapılar için özel bir “arbitrary Eulerian-Lagrangian” formülasyonunu da sunmaları beklenmektedir.

V-4.2 Hesaplama Veriminin Arttırılması İçin Öneriler

Otomobil lastiklerinde modellenmesinde dış deseni ihmal edilirse, oldukça basit aksenel simetriye sahip bir model elde edilir. Böyle bir modelin şişirme ve jant üzerine oturtma işlemlerinde kullanılması, analizde hassasiyeti önemli sayılacak düzeyde etkilememektedir. Bu nedenle yuvarlanan lastiğin analizinin tüm aşamalarında aksenel simetrisi olmayan 3-boyutlu bir modelin kullanılması yerine, şişirme ve janta oturtma işlemlerinden sonra elde edilen durumun aksenel simetrisinin bulunmadığı bir analiz için 3-boyutlu bir modele taşınması, gerekli çözüm süresini önemli ölçüde azaltabilecektir.

V-4.3 Deney Düzeneğinin Geliştirilmesi İçin Öneriler

Yüksek yol hızlarında, özellikle kayma açısının ve/veya lastik yükünün yüksek olduğu deneylerde, lastiğin ısındığı ve sonuçta dış deseninin tahrip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, normal yol koşullarında olduğu gibi oluşan hava akımının neden olduğu soğutmanın simülasyonu için deney düzeneğine bir fan eklenmesi uygun olacaktır.

Düzeneğin mevcut durumu ile sabit kayma açısında sürekli rejim viraj deneyleri yapılabilmektedir. Küçük değişikliklerle, kayma açısının deney sırasında değişmesini sağlamak mümkündür.

KAYNAKLAR

- Nordeen, D. L., Cortese, A. D., "Force and Moment Characteristics of Rolling Tires". SAE Transactions, 72, 325-336, (1964).
- Herrmann, L. R., "Elasticity Equations for Incompressible and Nearly Incompressible Materials by a Variational Theorem". AIAA, 3/10, 1896-2000, (1965).
- Dugoff, H., Brown, B. J., "Measurement of Tire Shear Forces". SAE Paper No: 700092, (1970).
- Dugoff, H., Fancher, P. S., Segel, L., "An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance". SEA Transactions 700377, (1970).
- Bergman, W., Clemet, H. R., Sheth, N.J., "Tire Traction Measurement on the Road and in the Laboratory". SAE Paper No: 710630, (1971).
- Bird, K. D., Martin, J. F., "The Calspan Tire Research Facility: Design, Development, and Initial Test Results". SAE Paper No: 730582, (1971).
- Pottinger, M. G., Marshall, K. D., Arnold, G. A., "Effects of Test Speed and Surface Curvature on Cornering Properties of Tires". SAE Paper no: 760029, (1976).
- Kennedy, R. H., Patel, H. P., McMinn, M. S., "Radial Truck Tire Inflation Analysis: Theory and Experiment". Rubber Chemistry and Technology, 54, 751-766, (1981).
- Huncler, C. J., Yang, T. Y., Soedel, W., "A Geometrically Nonlinear Shell Finite Element for Tire Vibration Analysis". Computers and Structures 17, 217-225, (1983).
- Padovan, J., Paramadilok, O., "Tire Modeling and Contact Problems-Transient and Steady State Viscoelastic Rolling Contact". Computers and Structures, 20, 545-553, (1985).
- Ridha, R. A., Satyamurthy, K., Hirscheft, L. R., "Finite Element Modeling of a Homogenous Pneumatic Tire Subjected to Footprint Loadings". Tire Science and Technology, 13, 91-110, (1985).
- Rothert, H., Idelberger, H., Jacobi, W., Laging, G., "On the Contact Problem of Tires Including Friction". Tire Science and Technology, 13, 111-123, (1985).
- Richards, T., Charek, L. T., Scavuzzo, R. W., "The Effects of Spindle and Patch Boundary Conditions on Tire Vibration Modes". SAE Paper No: 860243, (1986).

