

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JEOTEKSTİLLERDE KULLANILAN
POLİPROPİLEN LİFLERİN KULLANIM
ANINDAKİ ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ
METODLARDA İNCELENMESİ**

Ümit Halis ERDOĞAN

Eylül, 2008

İZMİR

**JEOTEKSTİLLERDE KULLANILAN
POLİPROPİLEN LİFLERİN KULLANIM
ANINDAKİ ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ
METODLARDA İNCELENMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Tekstil Mühendisliği Bölümü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Ümit Halis ERDOĞAN

Eylül, 2008

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÜMİT HALİS ERDOĞAN, tarafından PROF. DR. NİLÜFER ERDEM yönetiminde hazırlanan “JEOTEKSTİLLERDE KULLANILAN POLİPROPİLEN LİFLERİN KULLANIM ANINDAKİ ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ METOTLARDA İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Nilüfer ERDEM

Danışman

.....
Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Doç. Dr. A. Merih SARIŞIK

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Prof. Dr. Arif KURBAK

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Dilek Toprakkaya KUT

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tezimin konusunun belirlenmesi ve çalışmanın yürütülmesinde yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Nilüfer Erdem'e teşekkür ederim. Tez izleme toplantılarında ve sonrasında çalıőmamı fikirleri ile destekleyen tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Ramazan Karakuzu ve Doç. Dr. Merih Sarışık'a teşekkür borçluyum. Bu alıőma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Őube Müdürlüğü Tarafından 2005.KB.FEN.004 nolu proje ile desteklenmiőtir. Maddi desteği için üniversitemize teşekkür ederiz. Çalışma numunelerinin ve dinamik delinme cihazının temininde yardımcı olan Hassan Firması ile deneysel ve teorik çalışmaların yapıldığı Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği ve Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuar sorumlu ve görevlilerine teőekkürlerimi sunarım. Çalıőmam sırasında destekleri ile her zaman yanımda olan eőim R. Befru Turan'a, aileme ve çalışma arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Ümit Halis ERDOĞAN

Eylül 2008, İzmir

JEOTEKSTİLLERDE KULLANILAN POLİPROPİLEN LİFLERİN KULLANIM ANINDAKİ ÖZELLİKLERİNİN ÇEŞİTLİ METOTLARDA İNCELENMESİ

ÖZ

Jeotekstiller, sahip oldukları birçok avantaj ile inşaat sahaları ve tarım alanları gibi kompleks uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanan teknik tekstil malzemeleridir. Uygulama alanlarında maruz kaldıkları çeşitli yükler nedeni ile jeotekstillerin mekanik davranışları; tasarım, üretim ve projelendirme işlemlerinde bilinmesi gereken bir parametredir. Bu çalışmada, stapel polipropilen liflerinden iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarını hammadde ve ürün parametrelerini kullanarak önceden belirlemek için teorik bir model oluşturulmuştur. Bu amaçla öncelikle jeotekstil numunelerinde kullanılan polipropilen liflerinin ve dokusuz yüzey kumaşların özellikleri standart test metodlarıyla analiz edilmiştir. Daha sonra jeotekstil kumaşlar için tabakalı kompozit yapılarıdakine benzer teorik bir yaklaşım yapılmış ve geniş enli çekme testini dikkate alan uygun bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu teorik modelin çözümlenmesinde polipropilen liflerinin ve referans kumaşların gerilme-uzama oranı eğrileri ve mühendislik sabitlerini dikkate alan iki yaklaşım yapılmıştır. Her iki yaklaşımda da malzemelerin nonlineer davranışları da dikkate alınmıştır. Deneysel veriler ve teorik yaklaşımlar kullanılarak, sonlu elemanlar paket programı ANSYS ile kumaşlarda teorik gerilme analizleri yapılmıştır. Teorik ve deneysel bulguların karşılaştırılması sonucu, her iki teorik yaklaşımın da geniş enli çekme testinde kumaşlarda oluşan gerilme değerleri ve dağılımları açısından uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak her iki yaklaşımda da teorik olarak hesaplanan uzama değerleri ile deneysel olarak ölçülen uzama değerleri arasındaki fark yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte teorik uzama değerleri, referans kumaş yaklaşımında tek lif yaklaşımına göre daha yüksek ve gerçek kumaş değerlerine kısmen daha yakın hesaplanabilmiştir. Bu bilgiler ışığında; teorik modelin, jeotekstil üretiminde hammadde ve ürün tipi seçimini kolaylaştırarak üreticilere tasarım ile üretim aşamalarında zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Polipropilen Lifleri, Jeotekstiller, Dokusuz Yüzey Kumaşlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi

AN INVESTIGATION ABOUT IN USE PROPERTIES OF POLYPROPYLENE FIBERS USED IN GEOTEXILES BY DIFFERENT METHODS.

ABSTRACT

Geotextiles, which are the members of technical textiles, are gaining more and more importance in complex applications such as construction sites and agricultural areas by virtue of their many advantages. Geotextiles are exposed to various loads in their application areas so that the knowledge of their mechanical behaviours is a required parameter in the design and production processes and in projects. In this study, a theoretical model was constructed by using the raw material and product parameters to predict the mechanical properties of needle punched nonwoven geotextiles, which were produced from staple polypropylene fibers. For this purpose, at first the properties of polypropylene fibers and nonwoven fabrics were analyzed with standard test methods. Then a theoretical model was constructed using theory of layered composite materials and finite element method considering wide-width tensile test of geotextiles. In the analysis of model, two approaches were assumed in consideration with the stress-strain curves of polypropylene fibers and reference fabrics respectively. The nonlinear behaviour of material was taking into account in both of the approaches. Stress analysis of fabrics were performed in commercial finite element programme ANSYS by using experimental and theoretical data. The comparison of theoretical and experimental results indicated that, meaningful stress data can be obtained from the stress distribution of computed models for both of the approaches. However, it was found that the difference between computed and measured elongation was high. The computed elongation values of reference fabric approach were higher than the single-fiber approach values and close to the measured elongation values to some extent. Consequently it can be said that, the model can be used as a tool to ease the selection of raw material and product type, and thus it will provide advantage to the manufacturers in terms of cost and duration of design and production processes.

Kew Words: Polypropylene Fibers, Geotextiles, Non-wovens, Finite Element Method.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler.....	1
1.1.1 Teknik Tekstiller ve Kullanım Alanları.....	2
1.1.2 Jeotekstiller ve Üretim Parametreleri.....	7
1.1.2.1 Polimer Madde Çeşidi.....	10
1.1.2.2 Lif Tipi.....	11
1.1.2.3 Kumaş Tipi.....	11
1.1.3 Dokusuz Yüzey Kumaşlar ve Üretim Yöntemleri.....	12
1.1.3.1 Dokusuz Yüzey Kumaş Üretiminde Tülbent Oluşturma Yöntemleri.....	15
1.1.3.2 Dokusuz Yüzey Kumaş Üretiminde Tülbent Birleştirme Yöntemleri.....	18
1.1.3.3 Jeotekstillerin Eldesinde Kullanılan Dokusuz Yüzey Üretim Yöntemleri.....	21
1.1.4 Jeotekstillerin Kullanım Alanları ve Fonksiyonları.....	22
1.1.4.1 Jeotekstillerin Mekanik Fonksiyonları.....	23
1.1.4.2 Jeotekstillerin Hidrolik Fonksiyonları.....	25
1.1.5 Jeotekstillerin Genel Özellikleri ve Analiz Yöntemleri.....	28
1.1.5.1 Fiziksel Özellikler.....	29
1.1.5.2 Mekanik Özellikler.....	30
1.1.5.3 Hidrolik Özellikler.....	35
1.1.5.4 Kimyasal Özellikler.....	36

1.1.5.5 Uzun Süreli Dayanım Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	36
1.1.6 Polipropilen Lifleri.....	39
1.1.6.1 Polipropilen Liflerinin Tarihsel Gelişimi.....	39
1.1.6.2 Polimer Madde Eldesi ve Özellikleri.....	43
1.1.6.3 Lif Üretimine Hazırlık.....	48
1.1.6.4 Lif Üretimi.....	50
1.1.6.4.1 Eriyikten Çekim Yöntemi.....	51
1.1.6.4.2 Film Yarma Metodu.....	52
1.1.6.5 Lif Özellikleri.....	53
1.1.6.6 Başlıca Kullanım Alanları.....	57
1.1.6.7 Jeotekstiller ve Polipropilen Lifleri.....	59
1.1.7 Sonlu Elemanlar Metodu.....	60
1.1.7.1 Problemin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Metodunu Kullanmaya Karar Verme.....	63
1.1.7.2. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi.....	64
1.1.7.3 Model Geometrisinin Oluşturulması.....	64
1.1.7.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	64
1.1.7.5 Sınır Şartlarının ve Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Belirlenmesi.....	70
1.1.7.6 Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	71
1.1.7.7 Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanılmasının Avantajları.....	72
1.2 Önceki Çalışmalar.....	73
1.3 Araştırmanın Amacı.....	88
BÖLÜM İKİ - MATERYAL VE METOD.....	89
2.1 Materyal.....	89
2.2 Metod.....	91
2.2.1 Lif ve Kumaş Numunelerinin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	92
2.2.1.1 Liflerin Genel Özellikleri.....	92
2.2.1.2 Tek Lif Mukavemet Özellikleri.....	93
2.2.1.3 Kumaş Gramajlarının Belirlenmesi.....	94

2.2.1.4 Kumaş Kalınlıklarının Belirlenmesi.....	95
2.2.1.5 Kumaş Mukavemet ve Uzama Özelliklerinin Belirlenmesi.....	95
2.2.1.6 Kumaşlarda Lif Oryantasyon Açısı Ölçümleri.....	98
2.2.1.7 Referans Kumaşlarda Kayma Gerilmesinin Belirlenmesi.....	100
2.2.1.8 Kumaşların Darbe Dayanımlarının Belirlenmesi.....	101
2.2.2 Teorik Modellerin Oluşturulması ve Sonlu Elemanlar Analizi.....	102
BÖLÜM ÜÇ-ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	103
3.1 Deney Sonuçları.....	103
3.1.1 Liflerin Genel Özellikleri.....	103
3.1.2 Tek Lif Mukavemet Özellikleri.....	104
3.1.3 Kumaş Gramajları.....	107
3.1.4 Kumaş Kalınlıkları.....	107
3.1.5 Jeotekstil Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri.....	108
3.1.5.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri.....	109
3.1.5.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri.....	112
3.1.6 Referans Kumaşlarda Lif Yerleşimi Dağılımı.....	116
3.1.7 Jeotekstil Kumaşların Darbe Dayanımları.....	117
3.2 Teorik Modeller.....	118
3.2.1 Teorik Modellerin Oluşturulması.....	118
3.2.1.1 Teorik Modeller için Genel Kabuller.....	119
3.2.1.2 Model Parametreleri Arasındaki İlişkiler.....	120
3.2.1.3 Sonlu Elemanlar Ağı Model Yapısının Oluşturulması.....	125
3.2.1.4 Teorik Model-I: Tek Lif Yaklaşımı.....	128
3.2.1.5 Teorik Model-II: Referans Kumaş Yaklaşımı.....	136
3.3 Teorik Analiz Sonuçları ve Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması.....	143
3.3.1 Teorik Model-I: Tek Lif Yaklaşımı Sonuçları.....	143
3.3.1.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları.....	143

3.3.1.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları.....	155
3.3.2 Teorik Model-II: Referans Kumaş Yaklaşımı Sonuçları.....	166
3.3.2.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları.....	166
3.3.2.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları.....	179
3.4 Sonuçlar.....	191
KAYNAKLAR.....	195

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Son yıllarda bilim ve teknolojiadaki gelişmelere bağlı olarak tekstil yapıları için geleneksel uygulama ve kullanım alanlarının dışında farklı alternatifler ortaya çıkmaktadır. Çok çeşitli ve geniş olan bu yeni kullanım alanları inşaat, otomotiv, savunma, spor, tıp, elektronik, denizcilik ve benzeri sektörlerde birçok teknik uygulamayı içermektedir. Bu ve benzeri amaç ve fonksiyonlar için kullanılan tekstil yapıları maddeler “teknik tekstiller” olarak adlandırılmaktadırlar. Günümüzde mühendislik uygulamalarında teknik tekstillerin önemi ve kullanımını halen hızla artmakta ve yeni uygulama alanları araştırılmaktadır.

Bu malzemeler içerisinde jeosentetiklerin bir alt grubu olan “jeotekstiller” toprak ve/veya toprak esaslı yapılarla ilgili kullanılan tekstil yapılarını ifade etmektedir. Jeotekstiller sahip oldukları birçok avantaj ile inşaat sahaları ve tarım alanları gibi kompleks uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadırlar. Jeotekstillerin uygulama alanlarında kullanım amaçları takviye, ayırma, filtrasyon vb. gibi birçok fonksiyonu yerine getirmek olabilir. Bu nedenle, jeotekstillerin uygulama alanlarındaki özelliklerinin çeşitli test yöntemleri ve sayısal çözümlenmeler ile önceden belirlenmesi ve buna göre ürün seçiminin yapılması önemlidir. Ürün seçimi ve jeotekstil özelliklerini etkileyen en önemli faktörler ise üretim teknikleri ve kullanılan hammaddelerdir. Dolayısı ile hammadde özellikleri ve ürün parametrelerinden, nihai malzemenin kullanım anındaki özelliklerini önceden tahmin ederek doğru ürünü, doğru yerde kullanmak üretici ve tüketicilere maliyet ve zaman açısından önemli yararlar sağlayan bir işlemdir. Bu amaçla, araştırmacılar tarafından farklı yapılarıdaki jeotekstillerin fiziksel davranışları ele alınarak, nihai ürün özelliklerini belirleyecek çeşitli deneysel ve teorik yöntemler geliştirilmiştir. Jeotekstillerin günümüzde hızla yaygınlaşan kullanım alanları ve tüketim miktarlarına paralel olarak jeotekstil kumaşların özellikleri ve davranışlarını inceleyen yöntemler de çeşitlenerek artmaktadır.

Bu çalışmada, teknik tekstiller içerisinde yer alan jeotekstillerin mekanik davranışlarını, hammadde ve ürün özelliklerini kullanarak önceden belirleyebilmek için teorik bir model oluşturulmuştur. Çalışma numunesi olarak günümüzde Dünyada ve Türkiye’de jeotekstil uygulamalarında en çok kullanılan hammadde olan “polipropilen liflerinden” üretilmiş “dokusuz yüzey” jeotekstiller seçilmiştir. Teorik modelin çözümlenmesinde ise mühendislik uygulamalarında yaygın olarak yararlanılan “sonlu elemanlar yöntemi” kullanılmıştır.

1.1.1 Teknik Tekstiller ve Kullanım Alanları

Yüksek performans, hafiflik, üretim ve kullanım kolaylığı gibi kavramların ön plana çıktığı mühendislik uygulama alanlarında geleneksel ürünleri ile birlikte tekstil esaslı malzemelerin kullanım çeşitliliği de zamanla artmıştır. Bu amaçla kullanılan tekstil maddeleri başlangıçta endüstriyel tekstiller olarak adlandırılmışlardır. Fakat kullanım alanlarının zamanla daha fazla yaygınlaşması endüstriyel tekstiller terimine daha özel bir anlam kazandırmıştır. Geleneksel uygulama ve kullanım alanlarının dışındaki tekstil yapıları günümüzde “Teknik Tekstiller” olarak adlandırılmaktadırlar. Teknik tekstillerin tanımlanması ve sınıflandırılması birçok araştırmacı tarafından farklı şekillerde yapılmaktadır. Genel olarak teknik tekstiller; “Estetik veya dekoratif özelliklerinden ziyade fonksiyonel özellikleri ve teknik performansları için üretilen tekstil materyalleri ve ürünleri” şeklinde tanımlanabilirler (Denton ve Daniels, 2002). Teknik tekstiller terimi ile birlikte bu tip tekstil yapıları için kullanılan bazı diğer terimler ise fonksiyonel tekstiller, performans tekstilleri, yüksek-teknoloji tekstilleridir.

Tekstil malzemelerinin teknik amaçlar için kullanılmasına daha önceleri de birçok tekstil ürününün keşfine ve geliştirilmesine vesile olan savunma ve askeri sanayi Ar-Ge faaliyetleri öncülük etmiştir. Bu alanda kullanılan ilk ürünler paraşütler, yüksek fonksiyonlu üniformalar, çadırlar ve havacılık/uzay çalışmaları için geliştirilen kompozit malzeme bileşenleridir. Zaman içerisinde tekstil malzemelerinin teknik alanlardaki uygulamaları günlük yaşantımızın da bir parçası haline gelmeye başlamış ve inşaat, iletişim, otomotiv, spor, tarım, tıp, denizcilik vb.

sektörlerde tekstil malzemesi esaslı veya tekstil malzemesi içeren farklı ürünler geliştirilmiştir. Çok çeşitli üretim yöntemleri ile elde edilebilen teknik tekstil yapılarının başlıca kullanım alanlarına göre sınıflandırılması Tablo-1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1 Teknik tekstillerin kullanım alanları (Adanur, 1995; Horrocks ve Anand, 2000)

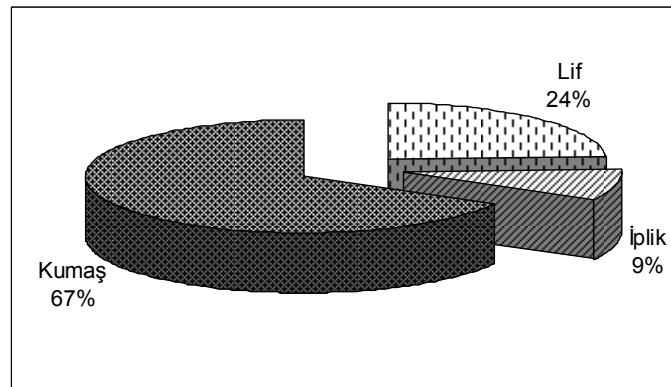
Kullanım Alanı	Örnek Uygulamalar ve Ürünler	
Jeotekstiller	✓ Asfalt takviyesi ✓ Çöp depolama alanları ✓ Erozyon önleme	✓ Tarım alanlarında ✓ Baraj İnşaatları ✓ Drenaj amaçlı vb
Tıbbi Tekstiller	✓ Ameliyat iplikleri ✓ Eldivenler, maskeler ✓ Anti-bakteriyel ürünler	✓ Yapay damarlar, organlar ✓ Bandajlar, Sargı Bezleri ✓ Cerrahi Örtüler vb.
Koruyucu Giysiler	✓ Balistik koruyucu ✓ Çevresel etkilerden (nem, sıcaklık vb) koruyucu ✓ Temiz oda giysileri	✓ İş giysileri: itfaiyeci, polis ✓ Nükleer, biyolojik ve kimyasal koruyucu.
Otomotiv Tekstilleri	✓ Emniyet kemerleri ✓ Hava yastıkları ✓ Lastik kord bezleri	✓ Kompozit malzeme bileşenleri (kaporta vb. yerlerde)
Akıllı Tekstiller	✓ Kimyasal ve fiziksel olarak reaksiyon verebilen giysiler	✓ Elektronik fonksiyonlara sahip giysiler vb.
Filtrasyon Tekstilleri	✓ Vakumlu temizleyici filtreleri ✓ Fabrika baca filtreleri	✓ Sigara filtreleri ✓ Atık su kanalları vb.
Askeri -Savunma Amaçlı Tekstiller	✓ Kamuflaj giysileri, ✓ Fosforlu (reflektif) giysiler ✓ Paraşütler	✓ Çadırlar ✓ Gizlenme ağları vb.
İnşaat ve Yapı Malzemeleri	✓ Çatı kaplamaları ✓ Taşıyıcı bandlar ✓ Hortumlar, borular ✓ Ambalajlar	✓ Liflerle güçlendirilmiş betonlar ✓ Kolon sağlamlaştırıcı kumaşlar vb.
Spor Malzemeleri	✓ Formalar, spor çantaları ✓ Kayak malzemeleri ✓ Tırmanış ipleri	✓ Yelkenler ✓ Yarış sürücüsü giysileri ✓ Tenis raketi, topu vb.
Denizcilik Malzemeleri	✓ Halatlar ✓ Can simitleri	✓ Balık ağları ✓ Olta ipleri vb
Tekstil Kompozitleri	✓ Plastik malzemelere takviye olarak ve metallerin yerine özellikle havacılık ve uzay ekipmanlarında kullanılan malzemeler ✓ Lif ve Kumaş takviyeli plastiklerin kullanıldığı diğer tüm uygulamalar	

Tekstil malzemelerinin teknik alanlarda kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak Dünya’da teknik tekstiller endüstrisi ve pazarı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde teknik tekstiller, hazır giyim ve ev tekstilleri ile birlikte dünya tekstil pazarının üç önemli bileşeninden biridir. Teknik tekstillerin tekstil sektörü içerisindeki payı %25-30'lara ulaşmıştır (Emek, 2004). Öte yandan teknik alanlarda kullanılan tekstil malzemeleri kullanım alanına göre lif, iplik ve kumaş gibi farklı ürün tiplerinde olabilmektedir. Tablo-1.2’de hammadde tipine göre teknik tekstillerin Dünya tüketimi ve tahminleri verilmiştir. Şekil-1.1’de ise 2010 yılı için ürün tiplerinin toplam kullanım içindeki yüzde dağılım tahminleri görülmektedir.

Tablo 1.2 Hammadde tipine göre dünyada teknik tekstillerin tüketimi (1000 ton) (David Rigby Associates [DRA], 2008)

Ürün Tipi	Yıllar				Artış Oranı (%)		
	1995	2000	2005	2010*	95-00	00-05	05-10*
Lif	3.289	4.004	4.774	5.763	4,0	3,6	3,8
İplik	1.382	1.570	1.776	2.079	2,6	2,5	3,2
Kumaş	9.300	11.140	13.133	15.932	3,7	3,3	3,9
TOPLAM	13.971	16.714	19.683	23.774	3,7	3,3	3,8

* Tahmin



Şekil 1.1 Ürün tipine göre dünyada teknik tekstillerin tüketim tahmini - 2010 yılı (DRA, 2008)

Tablo-1.2 ve Şekil-1.1’de görüldüğü üzere, teknik uygulamalarda kullanılan tekstil yapılarının büyük bir kısmı kumaşlardır. 2010 yılında teknik alanda kullanılan tekstil malzemelerinin %67’sinin kumaş, %24’ünün lif ve %9’unun iplik yapısında

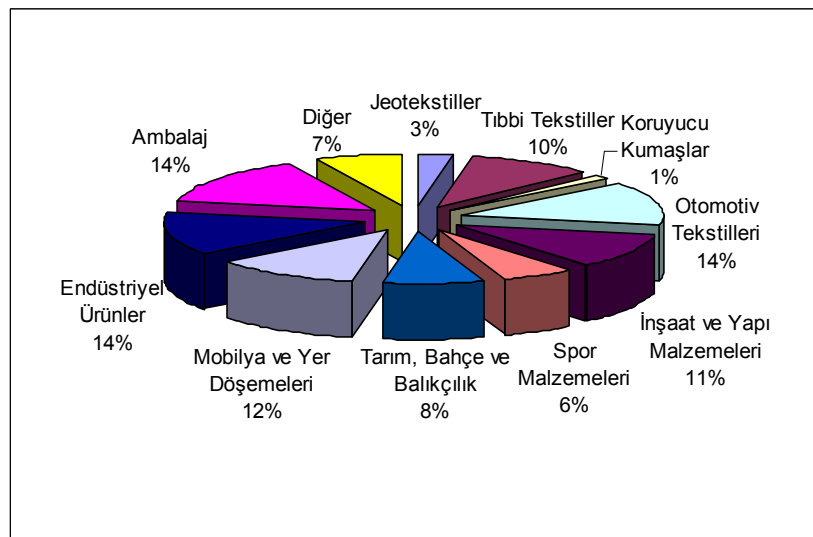
olacağı tahmin edilmektedir. Teknik alanda kullanılan kumaşların tamamına yakını ise dokusuz yüzey kumaşlardan oluşmaktadır.

Teknik tekstillerin kullanım alanlarına göre dünyadaki tüketim miktarları ve tahminleri ile ilgili bilgiler Tablo-1.3'de, bunların yüzde dağılımları ise Şekil-1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.3 Uygulama alanına göre teknik tekstillerin dünya tüketimi (1000 ton) (Chris, 2000; DRA, 2008)

Uygulama Alanı	Yıllar				Artış Oranı (%)		
	1995	2000	2005	2010*	95-00	00-05	05-10*
Jeotekstiller	251	400	570	700	5,4	4,6	5,3
Tıbbi Tekstiller	1.228	1.543	1.928	2.380	4,7	4,6	4,3
Koruyucu Kumaşlar	184	238	279	340	5,3	3,3	4,0
Otomotiv Tekstilleri	2.117	2.479	2.828	3.338	3,2	2,7	3,4
İnşaat ve Yapı Malzemeleri	1.261	1.648	2.033	2.591	5,5	4,3	5,0
Spor Malzemeleri	841	989	1.153	1.382	3,3	3,1	3,7
Tarım, Bahçecilik ve Balıkçılık	1.173	1.381	1.615	1.958	3,3	3,2	3,9
Mobilya ve Yer Döşemeleri	1.864	2.186	2.499	2.853	3,2	2,7	2,7
Endüstriyel Ürünler (Filtreler, bandlar vb.)	1.846	2.205	2.624	3.257	3,6	3,5	4,4
Ambalaj	2.189	2.552	2.990	3.606	3,1	3,2	3,8
Diğer	1.072	1.238	1.413	1.656	2,9	2,7	3,2
TOPLAM	14.026	16.859	19.932	24.061	3,7	3,3	3,8

* Tahmin



Şekil 1.2 uygulama alanına göre dünyada teknik tekstil tüketim tahminleri 2010 yılı (DRA, 2008)

Tablo-1.3 ve Şekil-1.2’de görüldüğü gibi teknik tekstillerin dünyada en fazla kullanıldığı uygulama alanı otomotiv tekstilleri, ambalaj malzemeleri, endüstriyel ürünler ve tıbbi tekstiller olarak sıralanabilir. Teknik tekstillerin önemli bir uygulama alanı olan jeotekstiller ise dünya teknik tekstil tüketimi içerisinde %3-4’lük bir paya sahiptir. Türkiye’de ise teknik tekstil alanındaki üretim ve tüketimler otomotiv tekstilleri, hijyenik pedler, dayanıklı büyük çuvallar (big-bag’ler), kord bezleri ve temizlik ürünlerinde yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte özellikle tıbbi tekstiller ve jeotekstiller alanında üretim ve tüketim giderek artmaktadır. Ülkemizde teknik tekstil yatırımlarının yeni olması, bu alanda çalışan kuruluşların üretim ve yatırım bilgilerini gizli tutması ve henüz yeterli bilgi envanterinin oluşturulamamış olması gibi nedenlerle firmaların üretim kapasitelerine ve ürün yelpazelerine ait sağlıklı veriler bulunmamaktadır. İthalat ve ihracat açısından ise armonize sistem sınıflandırmasına göre Dış Ticaret Müsteşarlığı tarafından açıklanan veriler mevcuttur. Bu verilere göre Türkiye teknik tekstil ihracatında yaklaşık 1 milyar dolarlık hacme sahiptir. İhraç ürünleri içerisinde en fazla paya sahip olan ürünler sırası ile büyük taşıma çuvalları (big-bag’ler) (%24,3) ve kord bezleridir (% 16,6). Türkiye’nin teknik tekstil ithalatı ise yine yaklaşık 1 milyar dolar civarındadır. İthal ürünler içindeki en fazla pay ise %20 ile dokusuz yüzey kumaşlar ve %15 ile kaplama kumaşlara aittir (Emek, 2004).

Teknik tekstilleri normal tekstil malzemelerinden farklı kılan özellikler; kullanım anındaki fonksiyonları ile birlikte bu fonksiyonları sağlayan hammadde (polimer madde, lif tipi vb) ve üretim teknikleridir. Teknik tekstil uygulamalarında gerekli kullanım fonksiyonlarının sağlanması, mevcut tekstil malzemelerinin modifikasyonu veya yeni geliştirilen tekstil malzemeleri ile gerçekleştirilmektedir. Teknik tekstiller alanında kullanılan kimyasal liflerin üretiminde, bilinen polimer maddelerle birlikte likit kristal polimerler, katı-rijid polimerler vb. hammaddeler kullanılmaktadır. Bu polimer maddelerden lif çekimi ise, geleneksel yöntemlerden ziyade jelden lif çekimi, likit kristal lif çekimi, elektrik alanı lif çekimi yöntemleri ile yapılmakta ve nihai ürün olarak yüksek performanslı lifler, yüksek konforlu lifler, mikro ve nano lifler elde edilmektedir. Ayrıca mevcut lif çekim sistemlerinde ya polimer madde içerisine ya da lif bitim işlemleri sırasında lifin üzerine çeşitli kimyasal maddeler

eklenerek biyo-aktif lifler, elektrik ileten lifler gibi farklı fonksiyonlara sahip lifler elde edilebilmektedir. Teknik tekstillerde kullanılan iplik yapıları ise klasik iplik yapılarından farklı olarak halatlar, ameliyat iplikleri gibi özel uygulamalarda kullanılan ipliklerdir. Teknik tekstil kumaş yapıları, kullanım alanlarına göre farklı özellikler içermesi gereken özel yapılar da olabilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde klasik örme ve dokuma kumaş yapılarının yanı sıra dokusuz yüzey kumaşlar, çok eksenli dokumalar, 3 boyutlu örgüler, çözgülü örme kumaş yapıları teknik alanlarda sıklıkla kullanılan kumaş yapılarıdır. Teknik tekstil üretiminde terbiye işlemleri, klasik terbiye işlemleri ve fonksiyonellik kazandıran özel terbiye işlemleri olarak ikiye ayrılabilir. Ürünün kullanım yeri ve şartları yukarıda bahsedilen tüm işlemleri etkilediği gibi terbiye sürecini de etkiler. Teknik tekstillerde kullanılan özel terbiye işlemlerinin bazıları şu şekilde özetlenebilir; kontrollü salınım sistemleri, anti-mikrobiyal bitim işlemleri, sol-gel kaplama işlemleri, diğer kaplama ve laminasyonlar, faz değiştiren materyal aplikasyonu, nano-teknoloji uygulamaları, plazma uygulamaları.

Teknik tekstillerin önemli bir uygulama alanı olan jeotekstiller sahip oldukları birçok avantaj ile inşaat sahaları ve dolgu alanları gibi kompleks projelerde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Öte yandan jeotekstillerin üretiminde kullanılan parametrelerin çeşitliliği nedeni ile farklı özelliklere sahip nihai ürünler elde edilebilmektedir. Jeotekstillerin üretiminde kullanılan hammaddeler, imalat yöntemleri ve jeotekstillerin özelliklerinin saptanmasında kullanılan metodlar ile ilgili genel bilgiler aşağıdaki kısımlarda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

1.1.2 Jeotekstiller ve Üretim Parametreleri

“Jeotekstil” terimi yeryüzü-toprak anlamına gelen jeo- kelimesi ile tekstil kelimelerinin birleşiminden meydana gelmiş bir sözcüktür. Jeotekstiller genel olarak polimer maddelerden oluşmuş geçirgen tekstil yapıları olarak tanımlanırlar ve çeşitli mühendislik uygulamalarında özellikle inşaat alanlarında toprak, kaya ve/veya su ile etkileşimli olarak kullanılırlar (Adanur, 1995; Ingold ve Miller, 1988; Koerner, 2005; Van Zanten, 1988).

Jeotekstiller uygulama alanları itibari ile aşağıdaki ürünleri de içeren ve “jeosentetikler” olarak adlandırılan malzeme grubu içerisinde yer alırlar (Geosynthetic Materials Association [GMA], 2002). Jeosentetikler toprak vb. zemin malzemeleri ile etkileşimli olarak kullanılan farklı formlardaki sentetik esaslı malzemeleri ifade eden genel bir terimdir. Şekil-1.3’de farklı üretim teknikleri ile elde edilen jeosentetiklerin sınıflandırılması verilmiştir.

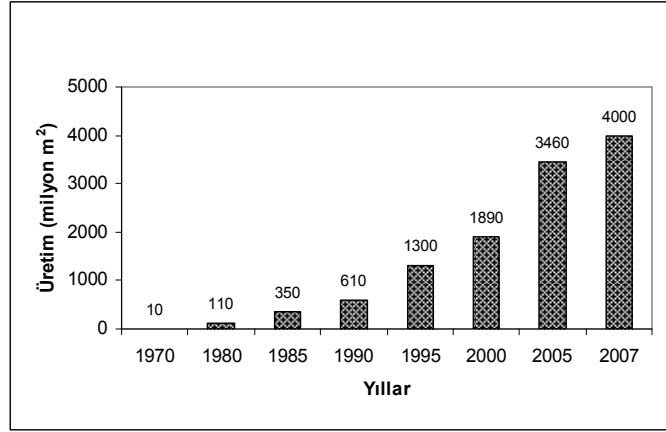
<u>Jeosentetikler</u>	
- Jeotekstiller	- Jeosentetik köpükler
- Jeomembranlar	- Jeokompozitler
- Jeonetler	- Jeogridler (ızgaralar)
- Jeoborular	- Jeosentetik kil kaplamaları

Şekil 1.3 Jeosentetiklerin sınıflandırılması (Koerner, 2005)

Jeotekstiller, jeosentetikler grubu içerisinde en fazla kullanılan malzemelerdir ve yapıları itibariyle gerçek tekstil materyalleridir. Bazı uygulamalarda jeotekstil terimi yerine tarımsal veya zirai kumaşlar terimleri de kullanılmaktadır.

Tekstil malzemelerin toprak ve toprağın yapısıyla ilgili uygulamalarda çok eskilerden beri kullanıldığı bilinmektedir. Babilliler ve Çinliler 1000 yıldan daha önce bina inşaatlarında zemini güçlendirmek için bambuları kullanmışlardır. Benzer şekilde Romalılar da yolların yapımında toprağı desteklemek için kamış (sazlık) dan yapılmış dokular kullanmışlardır. Kumaşların jeotekstiller olarak gerçek anlamda ilk kullanımları 1930’lu yıllarda Amerika’da olmuştur, yollar pamuk kumaşlarla desteklenmeye çalışılmıştır ama bu uygulama devam etmemiştir. Ticari anlamda kullanılan ilk jeotekstiller ise filtrasyon kumaşları olarak bilinen ve 1950’lerde erozyon kontrolünde ABD’de kullanılan dokunmuş endüstriyel kumaşlardır. Daha sonra 1960’larda Avrupa’da ilk dokusuz yüzey jeotekstil iğne ile keçeleştirme yöntemi ile üretilmiştir. Dokusuz yüzey jeotekstillerin ilk kullanım alanları genellikle baraj inşaat projeleri olmuştur. Dokusuz yüzey üretim tekniklerinin gelişmesi ve kullanımının artmasına paralel olarak 1970 sonrası jeotekstillerin kullanım ve uygulama alanları da hızla artmıştır (GMA, 2002; Leclerc, 1993). Dünya Jeotekstil

üretim miktarı 1970'li yıllarda 10 milyon m² iken, 1985 yılında 350 milyon m² ve 2007 yılında ise yaklaşık 4 milyar m² olarak gerçekleşmiştir. Şekil-1.4'de yıllar itibari dünya jeotekstil üretimi verilmiştir.



Şekil 1.4 Dünya jeotekstil üretimi (Hörschelmann, 2007)

Şekil-1.4'de görüldüğü gibi dünya jeotekstil üretimi yıllar itibari ile hızla artmaktadır. Son yıllarda jeotekstillerin üretiminde meydana gelen büyük artışın sebepleri birçok değişik faktörden kaynaklanmaktadır: Bu faktörler teknik gelişmeler ve ekonomiklik başlıkları altında özetlenebilir. Kimyasal liflerin fiziksel-kimyasal özelliklerinde ve üretim tekniklerinde meydana gelen gelişmeler teknolojik sebep, jeotekstillerin inşaat alanına getirilen tanecikli dolgu materyali miktarını azaltması dolayısıyla maliyetleri düşürmesi ise ekonomik sebeptir. Jeotekstillerin toprak, kaya ve/veya su ile etkileşimli olarak çeşitli uygulamalarda kullanılmasının klasik yöntemlere göre avantajları şu şekilde sıralanabilir (GMA, 2002);

- Malzeme kontrolü
- Konstrüksiyon kalite kontrolü
- Teknolojik üstünlük
- Yerden tasarruf
- Maliyet verimliliği
- Çevresel duyarlılık

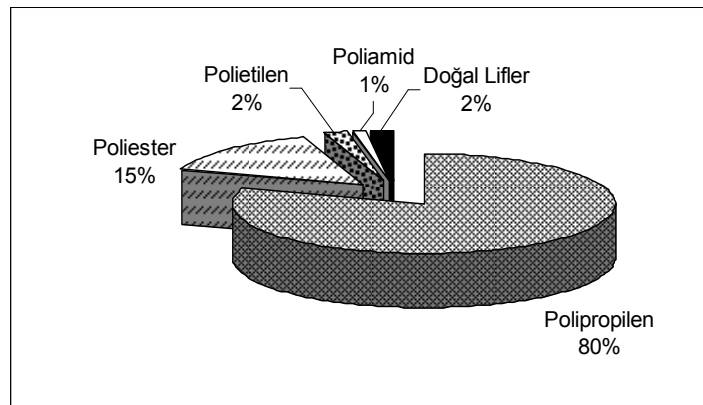
Jeotekstillerin Türkiye'deki ilk önemli kullanımı Atatürk Barajı inşaatı ile başlamıştır. Otoyol inşaatlarındaki drenaj ve ayırma amaçlı uygulamaları jeotekstil kullanımı zamanla arttırmıştır. Günümüzde havaalanı inşaatları ve çöp depolama alanlarında jeotekstil kullanımı zorunludur. Jeotekstil uygulamaları, Türkiye için yeni bir konu gibi görünmesine karşın hızla yaygınlaşmaktadır. Türkiye'nin

jeotekstil üretimi yıllık 6 milyon m² civarındadır. Bunun 5 milyon m²'sinden fazlası dokusuz yüzey jeotekstiller iken 1 milyon m²'sine yakını ise dokuma jeotekstillerdir. Türkiye'de jeotekstil üretimi yapan firmalar bulunmasına karşın kullanılan ürünlerin birçoğu da ithal edilmektedir (Sadıkoğlu, 2003).

Jeotekstil kumaşların üretim sırasında ve kullanımda davranışını belirleyen başlıca parametreler lif ve/veya iplikleri oluşturan polimer madde çeşidi, kumaşı oluşturan lif ve/veya ipliklerin tipi ve kumaş çeşididir. Jeotekstil kumaşların üretimi ile ilgili bu parametreler aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

1.1.2.1 Polimer Madde Çeşidi

Jeotekstillerin üretiminde çoğunlukla (%98) kimyasal lifler kullanılmaktadır. Nadiren de olsa bazı uygulamalarda jüt veya hindistan cevizi gibi doğal lifler de kullanılmaktadır. Şekil-1.5'de Dünyada jeotekstil üretiminde kullanılan liflerin yüzde dağılımları verilmiştir.



Şekil 1.5 Jeotekstil üretiminde kullanılan hammadde çeşitleri
(Koerner, 2005)

Şekil-1.5'de görüldüğü gibi jeotekstil uygulamalarında en fazla kullanılan kimyasal lifler sırası ile polipropilen (%75-80) ve poliesterdir (%10-15). Bunun dışında çeşitli özel uygulama alanlarında poliamid, polietilen ve diğer bazı kimyasal liflerde kullanılmaktadırlar. Polipropilen ve poliester lifleri diğer doğal ve kimyasal liflere kıyasla yüksek kimyasal dayanım, yüksek mukavemet ve düşük maliyet

özelliklerini bir arada sağladıklarından jeotekstil uygulamalarında en fazla tercih edilen liflerdir. Jeotekstiler, kullanım yerleri itibari ile toprak ve su ile etkileşimde olduğu için toprağın ve suyun kimyasal yapısına göre çeşitli kimyasalların etkisine maruz kalabilirler. Bu nedenle jeotekstil uygulamalarında kimyasal dayanımı yüksek liflerin seçilmesi gerekli ve önemlidir. Hammadde mukavemeti ürün özelliklerine etki edeceğinden, liflerin ürünün yerine getireceği fonksiyona göre seçilmesi de gerekmektedir. Öte yandan tüm uygulamalarda bu koşulların uygun maliyetler ile sağlanması esas önceliktir.

1.1.2.2 Lif Tipi

Jeotekstillerin üretiminde kullanılan lif tipleri üretilen kumaş çeşidi ve kullanım yerine göre farklı olabilir, üretilecek kumaşlarda kullanılan lifler monofilament, multifilament, stapel, film, bi-komponent vb formlarda olabilirler (Adanur, 1995; Ingold ve Miller, 1988). Kumaş yapısına göre lif tipi seçimi üretilecek kumaşın fiziksel özelliklerini belirlemede önemli bir etkidir. Dolayısı ile jeotekstilin kullanım yerine göre uygun lif tipi ve kumaş yapısının belirlenmesi önemlidir. Örneğin dokuma kumaşlar genellikle monofilament veya filmlerden üretilirken dokusuz yüzey kumaşlar filament veya stapel haldeki liflerden üretilmektedirler. Termal birleştirme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzeylerde ise bikomponent lifler de kullanılmaktadır.

1.1.2.3 Kumaş Tipi

Jeotekstil kumaşlar dokuma, örme ve dokusuz yüzey gibi klasik kumaş üretim teknikleri ile üretilirler. Uygulamalarda kullanılacak jeotekstil yapısı kullanım yerine göre bu kumaş yapılarının birleşiminden de oluşabilir. Günümüzde üretilen jeotekstillerin yaklaşık %70-80'ni dokusuz yüzeyler, %10-15'i dokuma kumaşlar ve %5-10'u örme kumaşlardan oluşmaktadır (Koerner, 2005; Lieberenz, 2003). Tablo-1.4'de yıllar itibari ile dünya jeotekstil tüketimi ve dokusuz yüzey kumaşların bu tüketim içindeki payları verilmiştir.

Tablo 1.4 Dünya jeotekstil tüketimi ve dokusuz yüzeylerin payı (DRA, 2008; Lieberenz, 2003)

	1990	1995	2000	2005	2007
Jeotekstil Tüketimi (ton)	178.000	251.000	400.000	574.000	600.000
Dokusuz Yüzeylerin Payı (%)	63	65	72	75	80

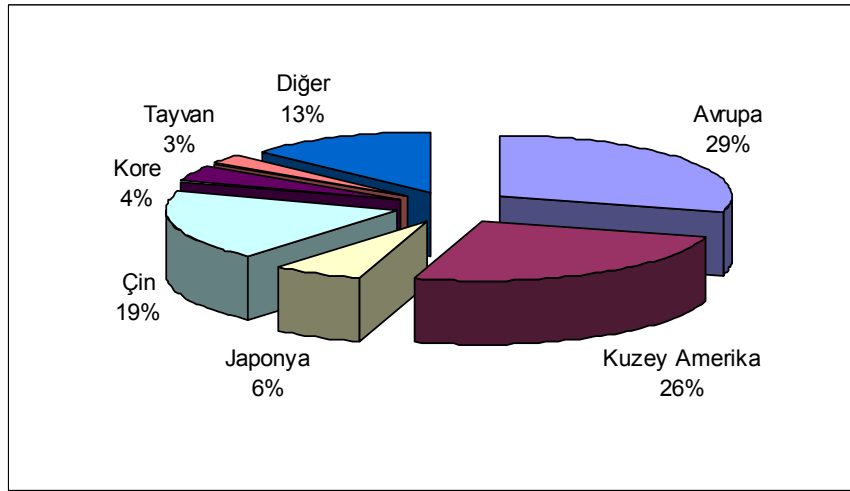
Tablo-1.4’de görüldüğü gibi dünya jeotekstil tüketiminin çok büyük bir kısmını dokusuz yüzey kumaşlar oluşturmaktadır ve tüketimleri son 10 yıl içerisinde yaklaşık %10–15 oranında artmıştır. Dokusuz yüzey kumaşlar ile ilgili genel bilgiler ve jeotekstillerde yaygın olarak kullanılan dokusuz yüzey kumaş tiplerinin özellikleri ileriki kısımlarda açıklanmıştır. Jeotekstil uygulamalarında dokusuz yüzey kumaşlardan sonra en fazla tercih edilen kumaş tipi dokuma kumaşlardır. Jeotekstillerde kullanılan dokuma kumaşlar genellikle düz, basket veya dimi yapıdaki dokuma kumaşlardır. En fazla kullanılan düz dokumadır ve geniş en tezgahlarda dokunur. Dokuma kumaşları oluşturan lifler çoğunlukla monofilament, multifilament veya film şeklindedir. Dokuma kumaşların mukavemetleri dokusuz yüzeylere göre fazladır ancak esneklikleri daha azdır. Bu da kumaşlara daha yüksek modül ve eğilme rijitliği sağlar. Kullanım alanında bu gibi özelliklerin gerektiği uygulamalarda dokuma kumaşlar tercih nedenidir. Örme kumaşların jeotekstil olarak kullanımları azdır. Jeotekstil uygulamalarında genellikle atkı ve çözümlü takviyeli çözümlü örme kumaşlar tercih edilmektedir.

1.1.3 Dokusuz Yüzey Kumaşlar ve Üretim Yöntemleri

Dokusuz Yüzey kumaşlar “Düzenli veya düzensiz bir lif oryantasyonu ile oluşturulan lif tülbentlerinin sürtünme, kohezyon ve/veya adezyon yolu ile sabitleştirilmesi suretiyle elde edilen tekstil yüzeyleri” şeklinde tanımlanmaktadır (Massenaux, 2003). Dokusuz yüzey kumaşlar, jeotekstillerin yanı sıra teknik tekstillerin diğer alanlarında ve klasik tekstil malzemeleri formunda çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Dolayısı ile günümüzde dokusuz yüzey kumaşların çeşitli uygulamalardaki kullanım miktarları artmaya devam etmektedir. Tablo-1.5’de yıllar itibari ile Dünya dokusuz yüzey üretimi Şekil-1.6’da ise bölgeler bazında üretim oranları verilmiştir.

Tablo 1.5 Dünya dokusuz yüzey üretimi (ton) (European Disposable and Nonwovens Association [EDANA], 2008)

	2003	2004	2005	2006
Avrupa	1.288.400	1.335.900	1.403.000	1.494.000
Kuzey Amerika	1.108.000	1.193.000	1.247.000	1.310.000
Japonya	296.800	296.900	313.900	329.000
Çin	615.000	755.000	838.000	966.000
Kore	199.300	203.900	205.960	210.000
Tayvan	135.700	139.100	140.550	144.000
Diğer	519.400	568.300	601.600	670.000
Toplam	4.102.600	4.492.100	4.750.010	5.124.688

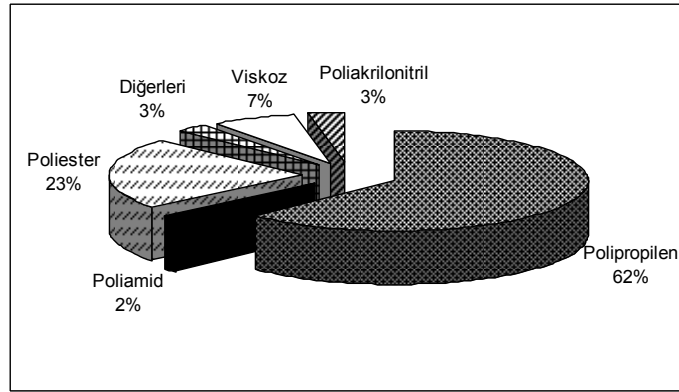


Şekil 1.6 Bölgeler bazında dünya dokusuz yüzey kumaş üretimi, 2006 yılı

Tablo-1.5 ve Şekil-1.6’da görüldüğü gibi dünyanın en büyük dokusuz yüzey üreticileri Kuzey Amerika, Avrupa ve Çin’dir. 2006 yılı bazında dünya dokusuz yüzey üretimi 5.124.688 ton olarak gerçekleşmiştir. Teknik tekstillerde dokusuz yüzey malzemelerin geniş bir kullanım alanına sahip olması, dokusuz yüzey üretimi için yapılan yeni yatırımları ülkemizde de artırmıştır. Türkiye’de yaklaşık 41 adet orta ve büyük ölçekli dokusuz yüzey üreticisi bulunmaktadır. Türkiye’nin toplam dokusuz yüzey üretimi dünya üretiminin %3-4’ü kadardır. Bu da yaklaşık 150-200 bin ton civarındadır. Dış Ticaret Müsteşarlığı verilerine göre 2004 yılı dokusuz

yüzeysel tekstiller ithalatının 41 bin ton, ihracatının ise 18 bin ton olduğu görülmektedir. Türkiye'nin dokusuz yüzeysel tekstiller ihracatının ülkelere göre dağılımında % 31,5'lik pay ile ABD ilk sırada yer almaktadır. ABD'yi % 11,7 ile İngiltere, % 6.7 ile Almanya, % 5 ile Bulgaristan ve 3.9 ile Polonya izlemektedir (Emek, 2004).

Dokusuz yüzeysel üretiminde 2006 yılında yaklaşık 3,5 milyon ton lif kullanılmıştır. Bu liflerin tamamına yakınına jeotekstillerdekine benzer şekilde kimyasal lifler oluşturmaktadır. Şekil-1.7'de dokusuz yüzeysel üretiminde dünyada kullanılan liflerin yüzde dağılımları verilmiştir.



Şekil 1.7 Dokusuz yüzeysel üretiminde kullanılan lifler, 2006 yılı (Koslowski, 2007)

Şekil-1.7'de görüldüğü gibi Dünya'da dokusuz yüzeysel üretiminde kullanılan liflerin % 62,7'si Polipropilen, % 23'ü poliester, % 1,5'ü poliamid, % 2'si poliakrilonitril, % 7'si viskoz ve % 2,8'i ise diğerleridir. Türkiye'de ise toplam 80.000-100.000 ton civarında lif, dokusuz yüzeysel üretiminde kullanılmaktadır. Bunların 35-40 bin tonu polipropilen, 30-35 bin tonu poliester, 5.000 tonu viskoz ve 4.000 ton diğer döküntü liflerdir (Duran 2004; Usta ve ark, 2004).

Tekstil sektöründe çok geniş bir uygulama alanlarına sahip olan dokusuz yüzeysel kumaşlar farklı üretim teknikleri ile elde edilebilmektedir. Dokusuz yüzeysel kumaşların üretim basamakları örme ve dokuma kumaşlardan farklıdır. Genel olarak dokusuz yüzeysel kumaşların üretim basamakları;

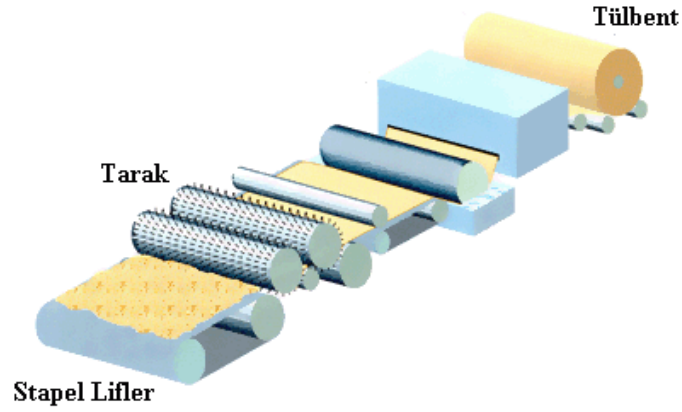
- * Lif üretimi,
- * Liflerden tülbent yüzeyin oluşturulması,
- * Tülbent yapıdaki liflerin birbirine bağlanması ve
- * Bitim işlemleri aşamalarından oluşur.

Dokusuz yüzey kumaşlar; tülbent yapının oluşturulması ve tülbent şeklindeki yapıyı oluşturan liflerin birbirine bağlanma yöntemlerine göre karakterize edilirler. Tülbent yapı, kesikli veya filament liflerden oluşan ve kendi doğal tutunma yetenekleri ile birbirine tutunan bir veya birkaç kat halindeki vatmaya denir (Duran 2004). Dokusuz yüzey kumaşların üretiminde, tülbent oluşturulmasında ve tülbentlerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

1.1.3.1 Dokusuz Yüzey Kumaş Üretiminde Tülbent Oluşturma Yöntemleri

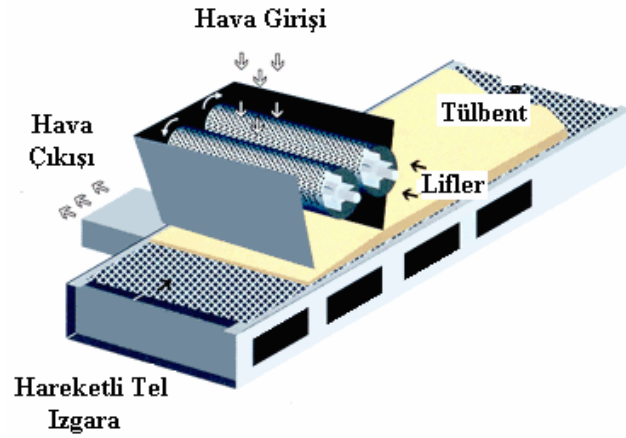
Dokusuz yüzey üretiminde hammadde olarak kullanılan liflerden tülbentlerin oluşturulması mekanik, aerodinamik, hidrodinamik ve eriyikten çekim yöntemleri ile gerçekleştirilir. Çeşitli kaynaklarda mekanik ve aerodinamik yöntemler kuru yöntemler olarak da adlandırılırken, hidrodinamik yöntem su kullanıldığı için yaş yöntem olarak da adlandırılmaktadır (Albert ve ark.,2003; Duran, 2004).

Mekanik Yöntem: Bu yöntemde liflerden tülbent üretimi tarak makinasında gerçekleştirilir. Balya açıcı veya harman hallaçtan tarak makinasına beslenen stapel lifler burada tarak telleri vasıtası ile açılıp paralel hale getirilerek tülbent formuna sokulurlar (Şekil-1.8). Bu yöntemle üretilen tülbent içindeki lifler tülbent boyunca çoğunlukla paralel yönlenmişlerdir. Tülbent kalınlığı ve ağırlığı tarağın üretim hızı ve besleme miktarına bağlıdır. Yöntem dokusuz yüzey jeotekstillerin üretiminde en çok kullanılan tülbent eldesi yöntemidir (Albrecht ve ark., 2003).



Şekil 1.8 Mekanik yöntem ile tülbent üretimi (EDANA, 2008)

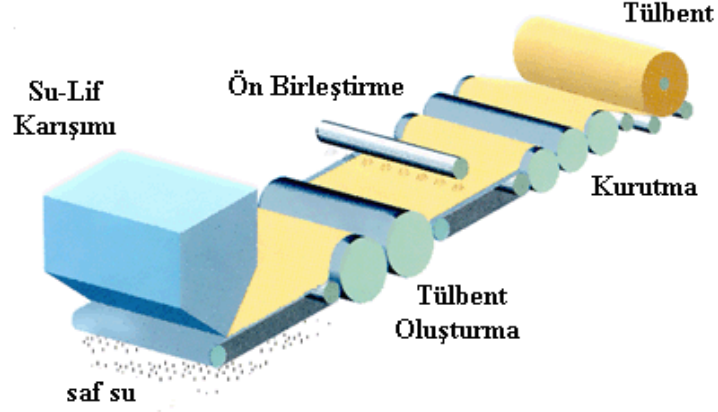
Aerodinamik Yöntem: Bu yöntemde hava akımı ile bir emme tamburu üzerine sevk edilen stapel lifler tambur üzerine tabakalar halinde tutularak tülbent yapıyı oluştururlar (Şekil-1.9). Yöntemde liflerin tülbent boyunca rasgele yönlendiği tabaka elde edilir. Bu yolla üretilen tülbentler mekanik yöntem ile üretilen tülbentlere göre daha ince, gevşek ve yumuşak yapıdadırlar. Elde edilen tülbentin kalınlığı ve ağırlığı elekli tamburun hızına bağlıdır (Albrecht ve ark., 2003).



Şekil 1.9 Aerodinamik yöntem ile tülbent üretimi (EDANA, 2008)

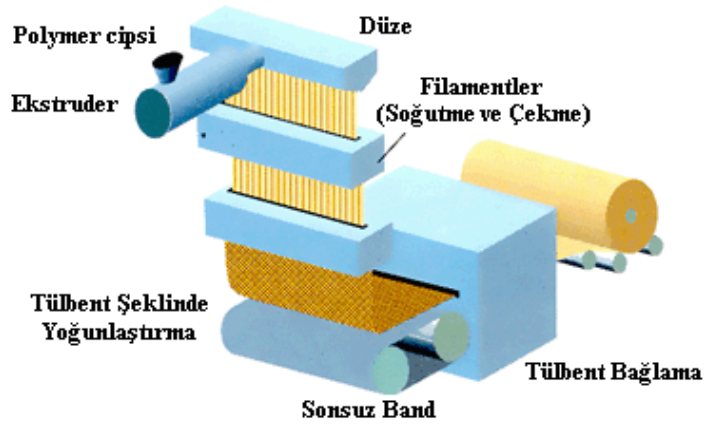
Hidrokinamik Yöntem: Yöntemde çok seyreltik durumdaki lif/su süspansiyonu üzerinde paralel hale getirilmiş lifler suyun uzaklaştırılmasına müteakiben gözenekli bir sonsuz bant üzerine sevk edilerek tülbent formuna sokulurlar (Şekil-1.10). Üzerinde kalan sular silindirlerle sıkılarak uzaklaştırılan tülbentlere ön sabitleştirme amacı ile bir yapıştırıcı püskürtülür ve sarım işlemi gerçekleştirilir. Üretim tekniği ve

kullanılan makinalar kağıt üretimi ve makinalarına benzerdir (Albrecht ve ark., 2003).



Şekil 1.10 Hidrodinamik yöntem ile tülbent üretimi (EDANA, 2008)

Eriyikten Çekim (Spun-Laid) Yöntemi: Bu yöntemde eriyikten çekim ile üretilen filamentler, sonsuz bir taşıma bandı üzerine direk olarak tülbent formu oluşturacak biçimde yoğunlaştırılarak serilmektedirler. Tülbent formundaki bu yapı daha sonra tülbent birleştirme işlemlerinden birisi kullanılarak kesintisiz bir şekilde dokusuz yüzey kumaş haline getirilmektedir. Diğer yöntemlerden daha sonra geliştirilen bu yöntemde lif çekim işlemi, tülbent oluşturma, tülbent birleştirme ve bitim işlemleri birleştirilmiştir. Yani kesintisiz bir sistem elde edilmiştir. Eriyikten çekim sonrası direk dokusuz yüzey kumaş üretim tekniği, kullanılan lif çekim yöntemi ve üretilen liflerin yapısına göre ticari olarak “Spunbond”, “Meltblown”, “Flashspun” ve “Fibrile edilmiş Film” gibi isimler almaktadır (Albrecht ve ark., 2003). Şekil-1.11’de polimer maddeden kesintisiz olarak dokusuz yüzey üretim yönteminin esası şematik olarak verilmiştir.



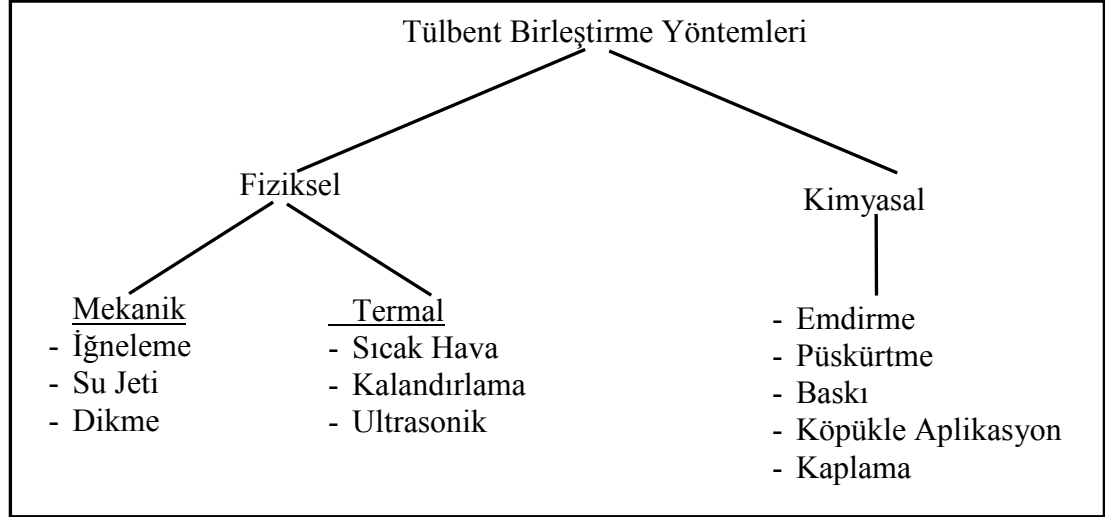
Şekil 1.11 Eriyikten çekim yöntemi ile tülbent üretimi (EDANA, 2008)

Yukarıda anlatılan çeşitli yöntemler ile elde edilen tülbentler, tülbent katlama (serme) sistemleri vasıtası ile üst üste serilerek tülbent birleştirme makinasına sevk edilirler. Tülbentlerin üst üste serilmesindeki başlıca amaçlar; nihai ürün kütlesini ve enini artırmak, ürünün makina yönündeki ve makina yönüne dik yöndeki özelliklerini ve kalitesini belirlemektir (Albrecht ve ark., 2003). Tülbentlerin üst üste serimi üretilen kumaşın tipine veya kullanım alanına bağlı olarak boyuna, enine, çapraz veya karışık halde olabilir.

1.1.3.2 Dokusuz Yüzey Kumaş Üretiminde Tülbent Birleştirme Yöntemleri

Tülbent yüzeylerin çeşitli metodlar kullanılarak birleştirilmesi sonucunda dokusuz yüzey kumaşlar elde edilmektedir. Dokusuz yüzey kumaşlar tülbent birleştirme işlemlerinde uygulanan yöntemlere göre isimlendirilirler. Dokusuz yüzey kumaşlar tülbent birleştirme işleminin yapıldığı makinadaki üretim akış yönüne göre belirlenen “makina yönü” (MD) ve “makina yönüne dik yön” (CD) olmak üzere iki temel yönde farklı fiziksel özellikler gösterirler. Kumaşların bu iki temel yönde farklı fiziksel özellik göstermelerinin sebebi kumaşı oluşturan stapel lif veya filamentlerin kumaş içindeki yerleşimlerinden kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile yukarıdaki kısımlarda anlatılan tülbent oluşturma işlemleri ile aşağıdaki kısımlarda anlatılacak tülbent birleştirme işlemleri kumaşın iki temel yönündeki özelliklerini belirleyen esas işlem kademeleridir. Tülbent birleştirme işlemi fiziksel veya kimyasal yöntemler ile gerçekleştirilir. Öte yandan tülbentler, kumaşın kullanım yerine göre birkaç yöntemin

kombinasyonu ile de birleştirilebilirler. Tülbentlerin birleştirme işlemleri için yaygın olarak kullanılan yöntemler Şekil-1.12’de verilmiştir.

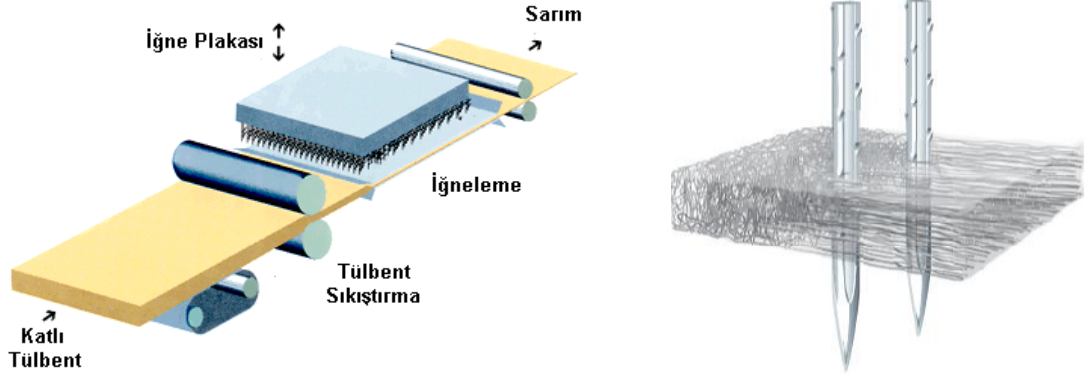


Şekil 1.12 Tülbent birleştirme yöntemleri (Albrecht ve ark., 2003)

Şekil-1.12’de verilen tülbent birleştirme yöntemlerinden kimyasal yöntemlerde kullanılan malzemelerin çevresel etkileri ve geri dönüşüm problemleri nedeni ile fiziksel birleştirme yöntemleri günümüzde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel yöntemler ise kendi içerisinde mekanik yöntemler ve termal yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunun yanı sıra polimer maddelerden doğrudan dokusuz yüzey eldesi günümüzde giderek önem kazanmaktadır. Bu yöntemde de Şekil-1.12’de verilen tülbent birleştirme işlemlerinden birisi uygulanmaktadır, ancak işlem kesintisizdir. Tülbent birleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan fiziksel yöntemlerin prensipleri aşağıda özetlenmiştir.

Mekanik Yöntemler: Mekanik yöntemlerden dokusuz yüzey üretiminde en fazla kullanılanı “**İğneleme ile birleştirme**” (iğne ile keçeleştirme) yöntemidir. Yöntem tülbent yapıyı oluşturan liflerin, ucu çentikli iğneler ile birbirine karıştırılması ve bağlanmasını içermektedir (Şekil-1.13). Tülbent tabakası içerisinde iğneler aşağı doğru ilerlerken çentikler tarafından tutulan lifler ileri taşınır, iğnelerin yukarı hareketi ile bu lifler tülbent içinde karmaşık bir şekil alırlar ve diğer liflerle bağlantı noktalarını oluştururlar. Böylece iğneleme öncesinde tülbent tabakaları içerisinde paralel halde bulunan lifler iğneleme sonrası farklı açılarda yönlendirilmiş olurlar.

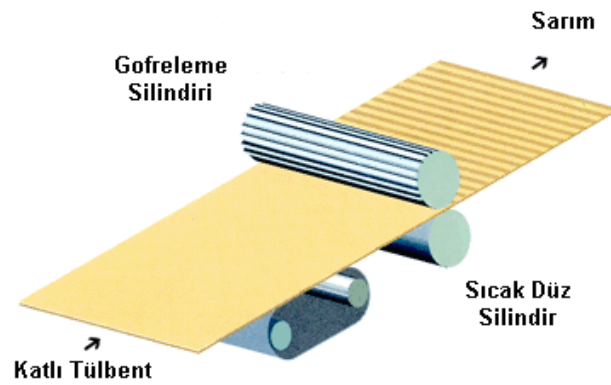
Tülbent katları makinada birkaç kez iğnelenebilirler. Bu yöntemde üretilen dokusuz yüzeyler diğerlerine göre nispeten daha kalındır ve joetekstillerin üretiminde en çok bu yöntem tercih edilmektedir (Gupta, 2000; Lieberenz, 2003).



şekil 1.13 iğneleme yöntemi ile tülbent birleştirme işlemi (EDANA, 2008; www.fibertex.com, 2008)

“**Su Jeti ile Birleştirme**”, iğneleme ile birleştirmeye göre daha az kullanılan bir mekanik yöntemdir. Bu yöntemde jetlerden basınçla üflenlen su ile tülbent tabakası içerisindeki lifler mekanik olarak karıştırılarak birbirlerine bağlanmaktadırlar. “**Dikme**” yönteminde ise tülbent tabakaları dikilerek birleştirilmektedir.

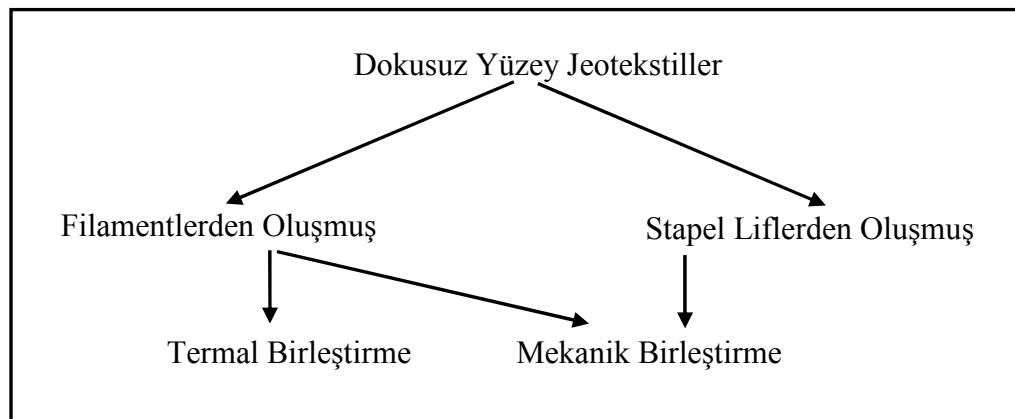
Termal Yöntemler: Tülbent yüzeyi oluşturan liflerin erime noktalarından faydalanılarak kesişme noktalarında birbirine bağlanması yöntemin esasını oluşturur. Liflerin erime noktasına kadar ısıtılmasında sıcak hava veya buhar, sıcak silindirler (kalandırlama) ve ultrasonik yöntemler kullanılmaktadır. Yöntemde termoplastik liflerin kullanılması gereklidir. Dokusuz yüzeyi oluşturacak liflerin erime noktaları eğer çok yüksek ise lifleri birbirine bağlamak için erime noktaları düşük toz veya granül halindeki polimerler ilave madde olarak kullanılabilir. Ayrıca erime noktaları farklı polimerlerden oluşan bikomponent liflerde bu yöntem ile dokusuz yüzey üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu yöntemde üretilen dokusuz yüzeyler diğerlerine göre nispeten daha incedirler (Adanur, 1995; Ingold ve Miller, 1988). Sıcak silindirler ile tülbent birleştirme işleminin esası şekil-1.14’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.14 Sıcak silindiler ile tülbent birleştirme yöntemi
(EDANA, 2008)

1.1.3.3 Jeotekstillerin Eldesinde Kullanılan Dokusuz Yüzey Üretim Yöntemleri

Dokusuz yüzey kumaş üretim yöntemleri içerisinde jeotekstillerin eldesinde en fazla kullanılan metodlar Şekil-1.15’de özetlenmiştir. Jeotekstil üretiminde kullanılan başlıca yöntem mekanik birleştirme metodlarından biri olan iğnelemedir (Lieberenz, 2003).

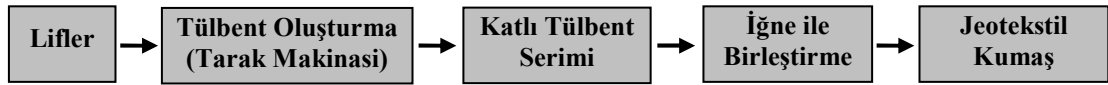


Şekil 1.15 Jeotekstilleri için dokusuz yüzey kumaş üretim yöntemleri

Şekil-1.15’de görüldüğü gibi termal birleştirme ile üretilen jeotekstilleri çoğunlukla filamentlerden üretilirler. Bu yöntem ile genellikle daha ince jeotekstil kumaşlar üretilir. Termal birleştirme yönteminde elde edilen kumaşların mekanik özelliklerini eriyerek birbirine bağlanan lifler belirler. Kumaş kalınlığı arttıkça yöntemin verimliliği azalır. Kalın kumaşlarda iç kısımdaki lifleri birbirine

bağlayabilmek için ısının artırılması gerekir bu da yüzeydeki liflerin aşırı ısınmasına neden olur.

Mekanik birleştirme yöntemlerinden biri olan iğneleme ile üretilen jeotekstiller ise stapel veya filament liflerden oluşturulan tarak tülbentlerinden elde edilirler. Şekil-1.16'da iğneleme ile üretilen jeotekstillerin üretim aşaması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.16 İğneleme ile birleştirilen jeotekstil kumaşlar için üretim akış şeması

İğne ile birleştirme yönteminde kumaşların özelliklerini birbirine mekanik olarak bağlanmış lifler sağlar. Bu yöntemde çok kalın ve ağır jeotekstil kumaşlar üretilebilir (Rankilor, 2000).

Eriyikten çekim ve direk birleştirme yöntemi ile dokusuz yüzey jeotekstil üretimi ise düzeden çıkan filament haldeki liflerin iğneleme veya ısıl işlem ile birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Kullanım alanında istenilen kumaş özelliklerini elde edebilmek için jeotekstil üretiminde birden fazla tülbent birleştirme işlemi bir arada da kullanılabilir. Örneğin iğneleme ile birleştirme yönteminde elde edilen dokusuz yüzey kumaşların bir yüzeyine ısıl işlem uygulanarak kumaşların boyutsal stabilitesi ve mukavemetleri değiştirilebilir.

1.1.4 Jeotekstillerin Kullanım Alanları ve Fonksiyonları

Jeotekstiller, genel olarak kullanıldıkları yerlerde toprak ya da zemin özelliklerini iyileştirme görevini yerine getirirler. İnşaat projelerinde bu amaçla kullanılan jeotekstillerin uygulaması çok farklı ve çeşitli alanlarda olabilmektedir. Tablo-1.6'da jeotekstillerin yaygın kullanım alanları özetlenmiştir (Ingold ve Miller, 1988; Koerner, 2005; Shukla, 2003) .

Tablo 1.6 Jeotekstillerin kullanım alanları

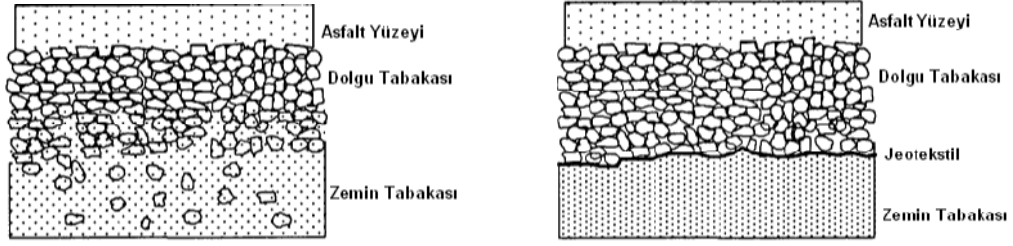
Karayolları, otoyollar ve park alanları	Barajlar, su kanalları, göletler
Köprü ve viyadükler	Kıyı koruma, çöp toplama sahaları
Demiryolları, havaalanları	Erozyon kontrolü, arazi doldurma
Tüneller, alt geçitler, metrolar	Ziraat alanları, bahçeler, teraslar
Spor sahaları (golf, tenis, halı saha)	İstinat duvarları

Jeotekstilin, zemin / jeotekstil yapısı içerisindeki kullanım amacına fonksiyonu denir. Tablo-1.6’da görülen uygulama alanlarında kullanılan jeotekstillerin birçok farklı fonksiyonu yerine getirmesi gerekmektedir. Jeotekstillerin kullanım alanlarındaki fonksiyonları temel olarak mekanik fonksiyonlar ve hidrolik fonksiyonlar olmak üzere ikiye ayrılır (GMA, 2002; Shukla, 2003; Van Zanten, 1988).

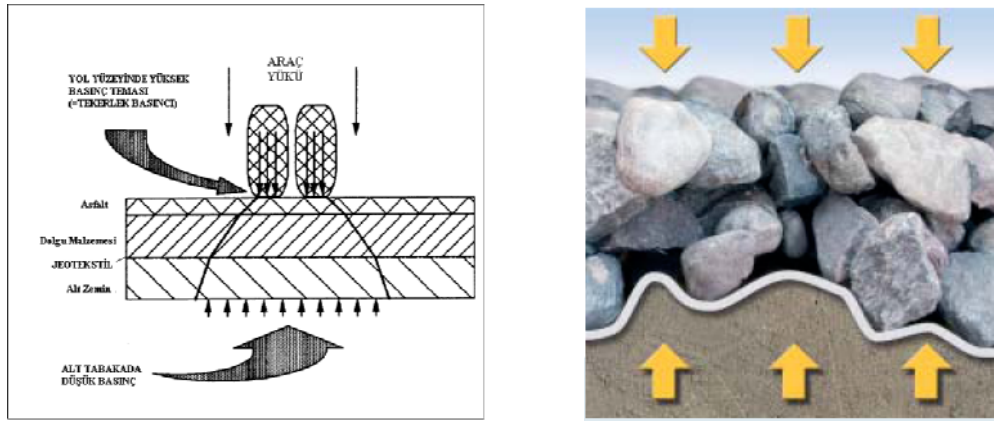
1.1.4.1 Jeotekstillerin Mekanik Fonksiyonları

Jeotekstillerin mekanik fonksiyonları, genellikle ayırma, takviye ve koruma amaçlı kullanımlar olarak sınıflandırılır.

Ayırma Fonksiyonu: Jeotekstillerin ayırma amaçlı kullanımı iki farklı tanecikli ortamın ayrılması, tanecikli yapıların sulardan ayrılması gibi çeşitli yüzeyler arasında da olabilir. Burada amaç iki farklı zemin tabakasının birbirine karışmasını önlemektir. Böylece yararlı ve pahalı olan malzemelerin zayıf zemine karışması önlenmiş olur. Aynı zamanda zemin taşıma kapasitesi korunarak yapı stabilliğini ve bütünlüğünü sağlamış olur. Jeotekstiller hemen hemen tüm uygulamalarda ayırma rolü oynarlar ancak esas fonksiyonun ayırma olduğu jeotekstil uygulamaları karayolu ve demiryolu projeleridir. Ayırma fonksiyonu için kullanılacak jeotekstil kumaşlarda kalınlık, kopma uzaması, mukavemet (kopma ve patlama) ve geçirgenlik dikkat edilmesi gereken fiziksel özelliklerdir (Adanur, 1995; Lieberenz, 2003). Jeotekstillerin ayırma fonksiyonu ile ilgili uygulama örnekleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

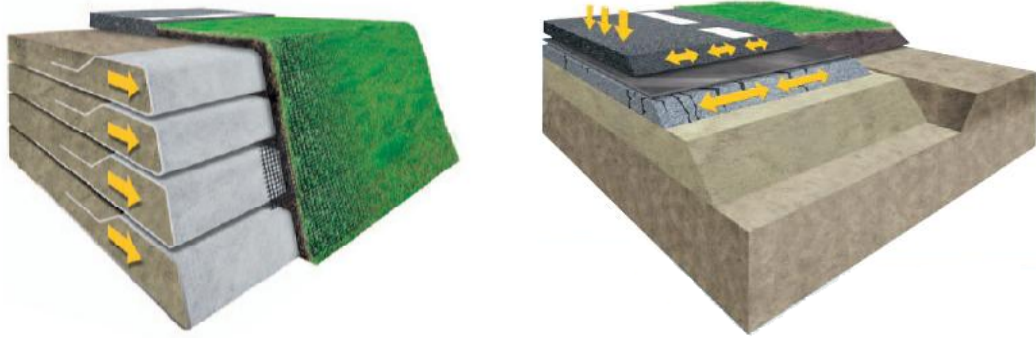


Şekil 1.17 Jeotekstil kullanılmayan ve kullanılan bir yol inşaat projesi örneği
(www.geotextile.com, 1994)



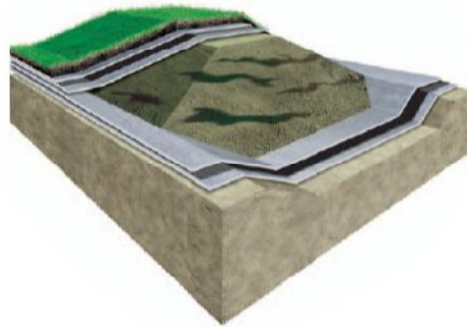
Şekil 1.18 Jeotekstil kumaşların ayırma fonksiyonunun yapıya kazandırdığı özellikler
(www.geotextile.com, 1994; www.fibertex.com, 2008)

Takviye (Stabilizasyon) Fonksiyonu: Zemin/Jeotekstil yapısı üzerine gelen yükleri bütün satha üniform olarak dağıtma amaçlı fonksiyondur. Böylece yapının dayanımı artırılmış olur. Jeotekstillere, zemine (toprağa) gerilme mekanizması sağlayarak yük taşıma kapasitesini artırır. Hemen hemen birçok uygulamada jeotekstillere takviye fonksiyonu sağlarlar ancak takviye fonksiyonun daha önemli olduğu uygulamalar çoğunlukla istinat duvarları, otoyollar ve erozyon kontrolü projeleridir. Takviye fonksiyonu sağlayan birçok uygulama aynı zamanda ayırma fonksiyonunu da sağlamaktadır. Takviye fonksiyonunu sağlayacak bir jeotekstil kumaşta dikkat edilmesi gereken özellikler kalınlık, kayma gerilmesi, sürtünme davranışı, kopma uzaması, kopma yükü ve kimyasal dayanıklılıktır. Jeotekstillere takviye fonksiyonu ile ilgili uygulama örnekleri Şekil-1.19'da görülmektedir.



Şekil 1.19 Jeotekstillerin takviye fonksiyonu için uygulama örnekleri (www.fibertex.com, 2008)

Koruma Fonksiyonu: Jeotekstillerin, dış etkenlere karşı gerekli tabakaları ve/veya malzemeleri koruma amaçlı kullanım özelliğidir. Jeotekstiller döşeme sırasında ve sonrasında bazı uygulamalarda birlikte kullanıldıkları diğer jeosentetik malzemelere delinme ve aşınma gibi mekanik hasarlara karşı uzun süreli koruma sağlarlar. Ayrıca çatı veya başka yüzeylerin kaplanması uygulamalarında bu yapıya koruma sağlarlar. Koruma amaçlı kullanılacak jeotekstillerin aşınma ve yırtılma dayanımları ile kimyasal davranışları önemli parametrelerdir. Şekil-1.20’de koruma fonksiyonu sağlayan bir jeotekstil uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.20 Koruma amaçlı kullanılan jeotekstil uygulaması (www.fibertex.com, 2008)

1.1.4.2 Jeotekstillerin Hidrolik Fonksiyonları

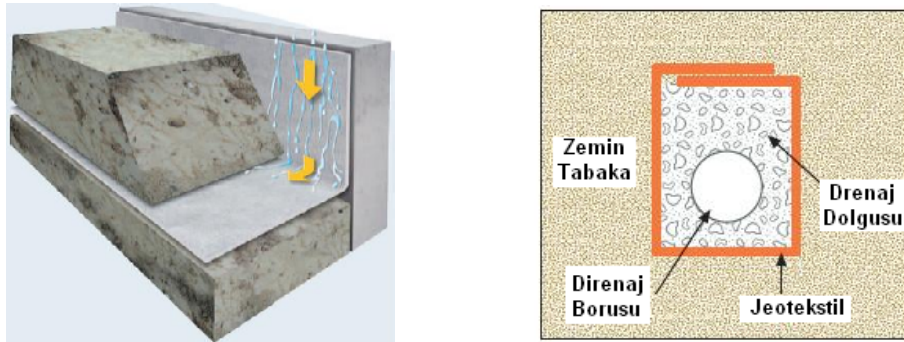
Jeotekstillerin hidrolik fonksiyonları, genellikle filtrasyon, drenaj ve yalıtım amaçlı kullanımlar olarak sınıflandırılır.

Filtrasyon Fonksiyonu: Jeotekstiller birçok uygulamada filtre gibi davranırlar. Jeotekstilin, düzlemine dik yönde su, gaz vb. maddelerin geçişine, zemindeki ince partikülleri tutarak izin verme özelliğidir. Jeotekstillerin filtrasyon fonksiyonu ile ilgili bir uygulama örneği Şekil-1.21’de görülmektedir. Filtrasyon fonksiyonu için önemli jeotekstil parametreleri kalınlık, gözenek açıklığı, jeotekstil düzlemine dik yöndeki geçirgenlik ve uzun süreli dayanımdır (Adanur, 1995; Lieberenz, 2003).



Şekil 1.21 Jeotekstillerin filtrasyon fonksiyonu
(www.fibertex.com, 2008)

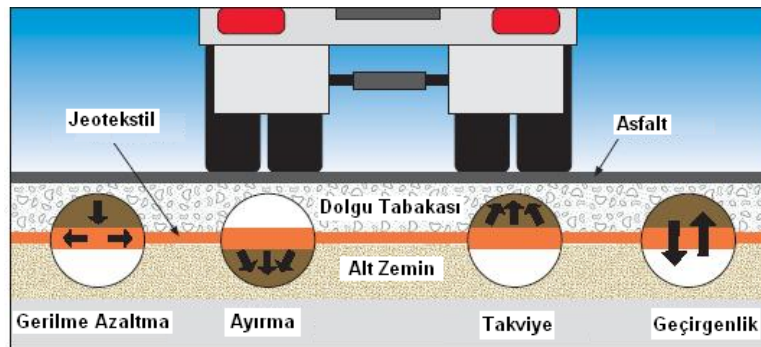
Drenaj Fonksiyonu: Drenaj, atıkları, yeraltı suyunu ve/veya diğeri akışkanları toplamak ve nakletmektir. Jeotekstil kullanılan projelerde kumaş, kendi düzleminde fazla suyun hareketine izin vererek fonksiyonu yerine getirebilir. Dolayısı ile kumaş kalınlığı ve yatay geçirgenlik drenaj için önemli parametrelerdir. Jeotekstillerin sağladığı drenaj fonksiyonu ile ilgili uygulama örnekleri Şekil-1.22’de verilmiştir.



Şekil 1.22 Jeotekstillerin drenaj fonksiyonu ile ilgili uygulama örnekleri
(www.fibertex.com, 2008; www.typargeotextiles.com, 2008)

Yalıtım (Su Geçirmezlik) Fonksiyonu: Jeotekstiller, zift veya polimerik dolgu materyalleri ile doymuş hale getirildiklerinde su geçirmez maddeler gibi davranırlar. Kaplamadan sonra, kumaşın hem dikey yönde hem de enine kesiti boyunca su ve buhar geçirgenliği çok düşük hale gelir. Kullanılacak jeotekstilin kaplama maddesi ile uyumlu olması bu fonksiyon için aranan özelliktir. Bu şekildeki jeotekstiller su rezervlerinin korunması, barajlar, tüneller, su kanalları ve çöp depolama alanları gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

Bir jeotekstil uygulaması aynı anda birden fazla fonksiyonu yerine getirebilir. Genellikle bu fonksiyonlardan birisi en önemli olanıdır ve uygulamada öncelikli jeotekstil fonksiyonu olarak dikkate alınır. Diğer fonksiyonlar ise tali fonksiyonlar olarak değerlendirilir. Jeotekstillerin projelendirme işlemlerinde jeotekstillerin sağlaması gereken fonksiyonların belirlenmesi önemli ve ilk adımdır. Kullanım yerine göre fonksiyonların saptanması uygulamada kullanılacak hammadde ve ürün özelliklerini de belirler. Örneğin otoyollarda veya havaalanlarında zemin güçlendirmesinde kullanılan bir jeotekstil ayırma ve takviye gibi öncelikli fonksiyonların yanı sıra filtrasyon, drenaj, koruma gibi birçok tali fonksiyonu da yerine getirmektedir (Şekil-1.23).



Şekil 1.23 Birden çok fonksiyonun sağlandığı jeotekstil uygulaması
(www.tyargeotextiles.com, 2008)

Şekil-1.23’de görüldüğü gibi jeotekstil uygulaması sayesinde yapı üzerine gelen gerilmeler azaltmaktadır. Asfalt altı dolgu tabakasının lastik genişliğine göre daha geniş bir alanda esnemesi iyi bir yük dağılımı, uniform oturma ve tekerleğin yaptığı oyulmaların asgariye indirilmesini sağlamış olur. Böylece üst yüzeyde bulunan

asfalt ya da beton tabakasının çatlaması/ kırılması ve dolgu malzemesinin alt zeminle karışması önlenerek yapının kullanım ömrünü uzatılmış olur. Jeotekstillerin yukarıda bahsedilen uygulama ve fonksiyonlarının sonucu oluşan yapılar çoğunlukla mekanik olarak stabilize edilmiş topraklar olarak ifade edilmektedir ve bu tip uygulamalar günümüzde hızla artmaktadır (GMA, 2002). Dolayısı ile jeotekstillerin uygulama alanlarında yerine getirecekleri fonksiyonlara uygun özelliklere sahip olup olmadıklarının çeşitli test yöntemleri ve sayısal çözümler ile belirlenmesi ve buna göre ürün seçiminin yapılması önemlidir. Bu seçimi belirleyen ise hammadde ve üretim tekniğine bağlı olarak değişen jeotekstil kumaşların genel fiziksel ve kimyasal özellikleridir.

1.1.5 Jeotekstillerin Genel Özellikleri ve Analiz Yöntemleri

Jeotekstillerin genel fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen esas parametreler jeotekstil kumaşları oluşturan liflerin özellikleri ve kumaş özellikleridir. Dolayısı ile jeotekstillerin özellikleri bu iki parametrenin birçok değişkenine göre çeşitlilik gösterir. Örneğin jeotekstilleri oluşturan liflerin; polimer maddesi, tipi, kesit şekli, inceliği, uzunluğu, mukavemeti, yüzde uzaması vb. birçok bileşeni kumaşın nihai özelliklerinin belirlenmesine etki eder. Bununla birlikte dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlarda liflerin kumaş içindeki yerleşimleri jeotekstil kumaşların özelliklerini etkileyen diğer önemli bir parametredir. Dolayısı ile jeotekstil üretiminin tamamına yakını oluşturan dokusuz yüzey kumaşların özelliklerini belirleyen temel parametreler lif özellikleri, üretim tekniği ve liflerin kumaş içindeki yerleşimleridir. Bu parametreler ve birbirleri ile etkileşimleri de göz önüne alındığında genel olarak dokusuz yüzey jeotekstilleri karmaşık bir yapıya sahiptirler ve karakterize edilmeleri zordur. Öte yandan jeotekstillerin kullanım yerleri itibari ile toprak, su vb. zemin malzemeleri ile olan etkileşimleri de jeotekstillerin özelliklerinin değerlendirilmesi açısından önemli bir parametredir. Jeotekstil kumaşların genel özelliklerini belirleyen parametreler ve bunların analizi için geliştirilen bazı önemli test yöntemleri aşağıdaki özetlenmiştir.

1.1.5.1 Fiziksel Özellikler

Jeotekstil kumaşların fiziksel özelliklerini belirleyen en önemli değişkenler kalınlık ve birim alan ağırlığıdır. Kumaşların maliyeti ile mekanik ve hidrolik özellikleri büyük oranda birim alan ağırlığı ile bağlantılıdır. Birim alan artışı ile kumaşların mukavemet özellikleri artarken, gözeneklilik ve geçirgenlikleri ise çoğunlukla azalmaktadır. Kalınlık ise özellikle filtrasyon fonksiyonu gerektiren uygulamalarda önemli bir özelliktir.

Jeotekstillerin birim alan ağırlığı gr/m^2 ile ifade edilir ve yaygın olarak kullanılan jeotekstil kumaşların birim alan ağırlıkları 100 gr/m^2 ile 1000 gr/m^2 arasındadır. 250 gr/m^2 den daha hafif jeotekstillere genellikle dokuma, iğneleme ile üretilmiş ince dokusuz yüzey veya termal birleştirme ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlardır. Daha ağır jeotekstillere ise genellikle iğneleme ile üretilmiş kalın dokusuz yüzey kumaşlar veya kordonlardan oluşmuş dokuma kumaşlardır (Ingold, ve Miller, 1988). Jeotekstil kumaşların kalınlıkları genellikle sabit basınç altında bir baskı ayağı vasıtası ile ölçülür ve çoğunlukla mm olarak ifade edilir.

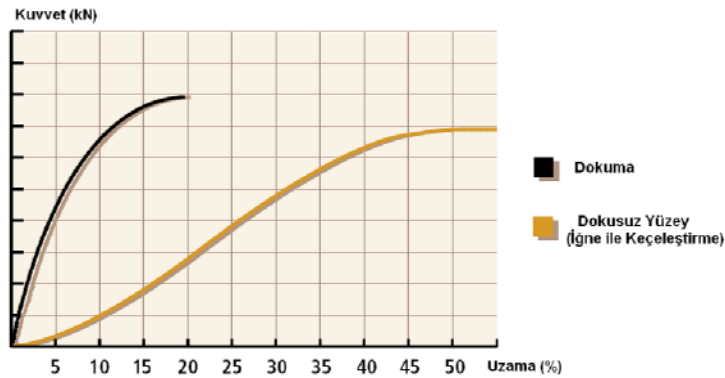
Jeotekstillerin özgül ağırlığı, erime noktası, yumuşama noktası, donma noktası vb. genel fiziksel özellikleri kumaşı oluşturan polimer maddenin çeşidine bağlıdır ve jeotekstilin uygulama alanına göre dikkat edilmesi gereken değişkenlerdir. Örneğin, jeotekstilleri oluşturan liflerin özgül ağırlıkları kimi kullanım yerleri için önemli bir parametredir. Polipropilen ve polietilen gibi özgül ağırlıkları suyun özgül ağırlığı olan 1'den küçük malzemeler kullanılması durumunda uygulama alanında su ve jeotekstil etkileşimine dikkat etmek gerekecektir. Jeotekstilleri oluşturan polimer maddelerin termal davranışları da bazı uygulamalarda önemlidir. Otoyol yapım çalışmalarında kullanılan sıcak asfalt eğer polimerin erime derecesine yakın bir sıcaklığa sahip ise jeotekstil kumaş zarar görebilir. Benzer şekilde çok soğuk yerlerdeki uygulamalarda polimerler kırılgan hale alarak kumaşların zarar görmesine neden olabilir.

Kullanım yerleri açısından temel fiziksel özelliklerin yanı sıra jeotekstil kumaşlar genellikle mekanik ve hidrolik özellikleri ile karakterize edilirler.

1.1.5.2 Mekanik Özellikler

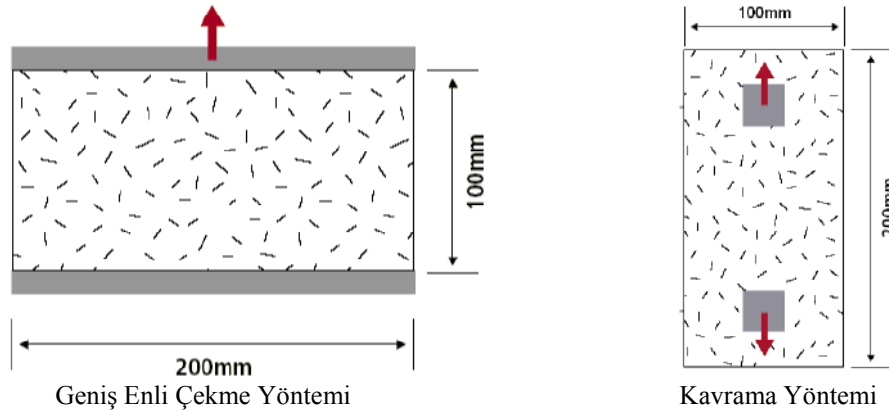
Jeotekstil kumaşların kullanım sırasındaki fonksiyonları incelendiğinde birçok uygulamada kumaşların mekanik dayanımlarının önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Jeotekstil kumaşların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesindeki en önemli değişkenler ise kopma mukavemeti, uzama oranı, dikiş (birleştirme) mukavemeti, sıkıştırılabilirlik, darbe dayanımı, yırtılma mukavemeti ve patlama mukavemetidir (Adanur, 1995; Rilem, 1988).

Her türlü jeotekstil uygulamasında yerleştirme ve fonksiyonların sağlanması için belirli bir kumaş mukavemeti ve uzama oranı gereklidir. Dolayısı ile jeotekstil kumaşların çeşitli yükler altındaki davranışları en önemli mekanik özellikleridir ve direk olarak kumaş parametrelerine bağlıdır. Jeotekstil kumaşların mukavemet ve uzama davranışlarını incelemek için tek eksenli gerilme testleri yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Uzama artış oranı sabit tek eksenli gerilme testlerinde genel olarak kumaşlara ait maksimum kopma yükü, kopma uzaması ile birlikte yük uzama eğrileri elde edilerek bu verilerden kumaşların gerilme, uzama oranı ve modül değerleri hesaplanabilir. Ayrıca gerilme-uzama oranı eğrisinde kumaş kopmadan hemen önce eğri altındaki alandan birim hacim başına yapılan iş de hesaplanabilir. Jeotekstil kumaşların yük-uzama eğrileri kumaş yapısına göre farklılık gösterir. Şekil-1.24'de dokuma ve iğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlara ait tipik yük uzama eğrileri görülmektedir.



Şekil 1.24 Farklı jeotekstil kumaşlara ait yük uzama eğrileri
(www2.dupont.com, 2008)

Şekil-1.24’de görüldüğü gibi dokuma kumaşlar dokusuz yüzey kumaşlara göre yüksek mukavemet ve düşük uzama yüzdesine sahiptirler. Dokusuz yüzey kumaşlarda ise çeşitli doğrultularda yerleşmiş liflerin çekme testinde yeniden yönlenmeleri ve daha sonra yük almaları nedeni ile uzama belli bir değerden sonra sınırlanarak azalır (Rankilor, 2000). Ayrıca dokuma kumaşlarda yük ve uzama değeri atkı ve çözgü yönüne göre iki farklı değer alırken dokusuz yüzey kumaşlarda ise makina yönü ve makina yönüne dik yön olmak üzere iki temel yönde farklı değerler gösterirler. Bununla birlikte dokusuz yüzeyler üretim tekniklerine ve sonrasında uygulanan işlemlere bağlı olarak tüm çekme yönlerinde aynı yük ve uzama değerlerinin elde edildiği izotropik yapı davranışı da gösterebilirler. Farklı tekstil yapılarının gerilme özelliklerini belirlemek için birçok test yöntemi geliştirilmiştir. Ancak bu testlerin tamamının sonuçları jeotekstil uygulamaları için kabul edilebilir veya karşılaştırılabilir değerler vermemektedir. Jeotekstil kumaşların gerilme özellikleri belirlenmek için kabul edilmiş iki yaygın çekme testi yöntemi kullanılmaktadır (Anadur 1995; Koerner ve Hsuan, 2001). Bunlardan biri kavrama yöntemi diğeri ise geniş enli çekme yöntemidir. Geniş enli çekme yöntemi daha uzun süren bir test olmasına rağmen çekme yönüne dik yönde daralması fazla olan dokusuz yüzeyler gibi kumaşlarda daha iyi sonuçlar veren bir yöntemdir (Koerner ve Hsuan, 2001; www.geotextile.com, 1994). Şekil-1.25’de her iki yöntemin şematik gösterimleri verilmiştir.



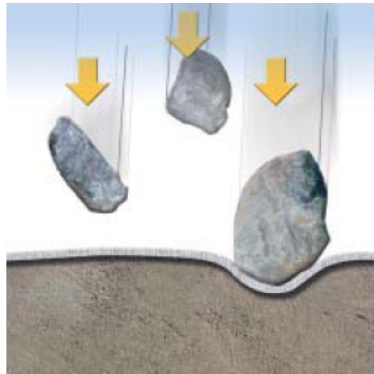
Şekil 1.25 Geniş enli çekme ve kavrama yöntemleri (www2.dupont.com, 2008)

Jeotekstil kumaşların hemen hemen hepsi esnektirler ve kullanılan liflerin mekanik özelliklerine bağlı olarak düşük eğilme direncine sahiptirler. Jeotekstillerin bu özellikleri ambalajlanma, nakliye ve yerleştirme işlemlerinde kolaylık sağlarlar. Jeotekstillerin sıkıştırılabilme özellikleri dokuma ve ısıl bağlama işlemi ile üretilen kumaşlarda düşük iken dokusuz yüzey kumaşlarda daha yüksektir (Adanur, 1995). Kumaşların sıkıştırılması gözenek yapısını değiştirdiğinden geçirgenlik özelliklerini azaltır.

Jeotekstil kumaşlar uygulama alanlarında kumaş topu uçlarından çeşitli dikişler, kimyasal veya termal yollar ile birleştirilerek kullanılırlar. Dolayısı ile kumaş toplarının birleşme yerlerindeki mukavemet değeri de uygulama alanına uygun olmalıdır. Birleştirme yeri uygunluğu birleştirme yeri mukavemeti ile jeotekstil kumaşın kendi mukavemetin karşılaştırılması ile aşağıdaki formül yardımı ile ifade edilebilir. %90 uyumluluk genellikle birleştirmenin uygun olduğu şeklinde kabul edilir (Adanur, 1995).

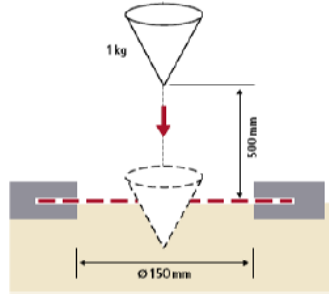
$$\text{Uygunluk \%} = \frac{\text{Birleştirme Alanının Mukavemeti}}{\text{Kumaş Mukavemeti}} \times 100 \quad (1.1)$$

Jeotekstil yerleştirme ve uygulamalarında karşılaşılan diğer bir sorun ise taş veya kaya parçalarının yerleştirme sırasında kumaş yüzeyine çarparak oluşturdukları yırtık ve deliklerdir (Şekil-1.26).



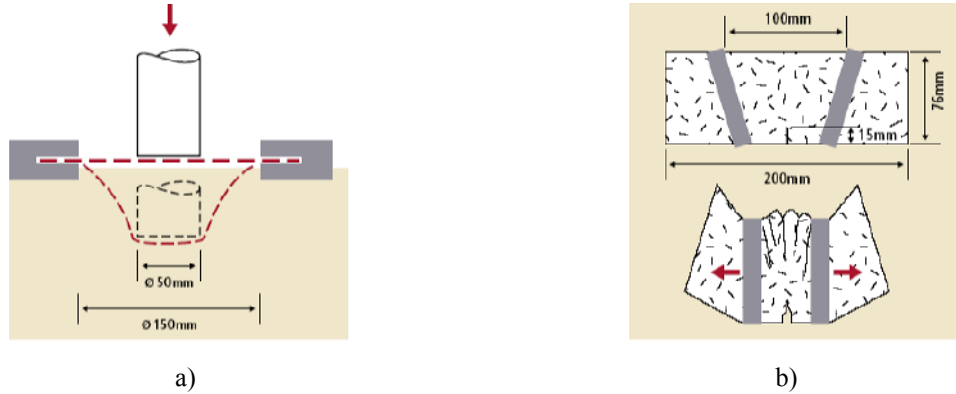
Şekil 1.26 Yerleştirme sırasında jeotekstil üzerine düşen taş veya kaya parçaları (www.fibertex.com, 2008)

Kumaşların bu gibi darbeler karşısındaki davranışlarını ve dayanımlarını değerlendirmek için uygulanan yöntem konik düşürme (dinamik delinme) testidir. Şekil-1.27’de testin şematik gösterimi verilmiştir. Teste, taş parçalarını simüle eden konik uçlu bir metal gerilmiş halde bulunan jeotekstil kumaş üzerine bırakılarak oluşan delik çapı ölçülmekte ve farklı tipteki jeotekstillerin darbeler karşısındaki dayanımı bu yöneme göre kıyaslanabilmektedir.



Şekil 1.27 Konik düşürme testi
(www2.dupont.com, 2008)

Jeotekstil kumaşlara uygulama alanlarında sağlayacakları fonksiyonlara göre aşağıda şematik gösterimleri verilen patlama mukavemeti, yırtılma mukavemeti ve benzeri testler de uygulanarak kumaşların bu özellikleri de değerlendirilebilir.

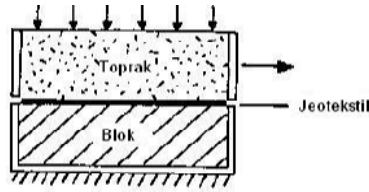


Şekil 1.28 a) Statik patlama testi (CBR Testi) b) Trapezoid yırtılma testi
(www2.dupont.com, 2008)

Jeotekstillerin kullanım yerleri açısından ilişkili oldukları yüzeyle ilgili mekanik özellikleri de önemlidir. Bu özellikler kullanım anında jeotekstil ve zeminin etkileşimi sonucu oluşan kuvvetler ve etkiler sonucu ortaya çıkan özelliklerdir. Zemin ve jeotekstil arasında oluşan mekanik etkileşim kayma kuvveti ile karakterize edilir. Güçlendirmelerde zemin-jeotekstil sürtünmesi çok kritiktir. Eğer jeotekstil

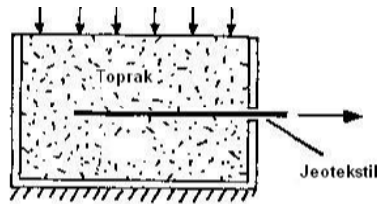
zemini takviye için kullanılmışsa yüksek temasta bir kayma kuvveti gerekir. Öte yandan jeotekstil ve zemin biri birine göre hareket edecek şekilde tasarlanmış ise düşük temas yüzeyli bir kayma kuvveti gereklidir. Kayma kuvveti, zemin ve jeotekstil arasında oluşan iç sürtünme açısı ile ifade edilir ve jeotekstil ile zemin arasındaki sürtünme özelliklerini test etmek için iki farklı yöntem uygulanır.

Direk Kesme Testi: Bu testte, jeotekstil normal basınç altında iki kayma kutusu arasına konur. Üst kısımdaki kutu hareket ettirilerek normal kuvvetlere karşı gelen kayma kuvvetleri ölçülüp grafik haline getirilir ve buradan kayma testi ile ilgili parametreler hesaplanır (Ingold ve Miller, 1988; Koerner ve Hsuan, 2001).



Şekil 1.29 Direk kesme testi

Çekme Testi: Bu testte ise jeotekstil toprak tabakası içerisine gömülmüştür. Jeotekstil normal bir gerilme ile çekilir. Jeotekstili topraktan çıkartmak için uygulanan yatay kuvvetler kaydedilir. Bu kuvvetlerin karşılık geldiği noktalarda jeotekstilin uç noktasının yer değiştirmesinden faydalanılarak bir grafik çizilir ve kayma kuvveti için hesaplamalar yapılır (Adanur, 1995; Ingold ve Miller, 1988).



Şekil 1.30 Çekme testi

Kayma kuvveti parametrelerini kumaş geometrisi, zemin tipi ve jeotekstilin geometrisi gibi özellikler etkiler. Testlerde zemin olarak genellikle tanecik büyüklüğü belli olan standart kumlar kullanılır. Yukarıdaki iki testten farklı olarak uygulama yeri dikkate alınarak jeotekstillerin özelliklerini değerlendirmek için eğik düzlemde kayma kutusu testleri de yapılabilir.

1.1.5.3 Hidrolik Özellikler

Kullanım yerleri itibariyle jeotekstillerin diğerk önemli bir özelliği ise hidrolik özelliklerdir. Jeotekstillerin, filtrasyon ve drenaj fonksiyonu ile doğrudan ilgili özelliğdir. Jeotekstillerin bu özelliklerini ifade etmek için kullanılan parametreler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Kumaş Düzlemine Dik Yönde Geçirgenlik: Filtrasyon fonksiyonu için önemli bir özelliğdir. Kumaşların düzlemine dik yöndeki “su akış oranı” ölçülerek belirlenir. Yük altında kumaşların bu özelliği değişeceğinden yükle değişimi inceleyen uygun standart test yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca her hangi bir yüklemenin olmadığı durumlarda da kumaşın düzlemine dik yöndeki geçirgenliğini ölçmek için kullanılan standart test metodları mevcuttur.

Kumaş Düzlemi Boyunca Geçirgenlik: Sıvı malzemelerin kumaş düzlemi boyunca hareketini ifade eder. Düzlem boyunca oluşan geçirgenlik genellikle çok azdır ve kumaş enine kesitine bağlıdır. Dokuma ve ısıl bağlama dokusuz yüzeylerde kumaş kalınlıkları çok ince olduğundan ihmal edilebilir. Dokusuz yüzey kumaşların özellikle drenaj uygulamalarında önemli bir parametredir.

Gözeneklilik: Jeoteksillerin gözenekliliği kumaşlardaki gözeneklerin (deliklerin) büyüklüğü ve kumaştaki dağılımı ile ifade edilir. Filtrasyon fonksiyonu için önemli bir parametredir. Uygulamalarda gözenek büyüklüğü sıvı geçişine izin verebilecek ancak toprak parçalarının geçişine izin vermeyecek şekilde seçilmelidir. Jeotekstil üzerine uygulanan yükler gözenek açıklığının değişmesine neden olabilirler. Dolayısıyla ile kumaşların gözeneklilik özellikleri değerlendirilirken kumaşın yük altındaki davranışı da dikkate alınmalıdır (Ingold ve Miller, 1988).

Açık (Boş) Alan Yüzdesi: Jeotekstil üzerindeki boş alanın toplam alana oranıdır. Sadece monofilament dokuma jeotekstillere için kullanılan bir değerdir.

Karakteristik Açıklık Ölçüsü ve Eşdeğer Açık Alan: Tüm dokuma ve dokusuz yüzey jeotekstiller için kullanılan genel parametrelerdir. Jeotekstil kumaş üzerine çeşitli boyutlarda taneciklerin veya cam boncukların konması ve daha sonra kumaşın çeşitli hareketleri sonucu alta geçen partikül miktarına göre kumaş yüzeyindeki açık alanın ölçüsünün hesaplanması ile belirlenir. Hesaplamalar partikül büyüklüğü ve birim alan ağırlığına göre bir grafik çizilerek yapılır.

1.1.5.4 Kimyasal Özellikler

Jeotekstillerin kimyasal davranışlarını kumaşı oluşturan polimerlerin özellikleri belirler. Jeotekstil kumaşların hammaddesinin tamamına yakınına oluşturan poliolefinler, poliester ve poliamid lifleri kimyasallara karşı genel olarak dayanıklı liflerdir. Bununla birlikte uygulama alanlarında zeminde veya yeraltı suyunda bulunan kimyasalların oluşturdukları çeşitli ortamlar kumaşlara zarar verebilir. Örneğin, yüksek pH (bazik) ortamında poliesterin, düşük pH (asidik) ortamında ise poliamidlerin hidrolize uğrayarak bozunmaları olasıdır. Ancak asidik veya bazik ortamın çok derişik olması halinde bozunma reaksiyonları gerçekleşeceğinden, zemin tabakasının analizi sonucunda uygun yerlerde bu polimerler jeotekstil kumaşlarda kullanılmaktadır. Öte yandan polipropilen lifleri kimyasal yapıları nedeni ile hidrolize yatkın değildirler. Düşük maliyet ile kimyasal dayanımın bir arada sağlanması polipropilen liflerini jeotekstiller uygulamalarında tercih sebebi yapmaktadır. Jeotekstil kumaşların tamamına yakını kimyasal liflerden üretildiğinden, jeotekstiller mikrobiyolojik tehditlere genel olarak dayanıklıdır.

1.1.5.5 Uzun Süreli Dayanım Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Jeotekstillerde kullanım sırasında zamanla meydana gelen bozulmalar ile ilgili özelliklerdir. Bu bozulmalar yük, sıcaklık veya kimyasal maddeler etkisi ile olabilir. Örneğin, jeotekstiller zaman içerisinde uygulama alanındaki büyük toprak partiküllerinin aşındırması veya toprak çökmesi sonucu zarar görebilirler. Bu ve benzeri uzun süreli etkiler sonucu jeotekstillerde oluşan önemli deformasyonlar şu şekilde özetlenebilir;

Aşınma: Materyalin herhangi başka bir yüzey ile sürtünmesi sonucu meydana gelen kopmalar nedeni ile materyalin zarar görmesine aşınma denmektedir. Büyük kaya parçaları jeotekstillerde aşınmaya neden olabilir. Jeotekstillerde aşınma direncinin ölçüm için kayan blok yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemde jeotekstil numunesi özel bir yüzeyi olan aşındırıcı ile belirli bir basınç ve kontrol edilebilir bir hareket hızı ile aşındırılır. Aşındırmaya karşı direnç numune üzerinde kopma gerçekleşmeden önce koparma yükünün yüzdesi olarak ifade edilir.

Creep (Akma): Jeotekstil kumaşlar uzun bir süre boyunca sabit bir yük etkisi altında kaldıklarında kumaşı oluşturan polimer maddede creep deformasyonu (akma) gerçekleşir. Bu durumda jeotekstil kalınlığı zamanla azalacağından istinat duvarları veya kıyı güçlendirme gibi takviye amaçlı önemli uygulamalarda dikkat edilmesi gereken bir özelliktir. Jeotekstillerin bu davranışı kumaşı oluşturan polimer maddeye bağlıdır. Liflerin üretiminde çapraz bağlayıcılar vb. çeşitli aditivler kullanılarak polimer maddelerde zamanla oluşan creep bozunması geciktirilebilir.

Bozunma: Çeşitli kimyasal (asit, baz vb) ve fiziksel (UV, sıcaklık, radyasyon vb) faktörlerin etkisine jeotekstillerin ve dolayısıyla kullanılan hammaddelerin ani tepkisi ile birlikte zaman içindeki tepkisinin de değerlendirilmesi önemlidir. Jeotekstillerde kullanım alanlarında bu gibi etkenlerin bileşkesi sonucu zaman içerisinde oluşan bozunmalar kumaşların fonksiyonlarını yitirmesine sebep olabilir. Örneğin güneş alan uygulamalarda kullanılan tüm jeotekstiller zaman içerisinde UV ışınları etkisi ile bozunmaya uğrarlar ve fiziksel özelliklerinde değişiklik meydana gelir. Jeotekstil üretiminde kullanılan polimer maddeler göz önüne alındığında; kimyasal olarak poliestere göre daha dayanıklı olan poliolefinler, UV ışınlarına karşı poliesterden çok daha duyarlıdırlar. Poliolefillerin bu dezavantajı karbon-siyahı gibi stabilizatör maddeler kullanılarak azaltılabilir. Ancak güneş ile direk temas halinde bulunan uygulamalarda poliolefin jeotekstillerin kullanılmasına dikkat edilmelidir. Öte yandan çok uzun kullanım sürelerine sahip jeotekstillerin bu özelliklerinin saptanması zor bir işlemdir.

Jeotekstillerin yukarıda özetlenen fiziksel, mekanik, hidrolik, kimyasal ve uzun süreli dayanım özellikleri hakkında fikir edinebilmek için çeşitli ülkelere ait üniversite, kurum ve enstitüler tarafından jeotekstiller ile ilgili birçok analiz metodu ve standart yöntem geliştirilmiştir. Jeotekstillere uygulanan analiz ve test yöntemleri genel olarak laboratuarda uygulanan ve sahada uygulanan (performans testleri) yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Saha testlerinin büyük örnek modeller ile gerçekleştirilmesi gereklidir. Uygulama alanında yapılan bu analiz ve testler zor ve zaman alıcı yöntemler olmakla birlikte çoğunlukla gerçeğe daha yakın sonuçlar verirler. Öte yandan laboratuvar testleri kullanılacak ürün hakkında kısa sürede ve daha kolay yöntemler ile karar verilmesini sağlayacak veriler sunduğundan üretici ve araştırmacılar tarafından tercih edilen yöntemlerdir. Ayrıca Laboratuvar testleri farklı ürünlerin karşılaştırılması ve uygulamalar için seçilmesinde daha etkin yöntemlerdir. (Adanur, 1995; GMA, 2002; Ingold ve Miller, 1988). Tablo-1.7’de jeotekstil kumaşların genel özelliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan test yöntemleri ile birlikte bunlara ait Türk, Avrupa Birliği ve Amerikan Standartlarının numaraları toplu olarak verilmiştir.

Tablo 1.7 Jeotekstiller için standart test yöntemleri

Yöntem	Standart No		
	TSE	ASTM	ISO
Jeotekstiller - Terimler ve Tarifler	TS EN ISO 10318	ASTM-D-4439	ISO 10318
Kalınlık Tayini	TS EN ISO 9863-1	ASTM-D-5199	ISO 9863-1
Birim Alan Ağırlığı	TS EN ISO 9864	ASTM-D-5261	ISO 9864
Geniş Enli Çekme Metodu	TS EN ISO 10319	ASTM-D-4595	ISO 10319
Çekme Testi- Kavrama Metodu	TS EN ISO 9073	ASTM-D-4632	ISO 9073-18
Dikiş Mukavemeti	TS EN ISO 10321	ASTM-D-4884	ISO 10321
Dinamik Delinme Testi	TS EN 918		ISO 13433
Statik Patlatma Testi (CBR Testi)	TS EN ISO 12236	ASTM-D-6241	ISO 12236
Hidrolik Patlama Testi		ASTM-D-3786	
Trapezoid Yırtılma Mukavemeti		ASTM-D-4533	
Sürtünme Özellikleri-Direk Kesme Testi	TS EN ISO 12957-1		ISO 12957-1
Sürtünme Özellikleri -Çekme Testi			
Sürtünme Özellikleri- Eğik Düzlemde	TS EN ISO 12957-2		ISO 12957-2
Kumaş Düzlemine Dik Yönde Geçirgenlik	TS EN ISO 11058	ASTM-D-4491	ISO 11058
Kumaş Düzlemi Boyunca Geçirgenlik	TS EN ISO 12958	ASTM-D-6574	ISO 12958
Açık-Boş Alan Yüzdesi	TS EN ISO 12957-2	ASTM-D-4751	ISO 12956
Aşınma Testleri-Kayan Blok Deneyi	TS EN ISO 13427	ASTM-D-4886	ISO 13427
Creep (Akma)	TS EN ISO 13431	ASTM-D-5262	ISO 13431
UV Dayanımı		ASTM-D-4355	

1.1.6 Polipropilen Lifleri

Polipropilen (PP) lifleri, propilenin polimerizasyonu sonucu elde edilirler ve kimyasal liflerin poliolefinler grubunda yer alırlar. Doymamış hidrokarbonların açık zincirli bileşiklerinden oluşan poliolefinler arasında lif üretiminde önem kazanmış polimerler polietilen (PE) ve polipropilendir. Araştırma materyalimizin de hammaddesini oluşturan polipropilen liflerinin tarihsel gelişimi, üretim yöntemi, özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili ayrıntılı açıklamalar bu bölümde verilmiştir.

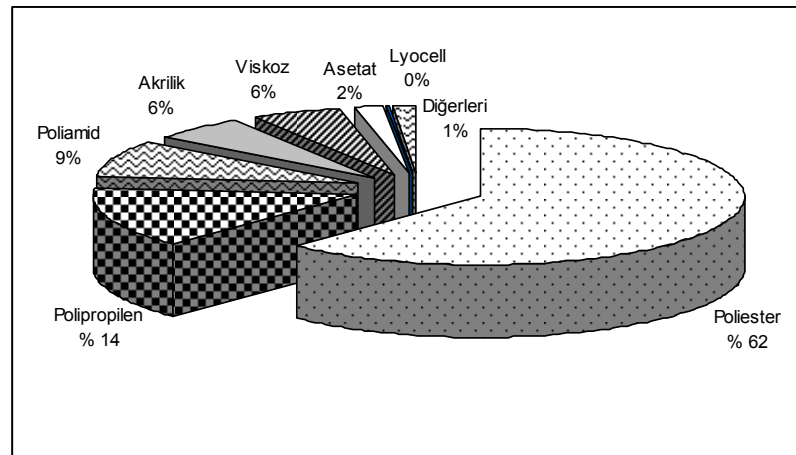
1.1.6.1 Polipropilen Liflerinin Tarihsel Gelişimi

İlk kimyasal lif üretimi, yirminci yüzyılın başlarında doğal polimer esaslı hammaddelerden gerçekleştirilmiştir. Sentetik esaslı kimyasal liflerin üretimi ise 1930'lu yıllarda mümkün olabilmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak propilenin polimerizasyonu da ilk defa 1930'lu yılların ortalarında gerçekleştirilmiştir. Ancak elde edilen polimer maddenin lif çekimi için uygun olmaması ve erime sıcaklığının düşük olması araştırmacıları farklı arayışlara yönlendirmiştir (Zhu ve Yang, 2006). Poliolefinlerin grubunda yer alan diğer bir polimer olan polietilenin ise, etilenden polimerizasyon işleminin yüksek basınçlar altında gerçekleştirilmesi gerekmekte idi ve zor bir işlemdi. 1953 yılında Karl Ziegler metal katalizörleri eşliğinde etilenin düşük sıcaklıklarda, normal basınç altında polimerize olmasını sağlayan bir yöntem geliştirdi. Elde edilen polimer poliamidlere benzer şekilde yüksek kristalizasyona sahipti ve yüksek basınçlarda radikal zincir polimerizasyonu ile elde edilen polietilendeki aşırı dallanmalar gözlenmemekteydi (Koch, 2000). Bu buluş lif çekimi için kullanılacak polipropilenin polimerizasyon işleminin gerçekleştirilmesi için de önemli bir adım olmuştur. Aynı yıllarda Milan Politeknik Enstitüsü yöneticisi olan Giulio Natta α -olefin ve stirenin polimerizasyonunu "Ziegler Katalizi" olarak adlandırılan Ziegler'in yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. G. Natta bu yöntemle 1954 yılında laboratuvar ortamında polimer zinciri üzerindeki metil gruplarının aynı doğrultuda yönlendiği izotaktik polipropilenin üretimini gerçekleştirmiştir (Natta, 1954). G. Natta çalışmalarında elde ettiği polipropilenin kristal ve içyapısını inceleyip moleküllerin dizilişine göre izotaktik, ataktik ve sindiyotaktik şekilde

adlandırdığı polimer formlarını keşfetmiştir. Aynı zamanda izotaktik formdaki polimerin yeterli mukavemetteki filamentlerin üretimi için uygunluğunu göstermiştir. G. Natta ve K. Ziegler bu çalışmaları ile 1963 yılında Nobel ödülüne layık görülmüşler ve buluşları Ziegler-Natta polimerizasyonu olarak anılmaya başlanmıştır (Koch, 2000).

Lif çekimine uygun polimer maddenin eldesi sonrasında polipropilen liflerinin endüstriyel olarak üretimi 1957 yılında “Meraklon” ticari ismi ile İtalya’da başlamıştır. 1960’lı yıllarda ilk stapel lifler üretilmiştir. Başlangıçtaki patent sıkıntıları ve boyamada yaşanan zorluklara rağmen 1970’li yıllardan sonra liflerin üretimi yaygınlaşmıştır. Liflerin üretim miktarı ve kullanım alanları düşük maliyetleri ve diğer üstün özelliklerine bağlı olarak hızla artmış ve günümüzde önemli sentetik lifler arasındaki yerini almıştır.

Çok çeşitli ve yaygın uygulama alanına sahip olan polipropilen lifleri günümüzde dünya toplam lif üretiminin yaklaşık %8,5’ini, kimyasal lif üretiminin ise %14’ünü oluşturmaktadırlar. Şekil-1.31’de 2006 yılı itibari ile dünya kimyasal lif üretim oranları verilmiştir.



Şekil 1.31 2006 yılı dünya kimyasal lif üretim oranları (Koslowski, 2007)

Şekil-1.31’de görüldüğü gibi 2006 yılında dünya toplam kimyasal lif üretiminin %62’si poliester, %14’ü polipropilen, %9’u poliamid, %6’sı akrilik, %6’sı viskoz ve %2’si asetat liflerinden oluşmaktadır. Kullanım alanlarındaki genişlemeye bağlı

olarak polipropilen lif talebi ve üretimi son 10 yıl içerisinde hızla artmıştır. Günümüzde polipropilen lifleri tekstil malzemesi olarak kullanılan kimyasal lifler alanında ikinci en büyük paya sahiptir. Teknik tekstiller alanında ise en fazla tercih edilen kimyasal lif türüdür. Poliolefinlerin ve kimyasal liflerin 1995 yılındaki ve günümüzdeki üretim miktarları Tablo-1.8'de verilmiştir.

Tablo 1.8 Dünya poliolefin ve kimyasal lif üretimi (Koslowski, 2007)

	1995	2005	2006	% Oran		Değişim	
				1995	2006	95/06	05/06
Poliolefinler¹	2.579.000	6.476.000	6.473.000	5,8	14,5	151,0	0,0
Filament	1.678.000	2.946.000	2.919.000	3,8	6,5	74,0	-0,9
Stapel	901.000	1.238.000	1.215.000	2,0	2,7	34,9	-1,9
Film	?	2.292.000	2.340.000	?	5,2	?	2,1
Kimyasal Lifler Toplamı	23.974.000	43.246.200	44.696.000			86,4	3,4

1) Poliolefinlerin, %95'ini polipropilen %5'ini polietilen lifleri oluşturmaktadır.

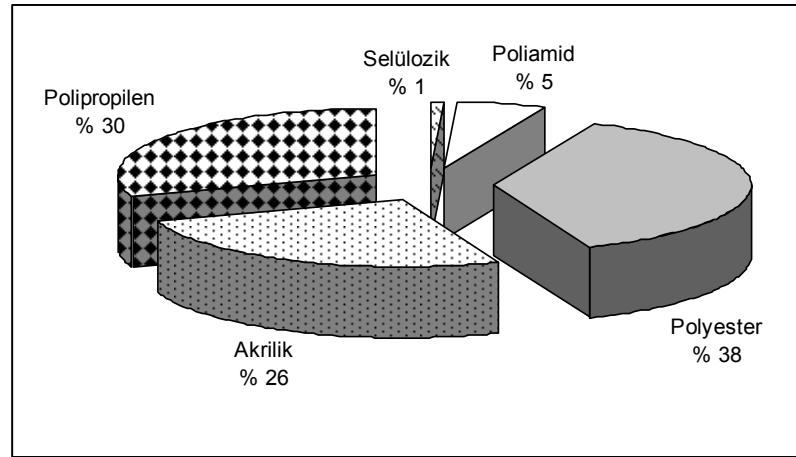
Tablo-1.8'de görüldüğü gibi son 11 yıl içerisinde polipropilen liflerinin üretimi yaklaşık %150 artarak 6,5 milyon tona yaklaşmıştır. Polipropilen liflerinin %45,1'i (2.919.000 ton) filament, %18,8'i (1.251.000 ton) stapel, %36,2'si (2.340.000 ton) film ve spunbondlardır. 2006 yılında polipropilen lif üretimi bir önceki yıl üretimine yakındır, filament ve stapel üretiminde küçük azalmalar olurken film ve spunbond üretiminde %2,1'lik bir artış meydana gelmiştir. Tablo-1.9'da ise çeşitli ülkelerin son yıllardaki polipropilen lif üretimleri görülmektedir.

Tablo 1.9 Çeşitli ülkelerdeki polipropilen lif üretimi (Koslowski, 2007)

Ülkeler	2004	2005	2006	% Değişim	Oran%
Batı Avrupa	1.632	1.584	1.581	-0,2	24,4
ABD	1.356	1.371	1.282	-6,5	19,8
Çin	1.069	1.037	1.056	1,8	16,3
Türkiye	332	323	348	7,7	5,4
Diğer Asya	504	517	534	3,3	8,3
Latin Amerika	488	403	413	2,5	6,4
Doğu Avrupa	179	184	192	4,3	3,0
Japonya	172	180	180	0,0	2,8
Tayvan	169	171	173	1,2	2,7
Kore	125	124	129	4,0	2,0
Kanada	78	81	78	-3,7	1,2
Diğerleri	475	500	506	1,2	7,8
Toplam	6.579	6.475	6.472	0,0	

Tablo-1.9’da görüldüğü gibi Dünyanın en büyük polipropilen üreticileri Batı Avrupa ülkeleri (%24,4), ABD (%19,8) ve Çin’dir (%16,3). Türkiye’nin Dünya pazarındaki payı %5,4 dür. Ülke bazında düşünülürse Türkiye dünyanın önde gelen polipropilen üreticilerinden biridir. Türkiye’nin polipropilen üretiminde 2006 yılında 2005 yılına göre %7,7’lik bir artış olmuş ve 348.000 tona ulaşmıştır.

Türkiye yaklaşık 1,1 milyon tonluk toplam kimyasal lif üretimi ile dünya üretiminin yaklaşık %2,5’ini sağlamaktadır. Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Türkiye’de de polipropilen liflerinin üretim oranları hızla artmış ve poliesterden sonra en fazla üretilen lif durumuna gelmiştir. Polipropilen lif üretiminin çoğu halı sektöründe kullanılsa da, artışta son yıllarda dokusuz yüzey üretimi için yapılan yeni yatırımların etkisi büyüktür. Şekil-1.32’de 2006 yılı itibari ile Türkiye kimyasal lif üretim oranları verilmiştir



Şekil 1.32 2006 yılı Türkiye kimyasal lif üretim oranları (Koslowski, 2007)

Şekil-1.32’de görüldüğü gibi 2006 yılında Türkiye toplam kimyasal lif üretiminin %38’i poliester, %30’u polipropilen, %26’sı akrilik, %5’i polamid ve %1’i selülozik liflerden oluşmaktadır. Türkiye’de polipropilen ve diğer kimyasal liflerin 1999 yılı ve günümüzdeki üretim miktarları Tablo-1.10’da verilmiştir.

Tablo 1.10 Türkiye kimyasal lif üretimi (Koslowski, 2007)

LİFLER	1999	2005	2006	Değişim (%)	
				99/06	05/06
Selülozik lifler	10.000	11.000	11.000	10,0	0,0
Poliamid	47.000	64.000	63.000	34,0	-1,6
Filament	25.000	31.400	31.400	25,6	0,0
Teknik Filament	22.000	32.000	31.000	40,9	-3,1
Stapel	0	600	600	10,0	0,0
Poliester	370.000	440.000	430.000	16,2	-2,3
Filament	260.000	350.000	340.000	30,8	-2,9
Teknik Filament	-	15.000	15.000		0,0
Stapel	110.000	91.000	91.000	-17,3	0,0
Akrilik					
Stapel	210.000	288.000	295.000	40,5	2,4
Polipropilen	332.000	323.000	348.000	4,8	7,7
Filament	165.000	167.000	179.000	8,5	7,2
Stapel	56.000	39.000	41.000	-26,8	5,1
Film & Spunbond	111.000	117.000	128.000	15,3	9,4
Sentetik Lifler Toplam	959.000	1.115.000	1.136.000	18,5	1,9
Genel Toplam	969.000	1.126.000	1.147.000	18,4	1,9

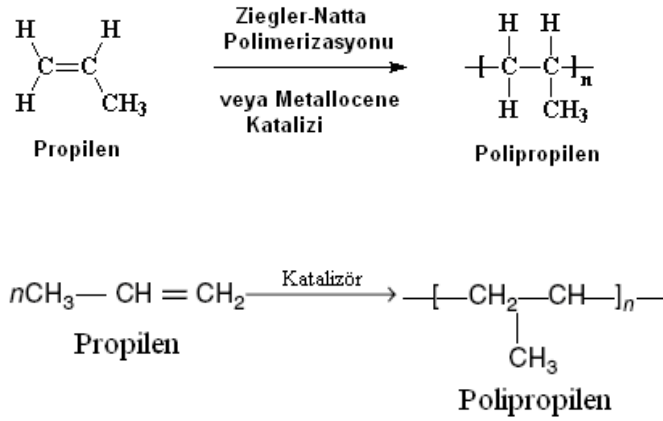
Tablo-1.10'da görüldüğü gibi son 7 yıl içerisinde Türkiye'de polipropilen liflerinin üretimi yaklaşık %5 artarak 348.000 tona ulaşmıştır. Türkiye'de üretilen polipropilen liflerin %51,4'ü (179.000 ton) filament, %11,8'i (41.000 ton) stapel, %36,8'i (128.000 ton) film ve spunbondlardır. 2006 yılında bir önceki yıla göre filament liflerde %7,2, stapel liflerde %11,8, film ve spunbondlarda %9,4'lük bir artış meydana gelmiştir.

1.1.6.2 Polimer Madde Eldesi ve Özellikleri

Polipropilen, petrolden elde edilen propilen gazının ($[CH_2=CH-CH_3]$) polimerizasyonu ile üretilen termoplastik bir polimerdir. Propilen petrolün ısı işlem ile parçalanması sırasında elde edilen kaynama noktası $-47,7$ °C olan bir gazdır. Propilende çift bağ birinci ve ikinci karbon atomları arasında olduğu için, propilen α -olefinler grubunda yer almaktadır. Propilenin polimerizasyonu yapısındaki çift bağa bağlı olarak adisyon polimerizasyonu ile gerçekleşir. Polimerizasyon reaksiyonu monomerlerin zincir reaksiyonları ile doğrudan doğruya polimer molekülüne katılması şeklinde gerçekleşir. Zincir oluşmasını sağlayan taşıyıcı bir iyon (anyon veya katyon) yada

serbest radikal diye adlandırılan çiftleşmemiş bir elektronu bulunan etkin bir madde olabilir (Ulçay ve Altun 1997).

Polimerizasyon işlemi çoğunlukla Ziegler-Natta katalizi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte 1980'li yıllarda geliştirilen ve farklı katalizörler ile gerçekleştirilen metallocene (veya single site) katalizi olarak adlandırılan yöntem ile de endüstriyel boyutlarda polimerizasyon işlemi yapılmaktadır. Her iki metod ile üretilen polimer madde lif üretimde kullanılabilir (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006). Propilenin genel polimerizasyon denklemi Şekil-1.33'de verilmiştir.

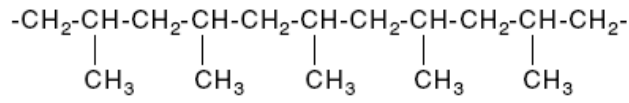


Şekil 1.33 Propilenin genel polimerizasyon denklemi

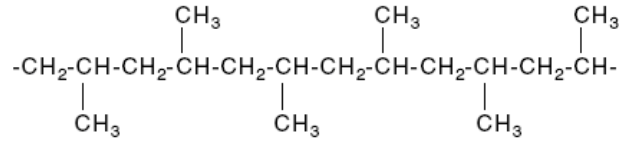
Şekil-1.33'de görüldüğü gibi polimer madde, çift bağın açılması ile oluşan $\text{---CH}_2\text{---CH}(\text{CH}_3)\text{---}$ birim ünitesinin tekrarından oluşur. Polimer madde molekül zinciri düz veya dallanmış olabilir. Polimerizasyon reaksiyonu egzotermiktir ve reaksiyon ısısı 20.0 kcal/mol dür (Koch, 2000). Polipropilenin, polimerizasyon derecesini belirleyen başlıca faktörler ise şu şekilde sınıflandırılabilir (Zhu ve Yang, 2006);

- * Katalizör tipi ve konsantrasyonu,
- * Monomer konsantrasyonu ve hidrojen,
- * Polimerizasyon sıcaklığı ve süresi,
- * Polimerizasyon ortamı (çözelti, gaz vb.)

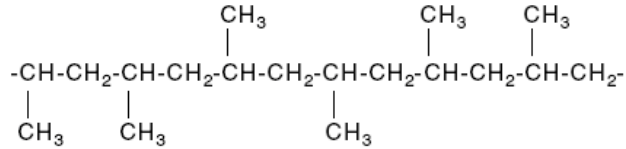
Propilenin polimerizasyon işlemi sonucu elde edilen polipropilende ana zincir üzerinde yer alan metil (-CH₃-) gruplarının yerleşimi farklı şekillerde olabilir. Yani lineer zincir içerisindeki CH₃ gruplarının yerleşimine göre polipropilen farklı özelliklere sahip olur. Propilen polimerleştiğinde lineer zincir içinde CH₃ grupları aynı yönlü ise, buna izotaktik polipropilen (iPP) denir. Eğer CH₃ grupları karşılıklı muntazamsa, sindiyotaktik polipropilen, CH₃ grupları muntazam değilse ataktik polipropilen oluşur (Harmancıoğlu, 1981). Şekil-1.34 de farklı yapıdaki polipropilen polimerleri görülmektedir.



a- İzotaktik Polipropilen



b- Sindiyotaktik polipropilen



c- Ataktik Polipropilen

Şekil 1.34 Farklı zincir yapısındaki polipropilen çeşitleri

Polipropilenin lif ve film üretiminde kullanılan formu, çoğunlukla polimerin izotaktik yapıda olanıdır. Ziegler-Natta katalizi yöntemi ile izotaktik polipropilen eldesinde genellikle katalizör olarak titanyum triklorit (TiCl₃) ve dietil alüminyum klorit veya trietil alüminyum gibi bir alüminyum alkil bileşeni kullanılır. Esas katalitik etkiyi yaratan titanyum klorittir diğer bileşik yardımcı katalizördür. Titanyum Ti-C bağları oluşturarak monomer maddenin zincir üzerine bağlanmasını sağlar. Polimerizasyon genellikle 60-80⁰C gerçekleşir (Koch, 2000).

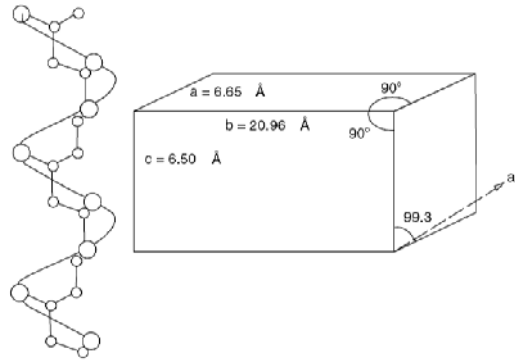
Polimerize olmamış monomerlerden ve çözücülerden filtrelenen polipropilen polimeri, reaktör çıkışında genellikle toz haldedir. Toz halindeki bu polimer madde oksijene karşı oda sıcaklığında bile hassastır dolayısı ile bu halde muhafazası için antioksidant ilavesi gereklidir. Öte yandan cips veya lif üretimini gerçekleştirebilmek için ilave antioksidantlar kullanılması da gerekebilir. Elde edilen polipropilen polimerinin filament yapısını da tayin eden genel özellikleri şu şekilde özetlenebilir;

Molekül Ağırlığı ve Molekül Ağırlığı Dağılımı: Polipropilen polimerinin reolojik özellikleri ve lif üretim işlemi karakteri polimerin molekül ağırlığı ve molekül ağırlığı dağılımına bağlıdır. Polimer maddelerdeki polar gruplar, molekül ağırlığı oldukça düşük olan polimerlerden uygun özelliklerde liflerin üretilmesine olanak sağlar. Polar gruplar bulunmayan polimerlerde ise lineer gruplar arası kaymanın azaltılması veya önlenmesi için molekül ağırlığının oldukça büyük olmasına gerek duyulur. Propilen polimerinde polar grupların bulunmaması düşük molekül ağırlığındaki polimerlerden yeterli mukavemete sahip liflerin üretilmesini sınırlar. Dolayısı ile lif üretiminde kullanılan polipropilenin polimer ağırlığı poliamid gibi polar gruplar içeren polimerlere göre oldukça yüksektir (Harmancıoğlu, 1981). Lif üretimi için kullanılan izotaktik polipropilenin ortalama molekül ağırlığı (M_w) genellikle 200.000 ile 300.000 arasındadır. Mono filament üretimi veya meltblown tülbent üretimi gibi ekstrem durumlarda bu rakam 150.000 ile 600.000 arasında değişebilir (Koch, 2000).

Eriyik Akış Oranı: Polipropilen beyaz, yarı kristalin bir polimerdir. Polipropilenin eriyik haldeki viskozitesi pratikte eriyik akış oranı (MFR) veya eriyik akış indeksi (MFI) ile ifade edilir. Yani katı halde bulunan polimerin eriyikten lif çekimindeki üretim parametrelerini bu indeks belirler. Eriyik akış indeksi standart bir sıcaklık ve basınçta belirli boyutlardaki bir delikten 10 dakikada geçen eriyik miktarının ölçülmesi ile belirlenir. Ticari olarak eriyik akış oranı 1-35 gr/10dk olan polipropilen polimerleri mevcuttur. Ancak nihai ürüne bağlı olarak daha büyük eriyik akış oranına sahip polimerler de üretilebilir. Lifler çoğunlukla eriyik akış oranı 10 ile 35 gr/10dk arasında olan reçinelerden üretilirler. Eriyik akış oranı, polimer ortalama molekül

ağırlığı (M_w) ile doğrudan ilişkili olan eriyik viskozitesi ile ters orantılıdır. Yani eriyik akış oranı arttıkça molekül ağırlığı azalır (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006).

Kristal Yapı: Polipropilenin kristal oranı işlem koşullarına bağlıdır ama genellikle %50 ile %65 arasında değişir. Yaygın kristalin formu monoklinikdir (veya α formundadır), ama diğer formlarda gözlenebilir. Şekil-1.35 de polipropilenin monoklinik birim ünitesi görülmektedir. Polipropilen helisleri birim kristal ünitenin c-ekseni boyunca uzanmaktadır (Zhu ve Yang, 2006).



Şekil 1.35 Monoklinik polipropilenin birim ünitesi (Zhu ve Yang, 2006)

Polipropilen molekülünün farklı stereo biçimleri polimer özelliklerine de önemli derecede etki yapmaktadır. İzotaktik ve sindiyotaktik polipropilende moleküllerin belirli bir şekilde paketlenmesi kristalleşmiş polimerleri oluşturur. Ataktik polipropilen de ise moleküllerin düzgün olmayan yerleşimi nedeni ile kristalleşme tam olarak gerçekleşmez ve bu tür polimerlerde amorf yapı daha fazladır (Harmancıoğlu, 1981).

Termal Davranışı: Polipropilen polimerinin termal özellikleri komplikedir ve işlem koşulları ile ölçüm tekniklerine bağlıdır. Erime noktası genellikle 165-175 °C civarındadır. Camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak -10 ve -18 °C arasındadır. Durgun eriyiklerdeki tekrar kristallenme tepe sıcaklığı ise 110-120 °C civarındadır. Polipropilen eriyikleri naylon ve poliesterden daha viskoelastik sıvılardır. Polipropilenin ısı iletkenliği ise lif üretiminde kullanılan diğer polimerlere göre düşüktür (Fried, 1995; Zhu ve Yang, 2006).

Tablo-1.11’de polipropilen polimerine ait diğ er fiziksel özellikler verilmiştir (Koch, 2000; Rodriguez, 1987; Zhu ve Yang, 2006). Bu özellikler eriyik akış oranı değı şimi ile çok fazla farklılık göstermeyen temel parametrelerdir.

Tablo 1.11 Polipropilen polimerinin temel fiziksel özellikleri

Özellik	Tipik Değ er
Nem Alma	< %0,1
Kırılma indeksi n_D	1,49
Özgöl Isısı	0,46 cal/g $^{\circ}C$
Oksijen İndeksi	17,4
Erime Isısı	21 cal/g
Bozunma sıcaklığı aralığı	328-410 $^{\circ}C$
Termal İletkenlik	0,95 Btu-in/ft ² hr- $^{\circ}F$
Lineer Termal Genleşme Katsayısı	4,0x10 ⁻⁵ / $^{\circ}F$
180 $^{\circ}C$ de eriyik yoğunluğu	0,769 gr/cc
Tutuş ma Isısı	19,400 Btu /lb
Dielektrik sabiti (0,1MHz)	2,25
Saçılma Faktörü (0,1 MHz)	<0,0002
Özgöl Hacimsel Direnç	>10 ¹⁶ Ω cm

Polimerizasyon sonucu elde edilen polipropilen genellikle granül (cips) haline dönüştürülerek lif çekimi için uygun halde ambaljanır. Polimer maddeye cips üretimi sırasında veya öncesinde çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek polimer lif üretimine hazırlanır.

1.1.6.3 Lif Üretimine Hazırlık

Termoplastik bir polimer olan polipropilen eritme yöntemi ile filament veya film haline dönüştürülür. Lif çekim işlemi sonrasında uygulanan bitim apreleri ile liflere çeşitli ilave özellikler kazandırılmaktadır. Bununla birlikte lif çekimi öncesinde polipropilenin çeşitli dezavantajlarını gidermek ve/veya liflere nihai kullanım alanlarına yönelik ilave özellikler kazandırmak için polimer madde çeşitli yöntemler kullanılarak modifiye edilebilir. Örneğ in, kimyasal yapısı nedeni ile polipropilen polar gruplar içermez, dolayısı ile polimerde boyarmadde molekülleri ile reaksiyona girecek gruplar yoktur. Bu nedenle polipropilen zor boyanır ve renklendirilmesi ilave işlemler gerektirir. Polipropilen liflerinin renklendirilmesi için çoğunlukla lif üretimi

öncesinde polimer madde içerisine renge uygun reçetelerde pigment ilavesi yapılarak masterbatchlar hazırlanır.

Polipropilenin diğer önemli dezavantajları ise erime sıcaklığının çok stabil olmaması ve UV ışınları etkisi ile oda sıcaklığında bile bozunmaya uğrayabilmesidir. Bu gibi dezavantajları giderebilmek ve depolama, üretim ve kullanım sırasında uygun lif özellikleri sağlayabilmek için polimer madde içerisine çeşitli stabilizatörler eklenir. Lif üretimi öncesinde ve/veya lif üretimi sırasında polimer madde içerisine eklenebilen başlıca stabilizatörler ve kullanım amaçları aşağıdaki şekildedir;

Antioksidantlar: Polimer cipslerini bozunmadan saklayabilmek ve eriyikten çekim işlemini gerçekleştirebilmek.

Termal Stabilizatörler: Normal kullanım sıcaklıklarında uzun süreli termal dayanıklılık sağlamak.

UV Stabilizatörleri: UV ışınlarına (güneş ışığına) karşı dayanımı artırmak.

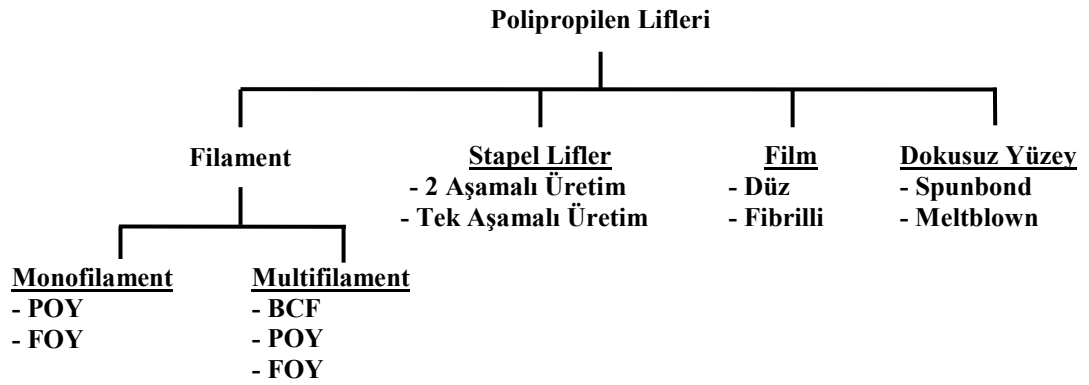
Polipropilen liflerin kendine özgü dezavantajlarını gidermek için uygulanan bu işlemlerin yanı sıra liflere kullanımları sırasında çeşitli ilave özellikler kazandırabilmek için polimer madde içerisine metal oksitler, gümüş vb. partiküllerde eklenebilir. Bu maddeler, liflerin güç tutuşurluk, iletkenlik, UV dayanımı vb. özelliklerini değiştirerek ya da liflere antibakteriyel, manyetiklik vb ilave özellikler kazandırarak liflerin farklı amaçlar için kullanılmasını sağlayabilirler. Genellikle mikron boyutlarında olan bu maddelerin lif çekimine hazırlık işlemlerinde polimer içerisine eklenerek kullanılmaları uzun yıllardır bilinmektedir. Bununla birlikte son yıllarda bilim ve teknolojiye paralel olarak bu partiküllerin nano-boyutlarda üretilmesi mümkün olmuştur. Polimer madde içerisine nano-boyutlardaki partiküllerin ilavesi ile polipropilen liflerin modifikasyonuna yönelik çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir. Nano-partikül ilavesi ile üretilen bu tip lifler ise “nano-kompozit lifler” olarak adlandırılmaktadır.

Sonuç olarak günümüzde üretilen polipropilen liflerinin üretim ve kullanım koşullarına uygunluğunu sağlamak, lif özelliklerini modifiye etmek veya liflere ilave

özellikler kazandırabilmek için polimer madde içerisine çeşitli pigmentler, stabilizatörler veya fonksiyonel maddeler ilave edilmektedir. Genellikle lif çekimi öncesinde gerçekleştirilen bu işlemde polimer içerisine eklenen maddelerin son ürüne kattığı özellikler ve birbirleri ile etkileşimleri üretimde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardır.

1.1.6.4 Lif Üretimi

Diğer termoplastik liflerin üretiminde olduğu gibi polipropilen lifleri de eriyikten çekim yöntemi ile üretirler. Polimerin çeşitli yöntemler ile eritilmesi sonucunda tekstil sanayinde kullanılmak üzere monofilament ve multifilament iplikler, stapel lifler, filmler (şeritler) ve spunbond tülbentler elde edilir. Bununla birlikte çok kalın monofilamentlerin üretiminde klasik yöntemden farklı olarak eriyikten çekim ve su içerisinde katılaştırma yöntemi de kullanılmaktadır (Zhu ve Yang, 2006). Şekil-1.36’da farklı üretim yöntemleri ile elde edilen polipropilen tekstil hammaddeleri görülmektedir.

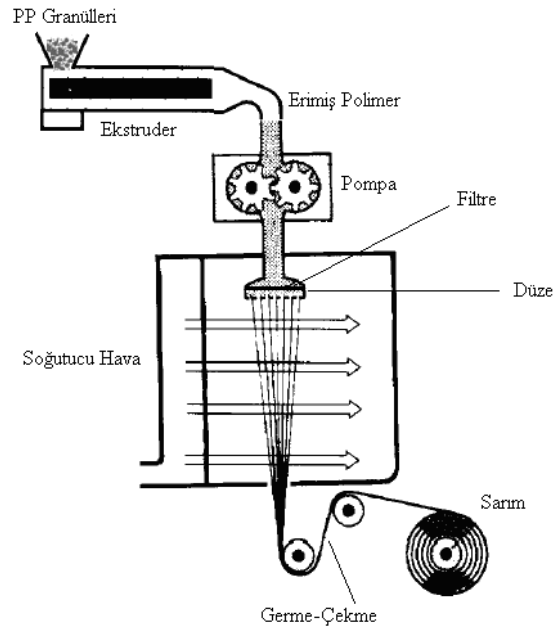


Şekil 1.36 Polipropilen lifleri için üretim yöntemleri (Troughton, 2008; Zhu ve Yang, 2006)

Şekil-1.36’da da görüldüğü gibi birçok farklı üretim yöntemi kullanılarak çeşitli özelliklere sahip polipropilen tekstil hammaddesi elde edilmektedir. Polipropilen filament ve stapel lifler klasik eriyikten çekim yöntemi ile üretilirken, filmler ekstrüzyon sonrası film yarma metodu ile üretilirler. Her iki yöntemin temel prensipleri aşağıda açıklanmıştır. Ekstrüzyon sonrası direk dokusuz yüzeý tülbendi

şeklinde elde edilen polipropilen hammaddelerin üretim yöntemi ise önceki bölümlerde açıklanmıştır.

1.1.6.4.1 Eriyikten Çekim Yöntemi. Klasik eriyikten lif çekim yönteminin esasını; polimer maddenin eritilmesi, düzelerden geçirilerek katılaştırılması ve filamentlerin oluşması ile germe-çekme sonrası filamentlerin bobinlere sarılması işlemleri oluşturur. Şekil-1.37’de polipropilenin filamentlerin eriyikten lif çekimi ile üretimi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.37 Eriyikten çekim yöntemi (Koch, 2000)

Şekil-1.37’de görüldüğü gibi polipropilenin eriyikten lif çekimi ekstruderde başlar. Eriyikten lif çekiminde polimerin eritilmesi, homojen hale ve belirli bir sıcaklığa getirilmesi için tek vidalı veya çift vidalı elektrik ısıtmalı ekstruderler kullanılmaktadır. Polipropilen üretiminde genellikle tek vidalı ekstruderler kullanılır ve ekstruderlerin boy/çap oranı (L/D) en az 24/1 olanlar tercih edilir (Zhu ve Yang, 2006). Ekstruderden çıkan eriyiğin sabit bir basınçla düzelerle beslenmesi gerekmektedir. Ayrıca düzelerle beslenecek eriyiğin saf olması, hava kabarcığı ve erimemiş polimer içermemesi gerekmektedir. Bu nedenle eriyik haldeki polimer ürünün cinsine göre çeşitli filtrelerden geçirilerek düze paketine iletilir. Lif üretiminde kullanılan düze paketleri çok çeşitlidir ve her üreticinin kendine özgü

tasarımları vardır. Polipropilen liflerin üretiminde kullanılan düze delikleri lifin nihai kullanım yerine göre yuvarlak, üçgen, tri-loblu, delikli vb. şekillerde olabilir. Genel bir kural olmamakla birlikte yuvarlak şekilli düzelerin çapları çoğunlukla 200-400µm dir. Düzelerden çıkan eriyik, katılaşıp filament haline geldiği 1-2 m boyundaki ilk soğutma bölgesinden geçerek toplama silindirlerine sarılır. Amorf ve kristal oryantasyonun gerçekleşmesi ve istenilen numarada liflerin elde edilmesi için liflere sıcak godet silindirleri ile bir germe- çekme işlemi uygulanır. Düzelerden çıkan filamentlerin oryantasyonuna ve üretilecek lifin tipine bağlı olarak filamentlere orijinal boylarının 2-10 katı arasında çekim uygulanabilir. Çekim işlemi sonrasında filamentlerin mukavemetleri artar ve uzamaları azalır ve kullanım alanına göre uygun kristalin yapıya gelirler (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006). Lif üretimi sonrasında liflerin yüzeyine yağlama, anti-statik malzeme uygulanma gibi bitim işlemleri yapılarak lifler sonraki işlem adımları ve kullanım için hazır hale getirilir. Eriyikten lif çekim işlemi sonucunda monofilament veya multi filamant halinde lifler üretilir. Bu aşamadan sonra üretilecek iplik tipine göre çok çeşitli tekstüre işlemleri uygulanarak lifler kullanıma uygun hale getirilirler. Eğer lifler stapel halde kullanılacaklar ise liflere kıvrım (yığma kutusu ile) verme ve kesme işlemlerinin de uygulanması gerekmektedir.

Eriyikten lif çekimi sırasında polipropilen lifleri için işlem kademeleri dikkat edilmesi gereken özellikler molekül ağırlığı, molekül ağırlığı dağılımı ve eriyik akış oranıdır (MFI). Lif çekiminde kullanılan polipropilenin eriyik akış oranının molekül ağırlığına da bağlı olarak genellikle 10-35 gr/10dk civarında olması tercih edilir. Polipropilen filamentlerin mukavemetleri, molekül ağırlığının yükselmesi ile artar. Teknik alanlarda kullanılan yüksek mukavemetli filamentler için molekül ağırlığı daha yüksek, yüksek viskoziteye sahip, dolayısı ile düşük eriyik akış oranına sahip (MFI=3-5 gr/10dk) polimerler kullanılır (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006).

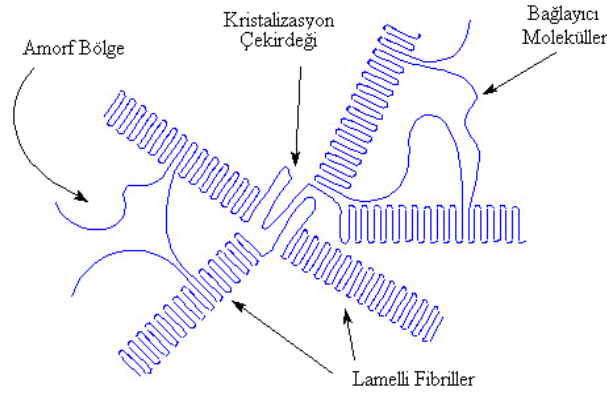
1.1.6.4.2 Film Yarma Metodu. Polipropilenin tekstil endüstrisinde lif formunun yanı sıra film formunda da kullanılmaktadır. Film yarma metodu ile üretilen şeritler genellikle dokuma çuval, dokuma jteotekstil vb amaçlar için kullanılmaktadırlar. Yöntemde granül haldeki polipropilen polimeri ekstruderde eritilerek sıvı hale

getirilir. Film üretimi için genellikle eriyik akış oranı 1-4 gr/10dk arası olan polimerler kullanılmaktadır (Zhu ve Yang, 2006). Sıvı haldeki polimer maddeden şişirme veya yayma yöntemi ile bir film tabakası elde edilir. Şişirme yönteminde ekstruderden iletilen eriyik polimer henüz soğumadan içine basınçla hava üflenip, balon gibi şişirilir. Ekstruderden şişmiş ve genişlemiş boru halinde çıkan polimer madde soğutma, sertleştirmeden sonra ya bu halde bırakılır, ya da film tabaka haline getirmek için ortadan yarılr. Film kalınlığı hava basıncı ile ayarlanabilir. Yayma yönteminde ise, ekstruderden çıkan polimer madde kalın bir şekilde yayılır, soğutulmuş silindirlere geçirilip film tabakası oluşturulur. Film kalınlığı manuel veya otomatik bir sistemle kontrol edilir. Yayma yöntemi daha basit olması ve bu yöntemde şerit kesimi için daha uygun film elde edilmesi nedeni ile endüstride daha fazla tercih edilmektedir. Her iki yöntem ile elde edilen film tabakalarından iplik üretilecek ise tabakalar kesiciler vasıtası ile ince şeritler (tape) halinde kesilir. Şeritler daha sonra bir germe çekme işlemine tabi tutularak bobinlere sarılır.

1.1.6.5 Lif Özellikleri

Eriyikten çekim yöntemi ile elde edilen polipropilen liflerinin özellikleri genellikle polimer özelliği, lif çekim koşulları ve uygulanan ilave katkı maddeleri olmak üzere üç temel parametreye bağlıdır. Özellikleri bu parametrelere bağlı olarak değişen polipropilen lifleri, içyapıları, fiziksel, mekanik ve kimyasal davranışları ile karakterize edilirler.

Lif İç Yapısı: Polipropilen liflerinin içyapısı da diğer kimyasal liflerde olduğu gibi amorf ve kristalin bölge olmak üzere iki kısımdan oluşur. Kristalin bölge birbirinden bağımsız kristalitler veya lamelalardan oluşur. Katlanmış zincir moleküllerinden oluşan bu lamelalar birbirleri ile amorf bölgenin de bir kısmını oluşturan bağlayıcı moleküller ile birleşirler (Şekil-1.38). Amorf bölgeyi oluşturan diğer moleküller, kristalizasyonlarını çeşitli nedenler ile (molekül ağırlığı farkları ve taktisite) tamamlamamış moleküllerdir.



Şekil 1.38 Polipropilen liflerinin içyapı modeli
(<http://pslc.ws/>, 2008)

Polipropilen liflerin mekanik ve kimyasal davranışlarını, amorf ve kristalin bölge oranları ve bu bölgelerdeki moleküler oryantasyon belirler. Liflerdeki amorf ve kristalin bölge oranları polimer madde özelliği ve üretim parametrelerine bağlı olarak değişir. Lif üretiminde kullanılan izotaktik polipropilenin kristalizasyon oranı, oriente olmamış liflerde genellikle %45 iken yarı oriente liflerde %60 ve tam oriente liflerde %70 civarındadır. (Taşcan ve Demir, 1999; Zhu ve Yang, 2006)

Fiziksel Özellikleri: Polipropilen liflerinin mikroskopik görünüşleri incelendiğinde lif yüzeyinin düz ve pürüzsüz olduğu görülür. Lif enine kesiti ise kullanılan düze tipine bağlı olarak yuvarlak, üçgen, oyuk vb şekillerde olabilir. Bununla birlikte en çok kullanılan düze tipi yuvarlak olanıdır. Polipropilen liflerinin genel fiziksel özellikleri Tablo-1.12’de verilmiştir (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006).

Tablo 1.12 Polipropilen liflerinin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	
Özgül ağırlık	0,90-0,905	(gr/cm ³)
Nem alma		
(21°C, %65 Bağlı Nemde)	< 0,1	%
(24°C, %95 Bağlı Nemde)	< 0,1	
Yumuşama Sıcaklığı	150-160	(°C)
Erime Sıcaklığı	160-175	(°C)
Camsı Geçiş Sıcaklığı	(-15)- (-19)	(°C)
Limit Oksijen İndeksi (LOI)	%17,5	%

Tablo-1.12’de görüldüğü gibi polipropilen liflerinin özgül ağırlığı 0,90-0,95 gr/cm³ arasında olup polimerin stero-taktik derecesine bağlıdır. Amorf halde bulunan polimerin özgül ağırlığı 0,84 gr/cm³’e kadar düşebilirken yüksek oranda kristal üniteye sahip liflerde özgül ağırlık 0,95 gr/cm³’e kadar çıkabilir (Harmancıoğlu, 1981). Polipropilen lifleri tekstil alanında kullanılan lifler arasında en düşük özgül ağırlığa sahip liflerden birisidir. Özgül ağırlığının düşük olması polipropilen liflerinin kullanılmasında çeşitli avantajlar oluşturmaktadır. Örneğin birim hacim için en düşük ağırlıktaki liftir. Bu da lifin kullanım alanında maliyet açısından avantaj yaratır. Lifin özgül ağırlığının sudan düşük olması su üzerinde batmadan durmasını sağlar ki bu özelliği kimi uygulamalarda avantaj sağlarken su ile etkileşimli bazı kullanım alanları için dezavantaj yaratabilir.

Polipropilen liflerinin kimyasal yapıları nedeni ile nem geri kazanımları çok düşüktür. 21°C, %65 bağıl nemde nem almaları %0,1’den daha düşüktür. Liflerin bu hidrofob yapısı nedeni ile statik elektriklenmesi fazladır. Ancak lif bitim işlemleri sırasında kullanılan anti-statik apreler ile bu dezavantaj azaltılabilir. Öte yandan liflerin yapılarına çok az nem ve kimyasal alması özellikle filtrasyon ve jeotekstil uygulamalarında büyük avantaj yaratır.

Lifler alev ile karşılaştığında tutuşmadan önce büzülür ve damlayarak erirler, alev kaldırıldığında yavaş yavaş yanmaya devam eder. Yanma sırasında parafin benzeri bir koku verirler, siyah bir kül bırakırlar. Polipropilen liflerin erime ve yumuşama sıcaklıkları diğer kimyasal liflere göre nispeten düşüktür. Liflerin bu özelliği bazı uygulamalarda (ütüleme, yıkama vb) dezavantaj yaratsa da özellikle ısı ile bağlanmış dokusuz yüzey kumaşların üretiminde büyük avantaj sağlamaktadır. Liflerin limit oksijen indeksi %17,5’dir ve havada tutuştuktan sonra yanmasını sürdürür. Öte yandan liflere güç tutuşurluk özelliği kazandırmak için polimer madde çeşitli yöntemler ile modifiye edilebilir.

Mekanik Özellikleri: Polipropilen liflerin mekanik özellikleri, lif çekim işlemine göre farklı değerler alabilmektedir. Tablo-1.13 de polipropilen liflerinin mekanik özellikleri için genel teknik veriler özetlenmiştir.

Tablo 1.13 Polipropilen lifleri için genel teknik veriler (Koch, 2000; Parys, 1998)

Özellik	Stapel	Filament (Normal)	Filament (Yüksek Mukavemetli)
Özgül Mukavemet (cN/tex)	13-60	15-60	70-95
Maksimum Yükte Uzama (%)	30-350	20-150	8-10
Lif İnceliği (dtex)		0,8-140 ¹ (-400) ²	
Düğüm Mukavemeti (%)		70-90	
İlmek Mukavemeti (%)		85-95	
Islak Mukavemet		Değişmez	
Büzülme			
100-130°C sıcak havada (%)		4-5	
Kaynar suda (%)		0,5	

1) 140 dtex: Halı sektörü için kaba lifler 2) 400 dtex: Monofilamentler ve özel dokusuz yüzeyler için stapel lifler.

Tablo-1.13’de görüldüğü gibi çeşitli kullanım alanları için çok değişik tiplerde ve inceliklerde üretilebilen polipropilen liflerin mukavemetleri birbirinden farklı değerlere sahiptir. Genel olarak liflerin kopma mukavemeti ve aşınma dayanımı iyidir. Lifler 120°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre kalırsa mukavemet kaybı olur ancak kullanılan termo-stabilizatöre bağlı olarak bu oran değişebilir. Soğukta kullanıma ise çok dayanıklıdır, -100°C’ye kadar liflerde mukavemet kaybı olmaz. Uzun süre sabit yük altında kaldıklarında liflerde akma deformasyonu (creep) oluşur.

Kimyasal Özellikleri: Polipropilen liflerinin kimyasallara dayanımı genel olarak çok iyidir ve bu özelliği birçok teknik tekstil uygulaması için avantaj yaratmaktadır. Polipropilen liflerinin tüm organik çözücüler, asit ve alkali çözeltilerine karşı dayanımı oda sıcaklığında çok iyidir. Bununla birlikte sıcaklığın yükselmesi ile konsantre nitrik asit gibi yüksek oksidan maddelerden etkilenirler. 100°C’nin üzerinde hidrokarbonlar ve klorlu hidrokarbonlar gibi organik çözücülerde şişer ve parçalanırlar. Lifler mikro-organizmalardan zarar görmezler.

Polipropilen liflerin UV ışınlarına karşı dayanımı ise düşüktür. UV ışınları etkisi altında oda sıcaklığında bile liflerin kimyasal yapısında değişim meydana gelir bu da mukavemet kaybına sebep olur. Bununla birlikte lif üretimi öncesinde uygun stabilizatörlerin katkısı ile çok yüksek UV dayanımı elde edilebilir.

Lifler eriyikten lif çekimi sırasında organik veya inorganik pigment boyar maddeler ile boyanabilirler. Bu şekilde boyanan liflerin boyama haslıkları iyidir. Bunun yanı sıra polipropilen lif, iplik ve kumaşların bir boya banyosunda boyanması zordur. Bunun başlıca nedenleri PP liflerinin yüksek kristalizasyon oranı ve boya molekülü ile polipropilen arasındaki moleküler etkileşimin zayıf olmasıdır.

1.1.6.6 Başlıca Kullanım Alanları

1970'li yıllarda ticari olarak önem kazanmaya başlayan polipropilen liflerin kullanım alanlarının yaygınlaşması ve artması ise diğer kimyasal liflere göre çok hızlı olmuştur. 2000'li yılların başından itibaren polipropilen liflerin kullanım alanları ve üretimi poliamid ve poliakrilonitrili geride bırakmış ve dünyada poliesterden sonra en fazla kullanılan lif haline gelmiştir.

Ticari olarak üretilen polipropilen lifleri 1970'li yıllara kadar düşük termal stabiliteleri, düşük UV dayanımı ve zor boyanabilme gibi dezavantajları ile anılmışlardır. Ayrıca düşük erime sıcaklığı da kimi uygulamalarda bir dezavantaj sayılmıştır (Zhu ve Yang, 2006). Polipropilen polimer maddesi üretim sonrasında oldukça kararsızdır. Polimer madde içerisine bazı stabilizatörler eklenmez ise polimer maddede zamanla oksidasyon, termal bozunma, UV bozunması gerçekleşebilir. Bu nedenlerden dolayı üretilen ilk polipropilen lifleri çok kalın enine kesitlerde üretilmişler ve kullanım alanları sınırlı kalmıştır. Dezavantaj olarak görülen bu özelliklerin bazıları 1980'lerde polimerizasyon koşullarındaki, stabilizatörlerdeki ve pigment boyalardaki gelişmeler sonucu birçok uygulamada avantaj haline dönüşmeye başlamıştır. Tekstil yapılarının teknik alanlardaki uygulamasının artmasına paralel olarak, polipropilenin hem boyamayı zorlaştıran kimyasal inertliği (ilgisizliği) hem de düşük erime sıcaklığının birçok ürün için avantaj yaratabileceği fark edilmiştir. Örneğin ısı bağlama tekniği ile dokusuz yüzey kumaş üretiminde polipropilenin düşük erime sıcaklığı liflerin zarar görmeden birbirine bağlanabilmesini sağlamaktadır. Dolayısı ile ilave bir kimyasal bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaz. Bu tip dokusuz yüzey ürünlerin bebek bezi ve benzeri ürünlerde yaygınlaşması polipropilen kullanımını da artırmıştır. Diğer bir örnek ise kimyasal

dayanımları nedeni ile filtrasyon ve jeotekstil uygulamalarında polipropilen liflerinin tercih edilmeleridir. Bununla birlikte liflerin mukavemet, hafiflik ve ekonomiklik gibi avantajları diğer liflere göre kullanım alanlarının daha hızlı genişlemesini sağlamıştır. Liflerin, yüksek mukavemeti ve kimyasal dayanımının ucuz maliyetle birleşmesi günümüzde teknik tekstil uygulamalarında da polipropilen liflerine olan talebi ve dolayısı ile liflerin üretimini artırmaktadır. Polipropilen lifleri günümüzde hazır giyim, döşemelik kumaşlar, ev tekstilleri, halılar, tıbbi tekstiller, otomotiv tekstilleri, jeotekstiller vb ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tekstil sektöründe çok geniş bir kullanım alanına sahip olan polipropilen liflerinin başlıca kullanım alanları, ürün tipleri ve öncelikli ürün özellikleri Tablo-1.14'de özetlenmiştir.

Tablo 1.14 Polipropilen liflerinin başlıca kullanım alanları (Koch, 2000; Zhu ve Yang, 2006)

Uygulama Alanı	Öncelikli Ürün Özelliği	Ürün Tipi
<u>Ev Tekstilleri</u>		
- Döşemelik Kumaşlar	Yüksek aşınma direnci, hacimlilik	POY, Stapel liflerden iplikler
- Halı İlme İpliği	Yüksek mukavemet	BCF
- Halı Sırt İpliği	Ucuzluk	FOY
- Paketleme Malzemesi		Film, Dokusuz yüzeyler
<u>Teknik Tekstiller</u>		
- Jeotekstiller	Mukavemet ve kimyasal dayanım	Dokusuz yüzeler (iğneleme), film
- Dolgu Malzemeleri	Düşük ağırlık	Stapel lifler
- Bebek bezleri vb.	Alerji yapmayan, hidrofobluk	Spunbond, meltblown, iğneleme
- Filtreler	Kimyasal dayanım, hidrofobluk	Dokusuz yüzeyler ve sandviç yapılar
- Halatlar	Yüksek mukavemet, hidrofobluk	Monofilament, FDY
- Otomotiv	Düşük maliyet, uygun dayanım	Dokusuz yüzeyler, örme kumaşlar
- Çimento Takviyesi	Kimyasal dayanım, hafiflik	Stapel lifler
- Diğer Medikal Ürünler	İncelik, kimyasal dayanım	Dokusuz yüzeyler
<u>Hazır Giyim</u>		
- Spor Giysiler,	Düşük ağırlık, su emme	POY, stapel lif iplikleri
- Çoraplar	Alerji yapmayan, mukavim	
- İç giyim	Alerji yapmayan	

Tablo-1.14'de görüldüğü gibi filament, stapel, film gibi farklı hammaddeler şeklinde üretilen polipropilen lifleri dokusuz yüzey, dokuma ve örme kumaş formunda çok çeşitli uygulama alanlarda kullanılmaktadırlar. Bunlar içinde polipropilen esaslı tekstil malzemelerinin en fazla kullanıldığı alanlar sırası ile halı

ilmek ve sırt iplikleri, hijyenik ve medikal ürünler, jeotekstiller, örme üst giysiler ve halatlardır (European Association for Textile Polyolefins [EATP], 2008).

1.1.6.7 Jeotekstiller ve Polipropilen Lifleri

Günümüzde dünyada üretilen jeotekstil kumaşların yaklaşık %85'lik kısmı polipropilen liflerinden üretilmektedir. Jeotekstil kumaş üretiminin ise %75'ine yakın bir kısmı dokusuz yüzey kumaşlardır. Dokusuz yüzey jeotekstiller üretiminde en fazla kullanılan tülbent birleştirme yöntemleri sırası ile iğneleme, spunbond ve termal bağlamadır. Ağır gramajlı, kalın dokusuz yüzey jeotekstillerin üretimi genellikle iğneleme yöntemi ile gerçekleştirilir ve üretimde çoğunlukla stapel polipropilen lifleri kullanılır. Termal bağlama ve spunbond yöntemi ile üretilen jeotekstiller, iğneleme yöntemi ile üretilen jeotekstillere göre daha hafif gramajlıdır ve genellikle polipropilen filament halinde kullanılır. Jeotekstil uygulamalarında polipropilen liflerin öncelikli olarak tercih edilmesinde iki husus öne çıkmaktadır. Bunlar:

- * Yüksek kimyasal dayanım ve
- * Yeterli mekanik fonksiyonun düşük maliyette sağlanmasıdır.

Polipropilen liflerin jeotekstil üretiminde öncelikli olarak tercih edilmelerinde ilk husus kimyasal dayanımları ve hidrofob özellikleridir. Uygulama sırasında toprak ve yeraltı suları ile sürekli etkileşim halinde bulunan jeotekstiller buradaki mikroorganizmalar, mineraller vb maddeler nedeni ile sürekli kimyasal etkilere maruz kalmaktadırlar. Özellikle drenaj ve filtrasyon amaçlı kullanılan jeotekstillerde bu kimyasal etkiler daha da artmaktadır. Dolayısı ile jeotekstillerin üretildikleri hammaddelerin bu gibi kimyasal tehditlere dayanıklı olması gerekmektedir. Polipropilen liflerinin kimyasal yapıları nedeni ile oda sıcaklığında tüm organik çözücüler, asit ve alkali çözeltilerine karşı dayanımı çok iyidir. Nem geri kazanımları %0,1'den küçüktür ve hidrofobdurlar. Dolayısı ile yüksek kimyasal dayanımları lifleri jeotekstil uygulamalarında ön plana çıkarmaktadır. Jeotekstil üretiminde polipropilen liflerinin öncelikli olarak tercih edilmesinde ikinci husus ise liflerin

yeterli mekanik fonksiyonu diğer liflere göre daha düşük maliyetle sağlamasıdır. Jeotekstil kullanılarak yapılan zemin takviyelerinde kumaşların üzerlerine gelen kuvvetleri emme ve yüzeye dağıtma gibi fonksiyonları yerine getirmesi beklenir. Bu fonksiyonlar yol takviyelerinde ve eğim stabilizasyonlarında önemli parametrelerdir. Dolayısı ile bu amaçla üretilcek kumaş ve hammaddelerinin mukavemet ve elastikiyet gibi mekanik özelliklerinin kullanım yerine uygun seçilmesi gereklidir. Polipropilen liflerinden üretilen kumaşlar çoğunlukla daha düşük maliyetle bu mekanik özellikleri sağlamaktadır. Liflerin özgül ağırlıklarının düşük olması birim hacimde kullanılan materyal miktarını azaltmaktadır. Dolayısı ile uygun maliyet ile yeterli mukavemet sağlanabilmektedir. Termal birleştirme yönteminde elde edilen kumaşların mekanik özelliklerini eriyerek birbirine bağlanan lifler belirler. Kumaş kalınlığı arttıkça yöntemin verimliliği azalır. Kalın kumaşlarda iç kısımdaki lifleri birbirine bağlayabilmek için ısının artırılması gerekir bu da yüzeydeki liflerin aşırı ısınması neden olur. İğneleme yöntemi (mekanik birleştirme) ile üretilen kalın jeotekstillerde ise kumaşların özelliklerini birbirine mekanik olarak bağlanmış lifler sağlar. Dolayısı ile tek lif mukavemet özellikleri ve liflerin tülbent içindeki yerleşimleri kumaş mekanik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerdir.

Dokusuz yüzey kumaş üretimi için seçilen lifler, kumaşların yüzey özellikleri ile fiziksel ve kimyasal davranışlarını doğrudan etkilemektedirler. Dolayısı ile kumaşların kullanım yerlerindeki fonksiyonları için gerekli birçok özelliği uygun maliyet koşullarında sağlayan lifler hammadde seçiminde ön plana çıkmaktadır. Polipropilen liflerinin uygun mukavemet ve kimyasal dayanımları, düşük maliyetleri ile birleşince, liflerin günümüzde jeotekstiller uygulamalarına en fazla tercih edilen hammadde olmasını sağlamıştır.

1.1.7 Sonlu Elemanlar Metodu

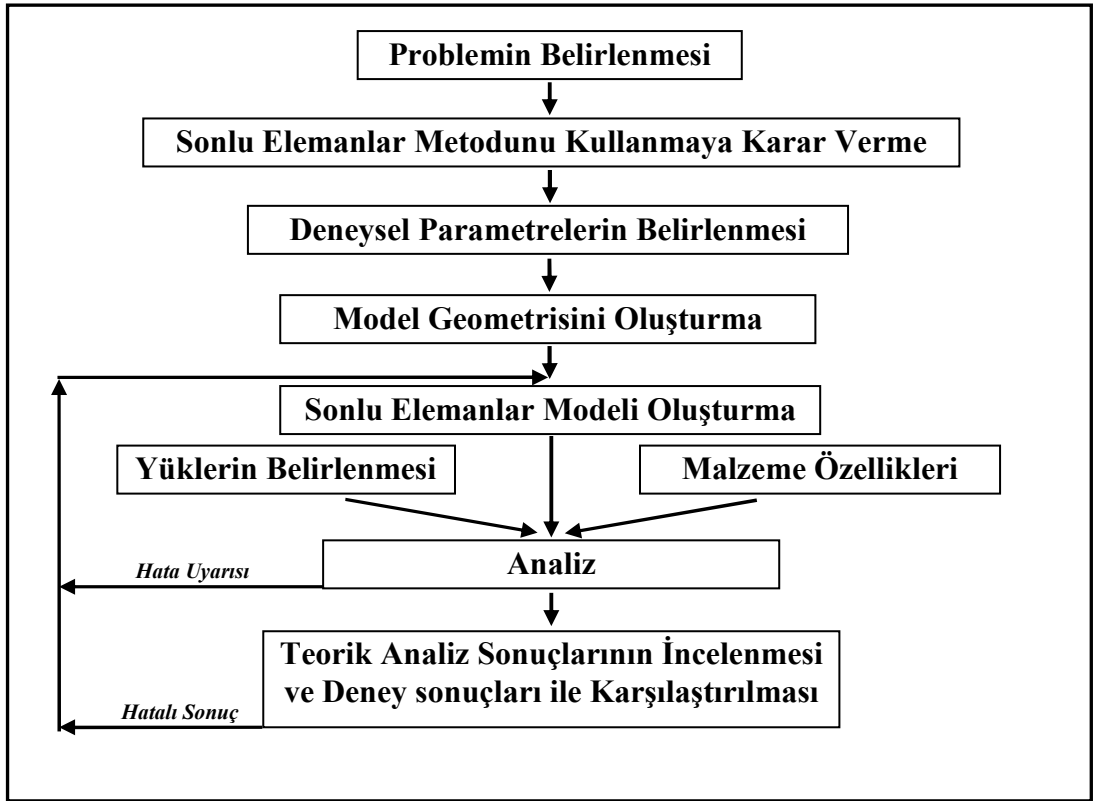
Teorik yaklaşımlar ve nümerik analizler günümüzde mühendislik problemlerinin çözümünde sıkça kullanılan yöntemlerdir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak geliştirilen paket programlar ise bu yöntemlerin etkin kullanımını yaygınlaştırmakta ve artırmaktadır.

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), malzemelerin veya sistemlerin dış etkenlere (kuvvet, ısı, elektrik, vb.) karşı davranışlarının analizinde kullanılan nümerik bir metottür. Sonlu elemanlar metodu karmaşık bir yapının küçük ve analiz edilebilir “sonlu” boyutta parçalara ayrılması fikrini temel alır. Bu küçük elemanların davranışlarının incelenmesi ve bunların tüm yapıyı temsil edecek şekilde matematiksel ve fiziksel yöntemlerle birleştirilmesi sonlu elemanlar metodunun esasını oluşturur. Metod, mühendislik uygulamalarında özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, titreşim ve benzeri problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Bu basit düşünce tarzının mühendislik alanında kompleks yapısal sistemlerin dizaynı ve analizinde kullanımının yanı sıra günlük yaşamda da birçok uygulamasıyla karşılaşılabilir.

Sonlu elemanlar metodunun temelini oluşturan ilk çalışmalar 1940’lı yıllarda geliştirilen ve sonsuz büyüklükte olduğu varsayılan bir birimin sonlu küçük parçalara kafes sistemleri veya üçgenler yardımı ile ayrılmasına dayanan yarı analitik analiz metodlardır. Daha sonra, enerji teoremleri ve yapı analizi üzerine yapılan çalışmalar sonlu elemanlar metodunun gelişimini hızlandırmıştır. “Sonlu Elemanlar” teriminin kullanılması ve mühendislik alanındaki lineer düzlem gerilme problemlerinde ilk uygulanması ise 1960’lı yılların başında gerçekleşmiştir. Metodun iki boyutlu teorisinin oluşturulmasından sonra, üç boyutlu problemlere uygulanması ve havacılık, inşaat gibi çeşitli uygulama alanlarında yapısal sistemlerin analizlerinde kullanılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda ise yöntemin lineer olmayan malzemeler ve dinamik yükleme durumu içeren problemler için teorileri ve çözüm teknikleri geliştirilmiştir. Sonlu eleman olarak kullanılan geometrik elemanlar ise kabuk eleman, tabakalı eleman vb. biçimde çeşitlenmiştir (Oden, 1987). Yöntemin karmaşık problemleri çözümedeki başarısı ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak sonlu elemanlar yönteminin bilgisayar uygulamaları ile yazılımlar geliştirilmeye başlanmış ve 1970’li yıllardan itibaren sonlu elemanlar paket programları piyasada yer almaya başlamıştır. 1990’lardan sonra ise kişisel bilgisayarlarda da kullanılabilen sonlu elemanlar paket programları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar programlarının yaygınlaşması ile birlikte, birçok ürünün pahalı ve zaman alıcı deneysel yöntemler ile analiz edilebilen mukavemet özellikleri,

araştırmacı ve üreticiler tarafından daha kısa sürede ve düşük maliyetle gerçekleştirilebilmiştir. Böylece optimum koşullarda ürün tasarımını gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Günümüzde sonlu elemanlar metodu mekanik analiz ile birlikte ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan ve diğer birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu ile bir yapının incelenmesi çeşitli işlem basamaklarından oluşmaktadır. Bu basamakların en önemli aşamaları problemin belirlenmesi, problemin sonlu elemanlar metodu ile analizi ve sonuçların değerlendirilmesidir. Sonlu elemanlar metodu ile bir problemin analizinde takip edilen işlem akış şeması Şekil-1.39'da verilmiştir.



Şekil 1.39 Sonlu elemanlar metodu işlem basamakları (Hartmann ve Kartz, 2007; Moaveni, 2007)

Şekil-1.39'da da görüldüğü gibi sonlu elemanlar metodunun bir probleme uygulanması ve problemin çözümünde aşağıda ayrıntıları açıklanan birçok işlem adımının takip edilmesi gerekmektedir.

1.1.7.1 Problemin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Metodunu Kullanmaya Karar Verme

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzeme ve yapılarda, maruz kaldıkları mekanik, termal, aerodinamik vb yükler sonucu çok çeşitli ve karmaşık mekanizmalar oluşmaktadır. Bu mekanizmaların deneysel ölçümler ile saptanması çoğunlukla uzun zaman almakta ve yüksek maliyetler gerektirmektedir. Öte yandan mühendislik uygulamalarında karşılaşılan bazı problemler ise doğrudan çözülemez veya çözüm için birçok parametrenin aynı anda analiz edilmesi gerekir. Bu tip problemlerin en azından bir kısmının anlaşılması bile pratik birçok yararlar sağlamaktadır. Dolayısı ile çeşitli yükler tarafından oluşturulan bu tip mühendislik problemleri hakkında fikir edinmek ve malzemelerin davranışlarını önceden belirlemek üzere araştırmacılar tarafından birçok teorik yaklaşım yapılmıştır. Bu teorik yaklaşımlardan en eski ve yaygın olanları, problemi çözümü daha kolay olan alt problemlere ayırarak daha anlaşılır hale getirilmeye çalışırlardır. Böylece oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Sonlu elemanlar metodu, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan kompleks yapıların analizinde, problemlerin alt bileşenlerine ayrılarak çözümünde sıkça kullanılan bir metodudur. Öte yandan sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür. Yani problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü elde edilir.

Sonuç olarak, mühendislik uygulamalarında etken olan çok çeşitli mekanizmalar nedeni ile deneysel analizi güç olan problemlerle karşılaşılabılır. Bu problemler statik, dinamik, termal vb analiz yöntemleri gerektirebilir. Bu gibi problemlerin çözümünde yaklaşık sonuçlar elde edilmesi araştırmacılara malzemelerin davranışı ve tasarımı ile ilgili yeterli bilgileri verebiliyor ise sonlu elemanlar metodu gibi teorik yöntemler tercih edilebilir. Problemi belirledikten ve sonlu elemanlar metodunu çözümde kullanmaya karar verdikten sonra yapılacak işlem teorik analizlerde ve değerlendirmelerde kullanılacak deneysel verilerin belirlenmesidir.

1.1.7.2 Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi

Sonlu elemanlar analizinde başlangıç verisi olarak kullanılacak sabitlerin elde edilebilmesi için analiz yapılacak sistemi oluşturan malzemenin çeşitli parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi gereklidir. Bu parametreler ele alınan problemin tipine göre malzemenin kuvvet, sıcaklık vb. dış etkiler karşısındaki davranışını gösteren sabitlerdir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının uygunluğunu kontrol edebilmek için de deneysel olarak belirlenmiş bu parametrelerin bazıları kullanılmaktadır.

1.1.7.3 Model Geometrisinin Oluşturulması

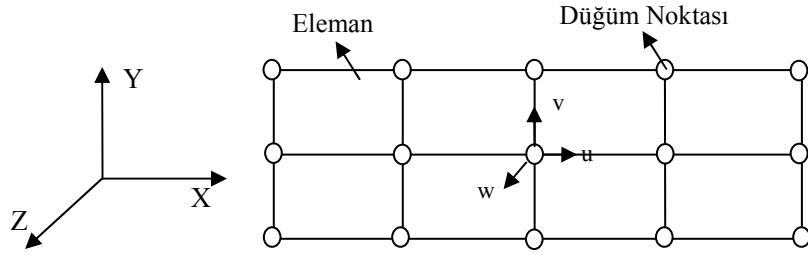
Sonlu elemanlar metodu kullanılarak analizi yapılacak katı modelin geometrik özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Bu amaçla çeşitli bilgisayar teknikleri ile incelenecek yapının geometrik modeli oluşturulabileceği gibi, model geometrisi noktasal veya çizgisel olarak da belirlenebilir.

1.1.7.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasındaki iki temel adım modelin teorik altyapısının oluşturulması ve önceden belirlenmiş geometrik modelin elemanlara ayrılması işlemleridir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması aşamasında kullanılan genel terimler aşağıda kısaca açıklanmıştır (Moaveni, 2007; Rao, 2004).

Sonlu Eleman: Analizi yapılacak geometrik yapıyı parçalara ayıran elemanlara sonlu eleman denir

Düğüm Noktaları: Sonlu elemanların birbirine bağlandığı noktalara düğüm noktaları denir. Şekil-1.40'da bir geometrik modeli parçalara bölen sonlu elemanlar ve elemanların birbirilerine bağladıkları düğüm noktaları görülmektedir.



Şekil 1.40 Düğüm noktaları ve lokal yer değiştirme vektörleri

Şekil-1.40'da verilen X-Y-Z koordinat sisteminde bulunan modele problemin cinsine göre etki eden sıcaklık, basınç, gerilme gibi fiziksel büyüklükler herhangi bir x, y, z noktasındaki düğüm noktasında bilinmeyen şekil değiştirme değişkenlerini oluşturmaktadır.

Lokal ve Global Koordinatlar: Herhangi bir x, y, z noktasındaki düğümün şekil değiştirmesi sırası ile u, v ve w lokal koordinat sistemi ile gösterilir. Problemin çözümü için yapının bulunduğu X Y Z gibi global eksenler ile düğümlerin lokal koordinatları arasında bir ilişki saptanması gerekir.

Şekil Fonksiyonu (İnterpolasyon Fonksiyonu): Düğümlerin yer değiştirmelerine bağlı olarak elemanların yer değiştirmelerini ifade edebilecek şekilde seçilen fonksiyona şekil fonksiyonu denir.

Serbestlik Derecesi: Serbestlik derecesi, düğümlerin hareket yönlerini belirler, örneğin; tek boyutlu bir problemde her düğümün tek bir serbestlik derecesi vardır ve her bir serbestlik derecesine karşılık gelen bir hareket yönü vardır; $u(x), f=f(x)$ gibi. İki boyutlu bir problemde ise bir düğümde iki hareket yönü vardır ve her düğümün iki serbestlik derecesi olacaktır.

Sınır Şartları: Problem sınır şartlarına göre çözülür. Örneğin problemde bir düğüm için $S_1=0$ ise, o düğümün kuvvet altındaki yer değiştirmesi sıfır kabul edilir. Sınır şartlarının belirlenmesi problemin çözümü için önemlidir.

Sonlu Elemanlar Ağı: Elemanların ve düğüm noktalarının kombinasyonu sonlu elemanlar ağı olarak tanımlanır.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasındaki önemli adımlardan birisi geometrik yapısı önceden belirlenen analiz bölgesinin elemanlara ayrılması ve bu işlem için eleman tipinin seçilmesidir. Seçilen birim eleman, geometrik bir şekildir. Bunun amacı, geometrik yapısını bilinen küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapmanın kolay olmasıdır. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına ve şekillerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler (Chen, 2005; Hartmann ve Kartz, 2007).

- Tek boyutlu elemanlar,
- İki boyutlu elemanlar,
- Üç boyutlu elemanlar,
- Dönel elemanlar,
- İzoparametrik elemanlar,
- Plaka, kabuk ve tabakalı elemanlar.

Modelin sonlu sayıda alt parçalara bölünmesinde kullanılacak eleman, analizi yapılan malzemenin geometrik yapısına ve malzemenin fiziksel özelliklerine uygun seçilmelidir. Seçilen elemanın analiz bölgesini doğru temsil etmesi oranında elde edilecek teorik sonuçlarda gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır. Örneğin, analiz edilecek yapı tek boyutlu ise düğüm noktaları ile sonlu sayıda bölünür, iki ve üç boyutlu cisimleri bölmek için doğrular ve düzlemler kullanılır. Birim elemanın boyutu da analiz sonuçlarına etki eder. Birim eleman boyutunun küçültülmesi ve analiz alanında eleman sayısının artırılması daha hassas çözüm yapılabilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durumda analizde çözülmesi gereken denklem sayısı artar ve buna bağlı olarak gerekli bilgisayar kapasitesi ve zaman da artar. Dolayısı ile çözüm bölgesinin uygun eleman tipi ve boyutu ile tanımlanması analizinin sağlıklı bir biçimde yapılmasını sağlayacaktır (Chen, 2005).

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasındaki diğer önemli adım ise model parametreleri arasındaki ilişkiyi belirleyen teorik altyapının oluşturulmasıdır. Teorik altyapının oluşturulmasındaki temel prensip, öncelikle bir elemana ait sistem özellikleri tanımlayan denklemlerin çıkartılması, daha sonra tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerinin birleştirilmesi ve sisteme ait genel lineer denklem takımının elde edilmesidir. Dolayısı ile analizi yapılan sistemin kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilmesi veya fonksiyonel minimizasyonu olarak formüle edilebilmesi gerekmektedir (Chandrupatla ve Belegundu, 2002; Rao, 2004).

Sonlu elemanlar modelindeki her bir elemanın sınırında bulunan belirli sayıda düğüm noktaları vasıtası ile komşu elemanına zincirleme şeklinde ve sonlu sayıda olacak şekilde bağlandığı kabul edilmektedir. Dolayısı ile her bir elemandaki şekil değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki şekil değiştirmelerle ilişkilidir. Sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değişkenler düğümlerdeki şekil değiştirmelerdir. Örneğin, bir gerilme analizi probleminde her bir elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın düğüm noktalarının şekil değiştirme bağıntıları hesaplandığında tüm sistemin çözümü kolaylaşmış olur. Sonlu elemanlar metodunda her bir elemanın şekil değiştirmesini tanımlamak için düğüm noktalarının şekil değiştirmelerine bağlı olan ve interpolasyon (şekil) fonksiyonu olarak tanımlanan bir fonksiyon belirlenir. İnterpolasyon fonksiyonu sonlu sayıda bilinmeyişi olan, eleman tipine ve çözülecek denklemin derecesine bağlı olarak seçilen bir fonksiyondur. İnterpolasyon fonksiyonu olarak genelde polinomlar seçilir ve polinomun derecesi birim elemanın düğüm sayısına bağlıdır. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer veya yüksek mertebeden olabilir. Böylelikle her bir elemanın şekil değiştirme fonksiyonu tanımlanmış olur. Elemanın şekil değiştirme fonksiyonu belirlendikten sonra modeli oluşturan malzeme ya da malzemelerin fiziksel özelliklerine uygun olarak her bir elemanın özelliklerini ifade eden bağıntılar tanımlanır. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde değişik metotlar kullanılabilir. Bunlar içinde en çok kullanılan dört temel yöntem şunlardır (Akay, 2005; Moaveni, 2007).

- *Direkt Yaklaşım:* Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu ve basit problemler için uygundur.

- *Varyasyonel Yaklaşım:* Bir fonksiyonun, ekstremize yani maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değerler maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.

- *Ölçülmüş Kalıcı Yaklaşım:* Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme işlemine “ölçülmüş ya da ağırlıklı kalanlar yaklaşımı” denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilemediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.

- *Enerji Dengesi Yaklaşımı:* Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermez. Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşık çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez.

Sonuç olarak elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın lokal koordinatlarındaki şekil değiştirmeleri arasındaki ilişki bir lineer denklem takım ile karakterize edilir. Örneğin bir gerilme analizinde; elemanlar $F [F_x, F_y, F_z]$ kütle kuvvetleri, $T [T_x, T_y, T_z]$ yüzey kuvvetleri, P_i tekil kuvvetleri gibi yükler etkisi altında kaldıklarında düğüm noktalarında yer değiştirmeler meydana gelir. X, Y, Z koordinat sisteminde herhangi bir x,y,z noktasındaki düğümün u,v ve w ile gösterilen yer değiştirmesi $u=u(u,v,w)^T$ fonksiyonu ile ifade edilir. Düğüm noktalarına etki eden kuvvetler ve her bir düğüm noktasındaki yer değiştirmeler vektörel olarak aşağıdaki matrisler ile ifade edilirler (Chandrupatla ve Belegundu, 2002).

$$F = [F_1, F_2, F_3, \dots] \quad (1.2)$$

$$U = [U_1, U_2, U_3, \dots] \quad (1.3)$$

ve

$$\{F\} = [K]_e \{U\} \quad (1.4)$$

yazılabilir.

Burada, $\{F\}$ düğüm dış kuvvetlerini belirten, $\{U\}$ ise düğüm yer değiştirmelerini; ifade eden sütun matrislerdir. $[K]_e$ ise elemanın geometrik ve elastik özelliklerinden elde edilen direngenlik matrisidir. Elemanın direngenliğinin bulunması elemana etki eden dış etkenler ile lokal değişkenleri arasında bir ilişki kurmak anlamına gelmektedir. Eleman direngenlik matrisinin belirlenmesinde seçilen eleman tipi, eleman özellikleri, interpolasyon fonksiyonu vb birçok faktör etkendir. Bu faktörlere göre eleman direngenlik matrisinin elde edilmesinde farklı yollar izlenir.

Her bir elemanın dış etkenler karşısındaki davranışı matematiksel olarak tanımlandıktan sonra bunların tüm yapıyı temsil edecek şekilde birleştirilebilir. Yani elemanların davranışlarını ifade eden matris denklemlerini birleştirerek sistemin davranışını ifade eden matris denklemler oluşturulabilir. Sistemin matris denklemleri bir elemanın matris denklemleriyle aynı formdadır. Fakat sistemde denklemlerin terim sayısı fazladır. Düğüm noktalarında toplanmış farz edilen ve sınır gerilmeleri dengeleyen kuvvetler ile düğüm noktalarının yer değiştirmeleri arasında

$$[F] = [K] \{U\} \quad (1.5)$$

bağıntısı bulunur.

Burada $[F]$ sütun matris olup dış kuvvetlerin tamamını göstermektedir, $[K]$ sistemin toplam direngenlik matrisidir. $\{U\}$ ise düğümlerin global koordinatlardaki şekil değiştirmelerini gösteren sütun matristir.

Sistem direngenlik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağlı olarak belirlenir. Elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngenlik matrisinde

ilgili satır ve sütununa yerleştirilir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler genel direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematığe göre yapılırsa genel direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal üzerinde üst üste toplanır. Genelde direngenlik matrisi simetriktir (Chandrupatla ve Belegundu, 2002). Cismin sonlu elemanlar modeli yaylardan oluşan bir sistem gibi düşünülürse $[K]$ direngenlik matrisi sistemin bileşke yay sabitidir. Her bir elemanın direngenlik matrisi ise yayların kendi sabitleri gibi düşünülebilir

Sonuçta cismin birim kuvvet etkisi altında şekil değiştirmeleri veren bir denklem takımı oluşturulmuştur. Denklem takımının çözümü ile cisme ait değişkenler sayısal olarak elde edilebilir.

1.1.7.5 Sınır Şartlarının ve Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Belirlenmesi

Sınır şartları; cismin belli parçasında veya parçalarındaki şekil değiştirmelerde yapılan kısıtlamalardır. Gerilme analizlerinde bu kısıtlamalar, cismin rijit yer değiştirmesine engel olur ve uygulanan dış yüklerin cisim tarafından taşınmasını sağlarlar. Sınır şartları, ayrıca cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yer değiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlar.

Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler ise aşağıda açıklanan çeşitli şekillerde olabilir;

- Tekil Kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın, hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir. Örneğin ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke karşılık noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akışı yükleri bulunmaktadır.

- Yayılı Kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca ya da bir alanda etkili olurlar.
- Kütle Kuvvetleri: Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

1.1.7.6 Çözüm ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Analiz edilen sisteme yada probleme ait sonlu elemanlar metodu ile oluşturulan denklem takımlarının çözümünde eliminasyon yöntemi gibi çeşitli matematiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Öte yandan ele alınan probleme ve malzeme özelliklerine bağlı olarak sonlu elemanlar analizinde kullanılacak denklem takımları çok yüksek sayıda değişken içerebilir. Bu denklem takımlarının çözümü bilgisayar programlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bilgisayar donanım ve yazılımlarındaki gelişmeler ile birlikte sonlu elemanlar modeli ve analizinin bilgisayar programları ile yapılması hızla yaygınlaşmıştır. Günümüzde kullanılan hazır yazılımlar ve yüksek kapasiteli gelişmiş bilgisayarlar sayesinde karmaşık yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi ve çözümlenmesi daha kolaydır. Sonlu elemanlar teorisini kullanan ve mühendislik uygulamalarında yapısal sistemlerin modellenmesi ve çözümlenmesinde sıkça kullanılan bazı önemli ticari yazılımlar aşağıda verilmiştir.

*ABAQUS	*ADINA	*ALGOR
*ANSYS	*Calculix	*COMSOL Multiphysics
*COSMOS	*DUNE	*Femap
*HyperMesh	*LS-DYNA	*MARC
*NASTRAN	*PATRAN	*STRAND7

Bilgisayar programları ile yapılan analizlerin sonuçları veri ve grafikler şeklinde incelenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar kendi içerisinde mantıksal uyumluluk açısından değerlendirilebileceği gibi deneysel verilerden elde edilen sonuçlar ile de karşılaştırılabilir. Örneğin bir gerilme probleminde incelenen yapısal modelin düğüm noktaları ve elemanlarına ait gerilme ve şekil değiştirme dağılımları grafiksel olarak incelenebilir ya da elde edilen gerilme ve uzama değerleri daha önceden yapılmış deneysel veriler ile karşılaştırılarak yorumlanabilir.

Sonuç olarak, sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonucunda elde edilen veriler kendi içerisinde ve deneysel değerler ile uyumlu ise, teorik sonuçlar

mühendislik uygulamalarında ve/veya araştırmalarda kullanılabilir. Eğer uygun sonuçlar elde edilememişse, problemim Şekil-1.39'da verilen işlem basamakları göz önüne alınarak tekrar değerlendirilmesi gerekir.

1.1.7.7. Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanılmasının Avantajları

Sonlu elemanlar metodunun mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılması yöntemin uygulanmasındaki avantajlardan kaynaklanmaktadır. Karmaşık bir problemin daha küçük parçalara bölünerek çözülmesinde sonlu elemanlar metodunu kullanmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir (Moaveni, 2007);

- Sonlu elemanlar yöntemi, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi birçok alanda kullanıma sahiptir.
- Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeni ile analizi yapılacak katı cisim çok karmaşık bile olsa bu cisimi temsil edebilir.
- Eleman boyutları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Böylece önemli şekil değiştirmeler beklenen bölgelerde daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölgeleri büyük elemanlara bölünerek işlem hızı arttırılabilir.
- Katı yapıların değişik malzeme özellikleri (lineer ve nonlineer davranış vb.) ve düzgün olmayan geometrileri de yöntem ile değerlendirilebilir.
- Problem sınır şartları kolayca uygulanabilir.
- Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.

Sonlu elemanlar metodunun kullanımdaki bu avantajlarının yanı sıra kullanıcıların karşılaşılabilecekleri bazı dezavantajları ise şu şekildedir.

- Model geometrisinin oluşturulması ve sonuçların değerlendirilmesi konu hakkında bilgi ve tecrübe gerektirir.
- Analizlerde kullanılan çok sayıda verinin bilgisayar yazılımlarına aktarılmasında hata yapma olasılığı yüksektir.

1.2 Önceki Çalışmalar

Dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların karakterleri, lif özelliklerine (lif tipi, lif inceliği, lif mukavemeti, lif uzaması, liflerin oryantasyonu vb.) ve üretim parametrelerine (tülbent birleştirme metodu, kumaş ağırlığı, kumaş kalınlığı, bitim işlemleri vb) bağlı olarak değişmektedir. Öte yandan çeşitli uygulama alanlarına sahip dokusuz yüzeyler üretim ve kullanım sırasında birçok farklı yükün etkisine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle dokusuz yüzey kumaşların deformasyonu sırasında kopma, uzama, kayma, sürtünme, eğilme, burkulma gibi birçok mekanizma oluşmaktadır. Bu mekanizmaların birbirleri ile etkileşimi sonucu kumaşların mekanik olarak karakterize edilmesi daha da zorlaşmaktadır. Bununla birlikte dokusuz yüzey kumaşların çeşitli yükler altındaki mekanik davranışları araştırmacılar için her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur. Çok sayıda araştırmacı, dokusuz yüzey kumaşları çeşitli yükler altındaki davranışlarını inceleyerek, nihai ürünün kullanım anındaki mekanik özelliklerini hammadde ve ürün parametreleri üzerinden önceden tahmin etmek için çeşitli teorik yaklaşımlar geliştirilmişlerdir. Problemin karmaşık olması nedeni ile genellikle her bir yaklaşım deformasyonun bazı özel mekanizmasının dikkate alınırken diğerlerini ihmal etmiştir. Dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerinin matematiksel olarak modellenmesi ve mekanik davranışının önceden tahminlenmesine yönelik ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda gerçekleşmiştir.

Baker ve Peterson (1960), dokuma ve dokusuz yüzey kumaşların deformasyon mekanizmalarını karşılaştırdıkları çalışmalarında, dokusuz yüzey kumaşlar için teorik bir model oluşturmuşlardır. Çalışmalarında giysilik kumaşlarda kullanılan ince dokumalara benzeyen dokusuz yüzeyleri ele alan araştırmacılar, dokusuz yüzeylerin mekanik davranışlarının lif özellikleri ile bağlantı noktası karakterinin kompleks etkileşimine bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Dokusuz yüzey kumaş davranışların tülbent yapısı ve lif özellikleri kullanılarak önceden nasıl belirlenebileceğini ele alan araştırmacılar bağlantı noktası özelliklerinden ziyade lif özelliklerinin kumaş özelliklerine etkisini incelemeyi tercih etmişlerdir. Araştırmacılar çalışmanın amacını şu maddeler ile özetlemişlerdir.

- Dokusuz yüzey kumaşların çeşitli doğrultulardaki malzeme sabitlerini önceden belirleyebilmek için elastik ortotropik malzeme teorisini kullanmak.
- Lifler için verilen gerilme-uzama oranı özelliklerinden ve liflerin tülbent içindeki dağılımlarından dokusuz yüzey kumaşların çeşitli doğrultulardaki malzeme sabitlerini tahmin etmek.

Bu amaçları gerçekleştirmek için bir lif ağ teorisi geliştiren araştırmacılar, teoride dokusuz yüzey kumaşların tek eksenli gerilme altında kenarları paralel hareket eden bir seri “hücre üniteden” oluştuğu, bağların sadece bu ünitenin kenarlarında olduğu, bağlar arasındaki lif kısımlarının düz olduğu, bağların kendilerinin uzamadığı ve liflerden daha mukavim olduğu kabullerini yapmışlardır. Araştırmacılar oluşturdukları lif ağ teorisini gerçek kumaşlara da modifiye etmeye çalışmışlardır. Backer ve Petterson tarafından oluşturulan bu teorik model dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerinin tahminlenmesinde kullanılan modellerin temelini oluşturmuştur. Daha sonra yapılan birçok çalışma bu teori üzerine kurulmuştur.

Hearle ve Stevenson (1963, 1964), yaptıkları bir dizi çalışmada Baker ve Peterson (1960) tarafından geliştirilen teoriyi kumaş bağlantı noktaları arasında yer alan liflerin kıvrımlarını da dikkate alarak genişletmiş ve iyileştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında kumaş gerilme özellikleri, lif oryantasyon ve lif kıvrım ölçümlerinin nasıl gerçekleştirildiğini ayrıca açıklamışlardır. Araştırmacılar, lif başlangıç modülünün belirlenmesinde önemli etkisi olan lif kıvrımını göz önünde bulundurarak farklı yapılarıdaki dokusuz yüzey kumaşlarda teorik hesaplamalar yapmışlar ve bunları deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Çalışmada kimyasal tülbent birleştirme yöntemi ile viskoz liflerinden üretilmiş kumaşlar kullanılmıştır. Kumaşların elde edilmesinde kullanılan tülbent birleştirme işleminde farklı kimyasallar seçilerek, değişik yapıdaki dokusuz yüzeyler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen gerilme-uzama oranı eğrilerinin, deneysel olarak elde edilen eğriler ile genel olarak uyumlu olduğunu vurgulayan araştırmacılar, teorik sonuçlarda meydana gelen sapmaların kimyasal bağlayıcının uzamaya etkisinden ve bağlantı noktası kopmalarından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

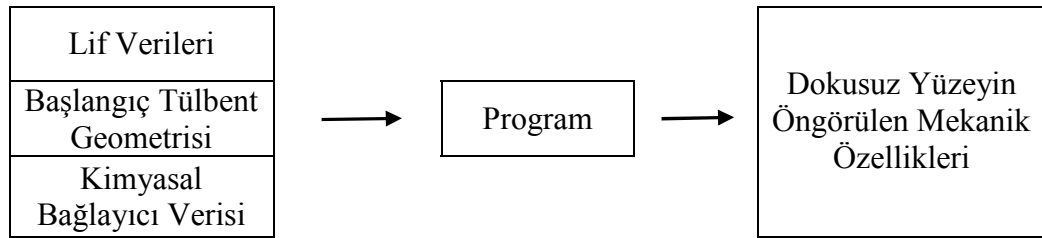
Hearle ve Newton (1967), dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerini tahmin etmek için yaptıkları çalışmada enerji metodunu kullanmışlardır. Çalışmalarında enerji metodunun genel formülasyonlarını dokusuz yüzey kumaşlar için uyarlayan araştırmacılar, kullandıkları temel teorik denklemlerin ayrıntılarını açıklamışlardır. Teorik yaklaşımda enerji metodunun kullanılmasının, daha önceki modellerde kullanılan gereksiz kabullerin yapılmasını ortadan kaldırdığını belirten araştırmacılar, düzenledikleri denklemlerin dokusuz yüzey kumaşların gerilme özelliklerini açıklamak için daha önce geliştirilen formüllerin daha doğru bir ifadesi olduğunu belirtmişlerdir. Bu genel denklemlerin, kuvvet analizlerinin zor yapılabildiği problemlerin çözümünde kullanılabileceğini ve böylece dokusuz yüzey kumaşlar gibi karmaşık yapıların mekanik davranışlarının anlaşılmasına kolaylık sağlayabileceğini vurgulayan araştırmacılar, mevcut teorinin geliştirilmesi ile daha karmaşık ağ yapılarının çözümlenmesine de yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar daha sonra yaptıkları diğer bir çalışmada (Hearle ve Newton, 1968) ise enerji metodunu kullanarak geliştirdikleri teorik modelin gerçek kumaşlara uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla teorinin matematiksel çözümlemesini yapabilecek bir bilgisayar programı oluşturarak, elde ettikleri verileri gerçek kumaşlarda belirledikleri deneysel veriler ile kıyaslamışlardır. Çalışmada kimyasal bağlama yöntemi kullanılarak üretilmiş ticari kumaşlar kullanılmıştır. Kumaşlar çeşitli liflerden oluşmakta ve farklı oranlarda bağlayıcı madde içermektedirler. Dokusuz yüzey kumaşları oluşturan lif ve bu liflerin yerleşim verilerini kullanarak elde ettikleri teorik gerilme-uzama oranı eğrilerini, deneyler sonucu belirlenen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslayan araştırmacılar, lif yerleşimlerinin kumaş davranışını nasıl etkilediğini açıklamışlar ve analizlerde yüksek uzama oranlarında bağlayıcının (yapıştırıcı) uzama etkisinin de göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Hearle ve Ozlansav (1979) tarafından kimyasal tülbent bağlama yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlarda sonraki yıllarda yapılan bir çalışmada, önceki modellerde dikkate alınmayan bağlantı noktası (yapıştırıcı) deformasyonu da dikkate alınarak teorik yaklaşım biraz daha geliştirilmiştir.

Hearle ve ark. ayrıca aynı yıllarda yaptıkları bir dizi çalışmada (Hearle ve Sultan, 1967,1968; Hearle ve Husain, 1971) iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerine etki eden parametreleri de incelemiştirlerdir. İğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzeylerin mekanik özelliklerini hammadde, lif tipi, tülbent tipi, iğne tipi, iğneleme ve bitim işlemleri gibi birçok üretim parametresinin etkilediğini belirten araştırmacılar, mekanik davranışın belirlenmesi aşamasındaki en önemli parametrenin ise liflerin birbirleri ile etkileşimleri ve sürtünme özellikleri olduğunu vurgulamışlardır.

Simülasyon tekniklerinin ve bilgisayar modellerinin gelişmesine paralel olarak dokusuz yüzey kumaşların davranışlarını tanımlamak için geçmişte oluşturulan teorik altyapı kullanılarak geliştirilen bilgisayar yazılım ve programlarının sayısında da zamanla artış olmuştur.

Brinton ve ark. (1983, 1984a, 1984b), yaptıkları bir dizi çalışmada dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerini tahminlemek için kumaşın temel mikroskobik görüntüsünü tanımlayan bilgisayar simülasyon tekniklerinin kullanılabileceğini göstermişlerdir. Araştırmacılar çalışmanın algoritmasını şu şekilde tanımlamışlardır.



Şekil 1.41 Brinton ve ark. tarafından oluşturulan programın algoritması

Şekil-1.41’de verilen bu algoritmanın uygulanabilmesi için araştırmacılar uygun bir kumaş modeli geliştirmiştir. Geliştirilen kumaş birebir gerçek kumaşlar ile örtüşmemektedir çünkü matematiksel uygunluk ön planda tutulmuştur. Lif özellikleri, liflerin geometrik yerleşimi ve kimyasal bağlayıcı verileri göz önüne alınarak matematiksel çözümler yapan bir program yazılmış ve program yardımıyla kumaş özellikleri tahminlenmeye çalışılmıştır. Bağ noktalarının kopması ve kumaş deformasyonunun inceleyen araştırmacılar, gerçek kumaşlarda meydana gelen

lif kıvrılması, lif kopması, bağlantı noktası kopması ve bağlantı noktası esnemesi gibi birçok önemli faktörünün ele alınması ile daha doğru sonuçlar elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Bu parametrelerin devreye girmesinin programlamada yeni detayları ortaya çıkaracağını belirten araştırmacılar, bu çalışmada sadece bilgisayarlı simülasyon metodlarının dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerinin tahminlenmesindeki başarısını göstermeye çalışmışlardır.

Jirsak ve ark. (1993), çalışmalarında tekstil yapılarının tasarımında da bir araç olarak kullanılan teorik modellerin aşamalarını analiz ederek, dokusuz yüzey kumaşlar için iki boyutlu bir teorik modelin oluşturulmasını açıklamışlardır. Araştırmacılar teorik modellerin;

- Modelin oluşturulması,
- Model parametrelerini belirleyen olasılıklarının tespit edilmesi ve
- Çeşitli tekstil materyalleri ve deformasyon tipleri için model geçerliliğinin doğrulanması aşamalarından oluştuğunu belirtmişlerdir. Model geçerliliğini sınarken negatif bir sonuç alınmışsa tekrar başlangıca dönülmesi gerekliliğini vurgulayan araştırmacılar, eğer model geçerliliğe sahip ise,
 - Deneysel verileri kullanarak model parametreleri ile deney parametreleri arasındaki ilişkinin ve
 - Bilgisayar denemeleri yardımı ile farklı deformasyonlar için model parametreleri ile model özellikleri arasındaki ilişkinin bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Araştırmacılar bu temel aşamaları kullanarak dokusuz yüzey kumaşlar için iki boyutlu bir model oluşturmuş, bu modelin parametrelerini ve parametrelerin etkileşimi sonucu oluşan mekanizmaları incelemişlerdir. Çalışmada, ayrıca modeldeki bağlanma noktalarının, gerilme-şekil değiştirme özelliklerine, bilgisayardaki çözüm zamanına ve modelin stabilliğine etkisi incelenerek tekstil malzemeleri için bilgisayarlı simülasyon tekniklerinin metodolojisi tartışılmıştır.

Zaman içerisinde görüntüleme tekniklerinin ilerlemesine bağlı olarak çalışmalar lif oryantasyonun bu teknikler ile belirlenmesi ve uygulanan bir deformasyonda liflerin nasıl davrandığı üzerine yoğunlaşmıştır. Pourdeyhimi ve ark. (1996a, 1996b, 1997a, 1997b, 1999) yaptıkları bir dizi çalışmada, dokusuz yüzey kumaşlarda lif oryantasyonunu karakterize etmek için görüntü analizi tekniklerini kullanmışlardır. Bu amaçla öncelikle farklı dokusuz yüzey kumaş görüntüleri yaratabilen bir simülasyon şeması geliştirmişlerdir. Serinin daha sonraki çalışmaların da ise; direk lif izleme yöntemi, görüntünün iki boyutlu fourier analizinden power spektrum yöntemi, flow-field analiz yöntemini kullanarak dokusuz yüzeylerde lif oryantasyonunu saptamaya çalışmışlardır. Seriyi, optik tarama metodları ile görüntü analizi metodlarını karşılaştırarak sonlandırmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında özel olarak üretilmiş gerçek kumaşları da dikkate alarak değerlendirme ve kıyaslamalar yapmışlardır.

Bais-Singh ve Goswami (1995), yaptıkları çalışmada spun-bonded dokusuz yüzey kumaşların gerilme özelliklerini tahmin etmek için yeni bir teori geliştirmişlerdir. Teorinin oluşturulmasında veri olarak dokusuz yüzey kumaşları oluşturan liflerin gerilme-uzama davranışları, liflerin oryantasyon açısı dağılımları, kumaş poisson oranları ve kumaş kayma gerilmeleri kullanılmıştır. Teorinin matematiksel çözümlemesi ise tabakalı kompozit yapıdakine benzemektedir. Teorik çözümlemeler araştırmacılar tarafından yazılan bir bilgisayar programında gerçekleştirilmiştir. İki adet spun-bond kumaş için elde edilen deneysel ve teorik gerilme-uzama oranı eğrilerini karşılaştırmalı olarak inceleyen araştırmacılar, çalışmada kullanılan kumaşlar için teorinin iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, teorik analiz verilerinin saptanmasında tek eksenli ve iki eksenli çekme testleri sonucu elde edilen poisson oranlarından yararlanılmıştır. Bu iki metodun karşılaştırılması ise ayrıca yapılmıştır. Bais-Singh ve ark. (1996), diğer bir çalışmada daha önce oluşturdukları teorik modeli kullanarak, spun-bond dokusuz yüzey kumaşlarda tek eksenli gerilme testinde çekme yönüne dik yönde oluşan daralmaları karakterize etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla çekme yönündeki ve çekme yönüne dik yöndeki uzama oranlarını teorik ve deneysel yaklaşımlar ile hesaplayarak poisson oranlarını belirlemişlerdir. Araştırmacılar çekme yönündeki

uzama ve çekme yönüne dik yöndeki daralmayı aynı anda ölçebilmek için tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilen kumaşları bölmelere ayırmış ve yüksek çözünürlüklü kamera ile testleri kaydetmişlerdir. Elde ettikleri verileri görüntü analizi teknikleri ile işleyerek çekme yönüne dik yönde farklı oranlarda oluşan daralmaları hesaplamaya çalışmışlardır. Bais-Singh ve Goswami (1998), ayrıca geliştirdikleri teoriyi spun-bond dokusuz yüzey kumaşların iki eksenli gerilme testlerindeki deformasyonu tahminlemek için de kullanmışlardır. Model iki eksenli çekme testinde çekme yönüne dik yöndeki gerilmeleri daha iyi tahminleyebilmiştir. Çekme yönündeki yüksek uzama oranlarında ise gerilmeler tam olarak tahminlenememiştir. Dolayısı ile liflerin yeniden yönlenebildiği az sayıda bağlantı noktası ile birbirine bağlanmış kumaşlardaki gerilmeleri tahminlemek için model yeterli bulunmamıştır. Bais-Singh ve ark. (1998), aynı yıl yaptıkları diğer bir çalışmada ise spun-bond dokusuz yüzey kumaşlarda tek eksenli çekme deneylerinde oluşan gerilme-şekil değiştirme bölgelerinin uniform olmadığını göstermek için analitik ve deneysel yöntemleri kullanmışlardır. Kumaştaki tek eksenli gerilme altında uniform olmayan bu gerilme-şekil değiştirme olayını simüle etmek için sonlu elemanlar modelini kullanan araştırmacılar, teorik çözümleme için bir sonlu elemanlar formülasyonu geliştirmişlerdir. Modelin matematiksel çözümlemesinin temelini ise araştırmacılar tarafından önceki çalışmalarında da kullanılan tabaka teorisi oluşturmaktadır. Modelde veri olarak liflerin mekanik özellikleri ile kumaş içerisindeki dağılımlarını kullanan araştırmacılar, çözümlemeleri gerçekleştirmek için oluşturdukları malzeme modelini sonlu elemanlar paket programı ABAKÜS'e aktarmışlardır. Çözümlemelerde liflerin lineer olmayan gerilme-uzama oranı eğrileri de göz önünde bulundurulmuştur. Farklı sayıda elemanlardan oluşan geometrik modeller kullanan araştırmacılar eleman sayısındaki değişimin çözüme etkisini de incelemişlerdir. Eleman sayısındaki artış ile modelin daha hassas değerler hesaplandığını, ancak belirli bir eleman sayısından sonra hesaplanan değerlerin çok fazla değişmediğini belirten araştırmacılar, uygun çözüm için gerekli optimum eleman sayısını belirlemeye çalışmışlardır. Elde ettikleri teorik analiz sonuçlarını inceleyen araştırmacılar, model üzerinde uniform olmayan bir gerilme dağılımı oluştuğunu belirterek, köşeler ve orta nokta gibi bazı kritik noktalardaki gerilme-uzama davranışını açıklamaya çalışmışlardır. Aynı zamanda gerilme birikimi olan diğer

noktaları da inceleyen araştırmacılar, oluşturdukları model ile kumaşlarda çekme testinde oluşan yanal daralmaların ve uniform olmayan gerilme dağılımının ilk defa hesaplanabildiğini vurgulamışlardır.

Liao ve ark. (1997), benzer çalışmalarında spun-bond dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarını belirlemek için sonlu elemanlar metodu ve tabakalı kompozit teorisini kullanarak yeni bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, modellerinde dokusuz yüzey kumaşları oluşturan liflerin mukavemet özellikleri ve kumaş içerisindeki oryantasyon açılarından yararlanmışlardır. Çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar yapısal matrisi lif özellikleri esaslı bir matristir ve araştırmacılar bu matrisin elemanlarını oluşturan çekme yönüne dik yöndeki elastisite modülü, kayma gerilmesi ve poisson oranlarını lifler için sıfır olarak kabul etmişlerdir. Dolayısı ile çekme yönündeki lif elastisite modülleri matrisin tek sabiti olarak kalmıştır. Kumaş içerisinde farklı doğrultularda yerleşmiş liflerin çekme yönündeki elastisite modülünü hesaplamak ve liflerin nonlinear gerilme-uzama oranı eğrilerini dikkate alarak başlangıç verilerini belirlemek için bir yaklaşım da geliştiren araştırmacılar, sonlu elemanlar analizini C dili ile yazdıkları programda gerçekleştirmişler ve çıktı grafiklerini Matematika programında oluşturmuşlardır. Elde edilen teorik çözümlerinin değerlendirilmesi 110 ve 210 gr/m² ağılığındaki iki spun-bond kumaşın deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Birbiri ile uyumlu deneysel ve teorik kumaş gerilme-uzama oranı eğrileri elde eden araştırmacılar, kumaş üzerinde oluşan gerilme dağılımı farklılıklarını da incelemişlerdir. Modelin veri olarak poisson oranı ve kayma gerilmelerini kullanmadan hesaplama yapmasının, ölçümlerde ve teorik hesaplamalarda işlem süresini kısalttığını belirten araştırmacılar, modelin kumaştaki relaksasyon ve gerilme dağılımı değişimlerini göz önüne aldığını vurgulamışlardır. Liao ve Adanur (1999), tarafından yapılan başka bir çalışmada ise dokusuz yüzey kumaşların deforme olma ve kopma aşamalarını analiz etmek için bilgisayar destekli bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada da tek lif özellikleri ve liflerin kumaş içerisindeki yerleşimini veri olarak kullanan araştırmacılar, lokal deformasyon olayı, liflerin kopma pozisyonu dağılımı ve kopma oluşturma eğilimi gibi deformasyon

karakteristiklerini tartışmışlar ve analiz etmeye çalışmışlardır. Dokusuz yüzey kumaşlarda çekme testlerinde oluşan kopmaların;

- Bağlantı noktası kopuşu,
- Lif kopuşu ve
- Lif bölümleri kaymasından kaynaklanabileceğini belirten araştırmacılar, bu çalışmalarında lif kısımlarından kaynaklanan kopuşları incelemiş ve teorik olarak analiz etmişlerdir.

Dokusuz yüzeylerin tek eksenli çekme testindeki mekanik davranışını simüle etmek için daha önceki çalışmalarında uyguladıkları yapısal model ve sonlu elemanlar analizini kullanan araştırmacılar, bu çalışmalarında kumaş bozunması ve kopma aşamalarını analiz etmek için iteratif hesaplama prosedürünü de kullanmışlardır. Tek eksenli çekme testi boyunca farklı açılarda yönlemiş liflerin, farklı gerilme-uzama davranışını sergiledikleri ve çekme yönüne dik yönde oluşan daralmanın da kumaş üzerinde farklı gerilme bölgeleri oluşmasına neden olduğunu belirten araştırmacılar, dokusuz yüzeylerin çekme testi sırasında farklı değerler alabilen lif elastisite modülünü doğru olarak hesaplayabilmek için relaksasyon prosedürünü kullanmışlardır. Oluşturdukları modeli kullanarak elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile karşılaştıran araştırmacılar, modelin hem düşük uzamaları hem de orta ve yüksek uzamaları tahminleyebildiğini belirtmişlerdir. Tek eksenli gerilme testinde kumaş üzerinde oluşan lokal deformasyonları da inceleyen araştırmacılar, lif yerleşimi ve lif oryantasyon açısına göre değişen deformasyonları sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemişlerdir. Başlangıçta lifleri düz olarak kabul eden yazarlar daha sonra yaptıkları başka bir çalışmada (Adanur ve Liao, 1999) lif kıvrımlarını da dikkate almış ve modellerini geliştirmişlerdir.

Bergado ve ark. (2001), eksenel simetrik yükleme koşulları altında iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların davranışını inceledikleri çalışmalarında, jeotekstillerde uygulanan geniş enli çekme testi, patlatma testi gibi eksenel yükleme testlerini ve bunların birbirleri ile ilişkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında filament polipropilen liflerinden iğneleme yöntemi ile üretilmiş üç

farklı gramajda jeotekstil kullanan araştırmacılar, tüm kumaşlara geniş enli çekme testleri ve patlama testlerini uygulayarak bu iki test sonuçları arasında nümerik bir ilişki saptamayı amaçlamışlardır. Ayrıca patlama testlerinin laboratuvar ve saha koşullarında olmak üzere iki farklı durumunu inceleyen araştırmacılar, toprak içerisinde gerçekleştirilen modifiye patlama testi için bir sonlu elemanlar modeli oluşturarak, PLAXIS sonlu elemanlar programında teorik analizler gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizleri, jeotekstil kullanılan uygulamalarda sistemin taşıma kapasitesinin, jeotekstil kullanılmayan uygulamalara göre arttığını göstermiştir.

Kim ve ark. (2000), dokusuz yüzeylerde yük-uzama deneyleri sırasında oluşan yapısal değişimleri karakterize edebilmek için, stapel polipropilen liflerinden ısıl bağlama yöntemi (kalandırlama) ile farklı bağlama sıcaklıklarında üretilmiş kumaşları incelemişlerdir. Dokusuz yüzey kumaşların lif oryantasyonu, bağlantı bölgesi uzama oranı, birim ünitenin uzama oranı ve kayma şekil değiştirmesi gibi yapısal ve deformasyon parametrelerinin yük altındaki davranışını inceleyen araştırmacılar, bu amaçla çekme testi sırasında kumaşları izleyen yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanmışlardır. Elde ettikleri görüntüleri değerlendiren araştırmacılar sonuçların dokusuz yüzey kumaşlarda kopma mekanizması hakkında fikir verebileceğini belirtmişlerdir. Dokusuz yüzey kumaşlarının deformasyon mekanizmasının yapısal anizotropi ve bağlantı noktaları anizotropisi tarafından belirlendiğini vurgulayan araştırmacılar, ayrıca farklı bağlama sıcaklıklarının kumaşların deformasyon mekanizması üzerinde çok az veya hiç etkisi olmadığını açıklamışlardır.

Kim ve Pourdeyhimi (2001), ısıl bağlama tekniği ile filamentlerden üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik performanslarını modelledikleri çalışmalarında, bağlantı noktası geometrisi ve dağılımını ele alarak yeni bir yaklaşım yapmışlardır. Araştırmacılar teorik analizlerde lif gerilme-uzama oranı özelliklerini, lif oryantasyon dağılımını ve bağlantı noktası geometrisinin şekli, aralığı, frekansı gibi detaylarını başlangıç verisi olarak kullanmışlardır. Lif oryantasyon açısı dağılımını gerçek kumaşlar üzerinden görüntü analizi yöntemi ile belirleyen araştırmacılar,

bağlantı noktası dağılımını da belirlemek için bu yöntemi kullanmışlardır. Görüntü analizi yönteminde bağ noktası ile ilgili tam olarak belirlenemeyen bazı detaylarını elde etmek için ise simülasyon yöntemlerini kullanmışlardır. Simülasyon yöntemi aynı zamanda yapısal detayları özelleştirmek içinde kullanılmıştır. Görüntü simülasyonu algoritması, ara-yüzü ve uzama oranı artışına göre teorik çözümlemeyi yapan programlar C++'da yazılmıştır. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçları, kullandıkları başlangıç parametrelerine göre değerlendirmişler ve simülasyon tekniğinin deneysel olarak belirlenmesi gereken bazı parametreleri elimine ederek çözümü kolaylaştırdığını belirtmişlerdir. Kim ve ark. (2001) aynı yıl yaptıkları diğer bir çalışmada ise ısı bağlama tekniği ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerindeki anizotropiyi deneysel gözlemler ile incelemişlerdir. Çalışmada farklı işlem koşulları (sıcaklık, basınç ve bağlanma alanı) kullanılarak üretilmiş bir dizi dokusuz yüzey kumaşta elastisite modülü, çekme testindeki maksimum gerilme, maksimum gerilmedeki uzama, kayma modülü ve eğilme rijitliği gibi düzlemdeki mekanik özellikler için anizotropik davranış değerlendirilmiştir. Lif dağılımını belirlemek ve kopma mekanizmasını tanımlamak için görüntü analizi tekniğini kullanan araştırmacılar, bağlama alanı ve bağlama sıcaklığının tüm mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ısı bağlama yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerinin basit bir bileşke model ile sayısal olarak da saptanabileceğini göstermişlerdir.

Kim (2004a), daha sonra yaptığı başka bir çalışmada ısı bağlama tekniği ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların özelliklerini tahminleyebilmek için ortotropik simetri teorisini farklı açılarda kullanarak değerlendirmeler yapmıştır. Dokusuz yüzey kumaşlar için oluşturulan teorik matrislerdeki sabitleri bulmak için, çalışmada polinomial regresyon analizini kullanan araştırmacı kumaşların düzlem gerilme durumunda tahminlenen sabitlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Araştırmacı aynı yıl yaptığı diğer bir çalışmada (Kim, 2004b) ise lif oryantasyon açısını görüntü analizi yöntemi ile belirleyerek ısı bağlama ile üretilmiş kumaşlarda lif oryantasyon dağılımı fonksiyonu ile mekanik anizotropi ilişkisini incelemiştir. Lif oryantasyon açısının kumaşların anizotropik davranışı üzerinde önemli etkisi olduğunu belirten araştırmacı, çekme testinde uygulanan yükün yönüne

göre oluşan farklı yük transfer mekanizmasının da bu kumaşlarda mekanik anizotropiye neden olduğunu açıklamıştır.

Lin ve ark. (2003), ısı bağlama yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerine lif yerleşiminin etkisini inceledikleri çalışmalarında, anizotropinin dokusuz yüzey kumaşların yapısal özellikleri ve uygulamaları için önemli bir parametre olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerinin lif inceliği, lif uzunluğu ve lif yerleşimi gibi hammadde özelliklerine ve üretim tekniği parametrelerine bağlı olduğunu belirten araştırmacılar, ısı bağlama yöntemi ile farklı oryantasyon açılarında üretilmiş 50 gr/m² den düşük ağırlıktaki kumaşların çekme mukavemeti, yırtılma mukavemeti ve patlama mukavemeti gibi özelliklerini incelemiştir. Paralel serim ile üretilmiş kumaşlarda çekme testlerinde makina yönündeki mukavemetin, makina yönüne dik yöndeki mukavemete oranı 4 ün üzerinde, rasgele serimde ise 3'den düşük bulunmuştur. Trapezoid yırtılma testinde rasgele serim için makina yönü ve makina yönüne dik yön arasındaki oran 5'in üzerinde bulunmuştur. Patlama mukavemeti ise rasgele serimde paralel serime göre daha düşük elde edilmiştir.

Limen ve Warner (2005), çalışmalarında kimyasal bağlama yöntemi ile polipropilen liflerinden üretilmiş spun-bond dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu kumaşların gerilme ve uzama davranışlarını tahminleyebilmek için lif, bağlayıcı kimyasal ve tülbent özelliklerini dikkate alan kafes sistemi esaslı bir modeli sonlu elemanlar yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır. Araştırmacılar sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen gerilme-uzama oranı eğrilerinin deneyler ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Rawal A. ve Anandjiwala R. (2006) iğneleme yöntemi ile üretilmiş çok fonksiyonlu jeotekstillerin üretim parametreleri ile özellikleri arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmalarında, jeotekstillerin üretim parametrelerini optimize etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla iğneleme ile üretilmiş dokusuz yüzeylerin özelliklerini tahminleyebilmek için besleme hızı, iğneleme frekansı, iğne dalış derinliği gibi üretim parametreleri arasında Fourier serileri ve çoklu regresyon teknikleri

kullanılarak bir dizi ampirik ilişki kurmuşlardır. Bu parametrelerin jeotekstillerin geometrik ve hidrolik özelliklerine etkisini de inceleyen araştırmacılar, iğne dalış derinliğinin artmasına ve/veya iğneleme frekansına bağlı olarak liflerin yatay konumdan dikey konuma doğru yönelmelerinin jeotekstil özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Bu teorik yaklaşım ile, aranan jeotekstil özelliklerine göre üretim parametreleri optimize edilerek, çok fonksiyonlu jeotekstiller üretilebileceğini belirten araştırmacılar, lif oryantasyonu ve gözenek açıklığı gibi geometrik özelliklerin özellikle her hangi bir drenaj ve filtrasyon uygulamasında kullanılan jeotekstile göre kontrol ve modifiye edilebileceğini açıklamışlardır.

Rawal ve ark. (2007), yaptıkları diğer bir çalışmada ısıl bağlama (sıcak hava ile) yöntemi ile %100 poliester ve bikomponent poliester liflerinden üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada gerilme, eğilme, kayma gerilmesi ve sıkışma özellikleri incelenen dokusuz yüzeylerin ayrıca lif oryantasyon açıları da ölçülmüştür. Çekme testlerinde kavrama yöntemini kullanan araştırmacılar, eğilme ve sıkıştırma testlerinde KES-F sistemini kullanmışlardır. Kayma gerilmesi ölçümlerinde ise 45⁰ye kadar olan çerçeve testini uygulamışlardır. Lif oryantasyon açısı ölçümleri, lif takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan iki boyutlu görüntü analizi tekniği ile yapılmıştır. Lif oryantasyon ölçümlerinde kumaş kesitindeki liflerin doğrultuları saptanmış ve ölçümler sonucunda karşılaşılan belirsizlikler ve hatalar incelenerek tartışılmıştır. Numune kumaşlarda, lif oryantasyon açısı ile değişen çekme ve eğilmenin anizotropik karakteri de incelenmiştir. Araştırmacılar, basit bir mikro-mekanik model ile de dokusuz yüzey kumaşların çeşitli test yönleri için aksenal yükleme atlındaki başlangıç gerilme tepkisini tahminlemeye çalışmışlardır. Farklı açılardaki çekme testleri için değişik teorik sonuçlar elde edildiğini belirten araştırmacılar, gerilme-uzama oranı eğrileri açısından sıfır derece ile yapılan çekme testlerinde daha uyumlu sonuçlar elde edildiğini vurgulamışlardır.

Gutier ve ark. (2007), dokusuz yüzey jeotekstillerin tek eksenli gerilme altındaki anizotropik mekanik davranışlarını inceledikleri çalışmalarında kumaşların termomekanik özelliklerini ele almışlardır. Kumaşlarda tek eksenli gerilme testinde yük ve uzamanın yanı sıra üçüncü bir parametre olarak örnek yüzeyindeki sıcaklıkları da ölçen araştırmacılar böylece lif ve filamentlerin sürtünme özelliklerini de gözlemleyerek, kumaş deformasyonu sırasında meydana gelen anizotropik mekanik davranışı çeşitli dokusuz yüzey kumaşlar için tanımlamaya çalışmışlardır. Ölçümlerde tek eksenli çekme testi dijital ve termal kameralar ile kaydedilerek kumaşlarda meydana gelen gerilme dağılımları ve kumaş yüzeylerinin termal haritası elde edilmiştir. Çalışmalarında numune olarak iğneleme yöntemi ve ısı bağlama yöntemi ile üretilmiş iki dokusuz yüzey jeotekstili inceleyen araştırmacılar, iğneleme yöntemi ile üretilmiş kumaşlarının gerilme dağılımı ve sıcaklık dağılımının anizotropik özellik gösterdiğini, ısı bağlama yöntemi ile üretilen kumaşları ise daha izotropik özellikte olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bunun sebeplerini üretim tekniklerindeki farklılık ve ısı bağlanmış kumaşlarda bağlantı noktalarının eriyerek birbirine tutunduğu için tamamen hareketsiz olmalarına bağlamışlardır.

Yukarıda özetlenen önceki çalışmalarda görüldüğü gibi, tek lif özellikleri ve liflerin kumaş içerisindeki yerleşimlerini kullanan teorik yöntemler ile dokusuz yüzey kumaşların mekanik davranışları önceden belirlenebilmektedir. Bu amaçla çeşitli araştırmacılar tarafından oluşturulan teorik modellerin gerçek kumaşlara uyarlanması ve modellerin çözümlenmesinde genellikle bilgisayar destekli programlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu da bu modellerin oluşturulması ve çözümlenmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir.

Bu konuda yapılan çalışmalarda, araştırmacılar tarafından materyallerin uniform olmayan davranışları, liflerin çekme testlerindeki yeniden yönlenmeleri ve lif-lif etkileşimleri gibi bazı parametreler genellikle ihmal edilerek modeller oluşturulmuş ve/veya çözümlenmeler yapılmıştır. Ayrıca çalışmaların birçoğunda, yapısal karakterizasyonu genellikle kolay belirlenebilen ısı bağlama veya kimyasal bağlama teknikleri ile üretilmiş düşük gramajlı kumaşlar kullanılmıştır. Günümüzde jeotekstil uygulamalarında en fazla kullanılan ürün olan iğneleme yöntemi ile stapel liflerden

üretmiş dokusuz yüzey kumaşlar ise yukarıda bahsedilen kumaşlara göre daha çok sayıda tülbent tabakasından oluşan, yüksek gramaja sahip kumaşlardır. Bu kumaşların yapısal karakterizasyonu ve liflerin kumaş içerisindeki yerleşimlerinin belirlenmesi daha zaman alıcı ve zor işlemler gerektirmektedir. Bu nedenle diğer araştırmalara nazaran, iğneleme yöntemi ile üretilmiş ağır gramajlı dokusuz yüzey kumaşlar ile ilgili yapılan teorik çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır.

Bu çalışmada, iğneleme yöntemi ile stapel polipropilen liflerinden üretilmiş dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarını önceden belirleyebilmek için tek lif özellikleri ve referans kumaş özellikleri esaslı iki yeni teorik yaklaşım yapılmıştır. Teorik yaklaşımlar, önceki çalışmalar, tabakalı kompozit teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi dikkate alınarak oluşturulmuş ve teorik analizlerde sonlu elemanlar paket programı ANSYS kullanılmıştır. Her iki yaklaşımda da malzemelerin üniform olmayan gerilme-uzama oranı davranışı göz önünde bulundurularak model oluşturulmuş ve çözümlenmeler yapılmıştır. Ayrıca referans kumaş yaklaşımında, çekme testlerindeki oluşan lif-lif etkileşimleri ve lif göçlerinin etkisi de kısmen dikkate alınmıştır. İğneleme yöntemi ile üretilmiş jeotekstil kumaşların mekanik özelliklerinin hammadde ve ürün özellikleri kullanılarak belirlenmesi için yaptığımız bu çalışmanın literatürdeki bu konudaki açığı kapatacağı ve üreticilere tasarım aşamasında yardımcı olacağı düşünülmüştür.

1.3 Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, günümüzde teknik tekstil uygulamalarında önemli bir yere sahip olan jeotekstillerin mekanik davranışlarını hammadde ve ürün parametrelerini kullanarak önceden belirlemeye yardımcı olacak teorik bir model geliştirmektir. Çalışmada, numune olarak jeotekstillerde en çok kullanılan hammadde olan polipropilen liflerinden, iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlar kullanılmıştır. İğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlar, jeotekstil uygulamalarında en fazla kullanılan kumaş tipidir ve çok sayıda tülbent tabakasından oluşan ağır gramajlı kumaşlardır. Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda genellikle spun-bond, kimyasal ve termal bağlama gibi diğer üretim yöntemleri ile elde edilmiş hafif gramajlı dokusuz yüzey kumaşlar kullanılmıştır. Dolayısı ile iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlar için oluşturduğumuz teorik modelin, bu konuda çalışacak araştırmacılara kaynak teşkil etmesi de amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmamızda önerilen metod ile jeotekstillerin mekanik davranışları hakkında önceden fikir edinilmesi üreticilerin tasarım aşamasını da kısaltarak işletmeye zaman ve maliyet açısından yarar sağlayacaktır. Dolayısı ile çalışmanın, günümüzde Türkiye’de de sayıları artan dokusuz yüzey jeotekstil üreticilerine tasarım ve üretim aşamalarında yardımcı olması da beklenmektedir. Jeotekstillerin kullanıldığı inşaat projelerinde uygulama alanına göre ürün seçimi yapan mühendis veya teknikerlerin deneysel olarak belirlemesi gereken parametrelerin sayısının model yardımı ile azaltılarak seçim sürecinin kısaltılması da çalışmanın amaçları arasındadır.

BÖLÜM İKİ

MATERYAL VE METOD

2.1 Materyal

Araştırma materyali polipropilen liflerinden iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlardan oluşmaktadır. Materyalin belirlenmesinde jeotekstil uygulamalarında en çok kullanılan kumaş ve lif tipi dikkate alınarak seçim yapılmıştır. Araştırma materyalini oluşturan kumaş numuneleri ticari olarak jeotekstil üretimi yapan bir firmadan temin edilmiştir. Numuneler üretim sonrası kumaş toplarından minimum beş metre kare boyutlarında olacak şekilde tesadüfi olarak alınmıştır. Araştırma materyallerinin tanımlayıcı genel özellikleri Tablo-2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Materyallerin genel özellikleri

Lif Tipi	: Kesikli polipropilen (PP)
Kumaş Tipi	: Dokusuz yüzey
Üretim Yöntemi	: İğneleme ile birleştirme
Kullanım Alanı	: Jeotekstiller

Araştırma materyali olarak Tablo-2.1’de belirtilen genel özelliklere sahip iki farklı incelikteki lif numunesinden, beş farklı gramajda üretilmiş toplam on adet dokusuz yüzey jeotekstil kullanılmış ve her bir kumaşa bir kod numarası verilmiştir. Ölçümler ve değerlendirmeler bu kod numaraları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Numunelerin kod numaraları ile temin edildikleri firma tarafından belirtilen kumaş gramajları ve genel hammadde özellikleri Tablo-2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 Numune kumaş kodları ve özellikleri

Numune No	Numune Kodu	Kumaş Gramajı (gr/m ²)	Lif İnceliği (denye)	Lif Uzunluğu (mm)
1	6D-100	100	6	60
2	6D-200	200	6	60
3	6D-300	300	6	60
4	6D-500	500	6	60
5	6D-800	800	6	60
6	3D-200	200	3	60
7	3D-300	300	3	60
8	3D-400	400	3	60
9	3D-600	600	3	60
10	3D-800	800	3	60

Tablo-2.2’de görüldüğü gibi çalışma numunelerini 3 ve 6 denye inceliğinde, 60 mm uzunluğunda stapel liflerden üretilen on adet kumaş oluşturmaktadır. 3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş kumaşlara, 6 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş kumaşlardan farklı olarak üretim sonrasında bir ısıtma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıtma işlemi kumaş yüzeyindeki lifleri termal olarak birbirine bağladığından kumaşların nihai özellikleri değişmektedir. Araştırma sonuçlarının değerlendirilmesinde kumaşlara uygulanan bu ısıtma işleminin etkisi de dikkate alınmıştır. Jeotekstillerde kullanılan dokusuz yüzey kumaşlar diğer uygulama alanlarında kullanılan dokusuz yüzey kumaşlara göre daha kalın ve gramajı yüksek kumaşlardır (Ingold ve Miller, 1988; Van Zanten, 1986) Bu nedenle çalışma numunesi olarak jeotekstil uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 100-800 gr/m² arası ağırlıktaki kumaşlar seçilmiştir.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ve analizlerin gerçekleştirilmesinde mühendislik uygulamalarında da yaygın olarak kullanılan genel amaçlı sonlu elemanlar paket programı ANSYS kullanılmıştır. ANSYS, çok çeşitli problemlerin sonlu elemanlar yöntemine dayanarak sayısal çözümlemesini yapabilen bir bilgisayar programıdır. Programda ele alınan bir problemin sonlu elemanlar metodu ile çözümlenmesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıda kısaca açıklanan üç ayrı modülde gerçekleştirilmektedir (Moaveni, 2007).

-*Verilerin Tanımlanması*: Çözüm için gerekli olan eleman tipi, eleman sabitleri, materyal özellikleri, model geometrisi, sınır şartları gibi verilerin programa tanımlandığı aşamadır.

-*Çözüm*: Problemin tipine göre yapılacak analizin (statik, dinamik, termal, manyetik vb.) seçildiği ve çözümün gerçekleştirildiği aşamadır.

-*Sonuçların Değerlendirilmesi*: Çözümde elde edilen değerlerin sayısal, grafiksel veya görsel (kontur çizimi) olarak değerlendirildiği aşamadır.

2.2 Metod

Araştırma materyali olarak belirlenen jeotekstillerin mekanik davranışlarını hammadde (lif) ve ürün (kumaş) özelliklerini kullanarak teorik bir yöntemle önceden tahminleyebilmek için Şekil-2.1’de belirtilen işlem basamakları takip edilmiştir.



Şekil 2.1 Çalışma metodunun işlem basamakları

Şekil-2.1’de görüldüğü gibi çalışmada öncelikle dokusuz yüzey jeotekstillerin çeşitli lif ve kumaş parametreleri standart test yöntemleri kullanılarak belirlenmiş, daha sonra jeotekstillerin mekanik özelliklerini önceden tahminleyebilmek için bu parametrelere bağlı teorik yaklaşımlar oluşturulmuştur. Teorik yaklaşımlarda,

literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak tabakalı kompozit teorisi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve geniş enli çekme testine uygun bir geometrik model oluşturulmuştur. Oluşturulan yapısal model için belirlenen sınır şartları ve elde edilen deneysel veriler, teoriye uygun materyal özellikleri ve elemanlar seçilmek sureti ile sonlu elemanlar paket programı ANSYS'e girilmiş ve teorik gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde veri olarak kullanılan materyal özelliklerinin belirlenmesinde, kumaşları oluşturan tek lif özellikleri ve referans kumaş (en hafif gramajlı kumaş) özelliklerini dikkate alan iki yaklaşım yapılmış ve tüm kumaşlar hem makina yönünde hem de makina yönüne dik yönde olmak üzere bu iki yaklaşım kullanılarak analiz edilmiştir. Teorik analizlerden elde edilen veriler ile deney sonuçları karşılaştırılarak sonuçların birbiri ile uyumluluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca hammadde ve ürün özelliklerinin kumaş mekanik davranışlara etkisi incelenmiştir. Böylece hammadde ve ürün özelliklerinden hareketle jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarının önceden belirlenmesine yardımcı olacak bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin ayrıntıları aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

2.2.1 Lif ve Kumaş Numunelerinin Özelliklerinin Belirlenmesi

Araştırma materyali olan dokusuz yüzey jeotekstillerin yapısal özelliklerini tanımlamak ve teorik analizler ile değerlendirmelerde kullanılacak verilerini elde etmek için lif ve kumaş numunelerinde aşağıda açıklanan deneysel analizler uygulanmıştır.

2.2.1.1 Liflerin Genel Özellikleri

Çalışma numunelerin tamamı Tablo-2.1'de de belirtildiği gibi polipropilen liflerinden oluşmaktadır. Polipropilen liflerinin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri genel bilgiler kısmında verilmiştir. Bununla birlikte numune kumaşların üretiminde hammadde olarak kullanılan liflerden alınan örneklerde kontrol amaçlı olarak; hammadde tayini, uzunluk ve incelik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kullanılan liflerin elektron mikroskobu ile boyuna ve enine kesit görüntüleri alınmıştır.

Lif numunelerinde hammaddenin belirlenmesi için kimyasal analiz yöntemleri kullanılmıştır (Hall, 1982). Numunelerin uzunlukları ise TSE 715 ISO 6989'da belirtildiği gibi tek lif uzunluk ölçüm yöntemi kullanılarak saptanmıştır. Lif numuneleri iki ucundan tutularak kıvrımları açılmış ve liflerin kıvrımsız uzunlukları bir cetvel yardımı ile ölçülmüştür. Toplamda 100 adet lifin uzunluğu ölçülerek numuneler için ortalama lif uzunluğu belirlenmiştir. Lif numunelerinin inceliklerini tanımlayan numaraları TSE 2874 EN ISO 1973'e göre birim uzunluklarının kütlesi ölçülerek belirlenmiştir. Ölçümlerde, her bir lif numunesinden alınan 100'er adet lif standart atmosfer koşullarında hassas terazi ile tartılmış ve denye olarak incelik numaraları hesaplanmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen incelik numaralarının ortalaması alınarak her iki lif numunesi için ortalama lif inceliği bulunmuştur. Dairesel kesite sahip olan lif numunelerin yarıçapları ise denklem 2.1 (Önder, 1995) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{\pi r^2 h} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{m}{\rho \pi h}} \quad (2.1)$$

burada, r liflerin yarıçapı, v belirli boyutlardaki liflin hacmi, m belirli uzunluktaki lifin gram olarak ağırlığı, ρ polipropilen lifinin özgül ağırlığı (0,91 gr/cm³), h lif uzunluğudur. Araştırmada kullanılan 3 denye inceliğindeki lifler için bu değerler m=3gr, h=9000m dir, 6 denye lifler için ise m=6gr, h=9000m dir.

Lif numunelerin enine kesit ve boyuna görünüşleri hakkında fikir edinebilmek için taramalı elektron mikroskobunda (SEM) lif görüntülerinin fotoğrafı çekilmiştir. Görüntüler Jeol JSM-6060 marka taramalı elektron mikroskobunda yapışkan karbon band üzerine yapıştırılmış ve altın kaplama yapılmış lif numunelerden alınmıştır.

2.2.1.2 Tek Lif Mukavemet Özellikleri

Jeotekstil kumaşları oluşturan iki farklı incelikteki polipropilen liflerinin mukavemet ve uzama özellikleri tek lif çekme mukavemeti testleri ile saptanmıştır. Testler, Şekil-2.2'de görülen ve sabit uzama artış oranı prensibi ile çalışan çok amaçlı mukavemet ölçer Instron 4411 aletinde TS EN ISO 5079'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.2 Tek lif mukavemet ölçüm cihazı

Tek lif mukavemet testlerinde kullanılan ölçüm parametreleri Tablo-2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3 Tek lif mukavemet testleri ölçüm parametreleri

Çekme Cihazı	:INSTRON 4411
Çekme Cihazı Tipi	:Uzama Artış Oranı Sabit (CRE)
Ölçüm Uzunluğu	:20mm
Test Hızı	:20mm/dk
Ön Gergi Ağırlığı	:0,2-0,4grf

Ölçümlerde, her bir lif numunesinden 100’er adet lif test edilerek liflere ait kopma yükleri, kopma uzamaları ve yük-uzama eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen yük uzama eğrileri, lif kesit alanları ve ölçüm uzunluğu dikkate alınarak, teorik analiz ve değerlendirmelerde kullanılacak gerilme-uzama oranı eğrilerine dönüştürülmüş ve lif numuneleri için ortalama gerilme-uzama oranı eğrileri saptanmıştır.

2.2.1.3 Kumaş Gramajlarının Belirlenmesi

Kumaş gramajlarını belirlemek için 200mm x 250mm boyutlarındaki şablonla kesilen dokusuz yüzey kumaş numuneleri standart atmosfer koşullarında hassas terazi ile tartılmıştır. Her bir kumaş numunesinden 10 ölçüm yapılarak ölçümlerin ortalaması alınmış numunelerin TS EN ISO 9864’e göre m² ağırlıkları hesaplanmıştır.

2.2.1.4 Kumaş Kalınlıklarının Belirlenmesi

Kumaş numunelerinin kalınlık ölçümleri dijital kalınlık ölçüm aletinde gerçekleştirilmiştir. Şekil-2.3’de görülen kalınlık ölçme cihazı numuneler üzerinde ölçüm yapmak için dairesel bir yüzeye sahip bir baskı başlığına sahiptir. Baskı başlığı deney numunesi düzlemine dik olarak 2 kPa ile 200 kPa arasında basınç uygulayacak kapasitededir. Ölçümler TS EN ISO 9863-1’e göre numuneler üzerine 2 kPa basınç uygulanması ve belirli bir süre (30sn) sonra kalınlık değerinin okunması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her bir kumaş numunesi için 10 farklı örneğin 5 değişik yerinden olmak üzere toplamda 50 ölçüm yapılarak kumaşların ortalama kalınlık değerleri mm cinsinden hesaplanmıştır. Kalınlık ölçümleri geniş enli çekme testi için kesilen kumaş şablonlarının 5 farklı noktasında gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilme değeri hesaplamalarında kullanmak üzere her bir geniş enli çekme deneyine ait kumaş numunesinin de ortalama kumaş kalınlığı belirlenmiştir.

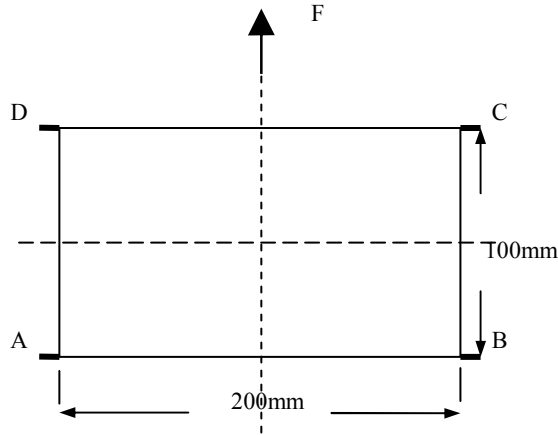


Şekil 2.3 Dijital kalınlık ölçüm cihazı

2.2.1.5 Kumaş Mukavemet ve Uzama Özelliklerinin Belirlenmesi

Numune kumaşların mukavemet ve uzama özelliklerinin belirlenmesinde Şekil-2.4’de şematik gösterimi verilen geniş enli çekme testi kullanılmıştır. Dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların çekme deneyindeki özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan bu metot ile diğer metotlar arasındaki temel fark, deney parçasının genişliğidir.

Dokusuz yüzey kumaşlar yük altında ölçüm uzunluğu bölgesinde çekme yönüne dik yöne daralma eğiliminde olduklarından bu metotta deney parçalarının genişliği uzunluğundan daha büyüktür. Daha büyük genişlik, bu tip kumaşların büzülme etkisini azaltır ve bu konuda jeotekstil malzemelerinin karşılaştırılması için bir standart olarak umulan kumaş davranışına daha yakın bir ilişki verir. Şerit şeklinde kesilen kumaşlarda ise çekme testinde gerilme yığılmaları nedeni ile aşırı uzamalar ölçülerek gerçek sonuçlardan uzaklaşılabilir. Öte yandan kumaşlarda uygulanan şerit çekme testlerinde tutucu çeneler deney parçasına zarar vererek, tutucu çene kopmasına sebep oluyor ise elde edilen sonuçlar genellikle değerlendirmeye alınmaz. Geniş enli çekme testlerinde ise tutucu çenelere yakın bölgelerde deney parçasının gerilmesi daha yoğun olabilir. Çünkü tutucu çeneler, yük uygulandığında deney parçasının genişliği boyunca çekme yönüne dik yönde daralmasını önlerler. Geniş enli çekme testinde, tutucu çene kenarlarının yakınındaki kopmaların şerit çekme testlerine göre fazla olması kaçınılmazdır ve bu durum deney metodunun bir özelliği olarak kabul edilir (TSE EN ISO 10319, 1998).

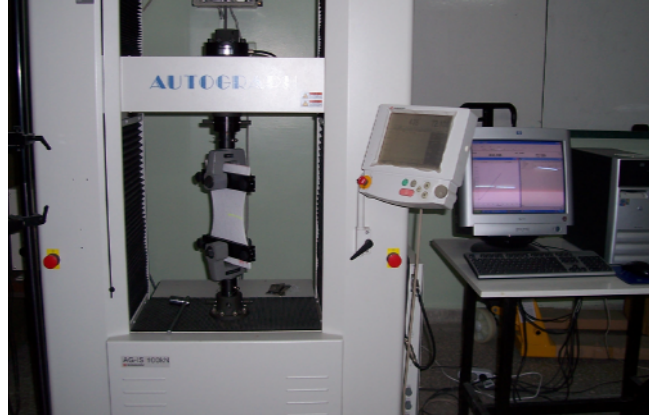


A-B Sabit Alt Çene, C-D Hareketli Üst Çene, F: Kuvvet

Şekil 2.4 Geniş enli çekme testi şematik gösterimi

Geniş enli çekme testleri, TSE EN ISO 10319'e göre Şekil-2.5'de görülen bilgisayar kontrollü Shimadzu Autograph AG-IS çok amaçlı mukavemet ölçüm aletinde gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan çene yanakları çekme cihazına uygun olarak ve standartta belirtilen şekilde 200 mm genişliğinde yaptırılmıştır. Çenelerin iç kısımları numunelerin test sırasında kaymasını engelleyecek şekilde

kauçuk ile kaplanmıştır. Çene yanaklarının kenarlarına ise kumaşı sıkıştırabilmek için ilave sıkıştırma aparatları eklenmiştir.



Şekil 2.5 Geniş enli çekme test cihazı

Deneylerde her bir kumaş için makina yönünde ve makina yönüne dik yönde 200mm x 250 mm boyutlarında 10'ar numune kesilmiş ve Tablo-2.4'de belirtilen ölçüm parametreleri kullanılarak geniş enli çekme testleri yapılmıştır.

Tablo 2.4 Geniş enli çekme testleri ölçüm parametreleri (TSE EN ISO 10319)

Çekme Cihazı	Shimadzu Autograph AG-IS Series
Çekme Cihazı Tipi	Uzama Artış Oranı Sabit (CRE)
Ölçüm Uzunluğu	100 mm
Numune Genişliği	200 mm
Test Hızı	20 mm/dk
Cihaz Kapasitesi	10 ton

Ölçümler sonucu numunelere ait yük-uzama eğrileri, kopma yükleri ve bu yükteki uzama miktarları elde edilmiştir. Bu verilerden ise her bir kumaş için ortalama yük-uzama eğrisi, ortalama kopma yükü ve bu yükteki ortalama uzama değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca her bir numune için geniş enli çekme testinde elde edilen yük ve uzama değerleri, denklem 2.2 ve denklem 2.3 (Saville, 2000) yardımı ile gerilme-uzama oranı verilerine dönüştürülmüştür. Elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinin ise ortalaması alınarak her bir kumaş numunesi için teorik analiz ve değerlendirmelerde kullanılacak ortalama-gerilme uzama oranı eğrisi, elastisite modülü, maksimum gerilme ve maksimum gerilmedeki uzama oranı değerleri elde edilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{t_k e_k} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{L} \quad (2.3)$$

burada, σ gerilme, F çekme testinde her hangi bir uzamadaki yük, A geniş enli çekme testinde kumaş kesit alanı, t_k kumaş kalınlığı, e_k geniş enli çekme testinde kumaş eni, ε uzama oranı, $\Delta \ell$ her hangi andaki uzama ve L ölçüm uzunluğudur.

Geniş enli çekme testleri sırasında kumaş orta noktasında çekme yönüne dik yönde meydana gelen daralmalar da ölçülerek denklem 2.4 (Gibson, 1994) yardımı ile her bir kumaş numunesi için poisson oranları belirlenmiştir. Öte yandan teorik analizlerde sadece referans kumaşlara ait poisson oranları veri olarak kullanılmıştır.

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.4)$$

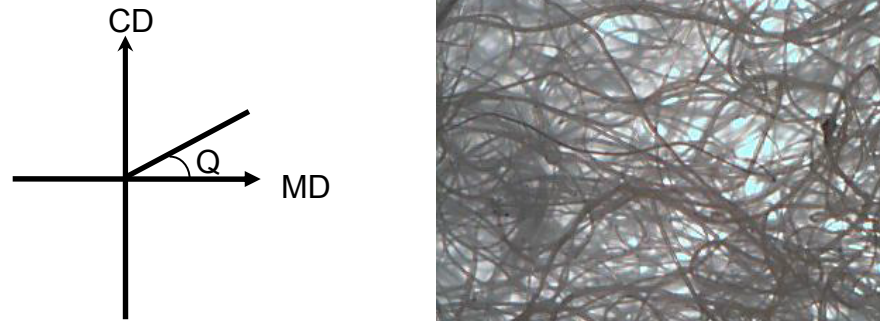
burada, ν_{12} major poisson oranı, ε_2 çekme yönüne dik yöndeki uzama oranı, ε_1 çekme yönündeki uzama oranıdır.

2.2.1.6 Kumaşlarda Lif Oryantasyon Açısı Ölçümleri

Dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların performansını etkileyen hammadde ve işlem parametrelerinden bir tanesi de liflerin kumaş yapısı içerisindeki yerleşimleridir. Dokusuz yüzey kumaş üretim hattında, tülbent yüzeyler içerisinde başlangıçta aynı doğrultuda yönlenmiş lifler katlama ve iğneleme işlemleri sonucunda kumaş içerisinde farklı doğrultulara yönlendirilerek rasgele veya bilinen bir dağılım sergilerler. Dolayısı ile liflerin seçilen kumaş düzlemine göre ölçülen oryantasyon açıları kumaşın mekanik özellikleri üzerine fikir edinilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak az sayıda tülbendin birleşmesinden oluşan hafif gramajlı kumaşlarda oryantasyon açısı ölçümleri basit mikroskopik metotlarla saptanabilirken, çok sayıda tülbendin birleşmesinden oluşan yüksek gramajlı kumaşlarda liflerin katmanlar arasında izlediği yol nedeni ile oryantasyon açısı ölçümleri daha karmaşık ve zor olan

yöntemleri gerektirmektedir. Özellikle iğne ile keçeleştirilmiş ağır gramajlı jeotekstil kumaşlarda tabalardaki lif oryantasyon dağılımının deneysel olarak saptanması çok zordur (Pourdeyhimi, 2001). Bu nedenle çalışmamızda numuneleri oluşturan iki farklı incelikte liften üretilmiş jeotekstillere en hafif gramajlıları olan 6D-100 ve 3D-200 kodlu referans kumaşlarda lif oryantasyon açısı dağılımı deneysel olarak belirlenmiştir. Ağır gramajlı kumaşların lif oryantasyon açısı dağılımları ise referans kumaşlar için belirlenen açılara ve kumaşları oluşturan tülbent tabakası sayılarına göre düzenlenerek teorik modelde veri olarak kullanılmıştır.

Teorik modelde veri olarak kullanılacak lif oryantasyon açısı ölçümleri projeksiyon mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bais-Singh ve Goswami, 1995; Hearle ve Stevenson, 1963). Referans kumaşlardan makina yönünde kesilen numunelerin bir kenarı mikroskop tablası üzerine makina yönüne paralel olacak şekilde yerleştirilerek projeksiyon mikroskobu ekranında Şekil-2.6'da bir örneği verilen görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 2.6 Kumaş üzerinden oryantasyon açısı ölçümü. MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön, θ : Oryantasyon açısı.

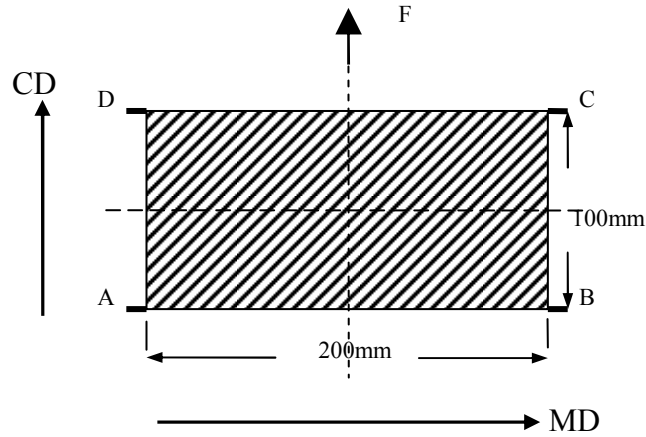
Ölçümlerde, ekrandaki görüntüler sabitlenmiş ve görüntü üzerinden 50 adet lifin makina yönüne göre oryantasyon açısı belirlenmiştir. Her bir kumaş için toplamda 20 görüntü üzerinden 1000 adet lif açısı ölçümü yapılmış ve liflerin oryantasyon açısı dağılımlarını saptayabilmek için bir frekans tablosu yapılarak liflerin 10° aralıklar ile $0-180^\circ$ arasındaki oryantasyon açısı diyagramları (histogramları) elde edilmiştir. Teorik model çalışmalarında, farklı sayıda tabakalardan oluşan çeşitli gramajlardaki

kumaşların tabaka oryantasyon açılarını belirlemek için en hafifi gramajlı kumaşlardan elde edilen bu oryantasyon açısı dağılımlarından yararlanılmıştır.

2.2.1.7 Referans Kumaşlarda Kayma Gerilmesinin Belirlenmesi

Teorik model yaklaşımlarında kumaşları oluşturduğu varsayılan tabakaların ortotropik malzeme özelliği gösterdiği kabul edilmiştir. Dolayısı ile referans kumaşlarda diğer mühendislik sabitlerinin yanı sıra analizlerde veri olarak kullanmak üzere düzlemdeki kayma modüllerinin de belirlenmesi gerekmektedir.

6D-100 ve 3D-200 kodlu referans kumaşların düzlemdeki kayma modüllerini belirleyebilmek için bu kumaşların iki temel üretim yönü ile 45° açı yapacak şekilde 10'ar deney numunesi hazırlanmış ve Şekil-2.7'deki gibi çeneler arasına yerleştirilen numunelerde geniş enli çekme testleri yapılmıştır.



Şekil 2.7 Temel eksenler ile 45° açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde geniş enli çekme testi

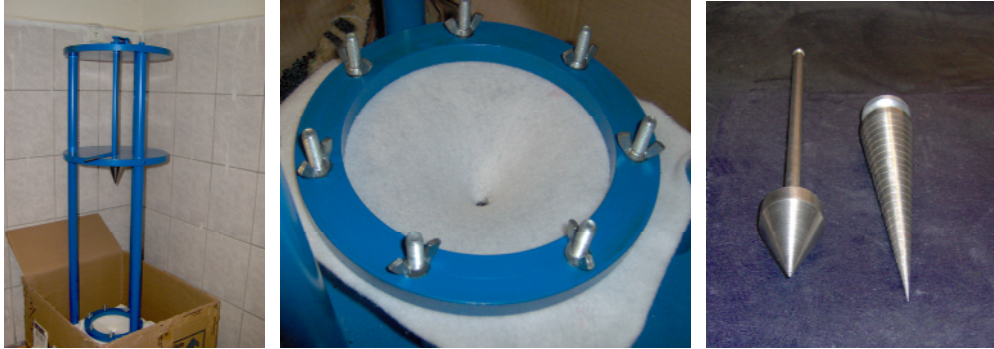
Ölçümler sonucu elde edilen gerilme-uzama eğrilerin eğimlerinden temel eksenlere göre 45° açı ile kesilmiş her bir referans kumaş numunesi için elastisite modülleri belirlenmiştir. Referans kumaş numuneleri için, iki temel yön olan makina ve makina yönüne dik yöndeki elastisite modülleri ve poisson oranları da kullanılarak denklem 2.5 yardımı ile düzlemdeki kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. (Saville, 2000).

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (2.5)$$

burada, G_{12} düzlemde kayma modülü, E_{45} 45° açı ile kesilmiş kumaşın elastisite modülü, E_1 makina yönündeki elastisite modülü, E_2 makina yönüne dik yöndeki elastisite modülü ve ν_{12} major poisson oranıdır.

2.2.1.8 Kumaşların Darbe Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında jeotekstil kumaşların genel özellikleri hakkında fikir edinebilmek için numunelerin darbelere karşı dayanımları da ölçülmüştür. Jeotekstil kumaş numunelerinin darbelere dayanımları konik delici düşürme testi (dinamik delinme testi) ile ölçülmüştür. Test çoğunlukla jeotekstillerin uygulama alanlarına yerleştirilmeleri sırasında üzerlerine düşen keskin kaya ve taş parçalarının etkilerini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Testlerde, TS EN 918'e göre yaptırılan ve Şekil-2.8'de görülen konik düşürme testi düzeneği kullanılmıştır. Konik düşürme testi düzeneği çalışma numunelerini de temin eden firma atölyelerinde yapılarak tarafımıza hibe edilmiştir.



Şekil 2.8 Konik düşürme test düzeneği, konik delici ve ölçme konisi

Deneylerde daire şeklindeki iki halka arasında sabitlenen numuneler üzerine 500cm yükseklikten 1kg ağırlığında konik uçlu bir delici serbest olarak bırakılmıştır. Konik delicinin çarpma sonrası numunelerde meydana getirdiği hasarın çapı 2mm aralıklı ölçme konisi ile mm cinsinden ölçülmüştür. Her bir çalışma numunesi için 5 düşürme testi yapılarak kumaşlar için ortalama delik çapı hesaplanmıştır.

Araştırma kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan, lif genel özelliklerinin belirlenmesi, tek lif mukavemet ölçümleri, kumaşlarda gramaj, kalınlık ve darbe dayanımların saptanması ile lif oryantasyon açısı ölçümleri Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği laboratuvarlarında, kumaş mukavemet ve uzama özellikleri ile kayma gerilmesi ölçümleri Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında, SEM görüntülerinin alınması ise Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

2.2.2 Teorik Modellerin Oluşturulması ve Sonlu Elemanlar Analizi

Çalışma kapsamında dokusuz yüzey jeotekstiller için teorik modellerin oluşturulmasında ve sonlu elemanlar analizinin uygulanmasında aşağıda verilen temel işlem basamakları takip edilmiştir.

- Dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlar için oluşturulacak modellere uygun kabullerin yapılması,
- Tabakalı kompozit yapıdaki benzer teorik modellerin oluşturulması,
- Model parametreleri arasındaki matematiksel ilişkilerin belirlenmesi,
- Oluşturulan teorik yaklaşıma göre geniş enli çekme testini dikkate alan uygun sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak paket bilgisayar programı ANSYS hakkında temel bilgilerin edinilmesi,
- Sonlu elemanlar analizi için teorik modellere uygun eleman ve materyal tiplerinin belirlenmesi,
- Materyal özellikleri olarak belirlenen deneysel ve teorik verilerin sonlu elemanlar programına girilmesi,
- Yüklerin uygulanması ve gerilme analizlerinin yapılması
- Teorik analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması.

Teorik modellerin oluşturulması ve sonlu elemanlar yönteminin araştırmadaki uygulama metodu ile ilgili yukarıda belirtilen işlem basamaklarının ayrıntıları bir sonraki bölümde teorik modeller kısmında açıklanmıştır.

BÖLÜM ÜÇ

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1 Deney Sonuçları

Araştırmamızda ilk aşamada lif numuneleri üzerinde uzunluk, incelik gibi genel özellikleri belirleyici ölçümler yapılmış ve numuneleri temin eden firma tarafından belirtilen verilerin doğruluğu kontrol edilmiştir. İkinci aşamada ise teorik analizlerde ve sonuçların değerlendirilmesinde veri olarak kullanılan tek lif mukavemeti, kumaş kalınlık ve gramajı, kumaş mukavemet özellikleri ve liflerin kumaş içerisindeki yerleşimleri deneysel olarak saptanmıştır.

3.1.1 Liflerin Genel Özellikleri

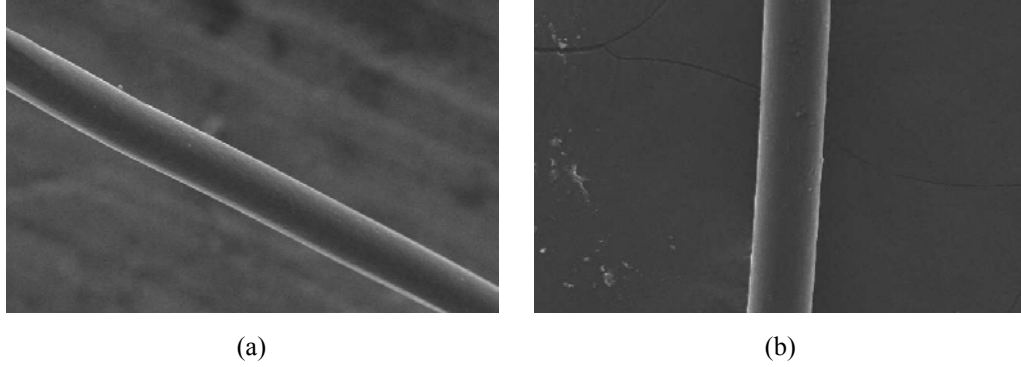
Numune kumaşların üretiminde hammadde olarak kullanılan liflerden alınan örneklerde kontrol amaçlı olarak yapılan hammadde analizi, uzunluk ve incelik ölçümleri sonuçları Tablo-3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Lif numunelerinin hammadde, uzunluk ve incelik ölçüm sonuçları

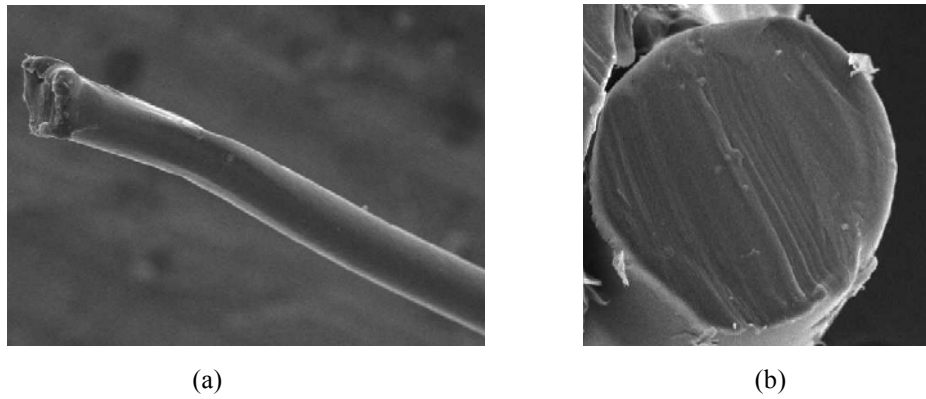
Numune	Hammadde	Uzunluk	İncelik	Lif Çapı
1	%100 PP	60 mm	6 denye	30,56 μ
2	%100 PP	60 mm	3 denye	21,60 μ

Tablo-3.1’de görüldüğü gibi numune kumaşları oluşturan liflerin hammaddeleri ile uzunluk ve incelik gibi genel özellikleri numuneleri temin eden firma tarafından belirtilen ve Tablo-2.2’de verilen değerler ile uyumludur.

Araştırmada kullanılan lif numunelerinin boyuna ve enine kesit SEM görüntüleri ise sırası ile Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Lif numunelerinin boyuna SEM görüntüleri (a) 3 denye, (b) 6 denye



Şekil 3.2 Lif numunelerinin enine kesit SEM görüntüleri (a) 3 denye, (b) 6 denye

Şekil-3.1 ve 3.2’de görüldüğü gibi liflerin boyuna görüntüleri düz cam boru, enine kesitleri ise dairesel şekildedir.

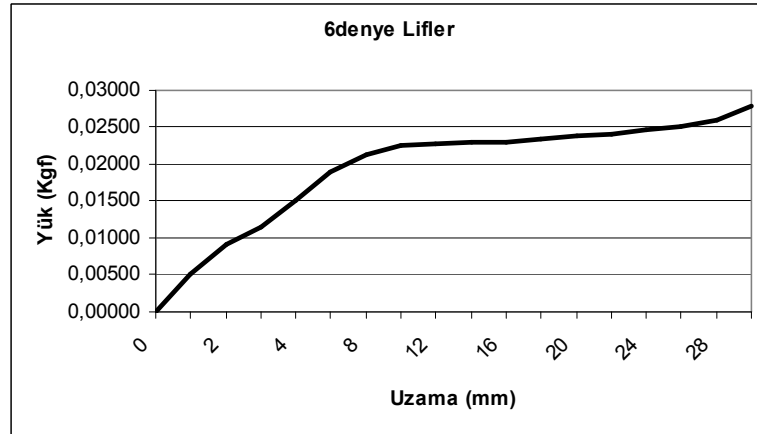
3.1.2 Tek Lif Mukavemet Özellikleri

Araştırma numunesini jeotekstil kumaşları oluşturan 6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflerin tek lif mukavemet ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo-3.2’de verilmiştir.

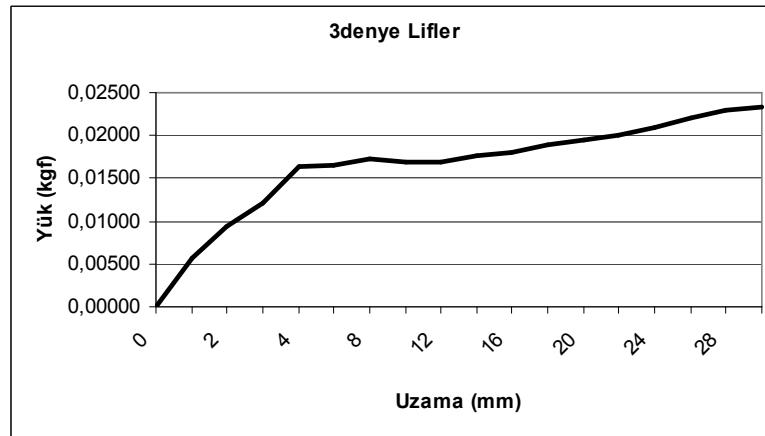
Tablo 3.2 Tek lif mukavemet test sonuçları

Lif Örneği	Kopma Yüğü (Kgf)	Kopma Uzaması (mm)	Gerilme (Pa)	Uzama Oranı
6 denye	0,0278	33,50	3,79E+08	1,68
3 denye	0,0233	32,34	6,36E+08	1,62

Tablo-3.2’de her iki lif numunesine ait kopma yükü, kopma uzaması, maksimum yükteki gerilme ve uzama oranı değerleri görülmektedir. 6 denye inceliğindeki liflerin kopma yükü 0,0278 kgf, kopma uzaması 33,50 mm iken, 3 denye inceliğindeki liflerin kopma yükü 0,02330 kgf, kopma uzaması 32,34 mm’dir. Her iki lif numunesine ait ortalama yük-uzama eğrileri ise sırası ile Şekil-3.3 ve Şekil-3.4’de verilmiştir.

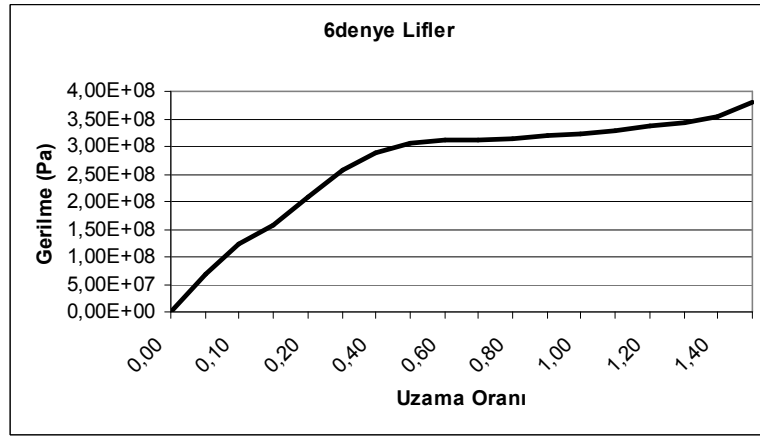


Şekil 3.3 6denye liflerin ortalama yük-uzama eğrisi

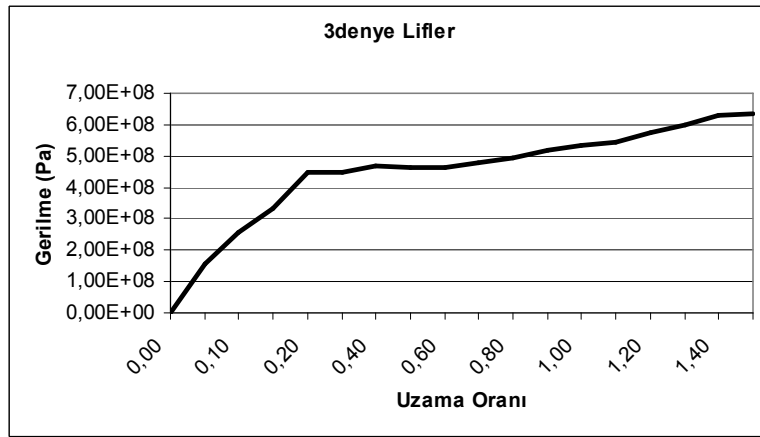


Şekil 3.4 3denye liflerin ortalama yük uzama eğrisi

Şekil-3.3 ve Şekil-3.4’de görülen yük-uzama eğrilerini oluşturan veriler, gerilme-uzama oranı eğrilerine dönüştürülmüştür. Böylece her bir lif numunesi için teorik analizlerde başlangıç verilerinin belirlenmesine yardımcı olacak gerilme uzama oranı eğrileri elde edilmiştir. Her iki lif numunesine ait gerilme-uzama oranı eğrileri sırası ile Şekil-3.5 ve Şekil-3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.5 6denye liflerin ortalama gerilme-uzama oranı eğrisi



Şekil 3.6 3denye liflerin ortalama gerilme-uzama oranı eğrisi

6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflere ait Şekil-3.5 ve Şekil-3.6 de görülen gerilme-uzama oranı eğrileri incelendiğinde, uzama oranındaki artış ile gerilmelerin doğrusal orantılı olarak artmadığı görülmektedir. Gerilme-uzama oranı eğrileri akma noktası sınırına kadar olan elastik bölgede kısmen doğrusal bir yol izlerken akma noktasından sonraki plastik bölgede doğrusal olmayan bir yol izlemektedirler. Teorik analizlerde veri olarak kullanılacak malzeme özelliklerinin belirlenmesinde lif gerilme-uzama oranı eğrilerinin doğrusal olmayan bu davranışları dikkate alınmıştır. Eğrilerin doğrusal bölgelerinde eğriye çizilen teğetin eğimi olan sabit elastisite modülü, doğrusal olmayan bölgelerinde ise noktasal gerilme-uzama oranı değerleri model verisi olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için programa deney verilerinin aktarılması teorik modeller kısmında ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1.3 Kumaş Gramajları

Çalışma materyalini oluşturan jeotekstil kumaşlarda yapılan ölçümleri sonucu elde edilen kumaş m² ağırlıkları Tablo-3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3 Kumaş gramajı ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Kumaş Gramajı (gr/m²)
6D-100	103,88
6D-200	208,70
6D-300	307,71
6D-500	504,71
6D-800	806,20
3D-200	203,49
3D-300	305,53
3D-400	406,73
3D-600	605,11
3D-800	805,68

Tablo-3.3’de görüldüğü gibi jeotekstil numunelerde ölçümler sonucu elde edilen ortalama m² ağırlıkları numunelerin temin edildiği firmanın belirttiği ve Tablo-2.2’de verilen değerlerden ufak sapmalar göstermektedir. Çalışmanın ileriki bölümlerinde kullanılan hesaplamalarda ölçümler sonucu elde edilen ortalama kumaş gramajı değerleri kullanılmıştır. Ancak numune kodlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

3.1.4 Kumaş Kalınlıkları

Çalışma materyalini oluşturan jeotekstil kumaşlarda yapılan kalınlık ölçümleri sonucu elde edilen ortalama kumaş kalınlığı değerleri Tablo-3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4 Kumaş kalınlığı ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Ortalama Kumaş Kalınlığı (mm)
6D-100	2,60
6D-200	2,96
6D-300	3,56
6D-500	4,01
6D-800	5,20
3D-200	1,48
3D-300	2,48
3D-400	2,96
3D-600	4,46
3D-800	6,09

Tablo-3.4’de görüldüğü gibi dokusuz yüzey jeotekstil numunelerinde kumaş gramajındaki artış ile kumaş kalınlığı da artmaktadır. 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda, gramaj artışı ile kalınlık artışı arasında doğrusal bir orantı yoktur. Öte yandan üretim sonrası sıcak silindirler arasından geçirilerek ısı işlem uygulanmış 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda gramaj artışı ile kalınlık artışı yaklaşık olarak doğru orantılıdır.

Tablo-3.4’de görülen ortalama kumaş kalınlıkları sonlu elemanlar analizinde kullanılacak geometrik modelin oluşturulmasında ve kumaş tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde veri olarak kullanılmıştır. Kumaş gerilmelerinin hesaplanmasında ise geniş enli çekme testi yapılan her bir numunenin bireysel kalınlık değeri kullanılmıştır.

3.1.5 Jeotekstil Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri

Araştırma numunesini jeotekstil kumaşlarda makina yönünde ve makina yönüne dik yönde yapılan geniş enli çekme testlerinden elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler şeklinde aşağıda verilmiştir.

3.1.5.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri

Tablo-3.5’de 6 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş kumaşlarda geniş enli çekme testleri sonucu elde edilen veriler görülmektedir

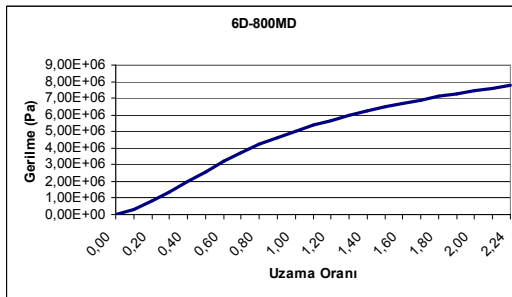
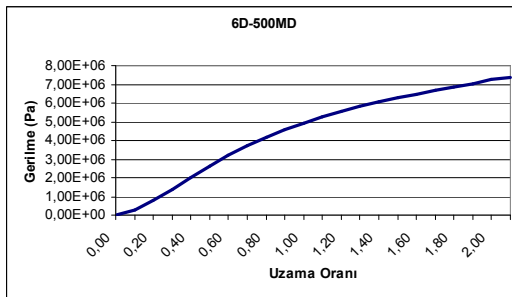
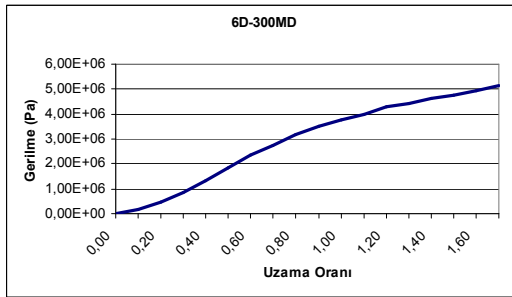
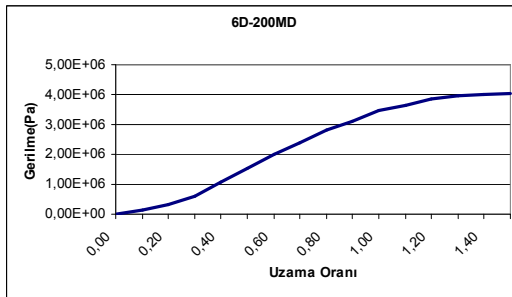
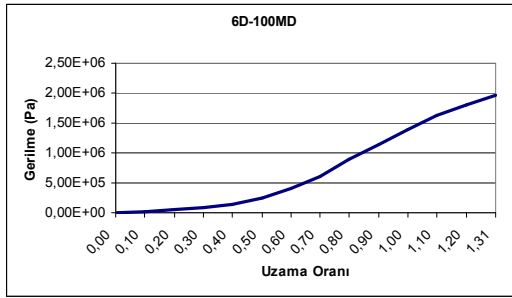
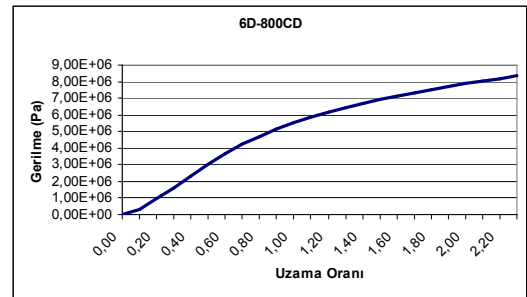
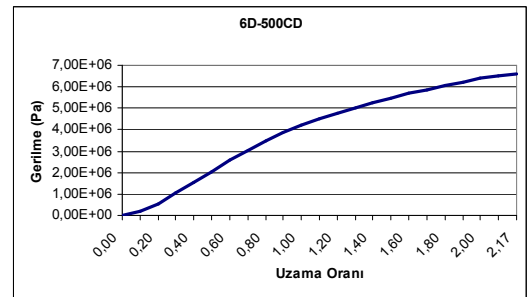
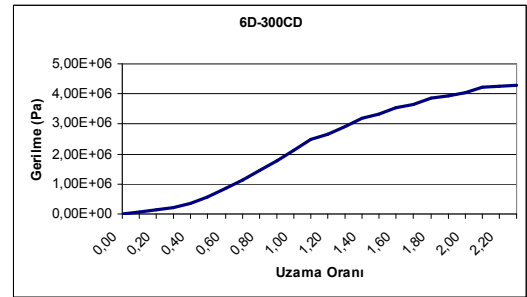
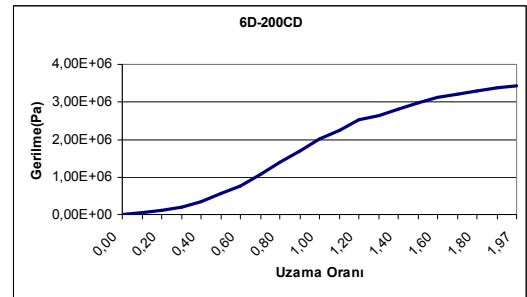
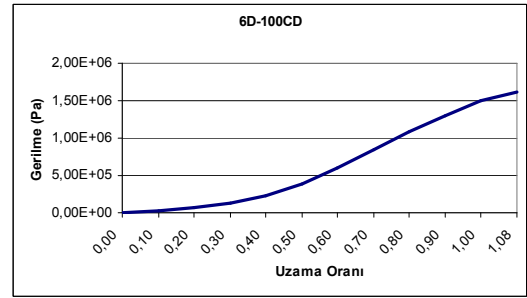
Tablo 3.5 6denye liflerden üretilmiş kumaların mukavemet ve uzama özellikleri

Numune Kodu	Kopma Yüğü (kgf)		Kopma Uzaması (mm)		Gerilme (Pa)		Uzama Oranı	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD
6D-100	106,10	80,30	131,25	108,00	1,97E+06	1,61E+06	1,313	1,080
6D-200	239,96	203,16	148,54	197,20	4,05E+06	3,45E+06	1,485	1,972
6D-300	365,54	306,48	171,36	229,86	5,11E+06	4,34E+06	1,714	2,299
6D-500	578,68	549,05	208,72	217,39	7,36E+06	6,62E+06	2,087	2,174
6D-800	810,99	872,17	223,81	236,01	7,87E+06	8,31E+06	2,238	2,360

MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön

Tablo-3.5’de 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait kopma yüğü, kopma uzaması, gerilme ve uzama oranı değerleri verilmiştir. Kumaşlara ait en düşük kopma yüğü 6D-100 kodlu kumaşta (80,30kgf) makina yönüne dik yönde, en yüksek kopma yüğü ise 6D-800 kodlu kumaşta (872,17kgf) yine makina yönüne dik yönde ölçülmüştür. 6D-800 kodlu en ağır gramajlı numune kumaş hariç diğer kumaşlarda makina yönündeki kopma yükleri daha fazladır. Kumaşlarda en düşük uzama, kopma yükünde olduğu gibi 6D-100 kodlu kumaşta (108,00mm) makina yönüne dik yönde, en yüksek uzama ise 6D-800 kodlu kumaşta (236,01mm) yine makina yönüne dik yönde ölçülmüştür. 6D-100 kodlu en hafif gramajlı numune kumaş hariç diğer kumaşlarda makina yönüne dik yönde daha yüksek uzamalar ölçülmüştür.

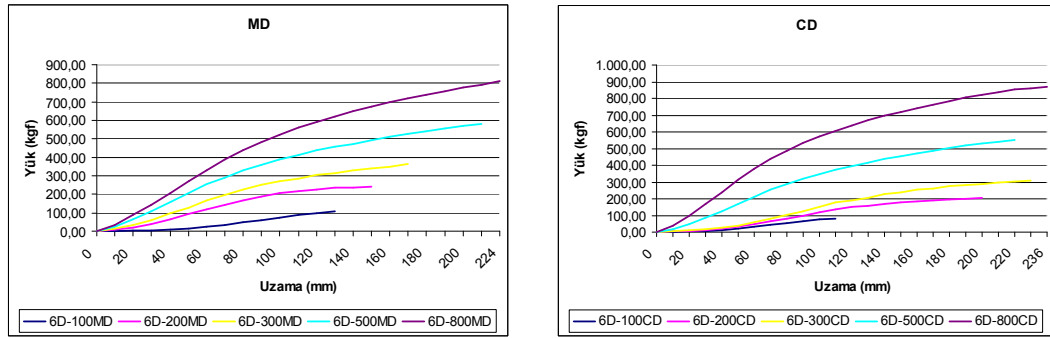
Tablo-3.5’de verilen gerilme değerleri; kopma yüğü ve kumaş kalınlığı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda bu iki parametre arasındaki orana bağlı olarak kumaş gramajı arttıkça gerilme değeri de artmaktadır. Kumaşlarda en düşük gerilme değeri 6D-100 kodlu kumaşta makina yönüne dik yönde, en yüksek gerilme değeri ise 6D-800 kodlu kumaşta yine makina yönüne dik yönde hesaplanmıştır. 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların geniş enli çekme testi verilerinden elde edilen iki temel üretim yönündeki gerilme-uzama oranı eğrileri Şekil-3.7’de verilmiştir.

Makina Yönü (MD)**Makina Yönüne Dik Yön (CD)**

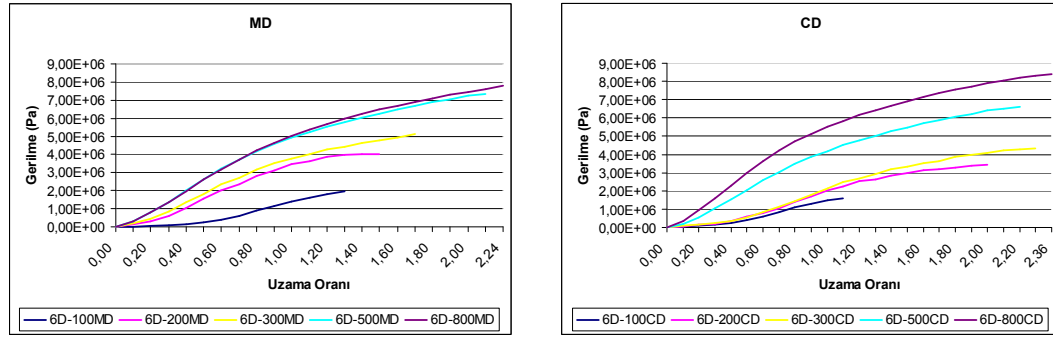
Şekil 3.7 6denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait gerilme-uzama oranı eğrileri

6 denye liflerden üretilmiş kumaşların Şekil-3.7’de görülen gerilme-uzama oranı eğrileri, sonuçların değerlendirilmesi aşamasında teorik analizlerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile karşılaştırılmıştır. 6D-100 kodlu en hafif kumaşa ait makina ve makina yönüne dik yöndeki eğriler ise aynı zamanda referans kumaş yaklaşımı teorik analizlerinde materyal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan eğrilerdir. Çalışma numunesi jeotekstil kumaşların makina yönü ve makina yönüne dik yöndeki çekme testlerinden elde edilen ve Şekil-3.7’de verilen gerilme-uzama oranı eğrileri incelendiğinde, eğrilerin doğrusal olmadığı görülmektedir. Eğriler nonlineer elastik ve lineer elastik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadırlar. 6 denye liflerden üretilmiş dokusuz yüzey kumaşların mukavemet testleri sırasında çekme yönünden farkı doğrultularda yerleşen lifler, yük almadan çekme doğrultusuna doğru yönlendirilerek düşük gerilmelerde aşırı uzama oranları oluşturmaktadırlar. Eğrilerin başlangıç kısmındaki bu bölgede kumaşların gerilme-uzama oranı davranışı lineer değildir. Öte yandan kumaş gramajı arttıkça gerilme-uzama oranı eğrilerinin başlangıç kısmındaki bu uzamalar azalmaktadır. Bu durum kumaş gramajı attıkça, kumaş esnekliğini azaltan lif-lif etkileşimlerinin ve kalınlık doğrultusunda yönlendirilmiş lif sayısının artmasından kaynaklanmaktadır.

6 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş farklı gramajlardaki jeotekstil numunelerin iki temel üretim yönündeki karşılaştırmalı yük-uzama ve gerilme uzama oranı eğrileri ise sırası ile Şekil-3.8 ve Şekil-3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8 6denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait karşılaştırmalı yük-uzama eğrileri (MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön)



Şekil 3.9 6denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait karşılaştırmalı gerilme-uzama oranı eğrileri (MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön)

Şekil-3.8’de verilen yük uzama eğrileri incelendiğinde, kumaş gramajındaki artış ile yük ve uzama değerlerinin de arttığı görülmektedir. Şekil-3.9’da görülen gerilme-uzama oranı eğrilerinde ise bu ayırım net değildir. Kopma yükü ile kalınlık arasındaki orana bağlı olarak değişen gerilmeler, farklı gramajlardaki jeotekstil numunelerinde birbirine yaklaşık değerler alabilmektedir.

3.1.5.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Kumaşların Mukavemet ve Uzama Özellikleri

Tablo-3.6’da 3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş kumaşlarda mukavemet ölçümleri sonucu elde edilen veriler görülmektedir.

Tablo 3.6 3denye liflerden üretilmiş kumaşların mukavemet ve uzama özellikleri

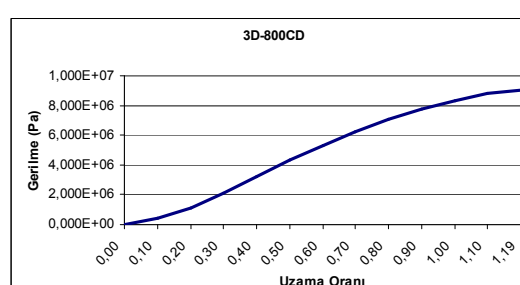
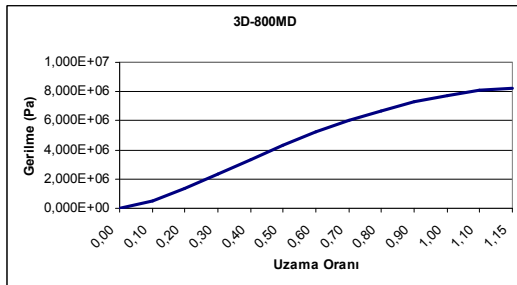
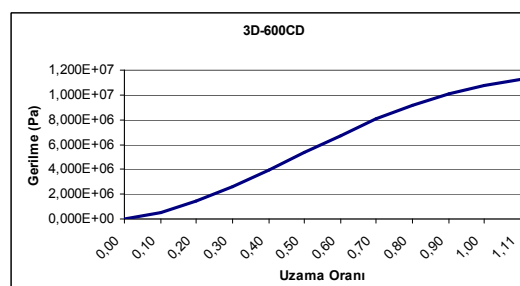
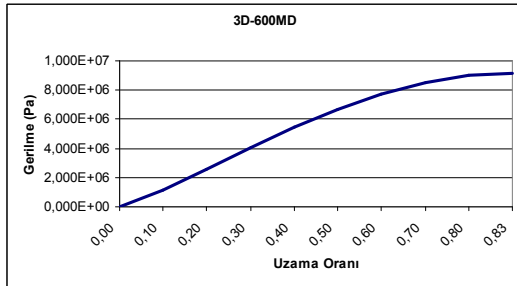
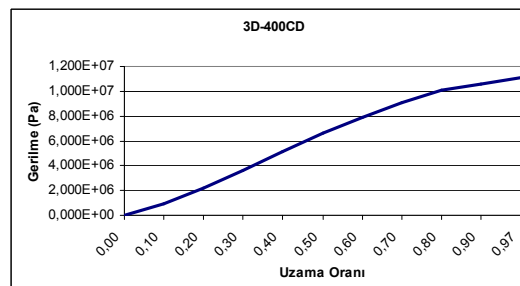
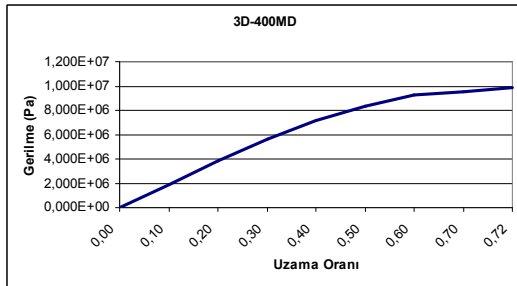
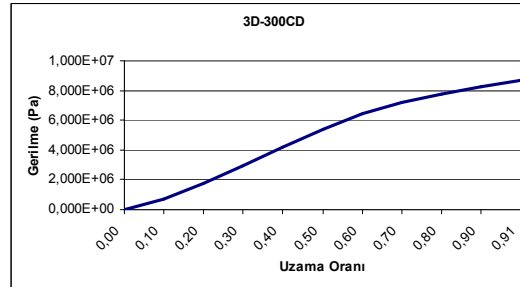
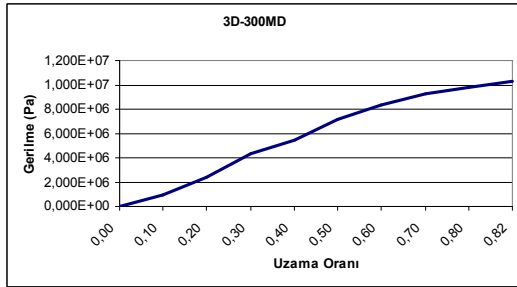
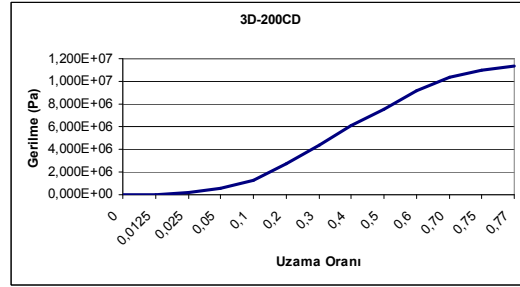
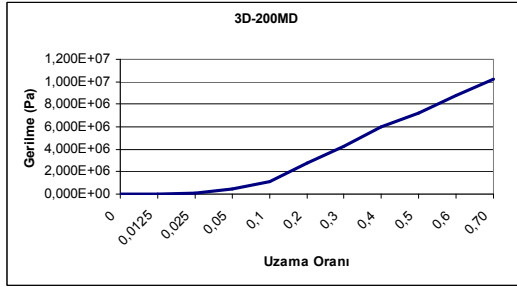
Numune Kodu	Kopma Yüğü (kgf)		Kopma Uzaması (mm)		Gerilme (Pa)		Uzama Oranı	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD
3D-200	304,98	332,59	69,92	76,99	1,03E+07	1,14E+07	0,699	0,770
3D-300	509,38	430,72	82,27	90,89	1,01E+07	8,96E+06	0,823	0,909
3D-400	583,31	657,66	72,05	96,78	1,01E+07	1,11E+07	0,721	0,968
3D-600	817,47	1.005,80	83,33	110,80	9,36E+06	1,09E+07	0,833	1,108
3D-800	1.003,58	1.095,80	115,14	118,60	8,32E+06	9,16E+06	1,151	1,186

MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön

Tablo-3.6’da 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait kopma yükü, kopma uzaması, gerilme ve uzama oranı değerleri verilmiştir. Kumaşlara ait en düşük kopma yükü 3D-200 kodlu kumaşta (304,98kgf) makina yönünde, en yüksek kopma

yükü ise 3D-800 kodlu kumaşta (1.095,80kgf) makina yönüne dik yönde ölçülmüştür. 3D-300 kodlu kumaş hariç diğer kumaşlarda makina yönüne dik yöndeki kopma yükleri daha fazladır. Kumaşlarda en düşük uzama 3D-200 kodlu kumaşta (69,92mm) makina yönüne dik yönde, en yüksek uzama ise 3D-800 kodlu kumaşta (118,60mm) yine makina yönüne dik yönde ölçülmüştür. Tüm kumaşlarda makina yönüne dik yönde daha yüksek uzamalar ölçülmüştür. 6 denye ve 3 denye liflerden üretilmiş benzer gramajlı kumaşların mukavemet ve uzama özellikleri karşılaştırıldığında, 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların kopma yüklerinin daha yüksek, kopma uzamalarının ise daha düşük olduğu görülmektedir. Bu fark 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların yüzeyine uygulanan ısı işleminden kaynaklanmaktadır. Isıl işlem sonucu yüzeydeki lifler termal olarak yeni bağlar oluşturmakta, bu bağlar uzamaları sınırlandırırken mukavemeti artırmaktadır.

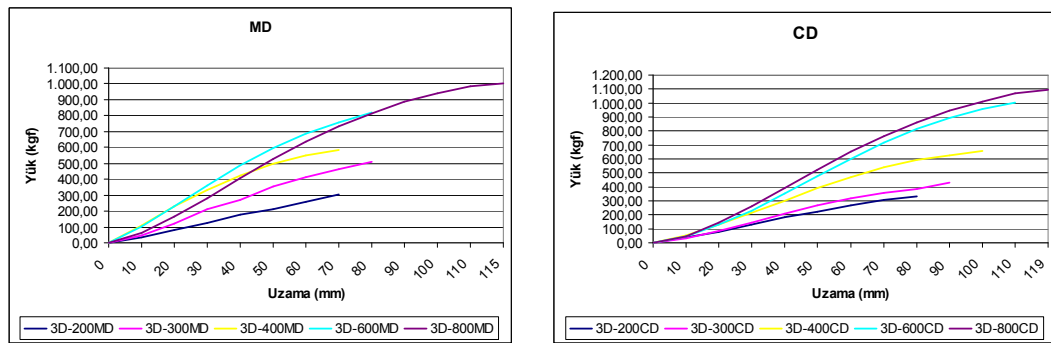
Tablo-3.6'da verilen gerilme değerleri incelendiğinde, kopma yüküne bezer şekilde 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda, 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlara göre daha yüksek gerilme değerleri elde edildiği görülmektedir. Gerilme değeri kumaş kopma yükü ve kumaş kalınlığına bağlı olarak değişen bir parametredir. 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda bu iki parametredeki artış oranları nedeni ile kumaş gramajı arttıkça gerilme değeri çok fazla değişmemektedir. Kumaşlarda en düşük gerilme değeri 3D-800 kodlu kumaşta makina yönünde, en yüksek gerilme değeri ise 3D-200 kodlu kumaşta makina yönüne dik yönde hesaplanmıştır. 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların geniş enli çekme testi verilerinden elde edilen iki temel üretim yönündeki ortalama gerilme-uzama oranı eğrileri ise Şekil-3.10'da verilmiştir.

Makina Yönü (MD)**Makina Yönüne Dik Yön (CD)**

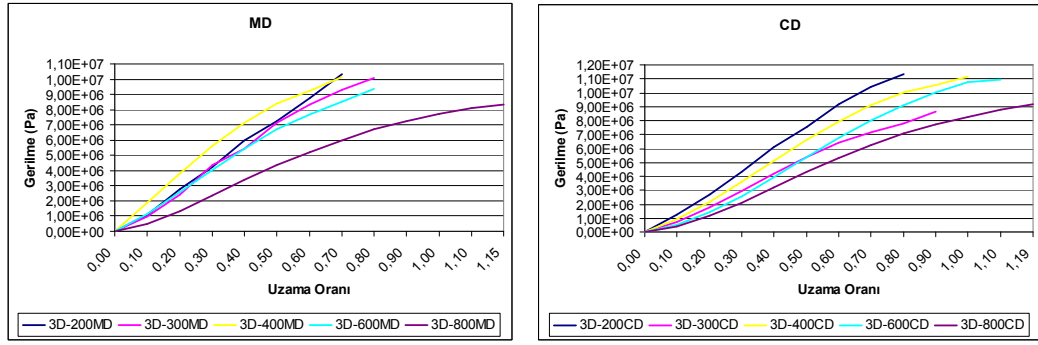
Şekil 3.10 3denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait gerilme-uzama oranı eğrileri

3 denye liflerden üretilmiş kumaşların Şekil-3.10'da görülen gerilme-uzama oranı eğrileri, sonuçların değerlendirilmesi aşamasında teorik analizlerden elde edilen gerileme-uzama oranı eğrileri ile karşılaştırılmıştır. 3D-200 kodlu kumaşa ait makina ve makina yönüne dik yöndeki eğriler ise aynı zamanda referans kumaş yaklaşımı teorik analizlerinde materyal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan eğrilerdir. 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için makina yönü ve makina yönüne dik yön için Şekil-3.10'da verilen gerilme-uzama oranı eğrileri incelendiğinde, eğrilerin doğrusal olmadığı görülmektedir. 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlara benzer şekilde bu kumaş numunelerine ait eğriler de nonlinear elastik ve lineer elastik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Uygulanan ısıl işlem nedeni ile 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların yüzeyinde oluşan yeni bağlar, dokusuz yüzey kumaşlarda çekme testi başlangıcında oluşan lif göçünü de sınırlamıştır. Dolayısı ile geniş enli çekme testi başlangıcındaki aşırı uzama oranları, 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda 6 denye liften üretilmiş kumaşlara göre çok düşüktür. Kumaş gramajındaki artış ile çekme testi başlangıcında yeniden yönlenebilen iç kısımlardaki lif sayısı artmaktadır. Ancak bu durumda lif-lif etkileşimleri ve kalınlık doğrultusunda yönlenebilen lif sayısı da arttığından bu liflerin çekme doğrultusunda yönlenebilmelerini sınırlanmaktadır.

3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş farklı gramajlardaki jeotekstil numunelerin iki temel üretim yönündeki karşılaştırmalı yük-uzama ve gerilme uzama oranı eğrileri ise sırası ile Şekil-3.11 ve Şekil-3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.11 3denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait karşılaştırmalı yük-uzama eğrileri (MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön)

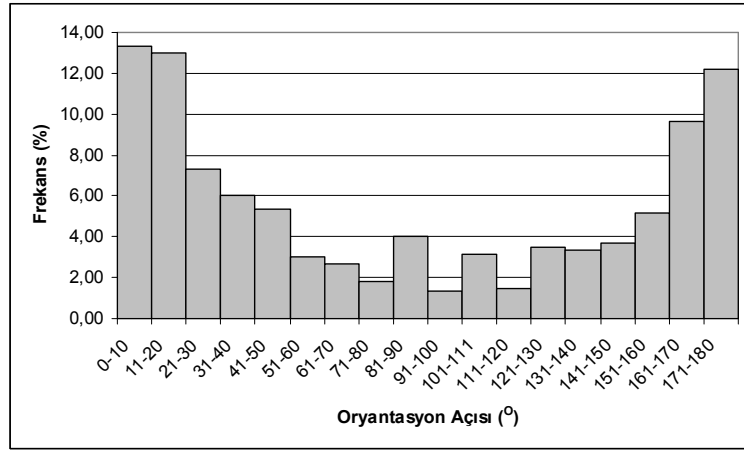


Şekil 3.12 3denye liflerden üretilmiş kumaşlara ait karşılaştırmalı gerilme-uzama oranı eğrileri (MD: Makina yönü, CD: Makina yönüne dik yön)

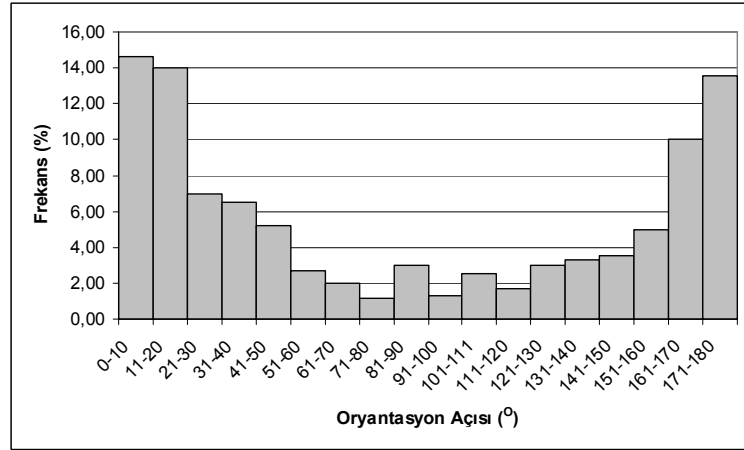
Şekil-3.11’de verilen yük uzama eğrileri incelendiğinde, kumaş gramajındaki artış ile yük ve uzama değerlerinin de arttığı görülmektedir. Şekil-3.12’de görülen gerilme-uzama oranı eğrilerinde ise bu ayırım net değildir. Kopma yükü ile kalınlık arasındaki orana bağlı olarak değişen gerilmeler, farklı gramajlardaki jeotekstil numunelerinde birbirine yaklaşık değerler alabilmektedir.

3.1.6 Referans Kumaşlarda Lif Yerleşimi Dağılımı

Kumaş tabakalarındaki liflerin yerleşimleri ve oryantasyon açıları teorik analizler için başlangıç verisi olarak belirlenmesi gereken bir diğer kumaş parametresidir. Bu çalışmada oluşturulan teorik modellerde kullanılan kumaş tabaka oryantasyon açılarının belirlenmesinde 6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş en hafif gramajlı referans kumaşlarda yapılan ölçümlerinden yararlanılmıştır. 6D-100 ve 3D-200 kodlu bu kumaşlarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen oryantasyon açısı histogramları sırası ile Şekil-3.13 ve Şekil-3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.13 6D-100 kodlu referans kumaşta makina yönündeki lif oryantasyon açısı dağılımı



Şekil 3.14 3D-200 kodlu referans kumaşta makina yönündeki lif oryantasyon açısı dağılımı

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen oryantasyon açısı dağılımlarından görüldüğü gibi referans kumaşlarda liflerin çoğu makina yönünde yönlendirilmiştir. Teorik analizlerde kumaş tabakaları için kullanılan oryantasyon açıları teorik modeller bölümünde tablolar halinde verilmiştir.

3.1.7 Jeotekstil Kumaşların Darbe Dayanımları

Jeotekstil kumaş numunelerinin darbe dayanımları hakkında fikir edinebilmek için uygulanan konik delici düşürme testi (dinamik delinme testi) sonuçları Tablo-3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 Dinamik delinme testi sonuçları

Numune Kumaş Kodu	Delik Çapı (mm)	Numune Kumaş Kodu	Delik Çapı (mm)
6D-100	18,10	3D-200	17,37
6D-200	11,00	3D-300	6,87
6D-300	6,50	3D-400	6,62
6D-500	4,70	3D-600	0,72
6D-800	0,47	3D-800	0,55

Tablo-3.7’de görüldüğü gibi kumaş gramajı arttıkça dinamik delinme testi sonucunda oluşan delik çapı (hasar) azalmaktadır. Çok sayıda tabakadan oluşan ağır gramajlı numunelerde meydana gelen delik çapı, daha ince kumaşlarda oluşan delik çapına göre çok düşüktür. Benzer gramajlı kumaşlarda 3 denye inceliğindeki liflerden oluşan ısıl işlem görmüş jeotekstillerde, 6 denye inceliğindeki liflerden oluşan jeotekstillere göre daha büyük delik çapları ölçülmüştür. Dinamik delinme testi sonuçları teorik modellerde kullanılmamıştır.

3.2 Teorik Modeller

Dokusuz yüzey jeotekstillerin mekanik davranışlarını önceden tahminleyebilmek için çalışma kapsamında oluşturulan teorik model yaklaşımlarının esası, bu yaklaşımlar ile gerçekleştirilen çözümler ile sonuçları ve elde edilen teorik bulguların deneysel veriler ile karşılaştırılması sonucunda yapılan değerlendirmeler aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

3.2.1 Teorik Modellerin Oluşturulması

Bu çalışmada, jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarını tahminleyebilmek için tek lif özellikleri ve referans kumaş özelliklerine bağlı iki farklı teorik yaklaşımı yapılmıştır. Bu yaklaşımlarda literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak (Bais-Singh ve Goswami, 1995; Liao ve ark., 1997), öncelikle dokusuz yüzey kumaşlar için tabakalı kompozit yapılarıdaki benzer teorik bir model oluşturulmuştur. Daha sonra bu teoriye göre geniş enli çekme testini dikkate alan uygun sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar paket programı ANSYS kullanılarak teorik gerilme analizleri yapılmıştır.

Birinci yaklaşımda, sonlu elemanlar analizinde kullanılan tabaka materyal özellikleri kumaşları oluşturan tek liflerin mukavemet ölçüm verilerinden yola çıkarak belirlenmiştir.

İkinci yaklaşımda ise iki farklı numune grubuna ait en düşük gramajlı kumaşlar (6D-100, 3D-200) referans kumaş olarak belirlenmiş ve sonlu elemanlar analizinde tabaka materyal özelliklerinin belirlenmesinde bu kumaşlara ait deneysel veriler kullanılmıştır.

Araştırma kapsamında oluşturulan yaklaşımlarda, materyal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan lif ve referans kumaşların gerilme-uzama oranı eğrilerindeki nonlinear durum da göz önüne alınarak teorik analizler gerçekleştirilmiştir.

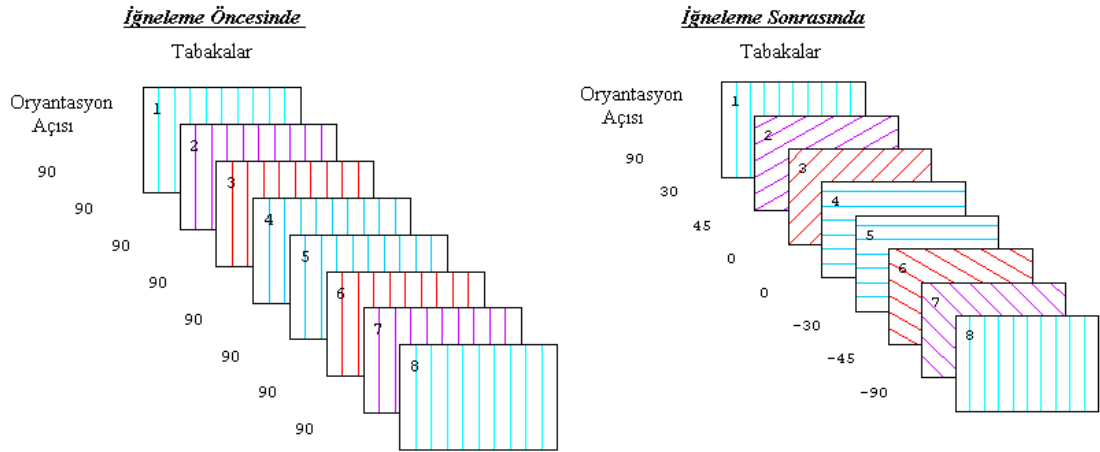
3.2.1.1 Teorik Modeller için Genel Kabuller

Tek lif özellikleri ve referans kumaş özelliklerine göre oluşturulan her iki teorik yaklaşımda, dokusuz yüzey kumaşlar için önceki çalışmalar da (Bais-Singh ve ark., 1998; Hearle ve Stevenson, 1964; Liao ve ark., 1997) dikkate alınarak aşağıda verilen genel kabuller yapılmıştır.

* Dokusuz yüzey kumaşların çoğu özellikle de yüksek gramajlı olanları çok sayıda tülbent tabakasından oluşmaktadır. Dolayısı ile bu çalışmada dokusuz yüzey kumaş yapısının bir tabakalı kompozit (laminat) olduğu varsayılmış, kumaşı oluşturan tülbent katmanları ise tek bir kompozit tabakası (lamina) olarak ele alınmıştır.

* Çalışma numunesi olarak kullanılan dokusuz yüzey kumaşlar çeşitli sayıda tülbent tabakalarından oluşmaktadırlar. Dokusuz yüzey kumaş üretim hattında başlangıçta tülbent tabakaları içerisinde aynı doğrultuda yönlendirilmiş lifler, katlama ve iğneleme işlemleri sonucunda kumaş içerisinde farklı doğrultulara yönlendirilerek rasgele veya bilinen bir dağılım sergilemektedirler. Dolayısı ile iğneleme sonrasında kumaş

tabakalardaki liflerin oryantasyon açılarının değiştiği veya aynı kaldığı kabul edilmiştir. Bu durumda tülbent tabakalarının kumaş yapısı içerisinde kumaş kalınlığına göre Şekil-3.15’de görüldüğü gibi farklı açılarda üst üste gelerek yerleştiği varsayılmıştır. Bu açılar, liflerden oluşan tabakaların kumaş içerisindeki oryantasyon açılarıdır.



Şekil 3.15 İğneleme öncesi ve sonrasında kumaş yapısı içerisinde tülbent tabakalarının yerleşimi

* Sonlu elemanlar metodunu kullanarak gerilme analizlerini gerçekleştirmek için kumaş yapısının sonlu sayıda sürekli olmayan birim ünitelerden (sonlu eleman) oluştuğu ve her bir birim ünitenin tabakalardan meydana geldiği kabul edilmiştir.

* Her bir tabaka içerisinde Şekil-3.15’de de görüldüğü gibi aynı doğrultuda yönlenmiş lifler bulunduğu ve bu liflerin sonlu elemanların düğüm noktalarında birbirlerine bağlanarak kumaşı oluşturduğu varsayımları yapılmıştır.

3.2.1.2 Model Parametreleri Arasındaki İlişkiler

Dokusuz yüzey kumaşlar için yukarıda verilen kabullere göre oluşturulan teorik modellerde ve yapılan teorik çözümlerinde değişkenler arasındaki ilişkileri belirten genel formülasyonlar aşağıda açıklanmıştır. Her iki model yaklaşımının parametreleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde kullanılacak bu genel formülasyonlar önceki çalışmalar (Bais-Singh ve Goswami, 1995; Liao ve ark., 1997) ve tabakalı kompozit teorisi (Chou ve Frank, 1989; Kaw, 1997) dikkate alınarak elde edilmiştir.

Kumaşlarda kalınlık diğer boyutlara göre çok küçük olduğu için çalışmada dokusuz yüzey kumaşı oluşturduğu varsayılan tülbent tabakaları ortotropik bir malzeme gibi düşünülmüştür. Bununla birlikte tabakanın kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük olduğu için düzlem dışındaki yükleri taşımaz ve bu durumda ince tabaka için düzlem gerilme koşulları dikkate alınabilir. Düzlem gerilme durumunda ortotropik malzemelerde gerilme-uzama oranı ilişkisi veren denklem 3.1 (Bais-Singh ve ark., 1998; Bogdanovich ve Pastore, 1996) kumaş tabakaların geniş enli çekme testindeki gerilme-uzama ilişkisini ifade etmekte kullanılmıştır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

burada, σ_1 ve σ_2 iki temel yöndeki gerilmeler, τ_{12} düzlemdeki kayma gerilmesi, ε_1 ve ε_2 iki temel yöndeki uzama oranları, γ_{12} düzlemdeki kayma şekil değiştirmesidir. Q_{ij} direngelik matrisinin düzlem gerilme durumunda ortotropik malzemeler için düzenlenmiş katsayılarını ifade etmektedir ve aşağıda verilen formüller ile mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilir (Kaw, 1997).

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (3.2)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (3.3)$$

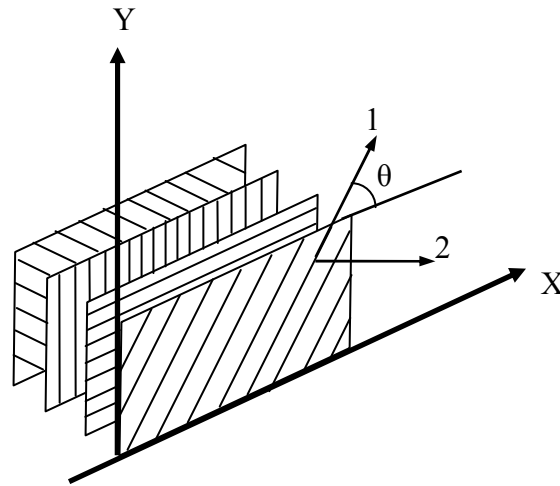
$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (3.4)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (3.5)$$

burada, E_1 ve E_2 iki temel yöndeki elastisite modülleridir, G_{12} düzlemdeki kayma modülü, ν_{12} ve ν_{21} bu yönlerdeki poisson oranlarıdır.

Teorik model için yapılan genel kabullerde de belirtildiği gibi jeotekstil uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çok ağır gramajlı dokusuz yüzey kumaşların Şekil-3.16'da görüldüğü gibi farklı açılarda yerleşmiş ince tülbent

tabakalarından oluştuğu varsayılmıştır. Dolayısı ile kumaş kalınlığına dik yönde bir kuvvet uygulandığında, liflerin de yerleşimi nedeni ile “Düzlemde keyfi takviyeli durumda gerilme şekil değiştirme ilişkisine” benzer koşullar oluşacaktır. Bu durumda geniş enli çekme testi için tüm kumaş yapısı ele alınırsa Şekil-3.16’da X-Y koordinat sistemi ile belirtilen eksenler, sırası ile kumaşın çekme yönündeki ve buna dik yöndeki eksenleridir ve global eksenler olarak adlandırılırlar. Tek bir tabakaya ait eksenler ise 1-2 koordinat sistemi ile gösterilmiştir ve lokal eksenler olarak adlandırılmaktadırlar (Kaw, 1997). Tek bir tabakadaki tüm lifler 1 doğrultusunda yönlenmişken 2 doğrultusu liflere dik yöndür.



Şekil 3.16 Dokusuz yüzey kumaşlar için global ve lokal koordinatların gösterimi

Çekme testlerindeki global ve lokal gerilmeler arasındaki ilişki Şekil-3.16’da da görülen tabaka oryantasyon açısı θ ’ya bağlıdır. Dolayısı ile kumaş kalınlığına dik yönde bir kuvvet uygulandığında lokal ve global koordinat sistemleri arasındaki gerilme-uzama oranı ilişkisi tabakalı kompozit teorisine (düzlemde keyfi takviyeli durumda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi) göre (Bogdanovich ve Pastore, 1996) aşağıdaki formüller ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2\theta & s^2\theta & -2s\theta c\theta \\ s^2\theta & c^2\theta & 2s\theta c\theta \\ s\theta c\theta & -s\theta c\theta & c^2\theta - s^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2\theta & s^2\theta & s\theta c\theta \\ s^2\theta & c^2\theta & -s\theta c\theta \\ s\theta c\theta & -s\theta c\theta & c^2\theta - s^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

burada , $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ X-Y koordinat sistemindeki tabaka gerilmeleri, $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ 1-2 koordinat sistemindeki tabaka gerilmeleri, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ X-Y koordinat sistemindeki tabaka şekil değiştirmeleri, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ 1-2 koordinat sistemindeki tabaka şekil değiştirmeleri, c kosinüs, s sinüs ve θ tabakadaki tüm liflerin oryantasyon açısıdır.

Denklem 3.7 ve 3.6 ile denklem 3.1 birleştirilerek her bir tabaka için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir ve bilinen bir oryantasyon açısında lokal ve global gerilmeler hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

burada, $\overline{Q_{ij}}$, matrislerin birleştirilmesi sonucunda elde edilen direngenlik matrisinin elemanlarıdır ve bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilir (Kaw, 1997).

$$\overline{Q_{11}} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \quad (3.9)$$

$$\overline{Q_{12}} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad (3.10)$$

$$\overline{Q_{22}} = Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (3.11)$$

$$\overline{Q_{16}} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \quad (3.12)$$

$$\overline{Q_{26}} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \quad (3.13)$$

$$\overline{Q_{66}} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad (3.14)$$

Kumaşı oluşturan tüm tabakaların birbirine bağlandığı varsayıldığından tüm tabakalar kumaş birim elemanı ile aynı şekil değiştirmeye maruz kalacaklardır. Eğer kumaşa ait uzama oranları biliniyorsa denklem 3.8 yardımı ile her bir tabaka için global koordinat sistemindeki gerilmeler hesaplanabilir. Her bir tabaka için hesaplanan bu gerilmeler daha sonra kompozit malzeme teorisi kullanılarak tüm elemanın mekanik davranışını verecek şekilde bütünleştirilebilir. Bu durumda her bir sonlu eleman için X-Y doğrultusundaki kumaş gerilmeleri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{k=N} \left(\begin{bmatrix} \overline{Q_{11k}} & \overline{Q_{12k}} & \overline{Q_{16k}} \\ \overline{Q_{12k}} & \overline{Q_{22k}} & \overline{Q_{26k}} \\ \overline{Q_{16k}} & \overline{Q_{26k}} & \overline{Q_{66k}} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

burada, $\overline{Q_{ijk}}$ i. tabakaya ait direngenlik matrisinin sabitleri, N toplam tabaka sayısıdır.

Denklem 3.15 ise sembolik matris formunda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$[\sigma]^e = [D]^e [\varepsilon]^e \quad (3.16)$$

Burada $[D]^e$ sonlu elemanın yapısal matrisidir $[\sigma]^e = [\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}]^T$ ve $[\varepsilon]^e = [\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}]^T$ dir.

Sonlu elemanlar metodu teorisine göre (Chandrupatla ve Belegundu, 2002) elemanlar için yük ve uzamalar arasındaki ilişki ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$[F]^e = [K]^e [U]^e \quad (3.17)$$

ve

$$[K]^e = [B]^e{}^T [D]^e [B]^e AT \quad (3.18)$$

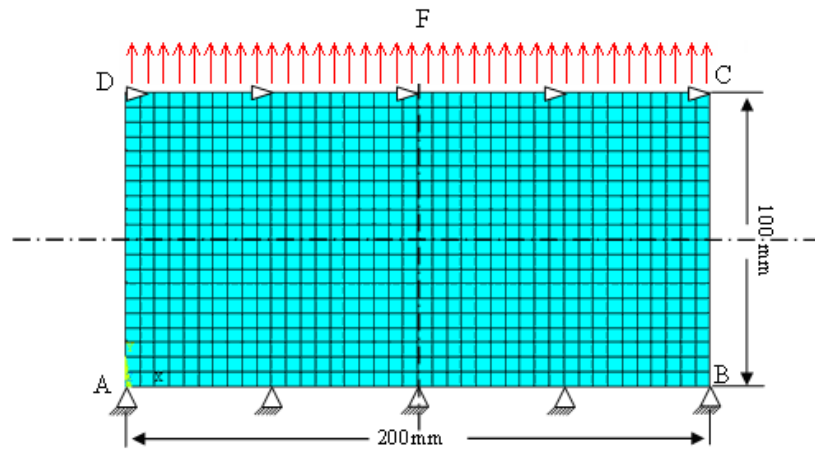
burada, $[F]^e$ elemana ait kuvvet vektörü, $[K]^e$ elemana ait direngenlik matrisi, $[U]^e$ elemana ait düğümlerdeki şekil değiştirme vektörü, $[B]^e$ elemana ait uzama oranı matrisi, A elemanın alanı, T ise kalınlığıdır.

3.18 numaralı denklemdeki $[D]^e$ matrisi yerine 3.16 numaralı denklemdeki $[D]^e$ matrisi kullanılarak sonlu elemanlar teorisine göre tüm yapının gerilme –şekil değiştirme ilişkisini verecek hesaplamalar yapılabilir.

Yukarıda verilen genel formülasyonlar dikkate alınarak, liflerin ve referans kumaşların geniş enli çekme testleri sonucu elde edilen gerilme-uzama oranı verileri ve eğrilerine göre düzenlenen iki farklı teorik yaklaşımının ayrıntıları ileriki kısımlarda açıklanmıştır.

3.2.1.3 Sonlu Elemanlar Ağı Model Yapısının Oluşturulması

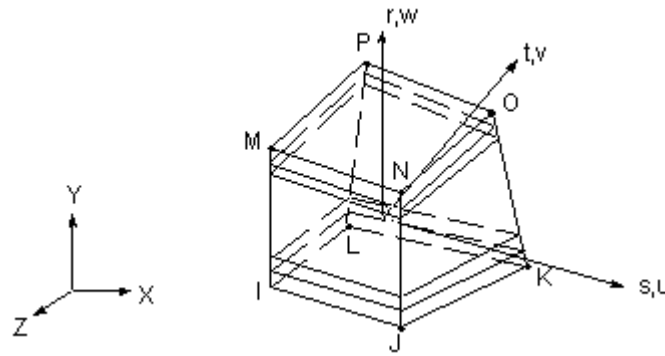
Teorik analizde kullanılan dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlara ait sonlu elemanlar model geometrisi, Şekil-3.17’de görüldüğü gibi geniş enli çekme testi dikkate alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.17 Kumaş modelinin başlangıç geometrisi

Şekil-3.17 kumaş modelinin başlangıç yapısının yanı sıra modelde uygulanan sınır şartlarını da göstermektedir. AB ve CD kenarları çeneler tarafından sıkıştırılmış kenarlardır. AB kenarındaki tüm şekil değiştirmeler sınırlandırılmıştır. CD kenarının ise sadece çekme yönünde hareket etmesine izin verilmiştir. BC ve AD kenarları serbesttir ve çekme yönüne dik yönde hareket edebilmektedirler.

Çalışma kapsamında oluşturulan teorik yaklaşım dikkate alınarak başlangıçtaki kumaş geometrik modelini elemanlara ayırmak için sonlu elemanlar paket programı ANSYS'de Şekil-3.18'de şematik gösterimi verilen “Yapısal Tabakalı Kompozit-Solid46” sonlu elemanı seçilmiştir. Eleman üç boyutlu ve sekiz düğümlüdür. Eleman her düğümünde üç serbestlik derecesine (x,y,z yönlerindeki şekil değiştirmeler) sahiptir. Seçilen elemanın özelliği nedeni ile elemanların içerisinde istenilen sayıda (250'ye kadar) tabaka oluşturulabilmektedir ve eleman tabakalı yapıların anizotropik nonlineer davranışının hesaplayabilmektedir (ANSYS 8.0). Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modeli 800 eleman ve 1722 düğümden oluşmaktadır.



Şekil 3.18 Tabakalı elemanın geometrisi (ANSYS 8.0)

6 denye ve 3 denye liflerden oluşan jeotekstil kumaşlar için sonlu elemanlar analizinde kullanılan tabaka ve elemanlara ait başlangıç verileri ise sırası ile Tablo-3.8 ve Tablo-3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.8 6denye liflerden oluşan kumaşlar için tabakalara ve elemanlara ait başlangıç verileri

Kumaş Kodu	Toplam Tabaka Sayısı	Tabaka Oryantasyon Açıları (°)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Toplam Eleman Kalınlığı (mm)
6D-100	2	10, 170	1,30	2,60
6D-200	5	10, 30, 90, 150, 180	0,59	2,96
6D-300	8	0, 20, 40, 70, 110, 140, 160, 180	0,44	3,56
6D-500	14	0, 10, 20, 30, 40, 60, 75, 105, 120, 140, 150, 160, 170, 180	0,28	4,01
6D-800	22	0, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115, 125, 135, 145, 155, 165, 170, 175, 180	0,23	5,20

Tablo 3.9 3denye liflerden oluşan kumaşlar için tabakalara ve elemanlara ait başlangıç verileri

Kumaş Kodu	Toplam Tabaka Sayısı	Tabaka Oryantasyon Açılırları (°)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Toplam Eleman Kalınlığı (mm)
3D-200	4	0, 10, 170, 180	0,37	1,48
3D-300	8	0, 20, 40, 70, 110, 140, 160, 180	0,31	2,48
3D-400	12	0, 10, 20, 30, 60, 75, 105, 120, 150, 160, 170, 180	0,25	2,96
3D-600	16	0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 85, 95, 120, 135, 150, 160, 170, 175, 180	0,29	4,46
3D-800	20	0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 50, 60, 85, 95, 120, 130, 135, 150, 160, 165, 170, 175, 180	0,30	6,09

Tablo-3.8 ve Tablo-3.9’de görülen ve teorik analizlerde tabaka ve elemanlara ait başlangıç verilerini oluşturan değerler, jeotekstil kumaşların üretim parametreleri ve deneysel ölçüm sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. 6 denye ve 3 denye liflerden üretilen kumaşlara ait toplam tabaka sayılarının belirlenmesinde kumaşları oluşturan tülbent sayıları esas alınmıştır. Kumaş gramajında artışta bağlı olarak kullanılan birim elemanın tabaka sayısı da artmaktadır. Tabakaların oryantasyon açıları ise referans kumaşlarda yapılan oryantasyon açısı ölçümleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Teorik analizler tüm kumaşlar için hem makina hem de makina yönüne dik yönde gerçekleştirildiğinden, makina yönüne dik yöndeki analizlerde Tablo-3.8 ve Tablo-3.9’da verilen oryantasyon açılarının tüm açıları veri olarak kullanılmıştır. Toplam eleman kalınlıkları kumaşların kalınlık ölçümleri sonucu belirlenmiş, tabaka kalınlıkları ise toplam eleman kalınlığının tabaka sayılarına bölünmesi ile elde edilmiştir.

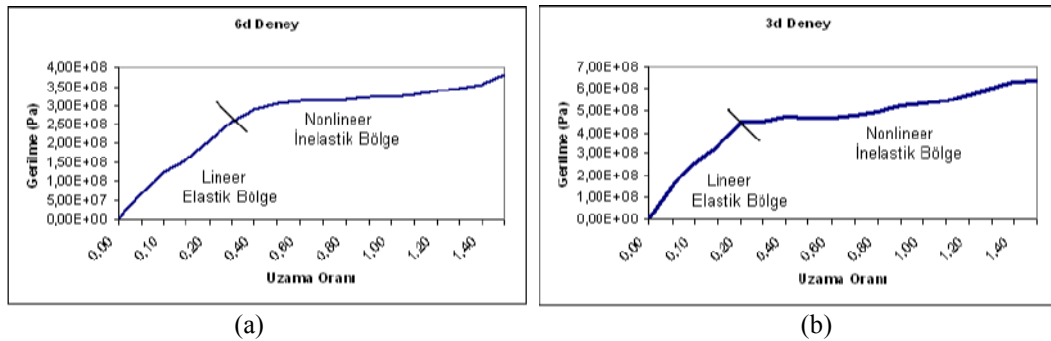
Sonlu elemanlar modelinde, Şekil-3.17’de de görüldüğü gibi kumaşlara DC kenarı boyunca yayılı yük (negatif basınç) uygulanmıştır. Uygulanan yüklerin büyüklükleri kumaş örnekleri için farklıdır ve her bir kumaşın Tablo-3.5 ve 3.6’da verilen kopma yüküne yakın değerlerdir.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak verilerin paket bilgisayar programına aktarılmasından sonra tüm kumaşlarda makina yönünde ve makina yönüne dik yönde gerilme analizleri yapılmıştır. Lif ve referans kumaş numuneleri çekme testlerinde nonlineer materyal özellikleri gösterdiklerinden sonlu elemanlar analizinde nonlineer çözüm yöntemi uygulanmıştır.

3.2.1.4 Teorik Model-I: Tek Lif Yaklaşımı

Bu teorik yaklaşımda, sonlu elemanlar analizinde malzeme özellikleri olarak numune kumaşları oluşturan liflere ait deneysel veriler kullanılmıştır. Model liflerin gerilme-uzama oranı davranışları ve kumaş içerisindeki hacimsel oranları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Dolayısı ile teorik modelin oluşturulmasında sonlu elemanın parametreleri (değişkenleri) arasındaki ilişkileri ifade etmek için kullanılan denklemler, bu yaklaşımda liflerin deneysel verileri dikkate alınarak tekrar düzenlenmiştir.

Sonlu elemanı oluşturan her bir tabaka için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisini ifade etmekte kullanılan denklem 3.8, gerilme ve uzama oranının lineer olarak ilişkili olduğu malzemelerde geçerlidir. Öte yandan bu yaklaşımda sonlu elemanın tabaka malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan polipropilen liflerin gerilme-uzama oranı eğrileri Şekil-3.19'da görüldüğü gibi lineer değildir. Modelde tülbent tabakalarını oluşturduğu varsayılan ve esas yük taşıyıcı elemanlar olan liflerin gerilme-uzama oranı eğrileri çekme testi başlangıcında lineer bir davranış gösterirken akma noktasından sonra nonlineer bir davranış sergilemektedir.



Şekil 3.19 Liflere ait gerilme-uzama oranı eğrileri; (a) 6denye, (b) 3denye

Şekil-3.19'da görüldüğü gibi liflerin lineer olmayan bu gerilme-uzama oranı davranışları nedeni ile modelde kumaş yapısını oluşturan her bir sonlu eleman tabakasının da lineer olmayan bir gerilme-uzama oranı davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Dolayısı ile her bir tabakanın gerilme bileşenleri de iki kısımda düşünülmüştür. İlk kısımda gerilme uzama oranı artışı ile lineer olarak

değişmektedir, ikinci kısımda ise gerilme uzama oranı artışı ile nonlinear olarak değişmektedir. Bu durumda ortotropik bir tabakada lokal koordinatlardaki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Burada lineer kısımdaki direngenlik matrisin değişkenleri denklem 3.2-3.5 arasında verilen malzeme sabitleridir. Nonlinear kısımdaki direngenlik matrisinin bileşenleri ise sabit olmayıp uzama oranının fonksiyonu $[Q'_{11} = f(\varepsilon)]$ şeklindedir. Yani matris, lif doğrultusundaki gerilme ve uzamaya bağlı olan tek bir terim içermektedir.

Bu durumda her bir tabaka için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} + Q'_{11} \begin{bmatrix} c^4 \theta & s^2 \theta c^2 \theta & s \theta c^3 \theta \\ s^2 \theta c^2 \theta & s^4 \theta & s^3 \theta c \theta \\ s \theta c^3 \theta & s^3 \theta c \theta & c^2 \theta s^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dokusuz yüzey jeotekstillerin her tabakası için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisini ifade eden bu denklemin çözümlenebilmesi için, \overline{Q}_{ij} matrisinin bileşenlerini oluşturan ve denklem 3.2-3.5 arasında verilen mühendislik sabitleri (elastisite modülleri E_1 ve E_2 , düzlemdeki kayma modülü G_{12} , poisson oranları ν_{12} ve ν_{21}) ile tabaka oryantasyon açısı θ ve nonlinear bölgedeki noktasal gerilme uzama oranı değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Kumaş tabakalarını oluşturan liflerin gerilme-uzama oranı özelliklerinin esas alındığı bu model için her bir lif tabakasına ait lineer bölgedeki E_1 , tek lif mukavemet ölçümleri sonucu belirlenen lif elastisite modülü E_{lif} 'e eşit alınmıştır. Boylarına göre incelikleri çok küçük olan liflerde diğer sabitlerin ölçümü zor olduğu için E_2 , G_{12} , ν_{21} sabitleri sıfır olarak kabul edilmiş, poisson oranı ν_{12} ise polipropilen lifleri için

0,35 olarak alınmıştır (Karain, 2003). Bu durumda her bir tabakanın global koordinatlardaki gerilme-uzama oranı ilişkisini ifade eden denklem aşağıdaki şekle dönüşecektir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = (E_{lif} + Q'_{11}) \begin{bmatrix} c^4\theta & s^2\theta c^2\theta & s\theta c^3\theta \\ s^2\theta c^2\theta & s^4\theta & s^3\theta c\theta \\ s\theta c^3\theta & s^3\theta c\theta & c^2\theta s^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Denklem 3.21’de her bir lif tabakasının elastisite modülü lifin elastisite modülü olan E_{lif} ’e eşit alınmıştır. Ancak her bir tabakada tek bir lifin değil liflerin gerilmeye etkisi olduğundan, tabakanın global koordinatlardaki gerilmelerini hesaplamak için liflerin tabaka içerisindeki hacimsel oranlarının dikkate alınması gerekmektedir. Teorik model altyapısını oluşturan tabakalı kompozit malzemelerde tek bir tabakanın elastisite modülü kompoziti oluşturan malzemelerin hacimsel oranlarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir (Kaw, 1997).

$$E_1 = E_{lif}V_{lif} + E_mV_m \quad (3.22)$$

burada, E_1 1 doğrultusunda yönlendirilmiş tabakanın elastisite modülü, E_m matris malzemenin elastisite modülü, E_{lif} lifin elastisite modülüdür. V_{lif} ve V_m sırası ile lifin ve matris malzemenin hacimsel oranlarıdır.

Dokusuz yüzey kumaşlarda tek bir tabakada sadece liflerin kapladığı hacim olduğundan boşluğun hacmi ihmal edilmiş ve E_mV_m değeri sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu durumda denklem 3.22 dokusuz yüzey kumaşlar için

$$E_1 = E_{lif}V_{lif} \quad (3.23)$$

şekline dönüşür. $1m^2$ kumaş içerisindeki liflerin hacimsel oranı ise denklem 3.24 ile hesaplanabilir (Bais-Singh ve Goswami, 1995).

$$V_{lif} = \frac{v_{lif}}{v_{kumaş}} = \frac{\frac{m_{lif}}{\rho_{lif}}}{1.1.T} = \frac{G}{\rho_{lif}T} \quad (3.24)$$

burada v_{lif} $1m^2$ 'deki lif hacmi, $v_{kumaş}$ $1m^2$ deki kumaş hacmi, m_{lif} $1m^2$ deki liflerin ağırlığı (sadece liflerin ağırlığı kumaş ağırlığını oluşturduğundan m_{lif} kumaş gramajı olan G 'ye eşittir), ρ_{lif} liflerin özgül ağırlığı, T kumaş kalınlığıdır. Tek bir tabakadaki liflerin hacimsel oranı ise denklem 3.25 yardımı ile ifade edilmiştir.

$$V_{lif} = \frac{G}{\rho T} \frac{t}{T} \quad (3.25)$$

burada, t tabakanın kalınlığıdır. Bu durumda her bir tabaka için denklem 3.21 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = V_{lif} (E_{lif} + Q'_{11}) \begin{bmatrix} c^4\theta & s^2\theta c^2\theta & s\theta c^3\theta \\ s^2\theta c^2\theta & s^4\theta & s^3\theta c\theta \\ s\theta c^3\theta & s^3\theta c\theta & c^2\theta s^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Dokusuz yüzey kumaşları oluşturan liflere ait özellikler göz önüne alındığında bu teorik model yaklaşımında her bir sonlu eleman için X-Y doğrultusundaki kumaş gerilmeleri veren denklem 3.15 aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{k=N} \left(V_{lif_k} (E_{lif} + Q'_{11}) \begin{bmatrix} c^4\theta_k & s^2\theta_k c^2\theta_k & s\theta_k c^3\theta_k \\ s^2\theta_k c^2\theta_k & s^4\theta_k & s^3\theta_k c\theta_k \\ s\theta_k c^3\theta_k & s^3\theta_k c\theta_k & c^2\theta_k s^2\theta_k \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

burada, θ_k tabaka oryantasyon açısıdır, V_{lif_k} ise tabadaki liflerin hacimsel oranıdır.

Denklem 3.27 lineer kısım ve nonlinear kısım için iki farklı direngenlik matrisi içermektedir ve sembolik formda aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$[\sigma]^e = [D]^e [\varepsilon]^e + [D]^{e'} [\varepsilon]^e \quad (3.28)$$

burada, $[D]^e$ ve $[D]^{e'}$ sırası ile sonlu elemanın lineer kısımdaki ve nonlineer kısımdaki direngenlik matrisleridir, $[\sigma]^e = [\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}]^T$ ve $[\varepsilon]^e = [\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}]^T$ dir.

Tek lif yaklaşım için denklem 3.28'de verilen ifade ve sonlu elemanlar teorisi için denklem 3.17 ve 3.18'de verilen eşitlikler dikkate alınarak sonlu elemanlar paket programı ANSYS'e veriler girilmiş ve gerilme analizleri yapılmıştır.

Tek lif özelliklerinin ele alındığı bu yaklaşımda, sonlu elemanın malzeme özellikleri liflerin Şekil-3.19'da verilen gerilme-uzama davranışları göz önüne alınarak ANSYS'de iki kısımda tanımlanmıştır. Malzeme özelliği, lif gerilme-uzama oranı eğrilerinin doğrusal olduğu ilk kısımda "lineer elastik ortotropik" olarak tanımlanmıştır. Lif gerilme uzama-oranı eğrilerinin doğrusal olmadığı akma noktasından sonraki ikinci kısımda ise malzeme "nonlineer inelastik" olarak tanımlanmış ve eğriyi belirlemek için "multi-lineer" yaklaşım yapılmıştır

Elastisite modülünün sabit olduğu lineer-elastik kısımda tabakalara ait elastisite modülü E_1 , her bir kumaş numunesi için denklem 3.25'de verilen hacimsel oran hesabına göre düzenlenerek programda veri olarak kullanılmıştır. 6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflerden oluşan kumaşlarda tek lif yaklaşımda analizlerde kullanılan lineer elastik bölgedeki sabit elastisite modülleri Tablo-3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10 Tek lif yaklaşımı için lineer bölgedeki sabit elastisite modülleri

Kumaş Kodu	E_{lif} (Pa)	Tabakadaki Lif Hacimsel Oranları	E_1 (Pa)
6D-100	1,26E+09	0,0211	2,66E+07
6D -200	1,26E+09	0,0149	1,87E+07
6D -300	1,26E+09	0,0116	1,46E+07
6D -500	1,26E+09	0,0098	1,23E+07
6D -800	1,26E+09	0,0077	9,67E+06
3D-200	3,46E+09	0,0371	1,29E+08
3D-300	3,46E+09	0,0166	5,75E+07
3D-400	3,46E+09	0,0124	4,28E+07
3D-600	3,46E+09	0,0092	3,20E+07
3D-800	3,46E+09	0,0072	2,50E+07

Elastisite modülünün sabit olmadığı nonlinear bölgede ise multi-lineer gerilme-uzama oranı yaklaşımına göre belirli aralıklardaki uzama oranı değerlerine karşılık gelen gerilme değerleri veri olarak kullanılmıştır. Linear bölgedekine benzer şekilde her bir lif tabakasında sadece liflerin kapladığı hacimsel oranın gerilme ve uzamaya etkisi olduğundan veri olarak kullanılan gerilme değerleri her bir kumaş için denklem 3.25'e göre hesaplanan hacimsel oranlar ile çarpılarak programa girilmiştir. Tablo-3.11 ve Tablo-3.12'de sırası ile 6 denye ve 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların hacimsel oranlara göre düzenlemiş multilineer bölgedeki gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 3.11 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda tek lif yaklaşımı için multi-lineer bölgedeki gerilmeler

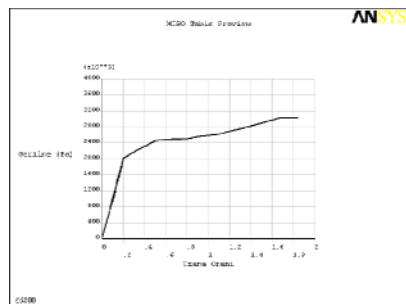
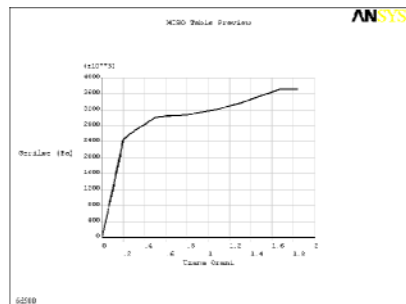
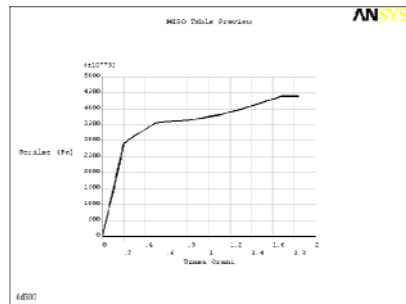
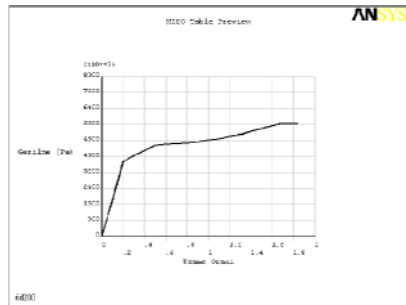
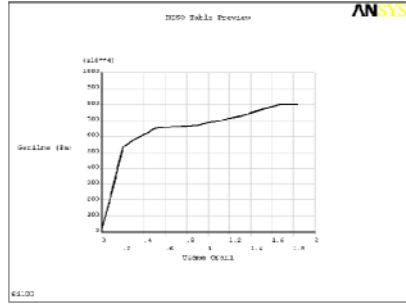
Uzama Oranı	Gerilmeler (Pa)				
	6D-100	6D-200	6D-300	6D-500	6D-800
0,30	5,77E+06	4,05E+06	3,16E+06	2,67E+06	2,18E+06
0,40	6,12E+06	4,30E+06	3,35E+06	2,83E+06	2,31E+06
0,50	6,49E+06	4,56E+06	3,56E+06	3,01E+06	2,45E+06
0,60	6,58E+06	4,62E+06	3,60E+06	3,05E+06	2,48E+06
0,70	6,61E+06	4,64E+06	3,62E+06	3,06E+06	2,50E+06
0,80	6,64E+06	4,66E+06	3,63E+06	3,07E+06	2,51E+06
0,90	6,75E+06	4,74E+06	3,70E+06	3,13E+06	2,55E+06
1,00	6,85E+06	4,81E+06	3,75E+06	3,17E+06	2,59E+06
1,10	6,95E+06	4,89E+06	3,81E+06	3,22E+06	2,63E+06
1,20	7,13E+06	5,01E+06	3,90E+06	3,30E+06	2,69E+06
1,30	7,26E+06	5,10E+06	3,97E+06	3,36E+06	2,74E+06
1,40	7,47E+06	5,25E+06	4,09E+06	3,46E+06	2,82E+06
1,67	8,02E+06	5,64E+06	4,39E+06	3,71E+06	3,03E+06

Tablo 3.12 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda tek lif yaklaşımı için multi-lineer bölgedeki gerilmeler

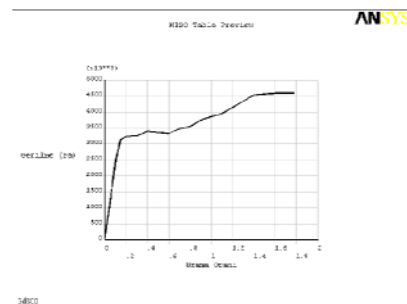
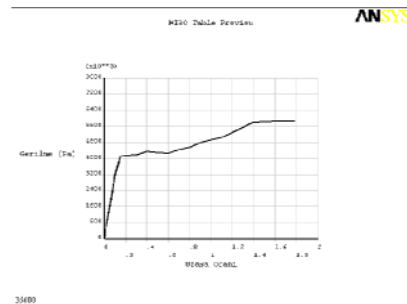
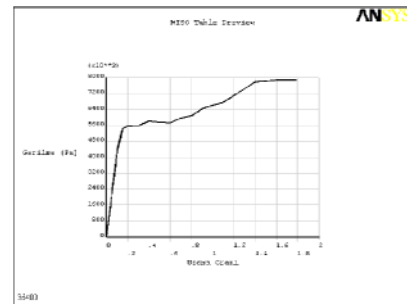
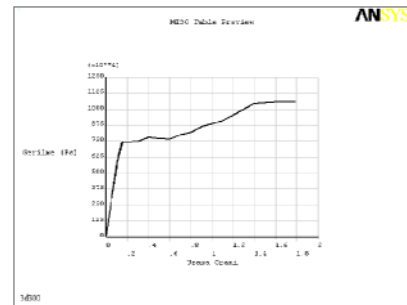
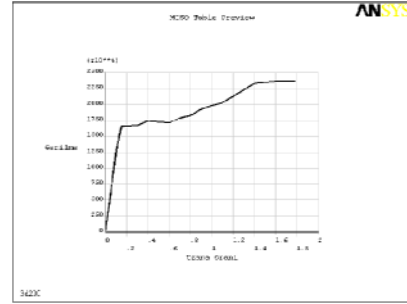
Uzama Oranı	<u>Gerilme</u>				
	3D-200	3D-300	3D-400	3D-600	3D-800
0,20	1,66E+07	7,45E+06	5,55E+06	4,14E+06	3,23E+06
0,30	1,67E+07	7,49E+06	5,58E+06	4,17E+06	3,25E+06
0,40	1,75E+07	7,81E+06	5,82E+06	4,34E+06	3,39E+06
0,50	1,72E+07	7,72E+06	5,75E+06	4,29E+06	3,35E+06
0,60	1,71E+07	7,67E+06	5,71E+06	4,27E+06	3,33E+06
0,70	1,79E+07	7,99E+06	5,95E+06	4,44E+06	3,47E+06
0,80	1,83E+07	8,17E+06	6,09E+06	4,54E+06	3,55E+06
0,90	1,93E+07	8,63E+06	6,42E+06	4,80E+06	3,75E+06
1,00	1,98E+07	8,85E+06	6,59E+06	4,92E+06	3,85E+06
1,10	2,03E+07	9,08E+06	6,76E+06	5,05E+06	3,94E+06
1,20	2,13E+07	9,53E+06	7,10E+06	5,30E+06	4,14E+06
1,30	2,23E+07	9,99E+06	7,44E+06	5,55E+06	4,34E+06
1,40	2,33E+07	1,04E+07	7,78E+06	5,81E+06	4,54E+06
1,61	2,36E+07	1,06E+07	7,88E+06	5,88E+06	4,60E+06

Tek lif yaklaşımında, sonlu elemanın malzeme özellikleri tanımlamak için programa lineer elastik ve nonlinear plastik bölge için girilen verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı grafikleri, tabakadaki lif hacimsel oran değerleri nedeni ile her bir kumaş için farklı olmaktadır. Öte yandan bu yaklaşımda lif özellikleri kullanıldığı için kumaşların makina yönündeki ve makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerinde aynı eğriler başlangıç verisi olarak kullanılmıştır. Ancak makina yönü ile makina yönündeki liflerin oryantasyon açıları farklıdır. Şekil-3.20'de 6 denye ve 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için tek lif yaklaşımına göre programa veri olarak girilen gerilme-uzama oranı değerlerinden elde edilen grafikler görülmektedir.

6denye inceliginde liflerden olusan kumaslar



3denye inceliginde liflerden olusan kumaslar



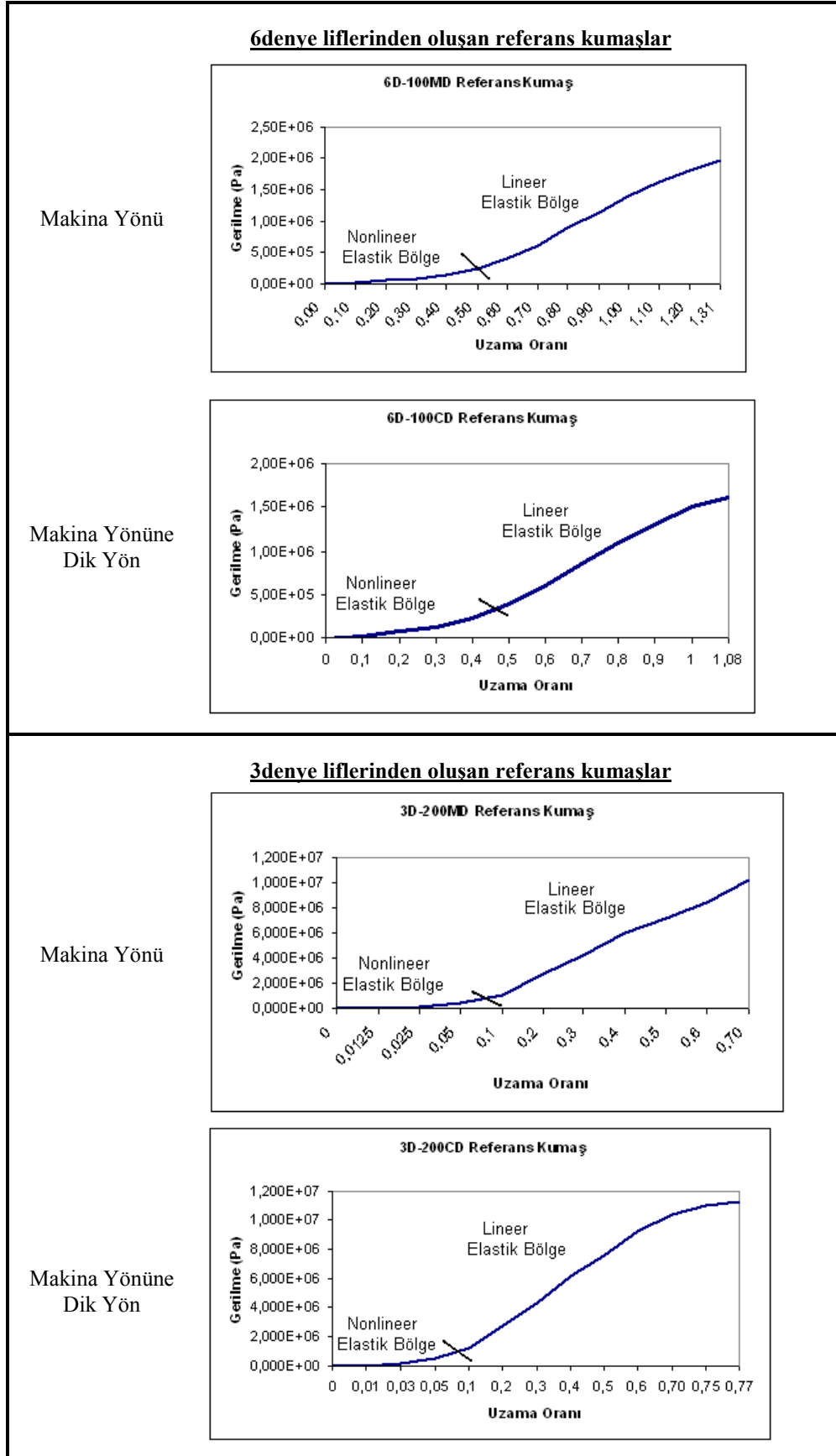
Şekil 3.20 Tek lif yaklaşımı için program verilerinden oluşturulan gerilme-uzama oranı eğrileri

Tek lif yaklaşımı için yukarıdaki kısımlarda belirtilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar programı ANSYS ile çalışma numunesi jeotekstil kumaşlarda gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tabaka ve eleman verisi olarak ise Tablo-3.8 ve 3.9'da belirtilen değerler kullanılmıştır. Analizler tüm kumaşlarda hem makina yönünde hem de makina yönüne dik yönde yapılmıştır. Analizler sonucu sonlu elemanlar modeli düğüm ve elemanlarında hesaplanan gerilmeler ile şekil değiştirmeler incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile uyumlulukları değerlendirilmiştir.

3.2.1.5 Teorik Model-II: Referans Kumaş Yaklaşımı

Bu teorik modelde sonlu elemanlar analizinde malzeme özellikleri olarak referans kumaşlara ait deneysel veriler kullanılmıştır. Modelde, ağır gramajlı kumaşların gerilme-uzama oranı davranışını belirleyebilmek için aynı hammadde ve üretim tekniği ile üretilmiş en düşük gramajlı (referans) kumaşların gerilme-uzama oranı özellikleri kullanılmıştır. Dolayısı ile sonlu elemanın parametreleri arasındaki ilişkileri ifade etmek için kullanılan genel denklemler, bu yaklaşımda referans kumaşların deneysel verileri dikkate alınarak tekrar düzenlenmiştir.

Sonlu elemanın tabaka malzeme özelliklerini belirlemek için bu yaklaşımda kullanılan referans kumaşlara ait gerilme-uzama oranı eğrileri Şekil-3.21'de verilmiştir. Eğriler, hem makina yönünde hem de makina yönüne dik yönde lineer değildir. Dolayısı ile gerilme ve uzama oranının lineer olarak ilişkili olduğu malzemelerde geçerli olan ve sonlu elemanı oluşturan her bir tabaka için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisini ifade etmekte kullanılan denklem 3.8, bu yaklaşımda referans kumaşların gerilme uzama davranışlarına göre yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 3.21 Referans kumaşlara ait gerilme-uzama oranı eğrileri

Şekil-3.21’de görüldüğü gibi referans kumaşlara ait gerilme-uzama oranı eğrileri iki farklı bölgeden oluşmaktadır. Kumaş gerilme-uzama oranı eğrileri test başlangıcında nonlinear bir davranış gösterirken, belirli bir uzama oranından sonra linear bir davranış sergilemektedirler. Bu durum çekme testleri başlangıcında kumaş içerisinde bulunan liflerin yük almadan yer değiştirmeleri, yani çekme yönüne doğru yönelmelerinden kaynaklanmaktadır. Başlangıç uzamaları Şekil-3.21’de de görüldüğü gibi 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda daha düşüktür. Bu kumaşların yüzeylerindeki lifler ısı bir işlem ile birbirine bağlandığından, liflerin çekme doğrultusunda yeniden yönelmeleri sınırlandırılmıştır. Referans kumaşların linear olmayan bu gerilme-uzama oranı davranışları nedeni ile modelde kumaş yapısını oluşturan her bir sonlu eleman tabakasının da linear olmayan bir gerilme-uzama oranı davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Dolayısı ile her bir tabakanın gerilme bileşenleri de iki kısımda düşünülmüştür. İlk kısımda gerilme uzama oranı artışı ile nonlinear elastik olarak değişmektedir, ikinci kısımda ise gerilme uzama oranı artışı ile linear elastik olarak değişmektedir. Bu durumda ortotropik bir tabakada lokal koordinatlardaki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Burada linear kısımdaki direngenlik matrisin değişkenleri denklem 3.2-3.5 ile verilen malzeme sabitleridir. Nonlinear kısımdaki direngenlik matrisinin bileşenleri ise sabit olmayıp uzama oranının fonksiyonu $[Q'_{11} = f(\varepsilon)]$ şeklindedir. Yani matris tabaka doğrultusundaki gerilme ve uzamaya bağlı olan tek bir terim içermektedir.

Bu durumda her bir tabaka için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = Q'_{11} \begin{bmatrix} c^4 \theta & s^2 \theta c^2 \theta & s \theta c^3 \theta \\ s^2 \theta c^2 \theta & s^4 \theta & s^3 \theta c \theta \\ s \theta c^3 \theta & s^3 \theta c \theta & c^2 \theta s^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Referans kumaş yaklaşımına göre dokusuz yüzey jeotekstillerin her tabakası için global eksenlerdeki gerilme-uzama oranı ilişkisini ifade eden bu denklemin çözümlenebilmesi için, deneysel olarak belirlenmesi gereken değerler; $\overline{Q_{ij}}$ matrisinin bileşenlerini oluşturan mühendislik sabitleri (elastisite modülleri E_1 ve E_2 , düzlemdeki kayma modülü G_{12} , poisson oranları ν_{12} ve ν_{21}) ile tabaka oryantasyon açısı θ ve nonlinear bölgedeki noktasal gerilme ve uzama oranlarıdır. Referans kumaşların gerilme-uzama oranı özelliklerinin esas alındığı bu modelde her bir tabaka için $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}$ ve θ bu kumaşların deneysel ölçümlerden alınmıştır.

Referans kumaşlara ait özellikler göz önüne alındığında, her bir sonlu eleman için X-Y doğrultusundaki kumaş gerilmeleri veren denklem 3.15 ise bu yaklaşım için aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{k=N} \left(Q'_{11} \begin{bmatrix} c^4 \theta_k & s^2 \theta_k c^2 \theta_k & s \theta_k c^3 \theta_k \\ s^2 \theta_k c^2 \theta_k & s^4 \theta_k & s^3 \theta_k c \theta_k \\ s \theta_k c^3 \theta_k & s^3 \theta_k c \theta_k & c^2 \theta_k s^2 \theta_k \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{k=N} \left(\begin{bmatrix} \overline{Q_{11k}} & \overline{Q_{12k}} & \overline{Q_{16k}} \\ \overline{Q_{12k}} & \overline{Q_{22k}} & \overline{Q_{26k}} \\ \overline{Q_{16k}} & \overline{Q_{26k}} & \overline{Q_{66k}} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Denklem 3.31 lineer kısım ve nonlinear kısım için iki farklı direngenlik matrisi içermektedir ve sembolik formda aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$[\sigma]^e = [D]^{e'} [\varepsilon]^e + [D]^e [\varepsilon]^e \quad (3.32)$$

burada, $[D]^{e'}$ ve $[D]^e$ sırası ile sonlu elemanın lineer kısımdaki ve nonlinear kısımdaki direngenlik matrisleridir, $[\sigma]^e = [\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}]^T$ ve $[\varepsilon]^e = [\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}]^T$ dir.

Referans kumaş yaklaşımı için denklem 3.32'de verilen ifade ve sonlu elemanlar teorisi için denklem 3.17 ve 3.18'de verilen eşitlikler dikkate alınarak, sonlu elemanlar paket programı ANSYS'e veriler girilmiş ve gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Referans kumaş özelliklerinin ele alındığı bu yaklaşımda, sonlu elemanın malzeme özellikleri, referans kumaşların Şekil-3.21'de verilen gerilme-uzama

davranışları göz önüne alınarak paket program ANSYS’de iki kısımda tanımlanmıştır. Malzeme özelliği referans kumaş gerilme-uzama oranı eğrilerinin doğrusal olmadığı ilk kısımda “nonlineer elastik” olarak tanımlanmış ve eğriyi belirlemek için “multi-lineer elastik” yaklaşım yapılmıştır. Referans kumaş gerilme-uzama oranı eğrilerin doğrusal olduğu ikinci kısımda ise malzeme özelliği “lineer elastik ortotropik” olarak tanımlanmıştır.

Modelde, elastisite modülünün sabit olmadığı nonlineer elastik bölgede multi-lineer gerilme-uzama oranı yaklaşımına göre referans kumaşlara ait belirli aralıklardaki uzama oranı değerlerine karşılık gelen gerilme değerleri veri olarak kullanılmıştır. 6 denye ve 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların teorik analizinde kullanılan referans kumaşlara ait multilineer bölgedeki gerilme değerleri sırası ile Tablo-3.13 ve Tablo-3.14’de verilmiştir.

Tablo 3.13 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda referans kumaş yaklaşımı için multi-lineer bölgedeki gerilmeler

Uzama Oranı	Gerilmeler (Pa)	
	Makina Yönü	Makina Yönüne Dik Yön
0	0,00E+00	0,00E+00
0,1	2,57E+04	2,91E+04
0,2	5,98E+04	7,39E+04
0,3	1,01E+05	1,31E+05
0,4	1,54E+05	2,28E+05
0,5	2,62E+05	

Tablo 3.14 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda referans kumaş yaklaşımı için multi-lineer bölgedeki gerilmeler

Uzama Oranı	Gerilmeler (Pa)	
	Makina Yönü	Makina Yönüne Dik Yön
0	0,00E+00	0,00E+00
0,1	3,13E+04	3,72E+04
0,3	1,25E+05	1,56E+05

Elastisite modülünün sabit olduğu lineer-elastik kısımda ise ortotropik malzeme özellikleri olarak referans kumaşların geniş enli çekme testlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. 6 denye ve 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için lineer elastik bölgede kullanılan malzeme sabitleri sırası ile Tablo-3.15 ve Tablo-3.16'da verilmiştir.

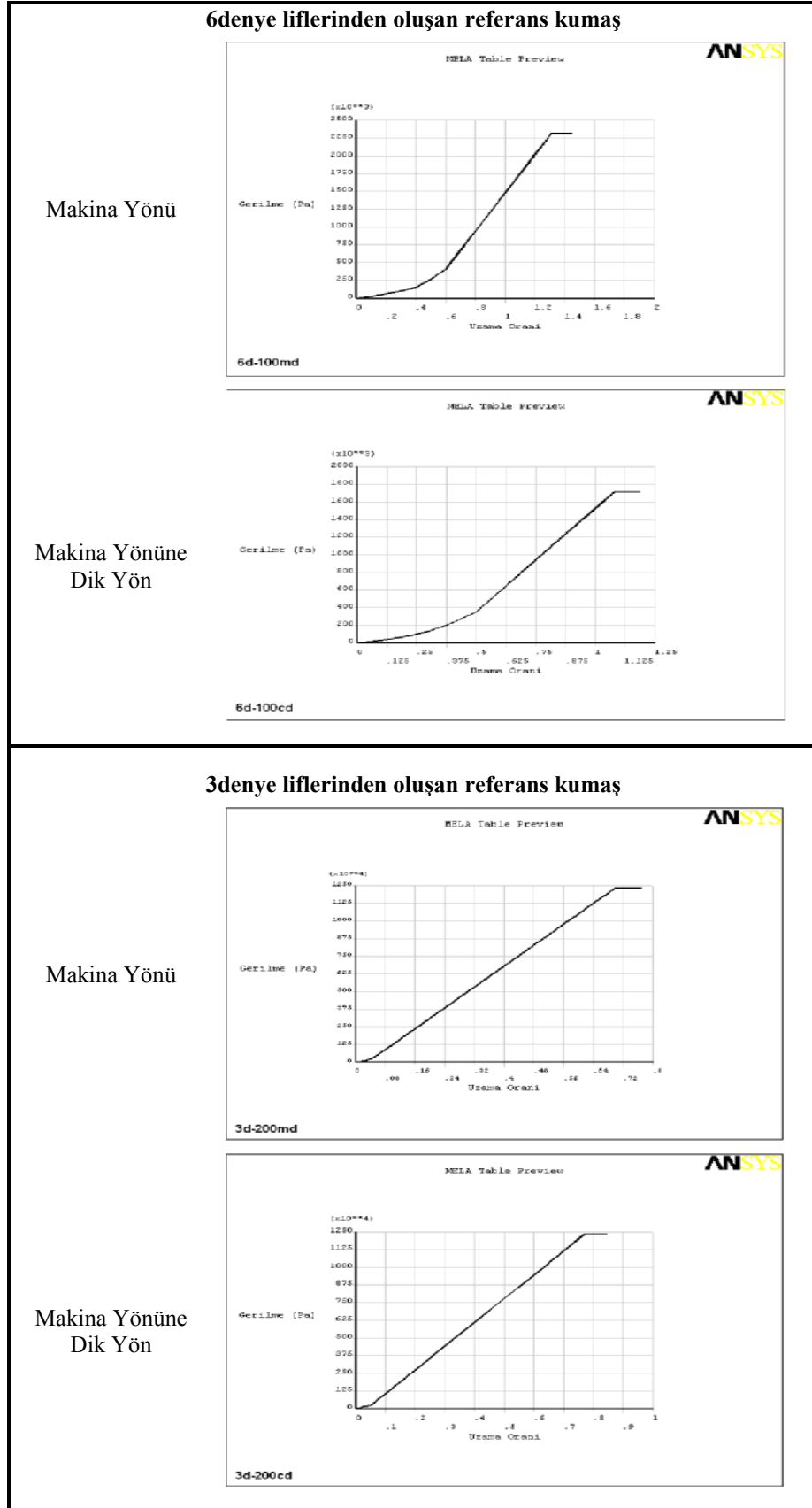
Tablo 3.15 6denye liflerden üretilen kumaşlarda referans kumaş yaklaşımı için materyal sabitleri

Özellik	Sembol	MD	CD
Çekme Doğrultusunda Elastisite Modülü	E_x	2,70E+06 Pa	2,36 E+06 Pa
Çekmeye Doğrultusuna Dik Yönde Elastisite Modülü	E_y	2,36 E+06Pa	2,70E+06 Pa
Düzlem Kayma Modülü	G_{xy}	0,91 E+06Pa	0,88E+06 Pa
Poisson Oranı	ν_{xy}	0,36	0,29

Tablo 3.16 3denye liflerden üretilen kumaşlarda referans kumaş yaklaşımı için materyal sabitleri

Özellik	Sembol	MD	CD
Çekme Doğrultusunda Elastisite Modülü	E_x	18,48E+06 Pa	16,82E+06 Pa
Çekmeye Doğrultusuna Dik Yönde Elastisite Modülü	E_y	16,82E+06 Pa	18,48E+06 Pa
Düzlem Kayma Modülü	G_{xy}	6,43E+06 Pa	6,28E+06 Pa
Poisson Oranı	ν_{xy}	0.24	0,21

Referans kumaş yaklaşımında, sonlu elemanlar paket programına malzeme özelliği olarak lineer elastik ve multi-lineer elastik bölgeler için girilen verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı grafikleri Şekil-3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22 Referans kumaş yaklaşımı-program verilerinden oluşturulan gerilme-uzama oranı eğrileri

Referans kumaş yaklaşımı için yukarıdaki kısımlarda belirtilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar paket programı ANSYS’de çalışma numunesi jeotekstil kumaşların teorik gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, tabaka ve eleman verisi olarak ise Tablo-3.8 ve Tablo-3.9’da belirtilen değerler kullanılmıştır. Analizler tüm kumaşlarda hem makina yönünde hem de makina yönüne dik yönde yapılmıştır. Analizler sonucu sonlu elemanlar modeli düğüm ve elemanlarında hesaplanan gerilmeler ile şekil değiştirmeler incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile uyumlulukları değerlendirilmiştir.

3.3 Teorik Analiz Sonuçları ve Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması

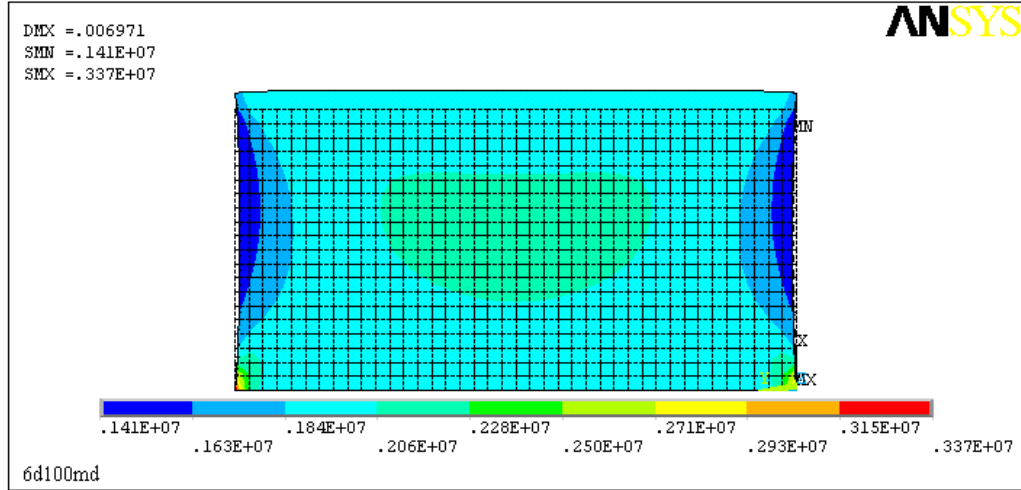
Çalışma kapsamında oluşturulan tek lif ve referans kumaş özellikleri esaslı iki farklı teorik model kullanılarak, sonlu elemanlar paket programı ANSYS’de yapılan gerilme analizlerinin sonuçları ve bu sonuçların deneysel bulgular ile karşılaştırılması aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

3.3.1 Teorik Model-I: Tek Lif Yaklaşımı Sonuçları

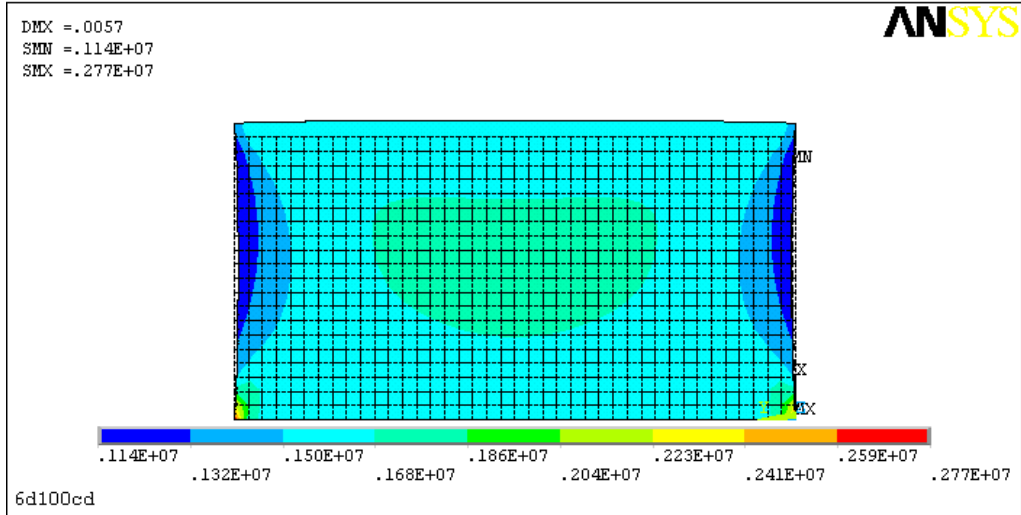
Yukarıdaki kısımlarda ayrıntıları açıklanan bu model yaklaşımında, kumaşları oluşturan liflerin gerilme-uzama oranı davranışları ve kumaş içerisindeki hacimsel oranları dikkate alınmış ve sonlu elemanlar analizinde malzeme özellikleri olarak liflere ait deneysel veriler kullanılmıştır. 6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflerden oluşan kumaşların tek lif yaklaşımı ile yapılan teorik gerilme analizi sonuçları ve bunların deneysel veriler ile karşılaştırılması aşağıdaki kısımlarda sırası ile grafikler ve tablolar halinde verilmiştir.

3.3.1.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları

6 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlarda, tek lif yaklaşımına göre makina yönünde ve makina yönüne dik yönde yapılan teorik analizler sonucu çekme doğrultusundaki düğümlerde elde edilen normal gerilme dağılımları Şekil-3.23, 3.24, 3.26, 3.27, 3.29, 3.30, 3.32, 3.33, 3.35 ve 3.36’da verilmiştir. Aynı kumaşlara ait geniş enli çekme testleri sırasında çekilen fotoğraflar ise Şekil-3.25, 3.28, 3.31, 3.34 ve 3.37’de görülmektedir.



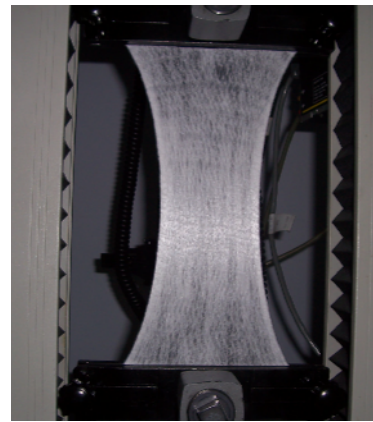
Şekil 3.23 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-100MD



Şekil 3.24 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-100CD

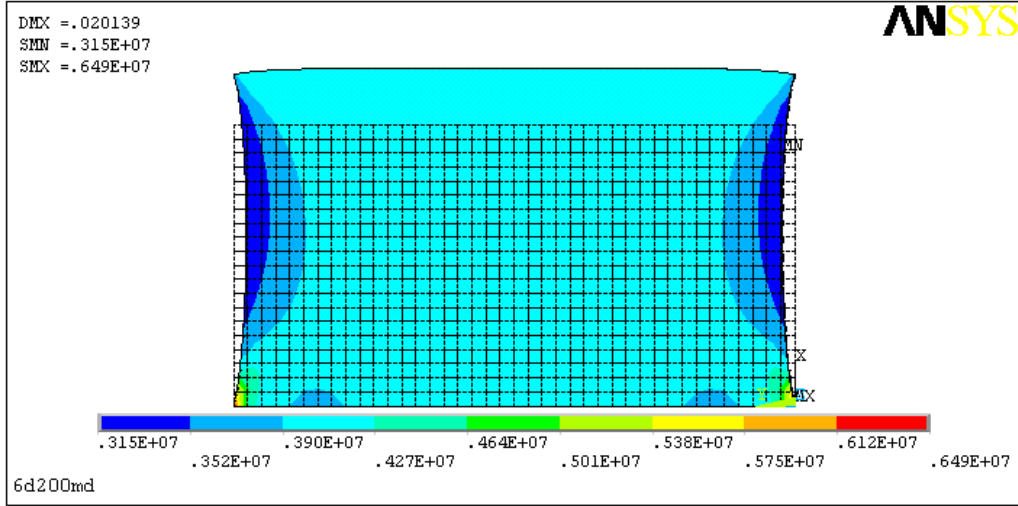


(a)

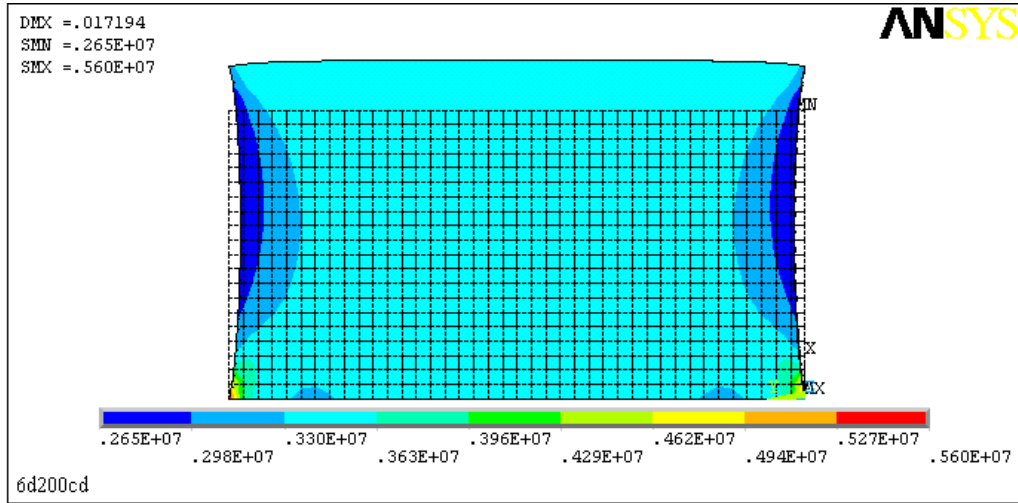


(b)

Şekil 3.25 Geniş enli çekme testleri: 6D-100 (a) MD, (b) CD



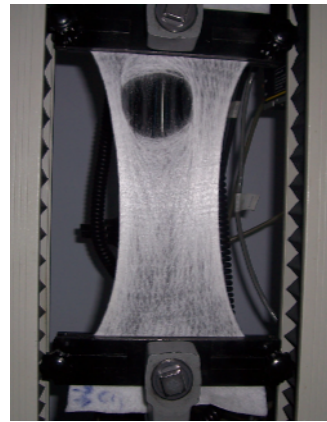
Şekil 3.26 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-200MD



Şekil 3.27 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-200CD

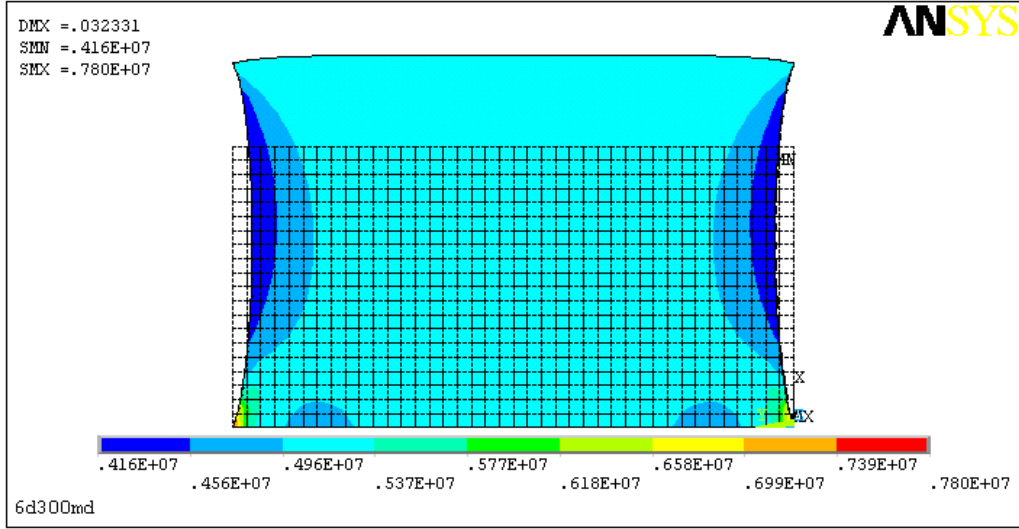


(a)

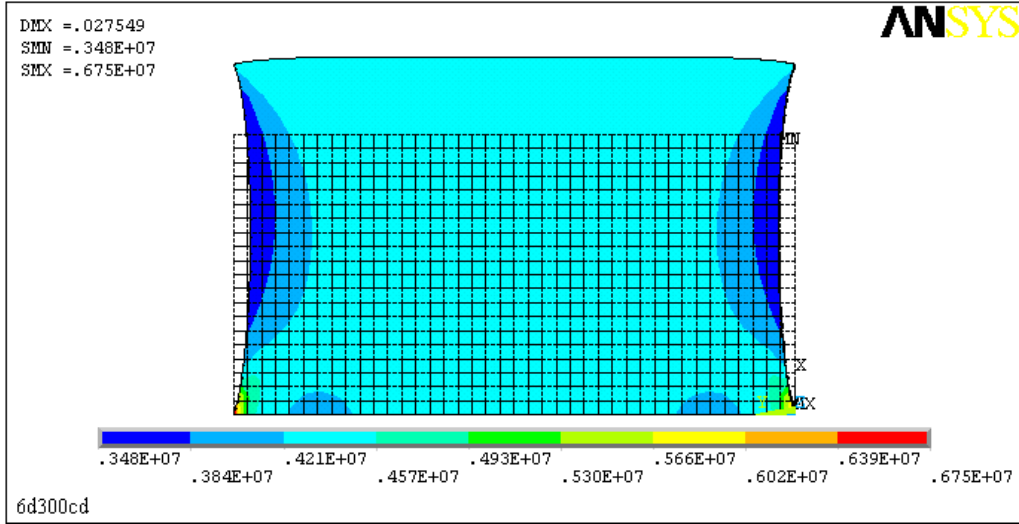


(b)

Şekil 3.28 Geniş enli çekme testleri: 6D-200 (a) MD, (b) CD



Şekil 3.29 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-300MD



Şekil 3.30 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-300CD

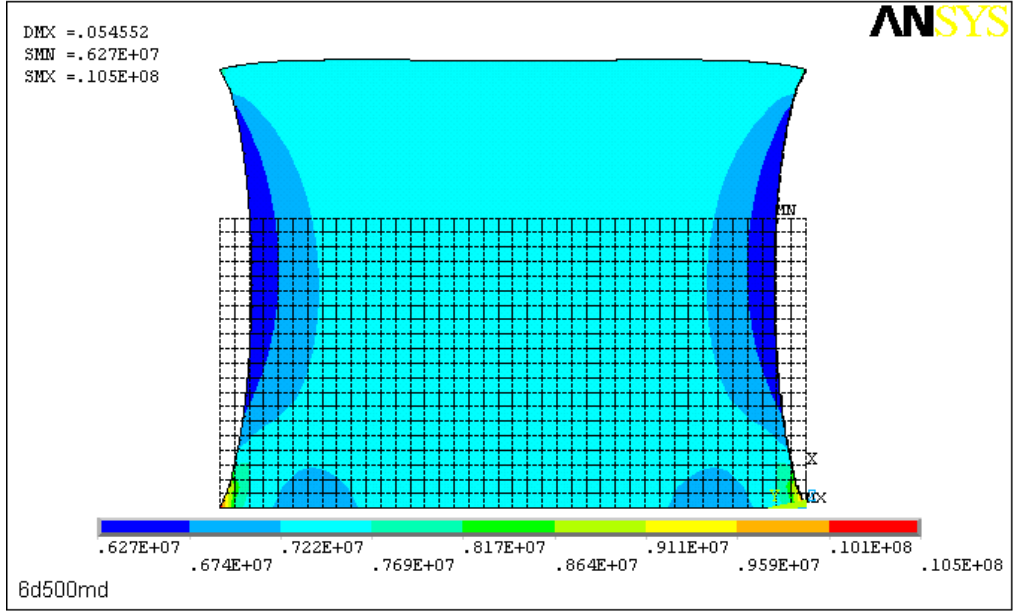


(a)

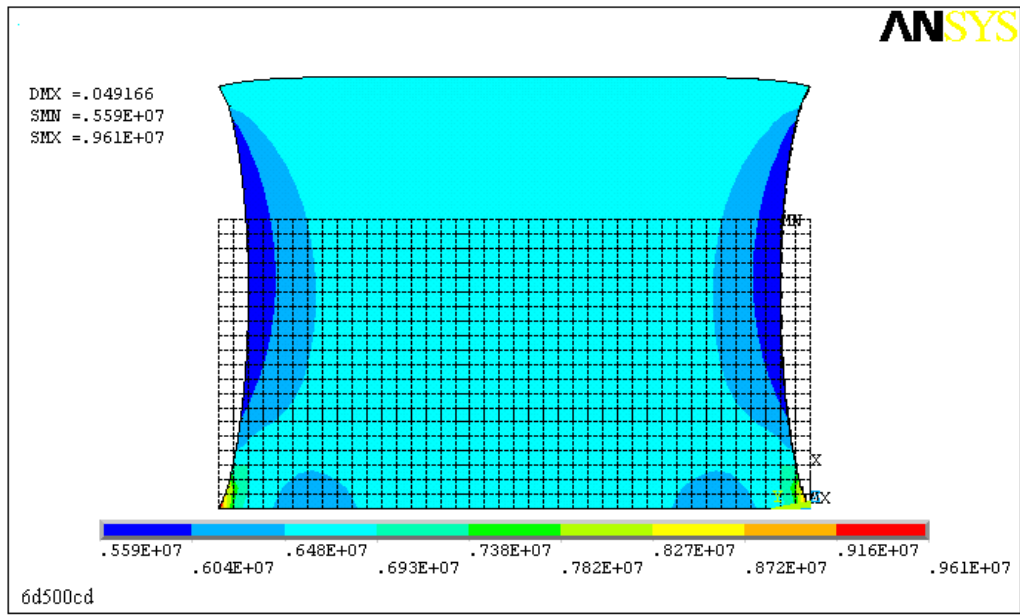


(b)

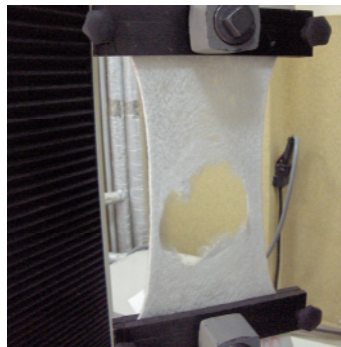
Şekil 3.31 Geniş enli çekme testleri: 6D-300 (a) MD, (b) CD



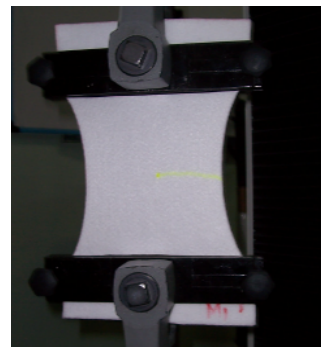
Şekil 3.32 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-500MD



Şekil 3.33 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-500CD

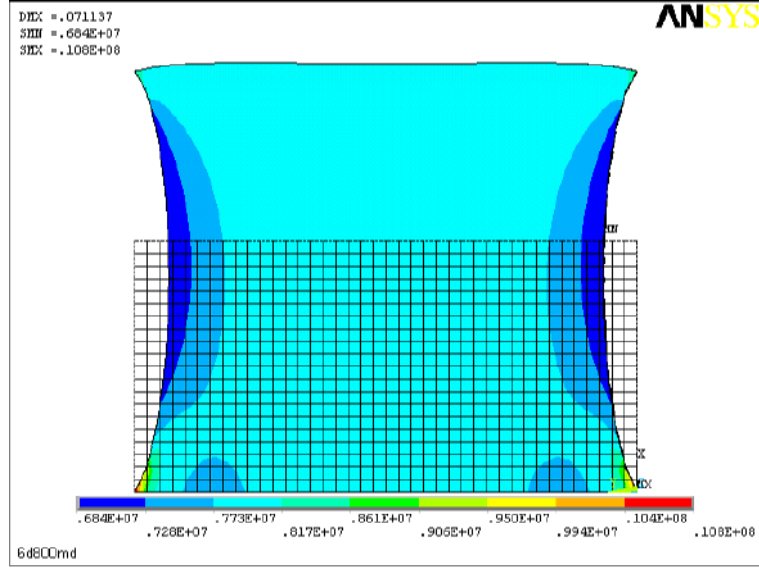


(a)

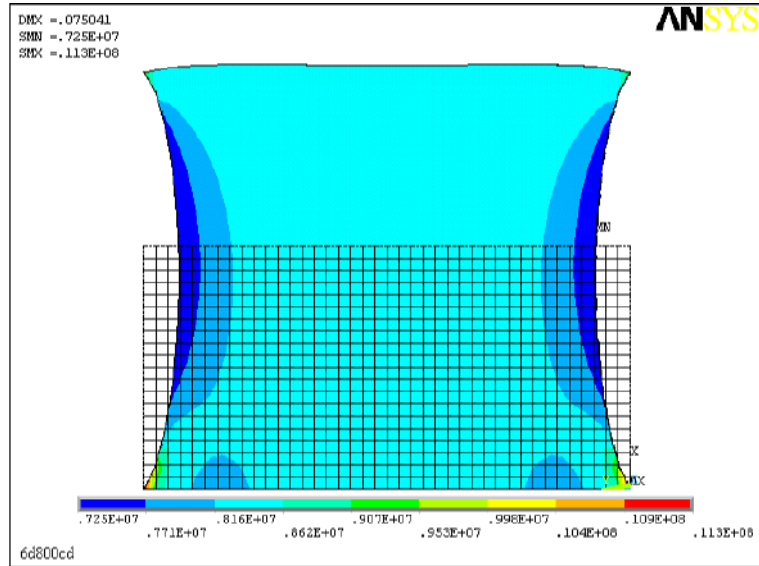


(b)

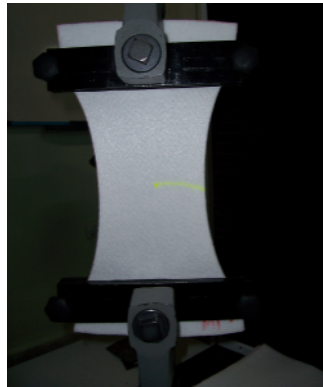
Şekil 3.34 Geniş enli çekme testleri: 6D-500 (a) MD, (b) CD



Şekil 3.35 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-800MD



Şekil 3.36 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-800CD



(a)



(b)

Şekil 3.37 Geniş enli çekme testleri: 6D-800 (a) MD, (b) CD

6 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için yukarıdaki şekillerde verilen makina ve makina yönüne dik yöndeki gerilme analizi sonuçları incelendiğinde, kumaş modellerinde farklı gerilme bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Çekme doğrultusundaki maksimum gerilmeler sınır koşulları nedeni ile çeneler tarafından tutulan köşelerde hesaplanmıştır. Minimum gerilmeler ise serbest bırakılan kenarlar civarında oluşmuştur. Modeldeki maksimum ve minimum gerilmeler dışındaki kritik gerilme dağılımları incelendiğinde, orta nokta etrafında gerilme yığılmaları oluştuğu, ayrıca serbest kenarlardan orta noktaya doğru gidildikçe gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Modelde orta nokta etrafındaki bu gerilme değerleri incelendiğinde, deneysel olarak elde edilen gerilmelere yakın değerler hesaplandığı belirlenmiştir. Numune kumaşlara ait geniş enli çekme testleri fotoğraflarında da kopuşların ve gerilme yığılmasının çoğunlukla orta nokta etrafında oluştuğu görülmektedir. Geniş enli çekme testlerinde, çekme yönüne dik yöndeki daralmalar nedeni ile gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Ayrıca kumaş içerisinde çekme yönünden farklı açılarda yönlenmiş ve serbest halde bulunan lifler, çekme testleri sırasında çekme doğrultusuna yönelerek kumaşta farklı gerilme bölgeleri oluşturmaktadırlar. Sonuç olarak tek lif yaklaşımı ile 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için elde edilen teorik gerilme dağılımı, kumaşlarda çekme testinde oluşan uniform olmayan gerilme dağılımına benzemektedir.

Teorik gerilme analizleri sonucu elde edilen kumaş şekilleri incelendiğinde ise, çenelerin tuttuğu kısımlarda çekme yönüne dik yönde herhangi bir yanal daralma oluşmazken kumaş orta noktasına doğru daralmanın arttığı ve burada maksimum değerini aldığı görülmektedir. Benzer durum fotoğraflarda da görüldüğü gibi çekme testlerinde de oluşmaktadır. Ancak tek lif yaklaşımında hesaplanan uzama değerleri deneysel olarak belirlenen uzama değerlerinden düşük olduğundan, elde edilen teorik şekiller çekme testleri sırasında oluşan kumaş yapılarına tam olarak benzememektedir.

6 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönündeki deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.17'de verilmiştir.

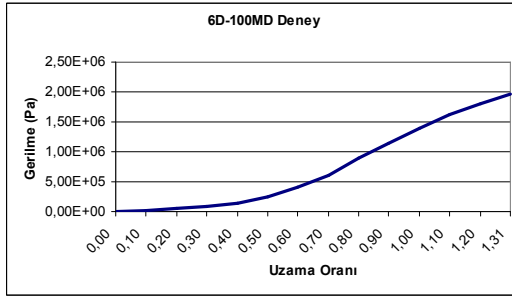
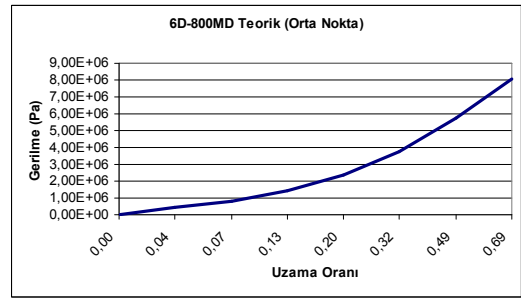
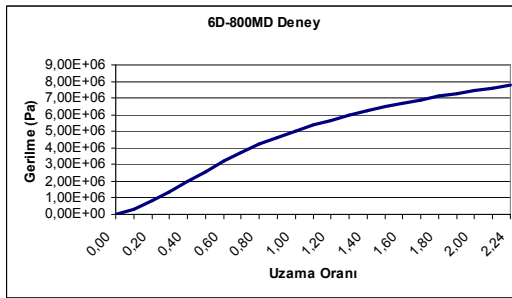
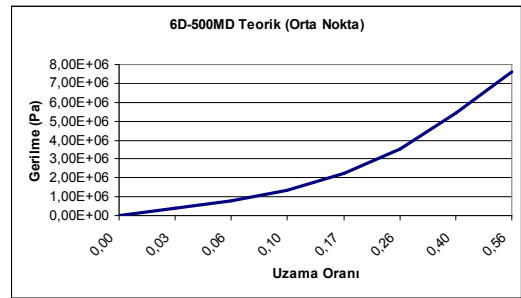
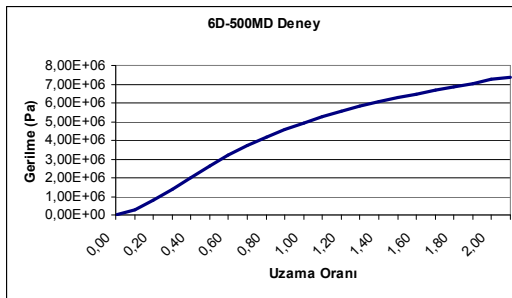
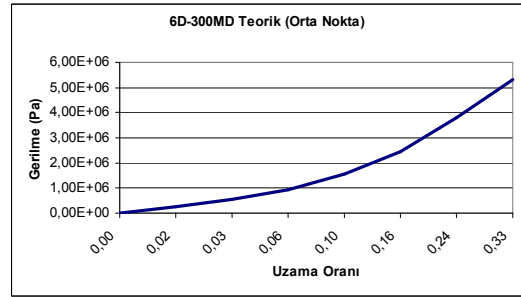
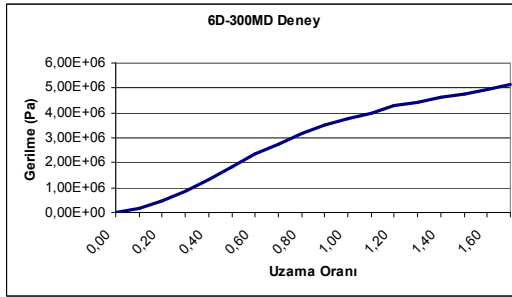
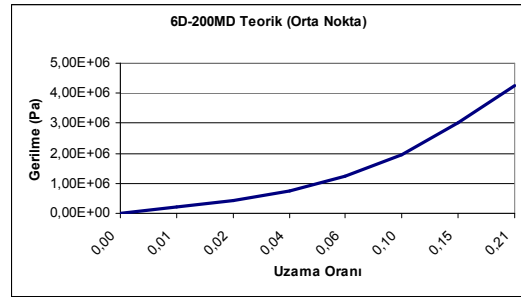
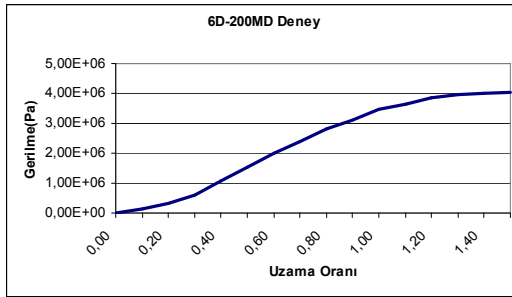
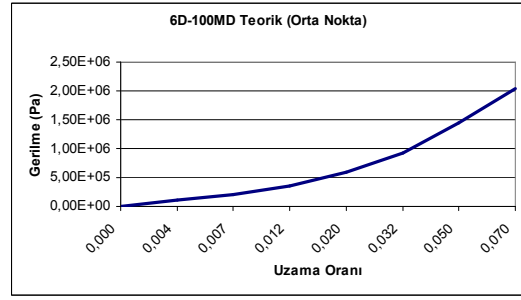
Tablo 3.17 Makina yönündeki deneysel veriler ve tek lif yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark (%)
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
6D-100	1,97E+06	131,25	2,08E+06	6,971	5,58	-94,69
6D-200	4,05E+06	148,54	4,24E+06	20,13	4,69	-86,45
6D-300	5,11E+06	171,36	5,31E+06	32,33	3,91	-81,13
6D-500	7,36E+06	208,72	7,58E+06	54,55	2,99	-73,86
6D-800	7,87E+06	223,81	8,06E+06	71,13	2,54	-68,22

Tablo-3.17’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, teorik analizlerde model orta noktasında elde edilen gerilme değerlerinin, geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %2,54 ile %5,58 arasında değişmektedir.

Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise teorik olarak hesaplanan maksimum uzama miktarlarının deney verilerden çok düşük olduğu görülmektedir. Kumaşlarda, çekme deneyleri başlangıcında çekme yönüne göre farklı doğrultularda yerleşmiş lifler, yük uygulandıktan sonra çekme doğrultusuna gelecek şekilde yeniden yönlenecek ve daha sonra yük almaktadırlar. Bu sırada düşük gerilme değerlerinde yüksek uzamalar oluşmaktadır. Şekil-3.20’de verilen ve tek lif yaklaşımında malzeme özelliklerini tanımlamakta kullanılan lif gerilme-uzama oranı eğrileri başlangıcındaki düşük uzamalarda ise yüksek gerilme değerleri oluşmaktadır. Dolayısı ile tek lif yaklaşımında uygulanan yükler için hesaplanan uzama değerleri, deneysel uzama verilerinden düşük olmaktadır. Bununla birlikte teorik analizlerde kullanılan gerilme-uzama oranı eğrilerinin eğimi, yani elastisite modülü Tablo-3.10’da da görüldüğü gibi kumaş gramajı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca kumaş gramajı arttıkça çekme testi başlangıcında oluşan aşırı uzamalar da azalmaktadır. Bu nedenler ile tek lif yaklaşımında teorik ve deneysel veriler arasındaki fark kumaş gramajı arttıkça azalmaktadır.

Şekil-3.38’de makina yönündeki teorik analizler sonucu 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

Deney Sonuçları-MD**Teorik Analiz Sonuçları-MD**

Şekil 3.38 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönünde deneysel ve teorik gerilme-uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil-3.38’de verilen eğriler incelendiğinde, teorik analizler sonucu orta noktada elde edilen gerilme uzama oranı eğrilerinin de deney eğrileri gibi nonlineer oldukları görülmektedir. Ancak deneysel olarak ölçülen maksimum gerilme değerleri teorik eğrilerde daha düşük uzama oranlarında hesaplanmıştır. Kumaş gramajı arttıkça teorik olarak hesaplanan uzama değerlerindeki farkın azaldığı eğrilerden de görülmektedir.

6 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönüne dik yönde deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri ise Tablo-3.18’de verilmiştir.

Tablo 3.18 Makina yönüne dik yöndeki deneysel veriler ve tek lif yaklaşımı teorik sonuçları

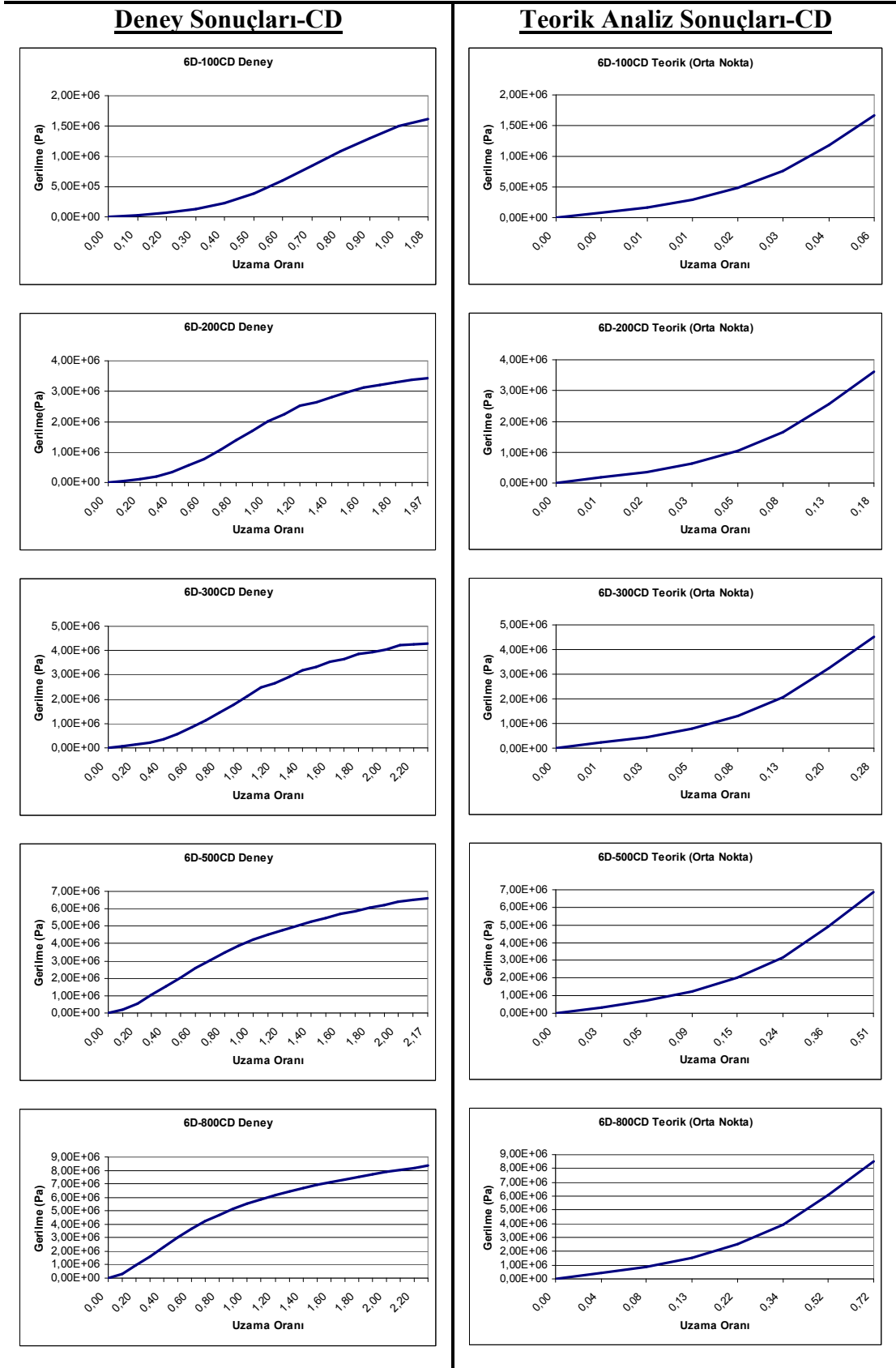
Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
6D-100	1,61E+06	108,00	1,70E+06	5,70	5,59	-94,72
6D-200	3,45E+06	197,20	3,62E+06	17,19	4,93	-91,28
6D-300	4,34E+06	229,86	4,52E+06	27,54	4,15	-88,02
6D-500	6,62E+06	217,39	6,83E+06	49,16	3,17	-77,39
6D-800	8,31E+06	236,01	8,50E+06	75,04	2,29	-68,20

Tablo-3.18’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerde de model orta noktasında elde edilen çekme doğrultusundaki gerilme değerlerinin geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %2,29 ile %5,59 arasında değişmektedir. Makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerde de kumaş gramajı arttıkça deneysel verilere daha yakın gerilme değerleri elde edilmiştir.

Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise makina yönündeki teorik sonuçlara benzer şekilde makina yönüne dik yönde de teorik uzama miktarlarının deneysel verilerden çok düşük olduğu görülmektedir. Makina yönüne dik yöndeki çekme testlerinde, kumaş içerisinde çekme yönünden farklı açılarda yönlenmiş lif sayısı daha fazladır. Dolayısı ile bu yöndeki çekme testlerinde genellikle daha

yüksek başlangıç uzamaları oluşmaktadır. Tek lif yaklaşımında lif göçünden kaynaklı bu başlangıç uzamaları hesaplanamadığından makina yönüne dik yöndeki analizlerde elde edilen teorik sonuçlar ve deneysel veriler arasındaki farklar, en ağır gramajlı kumaş hariç makina yönünde elde edilen farklardan daha fazladır.

Şekil-3.39'da makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucu 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

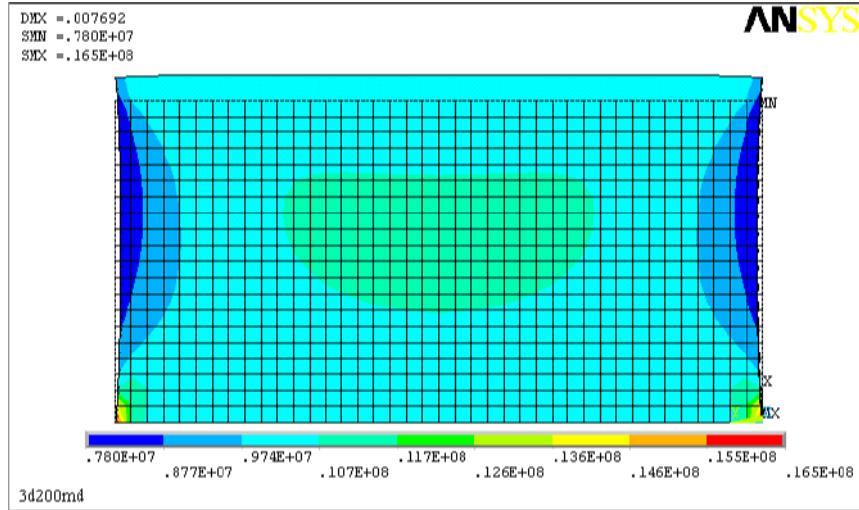


Şekil 3.39 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönüne dik yönde deneysel ve teorik gerilme-uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

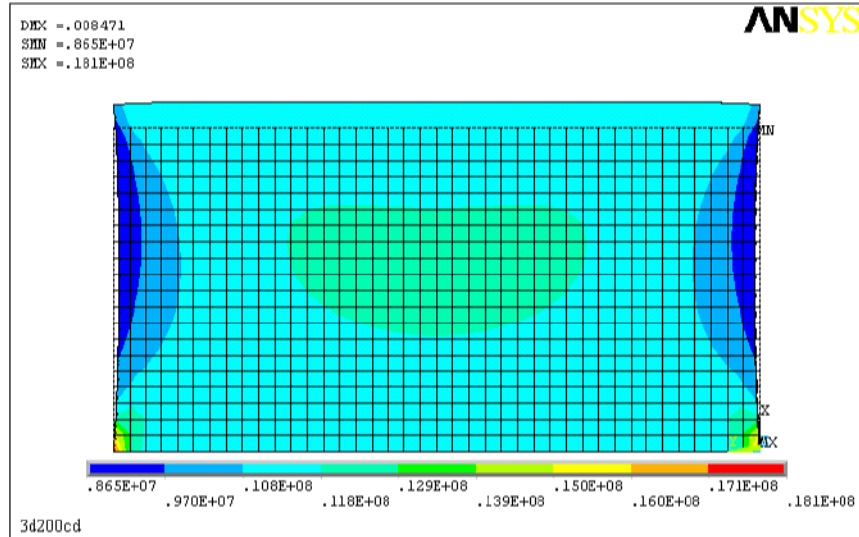
Şekil-3.39'da verilen eğriler incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucunda orta noktada elde edilen gerilme uzama oranı eğrilerinin de deneysel eğrilere benzer şekilde nonlineer olduğu görülmektedir. Öte yandan teorik analizlerde elde edilen düşük uzama oranı değerleri ve kumaş gramajı arttıkça teorik olarak hesaplanan uzama değerleri ile deneysel veriler arasındaki farkın azaldığı bu eğrilerde de görülmektedir.

3.3.1.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları

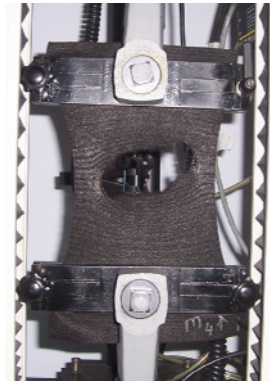
3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlarda tek lif yaklaşımına göre makina yönünde ve makina yönüne dik yönde yapılan teorik analizler sonucu çekme doğrultusundaki düğümlerde elde edilen normal gerilme dağılımları Şekil-3.40, 3.41, 3.43, 3.44, 3.46, 3.47, 3.49, 3.50, 3.52 ve 3.53'de verilmiştir. Aynı kumaşlara ait geniş enli çekme testleri sırasında çekilen fotoğraflar ise Şekil-3.42, 3.45, 3.48, 3.51 ve 3.54'de görülmektedir.



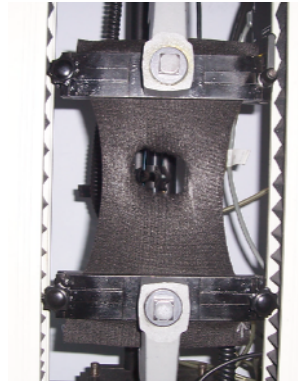
Şekil 3.40 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-200MD



Şekil 3.41 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-200CD

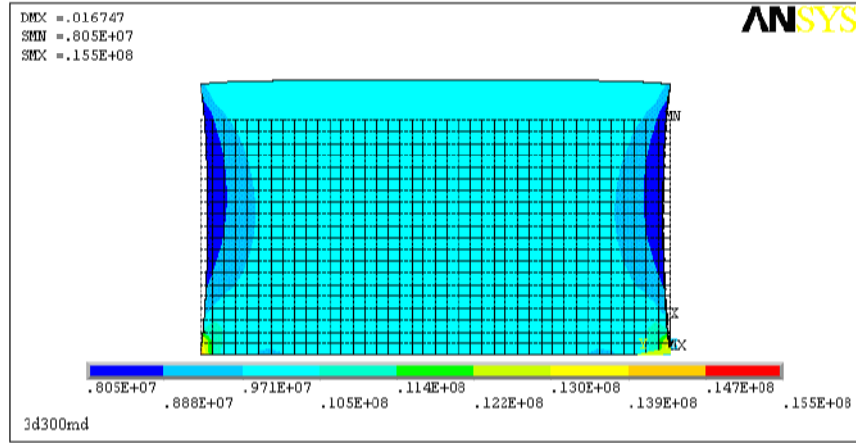


(a)

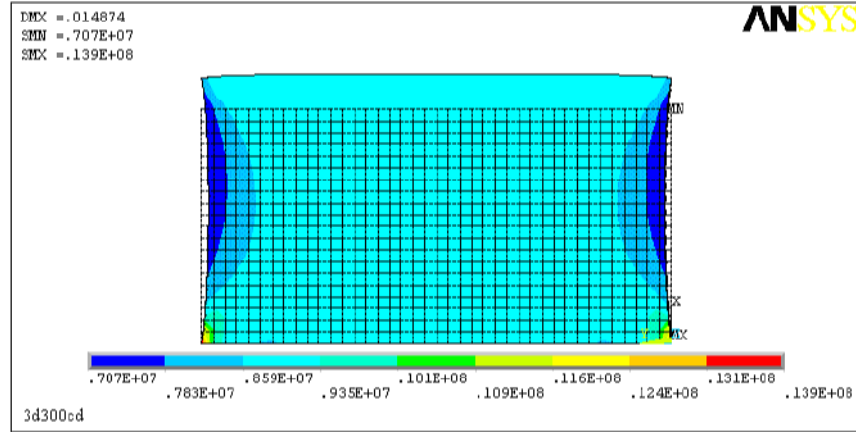


(b)

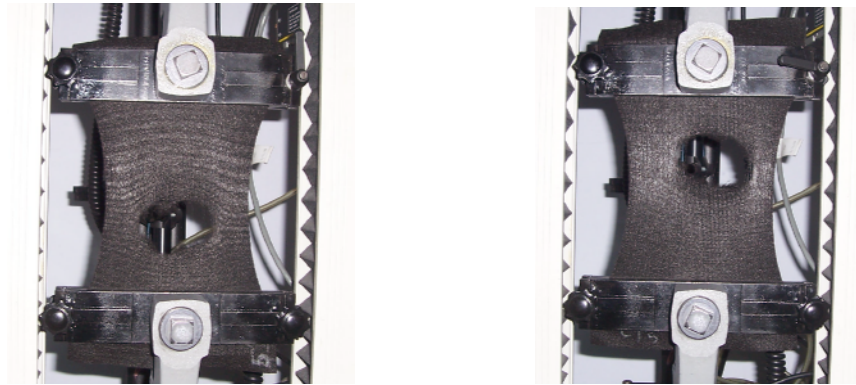
Şekil 3.42 Geniş enli çekme testleri: 3D-200 (a) MD, (b) CD



Şekil 3.43 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-300MD



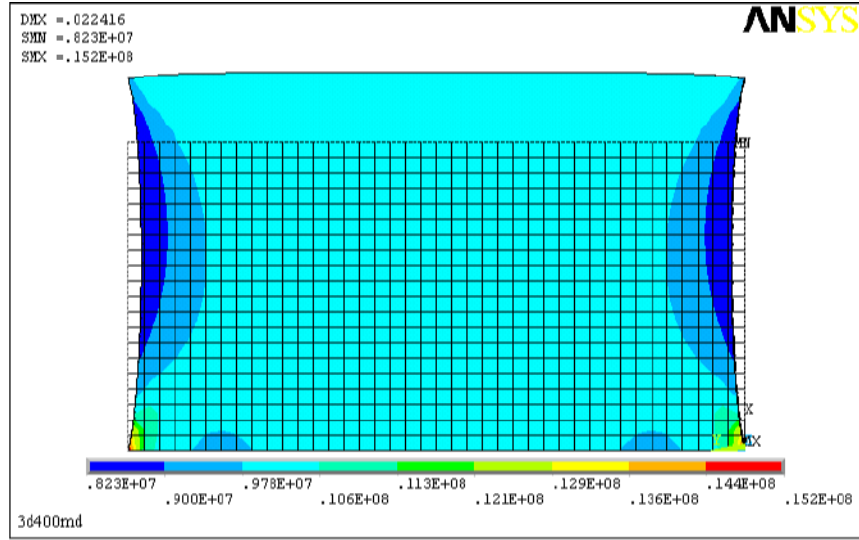
Şekil 3.44 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-300CD



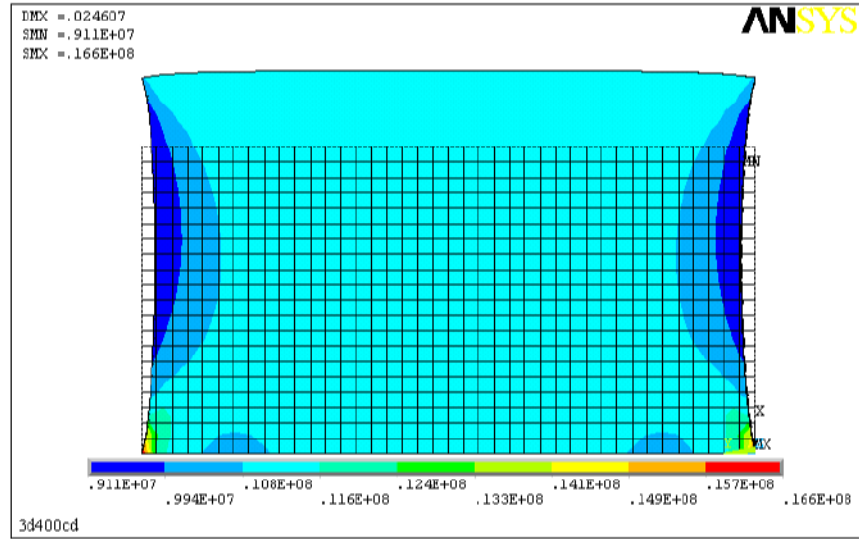
(a)

(b)

Şekil 3.45 Geniş enli çekme testleri: 3D-300 (a) MD, (b) CD



Şekil 3.46 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-400MD



Şekil 3.47 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-400CD

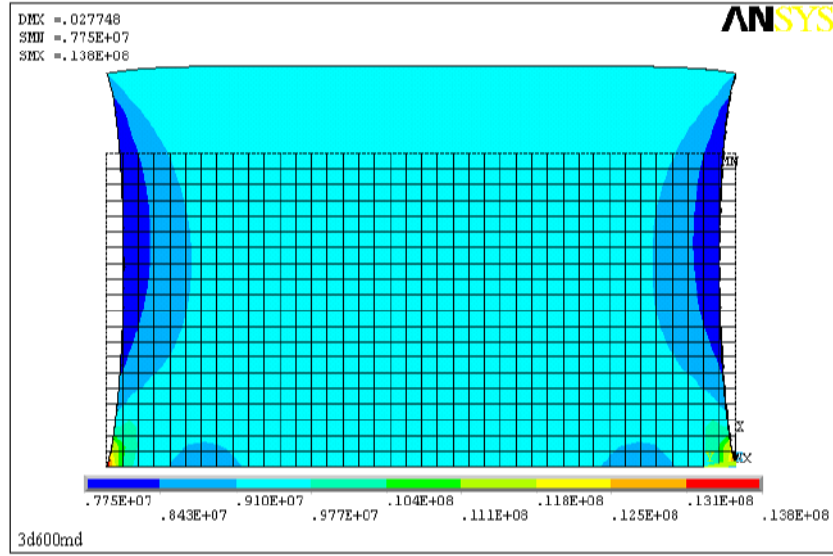


(a)

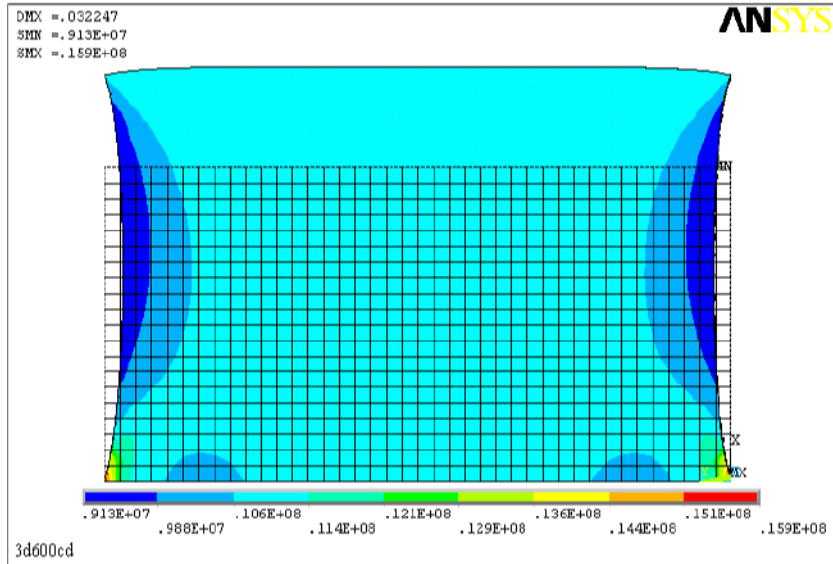


(b)

Şekil 3.48 Geniş enli çekme testleri: 3D-400 (a) MD, (b) CD



Şekil 3.49 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-600MD



Şekil 3.50 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-600CD

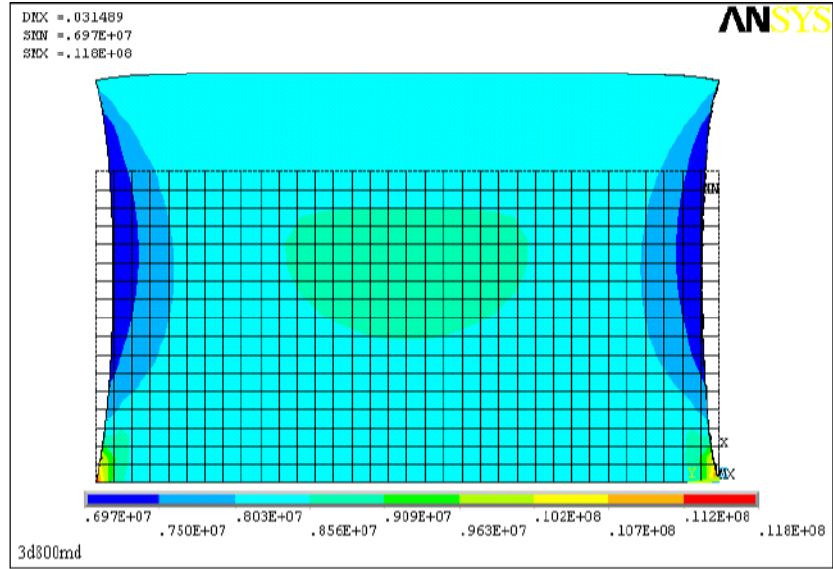


(a)

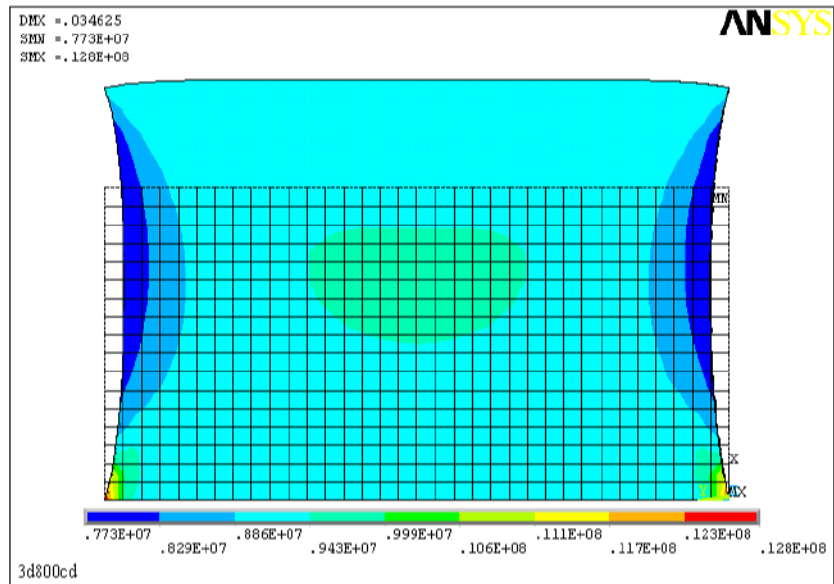


(b)

Şekil 3.51 Geniş enli çekme testleri: 3D-600 (a) MD, (b) CD



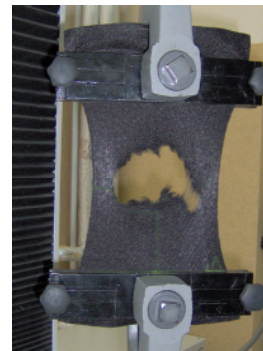
Şekil 3.52 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-800MD



Şekil 3.53 Tek lif yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-800CD



(a)



(b)

Şekil 3.54 Geniş enli çekme testleri: 3D-800 (a) MD, (b) CD

3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için yukarıdaki şekillerde verilen makina ve makina yönüne dik yöndeki gerilme analizi sonuçları incelendiğinde, bu kumaş modellerinde de farklı gerilme bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Çekme doğrultusundaki maksimum gerilmeler sınır koşulları nedeni ile çeneler tarafından tutulan köşelerde hesaplanmıştır. Minimum gerilmeler ise serbest bırakılan kenarlar civarında oluşmuştur. Modeldeki maksimum ve minimum gerilmeler dışındaki kritik gerilme dağılımları incelendiğinde, orta nokta etrafında gerilme yığılmaları oluştuğu, ayrıca serbest kenarlardan orta noktaya doğru gidildikçe gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Modelde orta nokta etrafındaki bu gerilme değerleri incelendiğinde, deneysel olarak elde edilen gerilmelere yakın değerler hesaplandığı belirlenmiştir. Numune kumaşlara ait geniş enli çekme testleri fotoğraflarında da kopuşların ve gerilme yığılmalarının çoğunlukla orta nokta etrafında oluştuğu görülmektedir. Sonuç olarak tek lif yaklaşımı ile 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için elde edilen teorik gerilme dağılımı da kumaşlarda çekme testinde oluşan uniform olmayan gerilme dağılımına benzemektedir.

3 denye liflerden oluşmuş kumaşlar için teorik gerilme analizleri sonucu elde edilen şekiller incelendiğinde, çenelerin tuttuğu kısımlarda çekme yönüne dik yönde herhangi bir yanal daralma oluşmazken kumaş orta noktasına doğru daralmanın arttığı ve burada maksimum değerini aldığı görülmektedir. Benzer durum fotoğraflarda da görüldüğü gibi çekme testlerinde de oluşmaktadır. Ancak tek lif yaklaşımında hesaplanan uzama değerleri deneysel olarak belirlenen uzama değerlerinden düşük olduğundan, 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için elde edilen teorik şekiller de çekme testleri sırasında oluşan kumaş yapılarına tam olarak benzememektedir.

3 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönündeki deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.19'da görülmektedir.

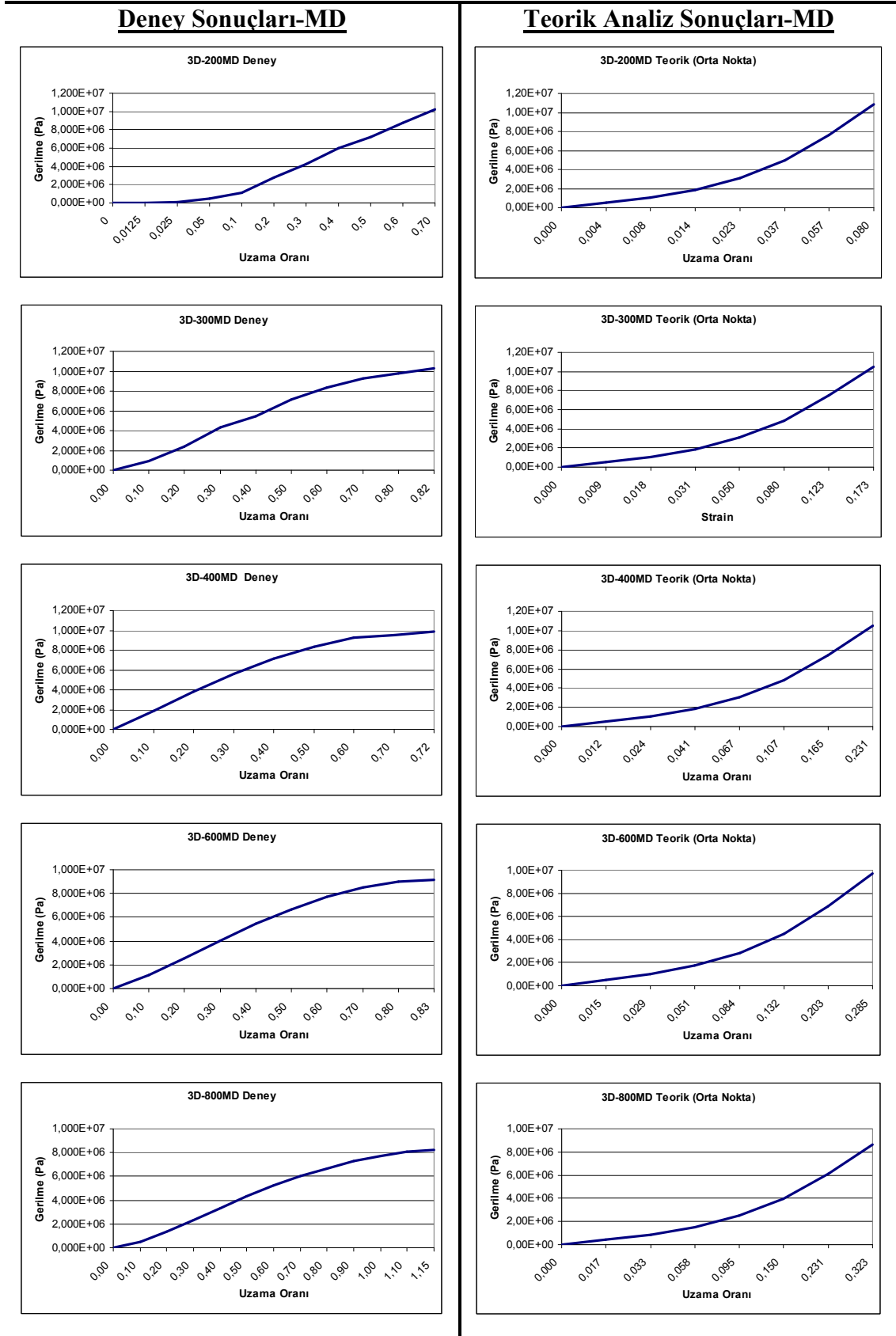
Tablo 3.19 Makina yönündeki deneysel veriler ve tek lif yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
3D-200	10,30E+06	69,92	10,80E+06	7,69	4,85	-89,00
3D-300	10,10E+06	82,27	10,50E+06	16,74	4,16	-79,65
3D-400	10,10E+06	72,05	10,50E+06	22,41	3,76	-68,90
3D-600	9,36E+06	83,33	9,69E+06	27,74	3,53	-66,71
3D-800	8,32E+06	115,14	8,59E+06	31,48	3,25	-72,66

3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için Tablo-3.19’da verilen gerilme değerleri incelendiğinde, teorik analizlerde model orta noktasında elde edilen gerilme değerlerinin geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %3,25 ile %4,85 arasında değişmektedir. Kumaş gramajı arttıkça teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark azalmaktadır.

Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında, tek lif yaklaşımı ile 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için de hesaplanan maksimum uzama miktarlarının deneysel verilerden çok düşük olduğu görülmektedir. Bu farkın nedeni, 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların tek lif yaklaşımı sonuçlarında da açıklandığı gibi malzeme özelliklerini tanımlamakta kullanılan veriler ile eğrilerin yapısı ve çekme testi başlangıcındaki lif göçü nedeni ile oluşan aşırı uzama oranlarıdır. Bununla birlikte 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların yüzeylerine uygulanan ısıl işlem, çekme testi başlangıcında oluşan bu aşırı uzamaları kısmen sınırlamaktadır. Ancak Tablo-3.10’da da görüldüğü gibi 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan sabit elastisite modülleri 6 denye kumaşlarından yüksektir. Dolayısı ile her iki liften üretilmiş kumaş numunelerinde tek lif yaklaşımı sonucu elde edilen uzama değerleri ile deneylerde ölçülen uzama değerleri arasındaki fark yüksektir.

Şekil-3.55’de makina yönündeki teorik analizler sonucu 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 3.55 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönünde deneysel ve teorik gerilme-uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil-3.55’de görüldüğü gibi teorik analizler sonucu orta noktada elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri de deneysel eğriler gibi nonlineerdir. Bununla birlikte deneysel olarak ölçülen maksimum gerilme değerleri, teorik eğrilerde çok düşük uzama oranlarında elde edilmiştir. Kumaş gramajı arttıkça teorik ve deneysel uzama oranı değerleri arasındaki farkın azaldığı eğrilerden de görülmektedir.

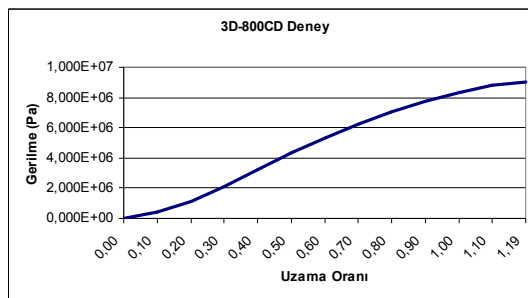
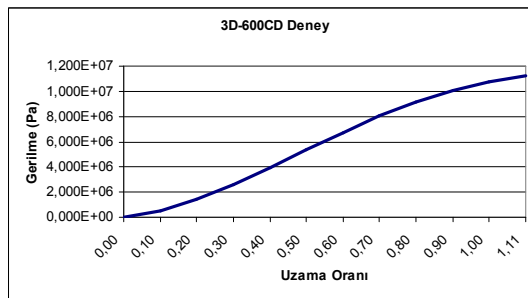
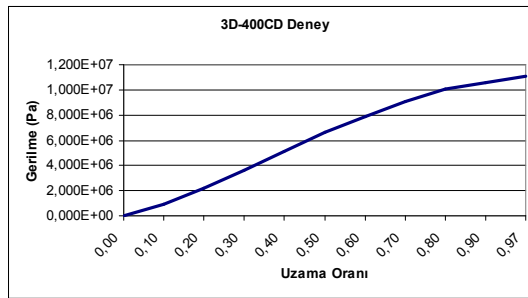
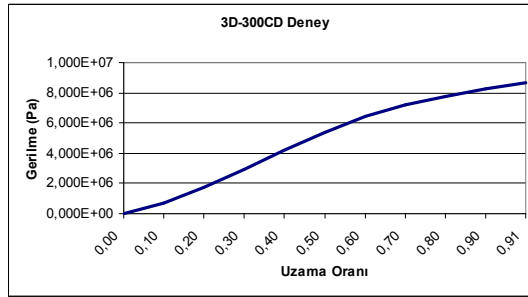
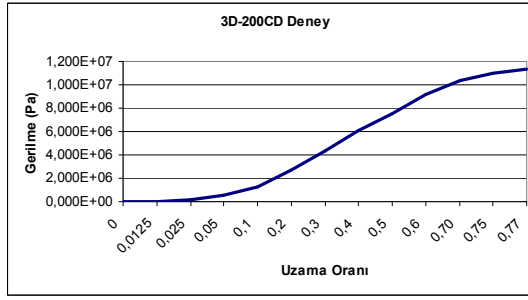
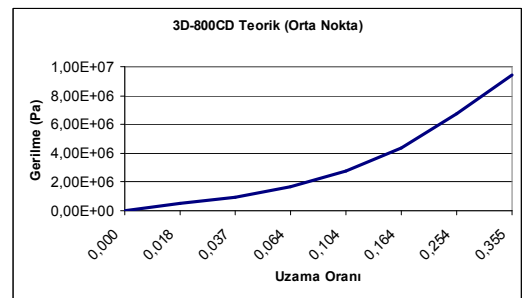
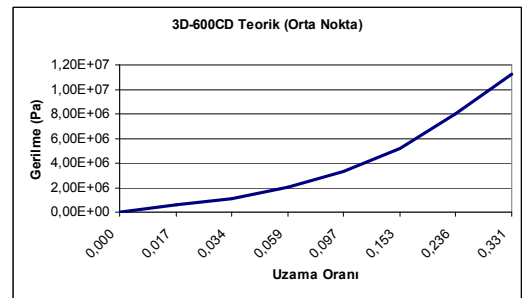
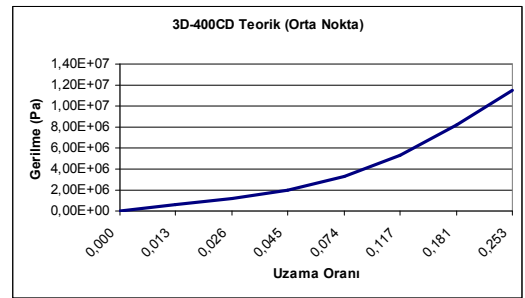
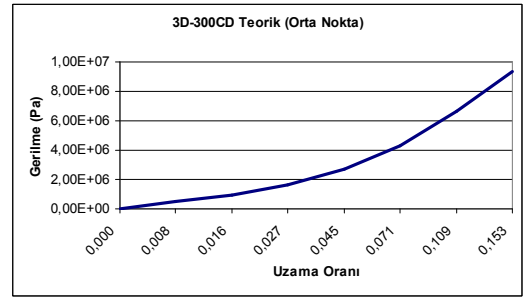
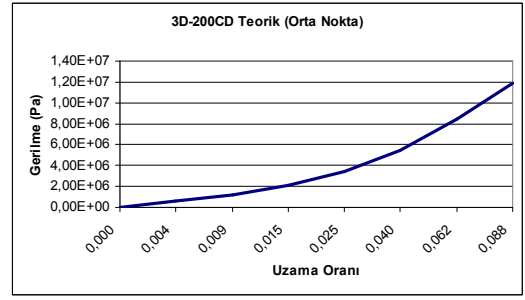
3 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönüne dik yönde deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.20’de görülmektedir.

Tablo 3.20 Makina yönüne dik yöndeki deneysel veriler ve tek lif yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
3D-200	11,40E+06	76,99	11,90E+06	8,47	4,30	-89,00
3D-300	8,96E+06	90,89	9,34E+06	14,87	4,24	-83,64
3D-400	11,10E+06	96,78	11,50E+06	24,60	3,69	-74,58
3D-600	10,90E+06	110,80	11,30E+06	32,24	3,30	-70,90
3D-800	9,16E+06	118,60	9,45E+06	34,62	3,17	-70,81

Tablo-3.20’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerde de model orta noktasında elde edilen çekme doğrultusundaki gerilme değerlerinin geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %3,17 ile %4,30 arasında değişmektedir. Makina yönüne dik yönde de kumaş gramajı arttıkça teorik analiz hesaplamalarında deneysel verilere daha yakın gerilme değerleri elde edilmiştir. Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için tek lif yaklaşımına göre makina yönüne dik yönde de hesaplanan teorik uzama miktarları deneysel verilerden çok düşüktür.

Şekil-3.56’da makina yönüne dik yönde teorik analizler sonucu 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

Deney Sonuçları-CD**Teorik Analiz Sonuçları-CD**

Şekil 3.56 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönüne dik yönde deneysel ve teorik gerilme - uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

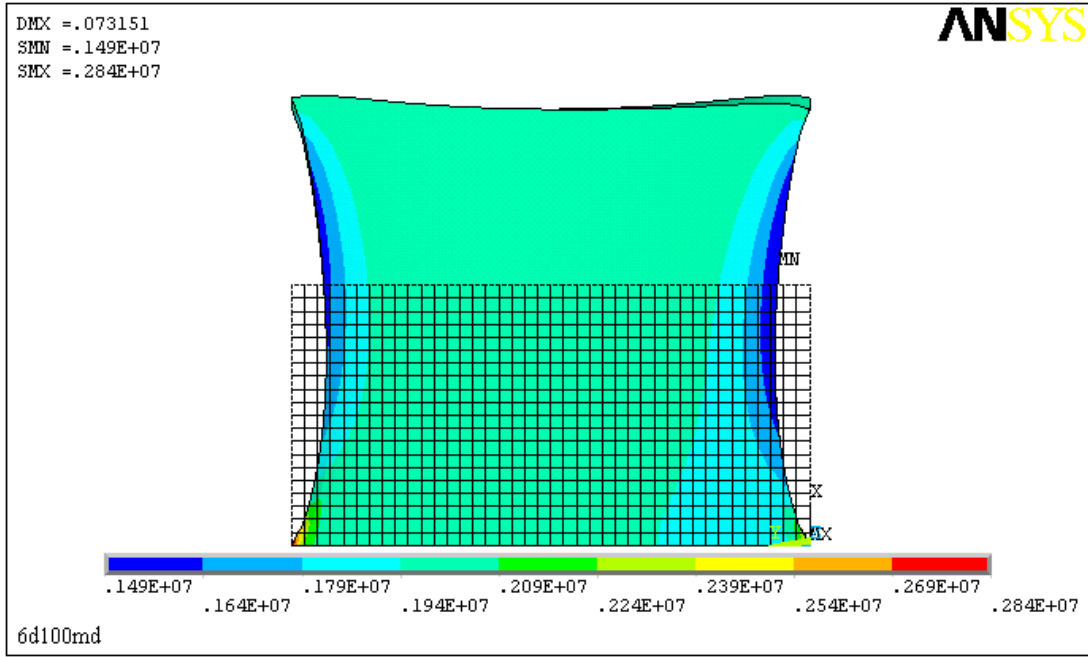
Şekil-3.56’da görüldüğü gibi makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucu orta noktada elde edilen gerilme uzama oranı eğrileri de deneysel eğrilere benzer şekilde nonlineerdir. Öte yandan teorik analizlerde elde edilen düşük uzama oranı değerleri ve kumaş gramajı arttıkça teorik olarak hesaplanan uzama değerleri ile deneysel veriler arasındaki farkın azaldığı bu eğrilerde de görülmektedir.

3.3.2 Teorik Model-II: Referans Kumaş Yaklaşımı Sonuçları

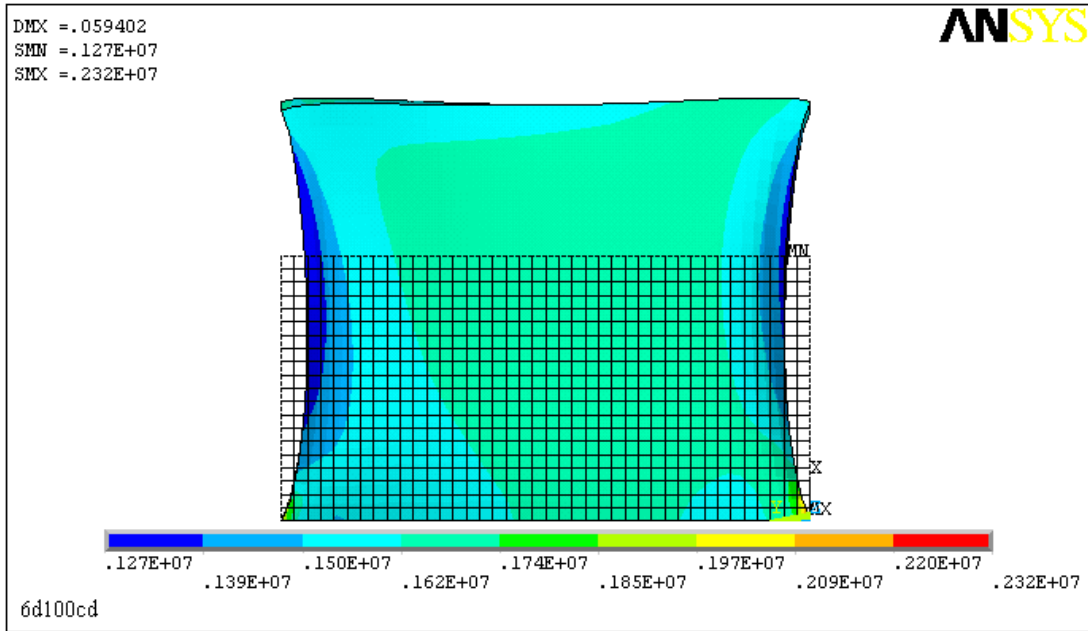
Yukarıdaki kısımlarda ayrıntıları açıklanan bu model yaklaşımında, referans kumaşlara ait gerilme-uzama oranı davranışları dikkate alınmış ve sonlu elemanlar analizinde malzeme özellikleri olarak bu kumaşlara ait deneysel veriler kullanılmıştır. 6 denye ve 3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşların referans kumaş yaklaşımı ile yapılan teorik gerilme analizi sonuçları ve bunların deneysel veriler ile karşılaştırılması aşağıdaki kısımlarda grafikler ve tablolar halinde verilmiştir.

3.3.2.1 Altı Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları

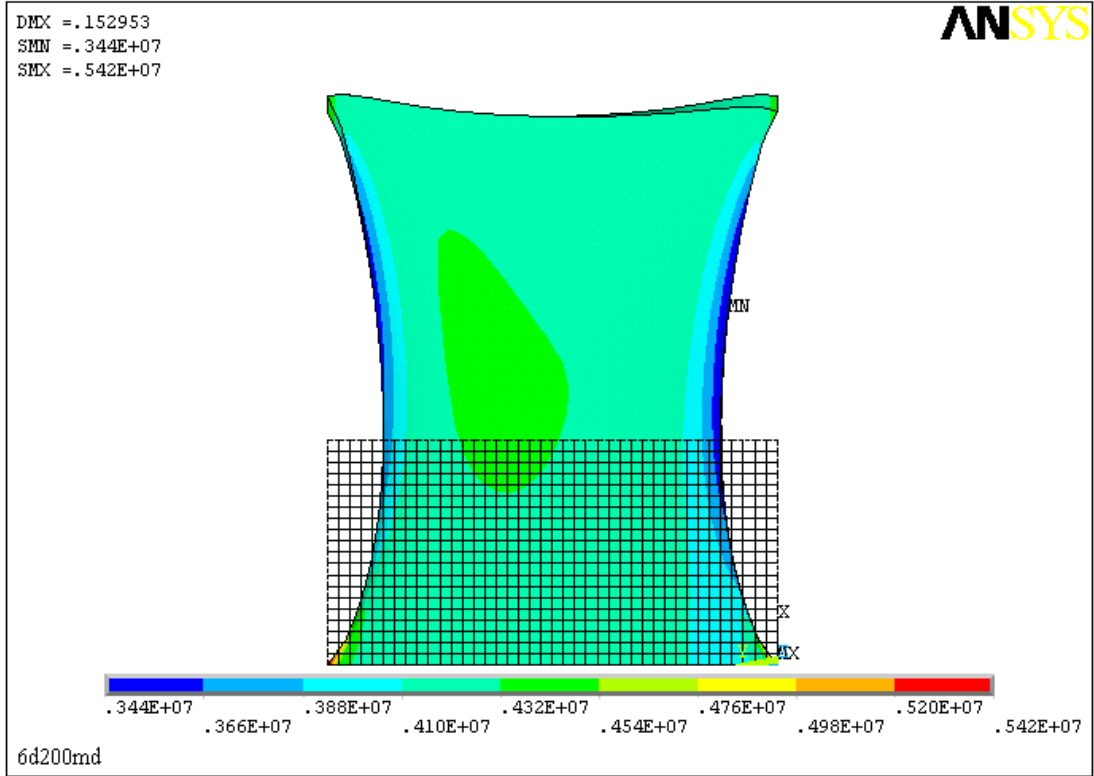
6 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlarda referans kumaş yaklaşımına göre makina yönünde ve makina yönüne dik yönde yapılan teorik analizler sonucu çekme doğrultusundaki düğümlerde hesaplanan normal gerilmeler ve dağılımları Şekil-3.57 ile Şekil-3.66 arasında verilmiştir. Kumaşlara ait geniş enli çekme testleri sırasında çekilen fotoğraflar ise tek lif yaklaşımı sonuçları bölümünde Şekil-3.25, 3.28, 3.31, 3.34 ve 3.37’de görülmektedir.



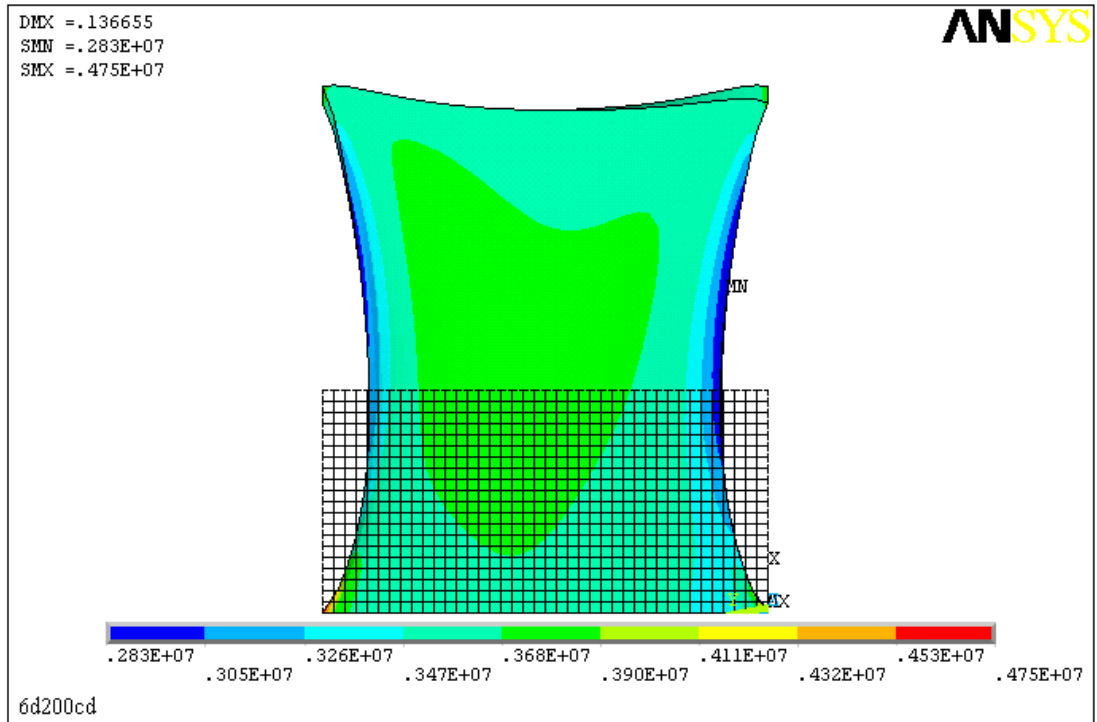
Şekil 3.57 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-100MD



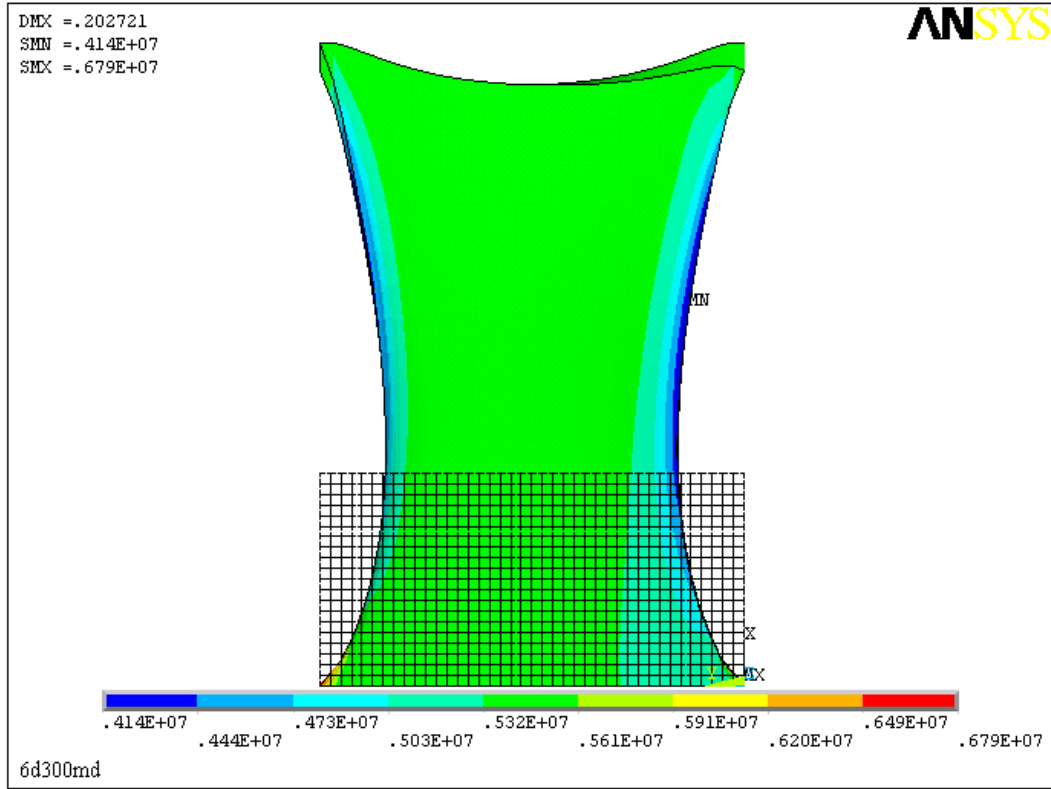
Şekil 3.58 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-100CD



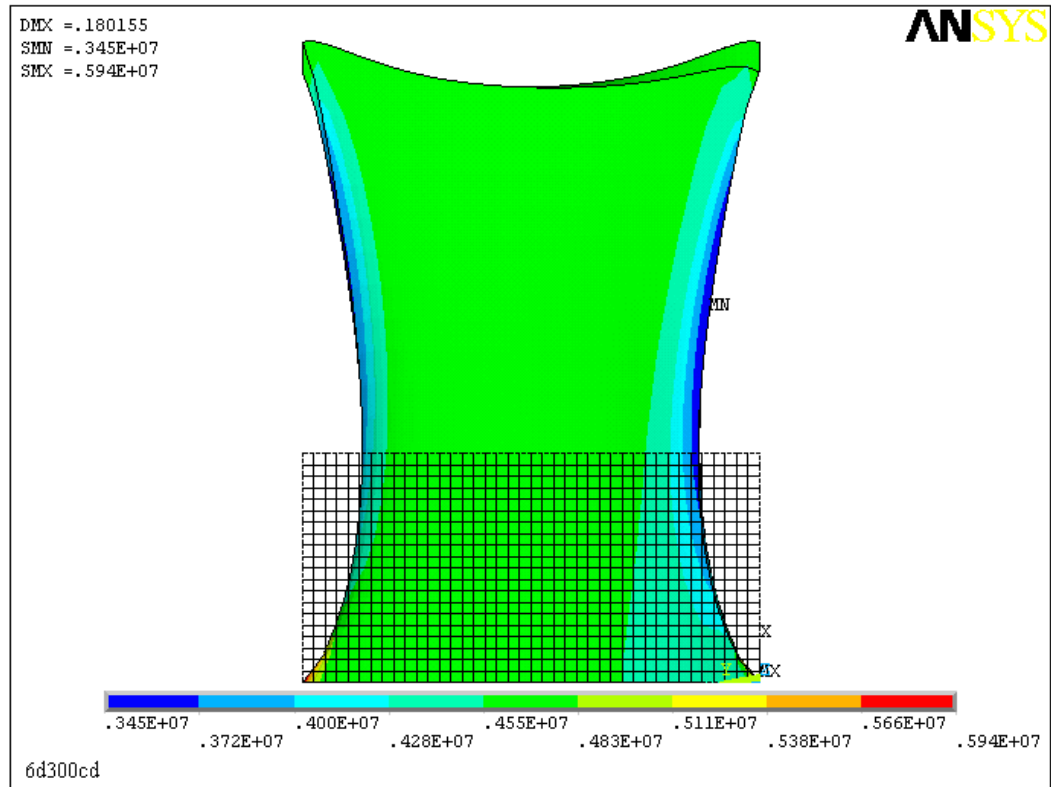
Şekil 3.59 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-200MD



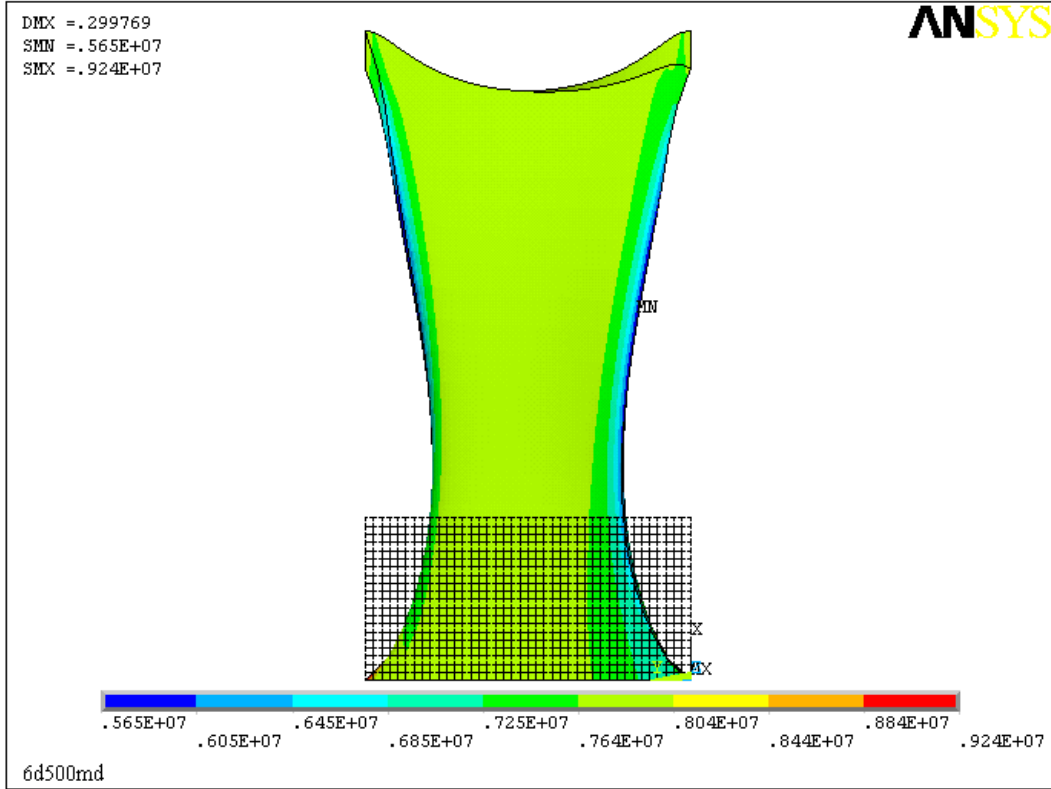
Şekil 3.60 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-200CD



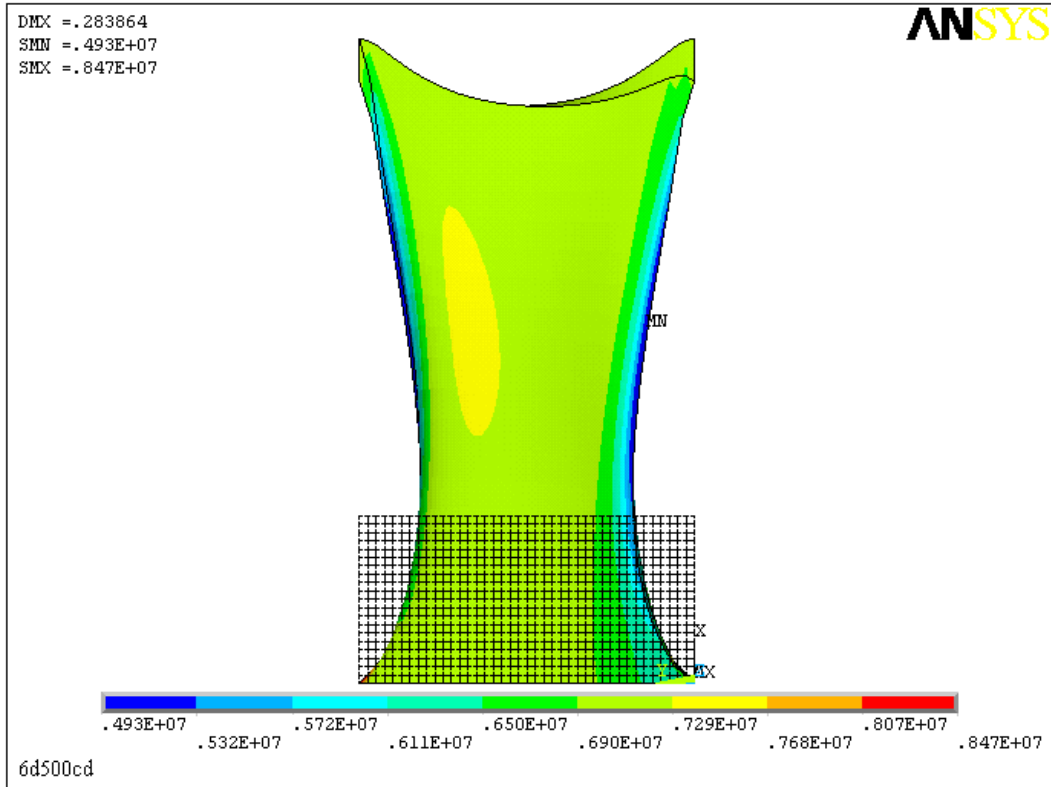
Şekil 3.61 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-300MD



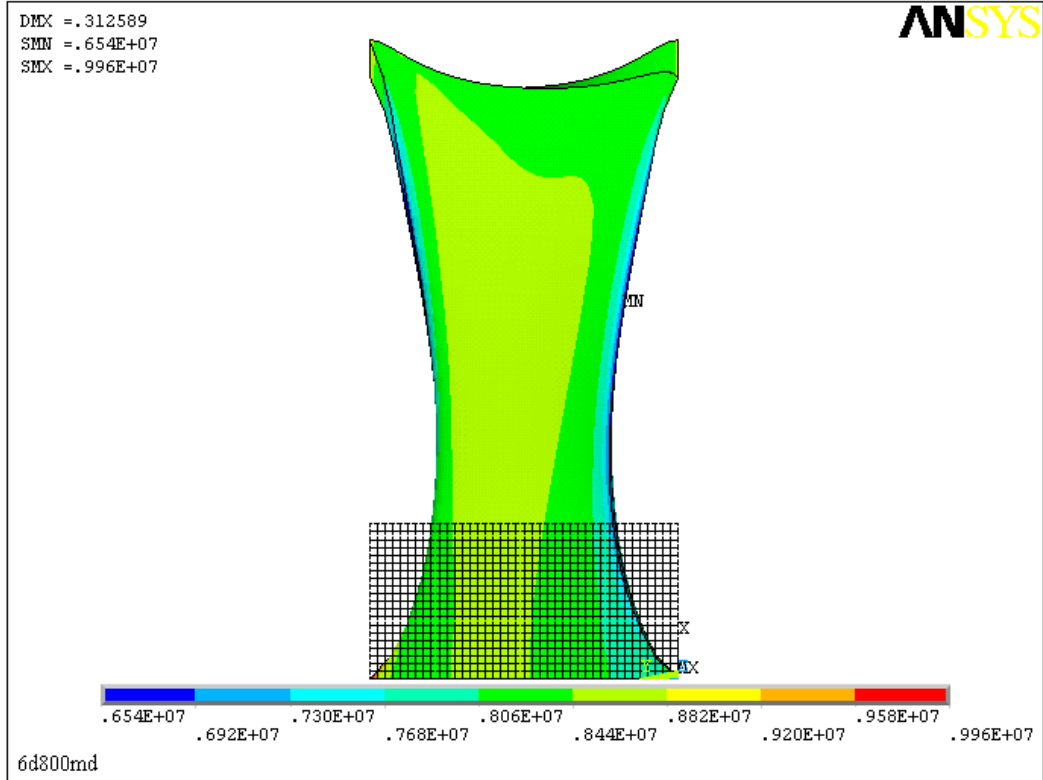
Şekil 3.62 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-300CD



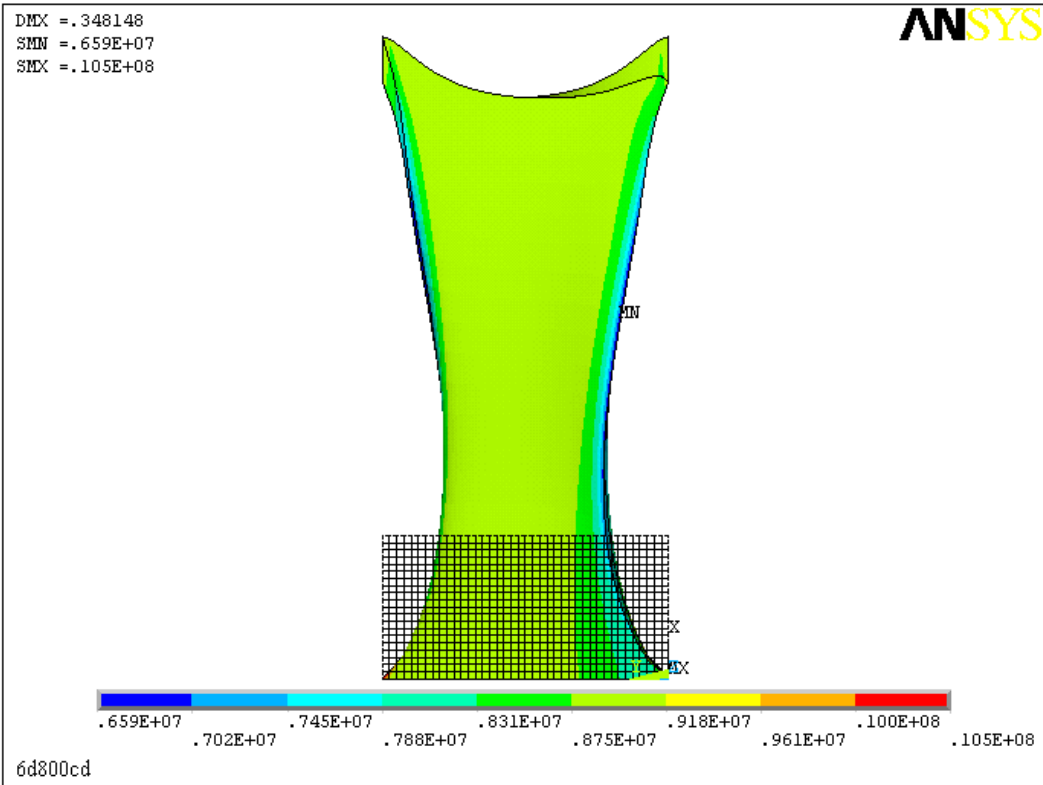
Şekil 3.63 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-500MD



Şekil 3.64 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-500CD



Şekil 3.65 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-800MD



Şekil 3.66 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 6D-800CD

6 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için yukarıdaki şekillerde verilen makina ve makina yönüne dik yöndeki referans kumaş yaklaşımı gerilme analizi sonuçları incelendiğinde, model kumaşlarda farklı gerilme bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Referans kumaş yaklaşımında da çekme doğrultusundaki maksimum gerilmeler sınır koşullar nedeni ile çeneler tarafından tutulan köşelerde hesaplanmıştır. Minimum gerilmeler ise serbest bırakılan kenarlar civarında oluşmuştur. Tek eksenli çekme testlerinde çekme yönüne dik yönde oluşan daralmalar orta nokta etrafındaki gerilme yığılmalarını artırmakta ve burada kritik gerilme değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca kumaş içerisinde çekme yönünden farklı açılarda yönlenmiş ve serbest halde bulunan lifler, çekme testleri sırasında çekme doğrultusuna yönelerek kumaşta farklı gerilme bölgeleri oluşturmaktadırlar. Modeldeki maksimum ve minimum gerilmeler dışındaki gerilme dağılımları incelendiğinde, orta nokta etrafında gerilme yığılmaları oluştuğu, ayrıca serbest kenarlardan orta noktaya doğru gidildikçe gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Modelde orta nokta etrafındaki bu gerilme değerleri incelendiğinde ise, deneysel olarak elde edilen gerilmelere yakın değerler hesaplandığı belirlenmiştir. Numune kumaşlara ait Şekil-3.25, 3.28, 3.31, 3.34 ve 3.37’de verilen geniş enli çekme testleri fotoğraflarında da kopuşların ve gerilme yığılmalarının çoğunlukla orta nokta etrafında oluştuğu görülmektedir. Referans kumaş yaklaşımı gerilme analizleri sonucunda 6 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için elde edilen düğümlerdeki gerilme dağılımı, çekme testlerinde dokusuz yüzey kumaşlarda oluşan uniform olmayan gerilme dağılımı ile benzerdir.

Bu yaklaşımda da teorik gerilme analizleri sonucu elde edilen kumaş konfigürasyonları, çekme testleri sonucunda oluşan kumaş şekillerine benzemektedir. Modelde çenelerin tuttuğu kısımlarda çekme yönüne dik yönde herhangi bir yanal daralma oluşmazken, kumaş orta noktasına doğru daralmanın arttığı ve burada maksimum değerini aldığı görülmektedir. Benzer durum fotoğraflarda da görüldüğü gibi 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların çekme testlerinde de oluşmaktadır. Tek eksenli çekme testinde dokusuz yüzey kumaşların sabit olmayan yanal daralmaları, oluşturulan model tarafından simüle edilebilmiştir. Bununla birlikte referans kumaş yaklaşımında hesaplanan gerilme değerlerinde, tek lif yaklaşımına göre daha yüksek uzamalar elde edilmiştir. Teorik uzama değerlerindeki bu artış çekme yönüne göre

farklı açıklarda yerleşmiş tabakaların gerilme dağılımına etkisini de göstermektedir. Dolayısı ile referans kumaş yaklaşımında elde edilen kumaş konfigürasyonları, gerçek kumaş yapılarına tek lif yaklaşımında elde edilen şekillerden daha çok benzemektedir.

6 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönündeki deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.21’de görülmektedir.

Tablo 3.21 Makina yönündeki deneysel veriler ve referans kumaş yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
6D-100*	1,97E+06	131,25	2,03E+06	73,15	3,05	-44,27
6D-200	4,05E+06	148,54	4,32E+06	152,95	6,67	2,97
6D-300	5,11E+06	171,36	5,52E+06	202,72	8,02	18,30
6D-500	7,36E+06	208,72	7,96E+06	299,76	8,15	43,62
6D-800	7,87E+06	223,81	8,52E+06	312,58	8,26	39,66

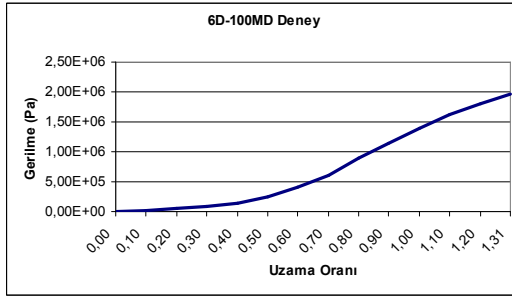
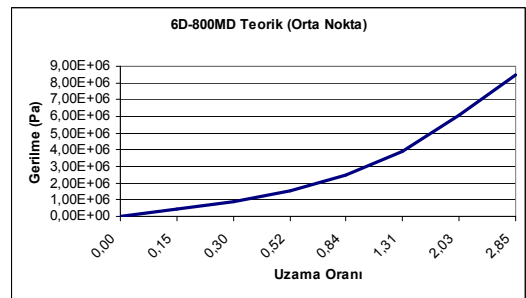
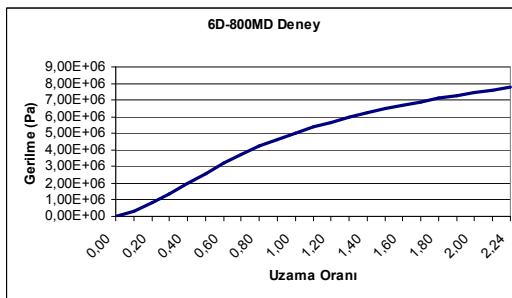
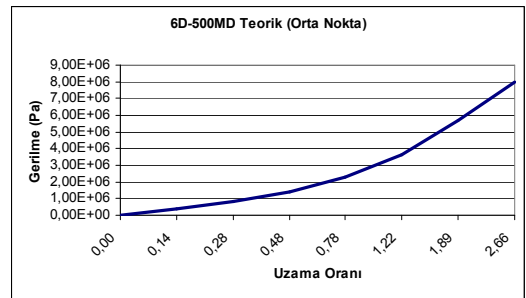
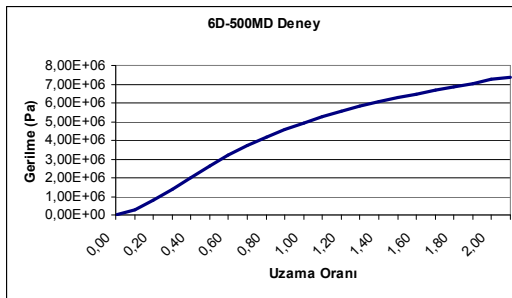
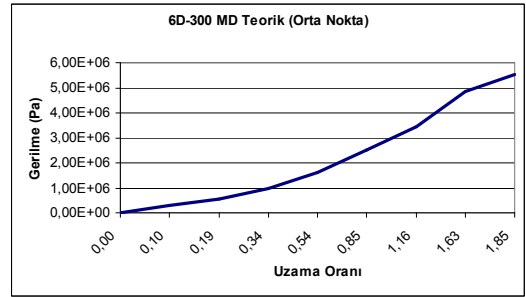
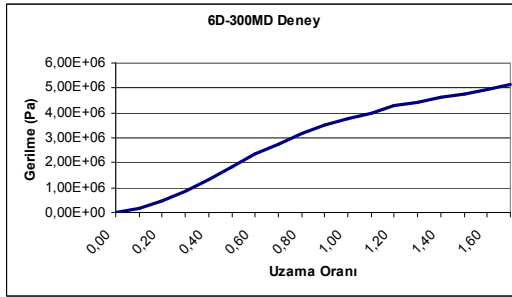
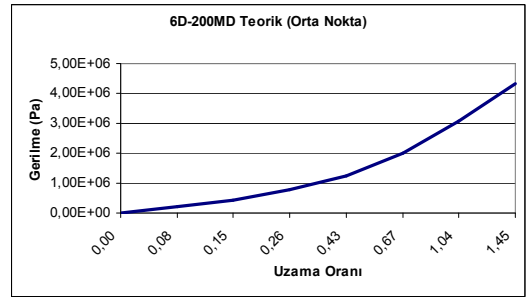
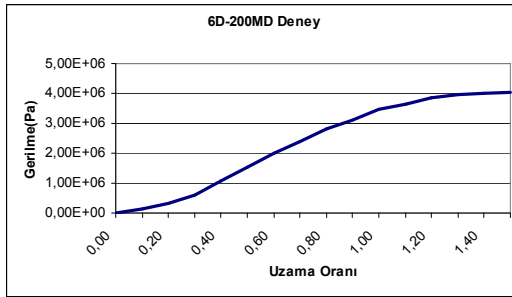
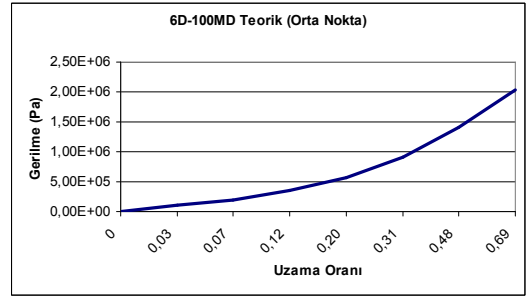
* Referans Kumaş

Tablo-3.21’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, teorik analizlerde model orta noktasında elde edilen gerilme değerlerinin, bu yaklaşımda da geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %3,05 ile %8,26 arasında değişmektedir. Teorik analizlerde başlangıç verisi olarak kullanılan referans kumaşlarda deneysel ve teorik gerilme değerleri arasındaki fark sadece %3,05’dir. Bununla birlikte kumaş gramajı attıkça bu fark artmakta ve en ağır jeotekstil numunesi için %8,26 olmaktadır.

Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise referans kumaş yaklaşımında, tek lif yaklaşımına göre uzama değerleri açısından daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Uzama değerleri model tarafından %2 ile %40 arasında değişen farklarda hesaplanabilmektedir. Şekil-3.22’de verilen ve bu yaklaşımında malzeme özelliklerini tanımlamakta kullanılan referans kumaş-gerilme-uzama oranı eğrisi, geniş enli çekme testleri sonucunda numune kumaşlarda elde edilen ve Şekil-3.7’de verilen gerilme uzama oranı eğrilerine benzemektedir. Eğriler, düşük gerilmelerde aşırı uzamaların olduğu başlangıç bölümü ve uzamanın gerilme ile yaklaşık olarak

doğrusal arttığı iki kısımdan oluşmaktadır. Dolayısı ile referans kumaş yaklaşımında çekme testleri başlangıcında lif göçü sebebi ile oluşan aşırı uzamalar ve lif-lif etkileşimleri kısmen dikkate alınabilmektedir. Bununla birlikte çekme testi başlangıcında oluşan aşırı uzamaların gerçek kumaşlarda kumaş gramajı attıkça azalması, referans kumaş gerilme-uzama eğrilerine göre hesaplanan teorik değerlerde sapmalar olmasına neden olmaktadır. Ayrıca teorik analizlerde veri olarak kullanılan gerilme-uzama oranı eğrisinin ikinci kısmının lineer olarak kabul edilmesi bu farkların oluşumunda etkilidir. Üretim tekniğine bağlı olarak oluşan zayıf bağ noktalarından kaynaklı erken kopuşlar ve/veya özellikle yüksek gramajlı kumaşlarda uzamayı sınırlayan, kumaş kalınlığı boyunca yönelmiş lifler teorik ve deneysel veriler arasında farkın diğer nedenleri olabilir.

Şekil-3.67'de makina yönündeki teorik analizler sonucu 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

Deney Sonuçları-MD**Teorik Analiz Sonuçları-MD**

Şekil 3.67 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönünde deneysel ve teorik gerilme -uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil-3.67’de görüldüğü gibi, teorik analizler sonucu orta noktada elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri de deneysel eğriler gibi nonlineerdir. Eğriler, çekme testlerindeki başlangıç uzamalarının oluştuğu nonlineer elastik ve daha sonraki lineer elastik kısımlardan oluşmaktadır. Referans kumaş yaklaşımında gerilme ve uzama değerleri açısından tek lif yaklaşımına göre daha iyi ve gerçek kumaşlara daha yaklaşık değerler elde edildiği eğrilerden de görülmektedir.

6 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönüne dik yönde deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.22’de görülmektedir.

Tablo 3.22 Makina yönüne dik yöndeki deneysel veriler ve referans kumaş yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
6D-100*	1,61E+06	108,00	1,66E+06	59,40	3,11	-45,00
6D-200	3,45E+06	197,20	3,71E+06	136,65	7,54	-30,70
6D-300	4,34E+06	229,86	4,75E+06	180,15	9,45	-21,63
6D-500	6,62E+06	217,39	7,26E+06	283,86	9,67	30,58
6D-800	8,31E+06	236,01	9,08E+06	348,14	9,27	47,51

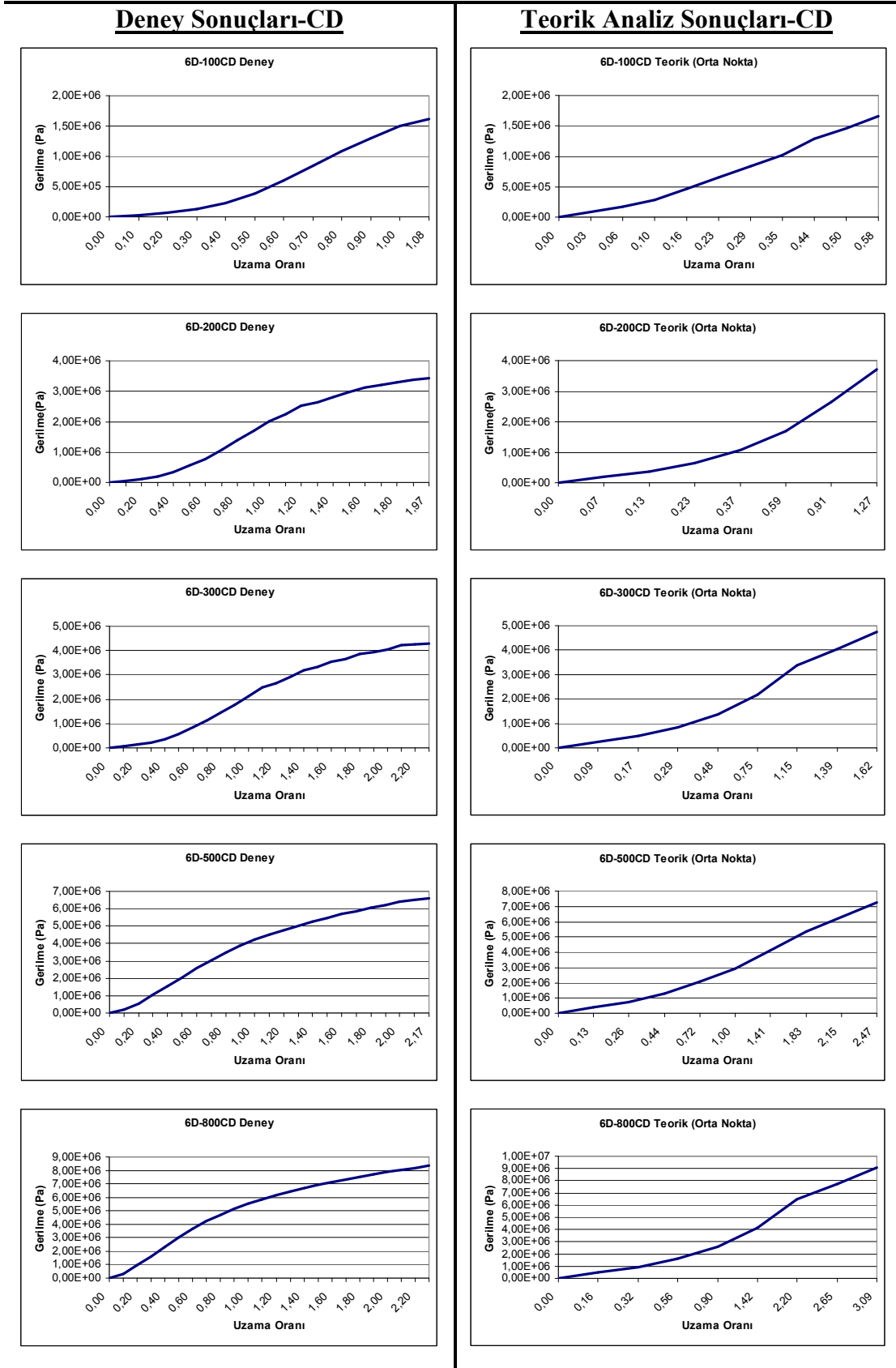
*Referans Kumaş

Tablo-3.22’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerde de model orta noktasında elde edilen çekme doğrultusundaki gerilme değerlerinin geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %3,11 ile %9,27 arasında değişmektedir. Teorik analizlerde başlangıç verisi olarak kullanılan referans kumaşlarda deneysel ve teorik gerilme değerleri arasındaki fark sadece %3,11’dir. Bununla birlikte kumaş gramajı attıkça bu fark artmakta ve en ağır jeotekstil numunesi için %9,27 olmaktadır.

Uzama değerleri açısından referans kumaş yaklaşımında, makina yönüne dik yönde de tek lif yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Uzama değerleri model tarafından %20 ile %47 arasında değişen farklarda

hesaplanabilmiştir. Bu durum makina yönündeki çözümlerde de belirtildiği gibi malzeme özelliklerini tanımlamakta kullanılan eğrinin yapısından kaynaklanmaktadır.

Şekil-3.68'de makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucu 6 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

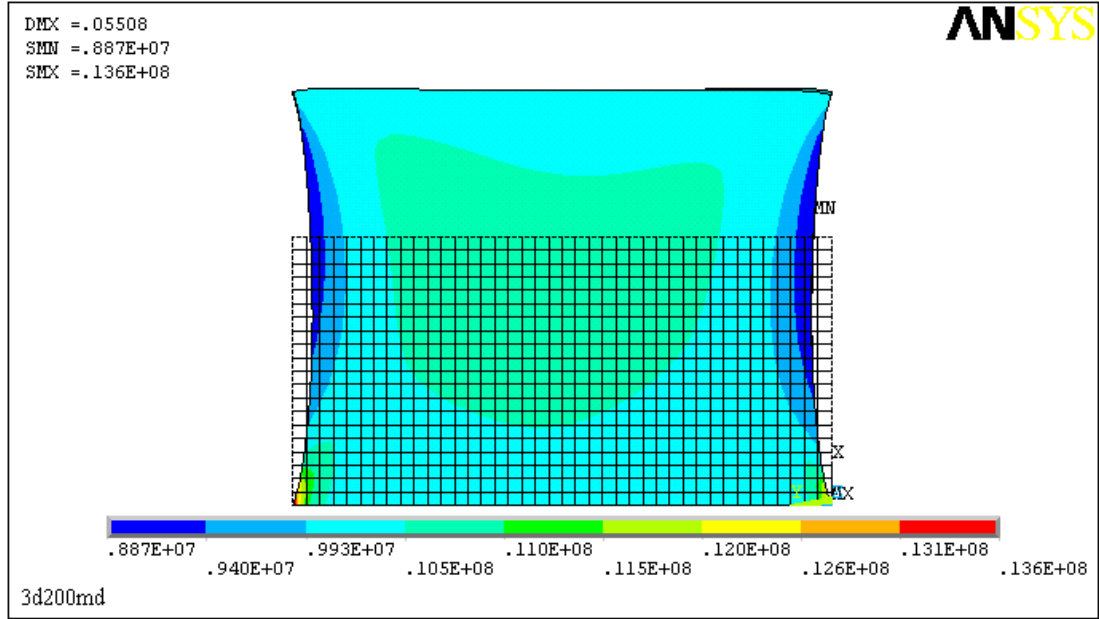


Şekil 3.68 6denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönüne dik yönde deneysel ve teorik gerilme -uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

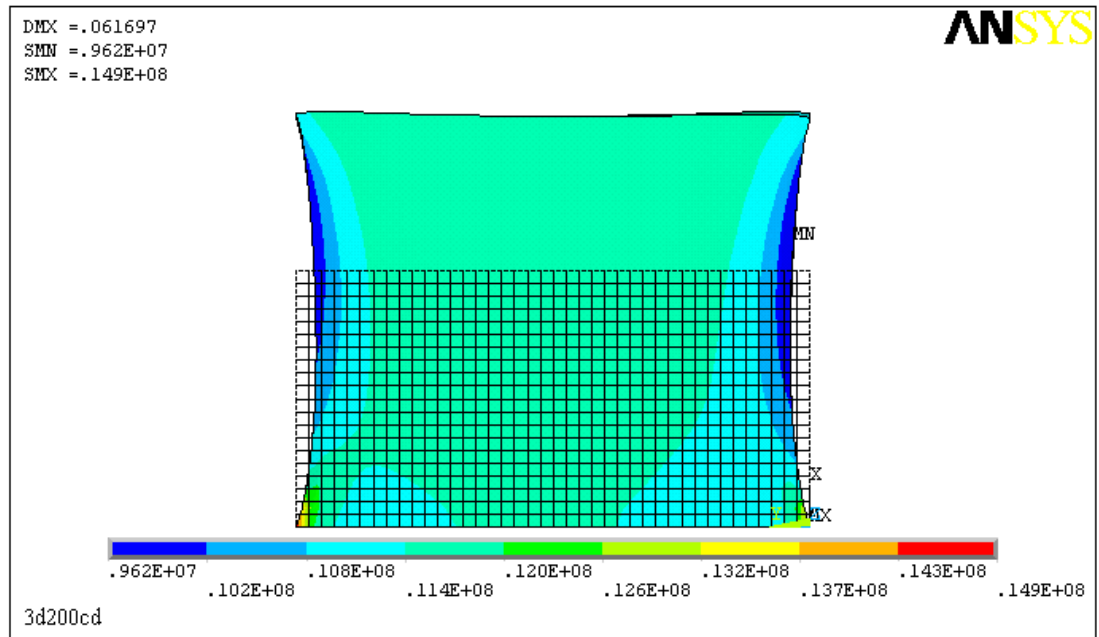
Şekil-3.68’de verilen eğriler incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucunda orta noktada elde edilen gerilme uzama oranı eğrilerinin de deneysel eğrilere benzer şekilde nonlineer olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu, ancak bu değerlerdeki teorik ve deneysel uzama verileri arasında farklar olduğu eğrilerden de görülebilmektedir.

3.3.2.2 Üç Denye Liflerden Üretilmiş Jeotekstil Kumaşlarda Teorik Analiz Sonuçları

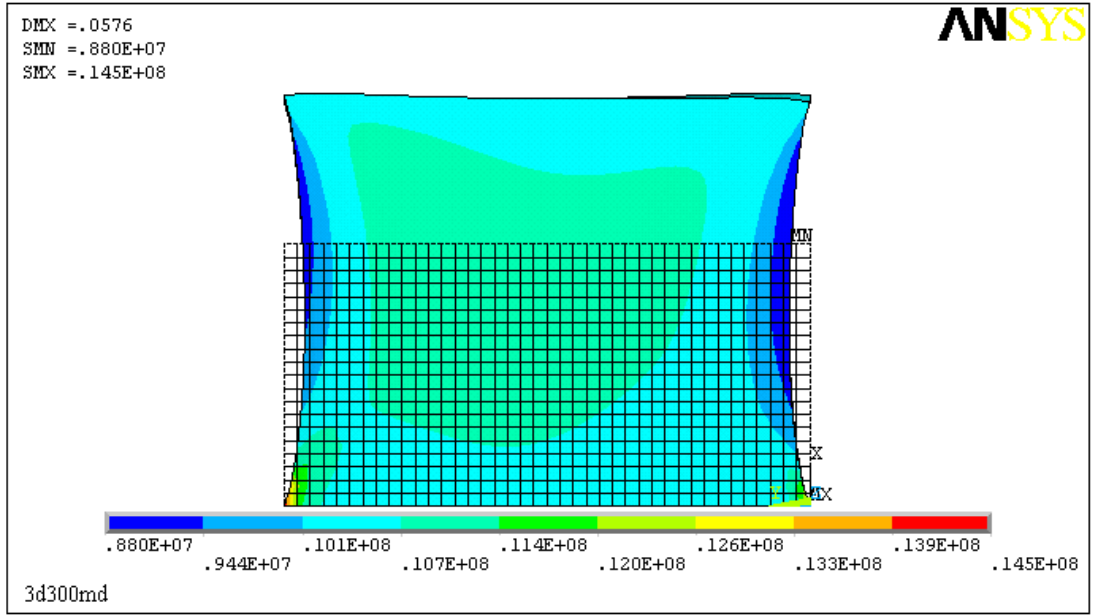
3 denye inceliğindeki liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlarda, referans kumaş yaklaşımına göre makina yönünde ve makina yönüne dik yönde yapılan teorik analizler sonucu çekme doğrultusundaki düğümlerde hesaplanan normal gerilme dağılımları Şekil-3.69 ile Şekil-3.78 arasında verilmiştir. Kumaşlara ait geniş enli çekme testleri sırasında çekilen fotoğraflar ise tek lif yaklaşımı sonuçları bölümünde Şekil-3.42, 3.45, 3.48, 3.51 ve 3.54’de görülmektedir.



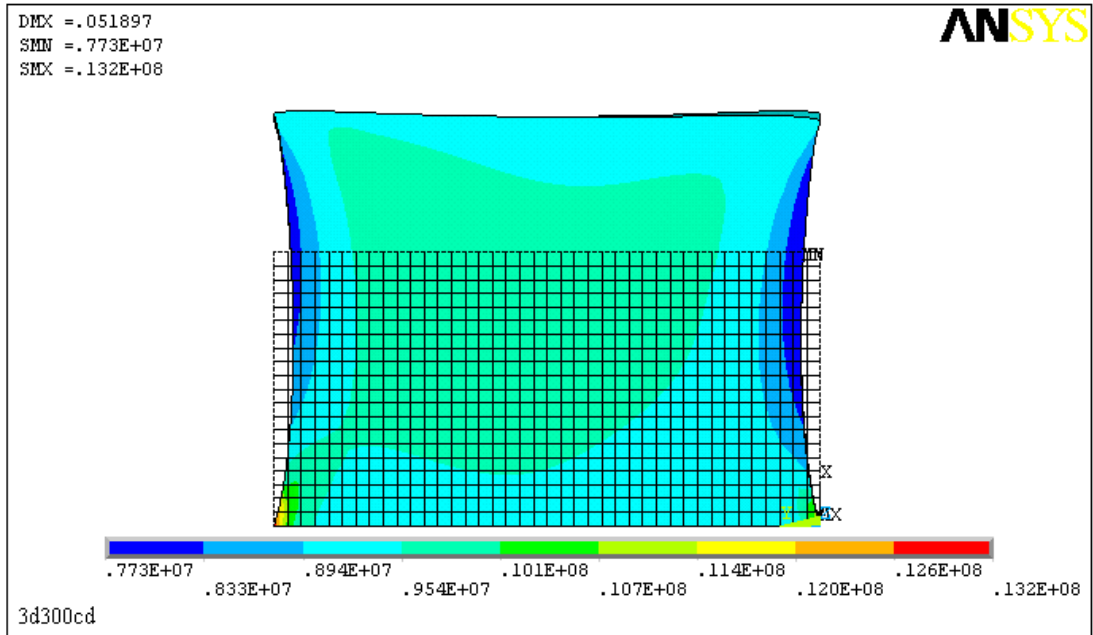
Şekil 3.69 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-200MD