- Allen, R. W., Rosenthal, T. J., Szostak, H. T., "Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling". SAE Paper No: 870495, (1987).
- Kennedy, R., Padovan, J., "Finite Element Analysis of Steady and Transiently Moving/Rolling Nonlinear Viscoelastic Structure - II. Shell and Three-Dimensional Simulations". Computers and Structures, 27, 259-273, (1987).
- Nakajima, Y., Padovan, J., "Finite Element Analysis of Steady and Transiently Moving/Rolling Nonlinear Viscoelastic Structure - III. Impact/Contact Simulations". Computers and Structures, 27, 275-286, (1987).
- Maalej, A. Y., Guenther, D. A., Ellis, J. R., "Experimental Development of Tyre Force and Moment Models". International Journal of Vehicle Design, 10/1, 34-50, (1989).
- Stribersky, A., Fancher, P. S., "The Nonlinear Behavior of Heavy-Duty Truck Combinations with respect to Straightline Stability". Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 111, 577-582, (1989).
- Gim, G., Nikraves, P. E., "An Analytical Model of Pneumatic Tires for Vehicle Dynamic Simulations. Part 1: Pure Slips". International Journal of Vehicle Design, v. 11, n. 6, pp. 589-618, (1990).
- Loeb, J. S., Guether, D. A., Chen, H. H. F., Ellis, J. R., "Lateral Stiffness, Cornering Stiffness and Relaxation Length of Pneumatic Tire". SAE Paper No: 900129, (1990).
- Gim, G., Nikraves, P. E., "An Analytical Model of Pneumatic Tires for Vehicle Dynamic Simulations. Part 2: Comprehensive Slips". International Journal of Vehicle Design, 12/1, 19-39, (1991a).
- Gim, G., Nikraves, P. E., "An Analytical Model of Pneumatic Tires for Vehicle Dynamic Simulations. Part 3: Validation Against Experimental Data". International Journal of Vehicle Design, 12/2, 217-228, (1991b).
- Holloway, D. C., Drach, T. J., Mohanty, B., "An Experimental Investigation of Passenger Car Tire Properties at High Slip and Camber Angles". SAE Paper No: 910233, (1991).
- Stocker, M., "A Giant Stride in Tire Testing". Automotive Engineering 99/4, 29-31, (1991).
- Faria, L. O., Oden, T. J., Yavari, B., Tworzydlo, W. W., Bass, J.M., Becker, E.B., "On the Contact Problem of Tires Including Friction". Tire Science and Technology, 3, 111-123, (1992).

- Pottinger, M. G., "The Three-Dimensional Contact Patch Stress Field of Solid and Pneumatic Tires". *Tire Science and Technology*, 20, 3-32, (1992).
- Fancher, P. S. Jr., Bareket, Z., "Including Roadway and Tread Factors in a Semi-Emprical Model of Truck Tyres". *Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Proceedings of 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis Supplement to Vehicle System Dynamics*, Swets and Zeitlinger, Amsterdam, 21, 92-107, (1993).
- Helnwein, P., Liu, Ch. H., Meshke, G., Mang, H. A., "A New 3-D Finite Element Model for Cord-Reinforced Rubber Composites-Application to Analysis of Automobile Tires". *Finite Elements in Analysis and Design*, 4, 1-16, (1993).
- Pacejka, H. B., Bakker, E., "The Magic Formula Tyre Model". *Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Proceedings of 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis Supplement to Vehicle System Dynamics*, Swets and Zeitlinger, Amsterdam, 21, 1-18, (1993).
- Tönük, E., Ünlüsoy, Y. S., "Taşıt Dinamiğini Modellemede Kullanılabilecek Basit Analitik Lastik Modelleri, Bölüm I: Modeller, Bölüm II: Uygulama". 7^{nci} Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2, 606-623, (1995).
- Osswald, T. A., Menges, G., "Materials Science of Polymers for Engineers". Carl Hanser Verlag, Kösel, Kempten Germany, (1996).
- Zegelaar, P. W. A., Pacejka, H. B., "The In-Plane Dynamics of Tyres on Uneven Roads". *Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Proceedings of 6th International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis Supplement to Vehicle System Dynamics*, Swets and Zeitlinger, Amsterdam, 27, 22-36, (1996).
- Becker, A., Seifert, B., "Simulation of Wear with a FE Tyre Model Using a Steady State Rolling Formulation". *Contact Mechanics III*, Aliabadi, M. H., Samartin, A. (ed.), Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 118-127, (1997).
- Leister, G., "New Procedures for Tyre Characteristic Measurement". *Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Proceedings of 4th International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis Supplement to Vehicle System Dynamics*, Swets and Zeitlinger, Amsterdam, 25, 714-730, (1997).
- Du, X. W., Wei, Y. T., "Non Linear Finite Element Methodology for Structural Analysis, Rolling Loss and Temperature Field Prediction of Steady Rolling Tires". Presented in the 17th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, (1998).
- Padovan, J., Ni, J. F., "Modeling the Local Mechanics of Twisted Cord Rubber Composites". Presented in the 17th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, (1998).

Turner, J. L., Nakajima, Y., Branca, T. R., Kelsey, S., "A 3D Finite Element Modeling Approach for Simulation of Steady State Tire Rolling". Presented in the 17th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, (1998).

Tönük, E., "Computer Simulation of Dynamic Behavior of Pneumatic Tires", Doktora Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, (1998).

- 1994a. "ABAQUS/Pre User's Manual Volume II", Hibbitt, Karlsson & Sonensen, Inc., Pawtucket.
- 1994b. "ABAQUS/Standard User's Manual Volume I, Version 5.4", Hibbitt, Karlsson & Sonensen Inc., Pawtucket.
- 1995. "ABAQUS Theory Manual, Version 5.5", Hibbitt, Karlsson & Sonensen Inc., Pawtucket.
- 1998. "ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.8 Draft", Personal Communication with Michael Snyman of Hibitt, Karlsson & Sonensen Inc.
- 1994a. "MARC, Volume B, Element Library Rev. K6", MARC Analysis Research Corporation, California.
- 1997a. "MARC, Volume A, User Information Version K7", MARC Analysis Research Corporation, California.
- 1997b. "MARC, Volume B, Element Library Version K7", MARC Analysis Research Corporation, California.
- 1984a. "MARC, Volume F, Part 1, Background Information", MARC Analysis Research Corporation, California.
- 1984b. "MARC, Volume F, Part 2, Background Information", MARC Analysis Research Corporation, California.
- 1996. "MARC, Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers", MARC Analysis Research Corporation, California.

KİMLİK BİLGİ FORMU	
- Proje No: MİSAG-86	2- Rapor Tarihi: OCAK 1999
- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 15.7.1996, 15.1.1998	
4- Projenin Adı: Pnömatik Lastiklerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof. Dr. Y. Samim ÜNLÜSOY Arş. Gör. Ergin TÖNÜK (Doktora Öğrencisi) Arş. Gör. Hakan KORKMAZ (Y. Lisans Öğr.)	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Makina Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi 06531, Ankara	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:	
3- Öz (Abstract): Otomobil lastiklerinin yan (viraj) kuvvet karakteristiklerini tasarım aşamasında belirlemek için ayrıntılı bir sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Kauçuk malzemenin doğrusal olmayan malzeme davranışı, lastiğin içinde bulunan karkas malzemesi, normal çalışma sırasında görülen büyük yer değiştirme ve gerinmelerle yerle lastik arasındaki sürtünmeli temas modellenmiştir. Modelden alınan sonuçların sınanması için tamburlu bir lastik deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur. İlk olarak statik bir lastik modeli hazırlanmış, elde edilen düşey yük-sehim ve temas alanı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sanki-statik yuvarlanan lastik modeliyle düşük hızlarda lastiğin viraj davranışı modellenmiştir. Lastik üzerine merkezkaç yük uygulanmasıyla hızın artmasının etkisi de modele katılmıştır. Bilgisayar modelinden alınan sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, sonlu elemanlar yönteminin lastiklerin yan kuvvet karakteristiklerinin tasarım aşamasında kestirilebilmesi için kullanılabilirliğini, böylelikle prototip üretimi ve deneyler için harcanan zaman ve gayretin azaltılabileceğini göstermiştir.	
Anahtar Kelimeler: Lastik Yan Kuvvet Karakteristikleri, Otomobil Lastiği, Sonlu Elemanlar Analizi	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler Tönük, E. ve Ünlüsoy, Y. S., 1. "Radyal Kuşaklı Otomobil Lastiklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Statik Modellenmesi", II. Ulusal Mekanik Kongresi, Trabzon, Eylül 1996, 2. "Static Finite Element Modeling of Radial Automobile Tires", 17 th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, A.B.D., Nisan 1998.	
10- Bilim Dalı: Tasıt Tekniği (Otomotiv Mühendisliği) Doçentlik B. Dalı Kodu: 625.01.05 Uzmanlık Alanı Kodu: ISIC Kodu:	
11- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input checked="" type="checkbox"/> Sınırsız	
12- Raporun Gizlilik Durumu: <input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil	

*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz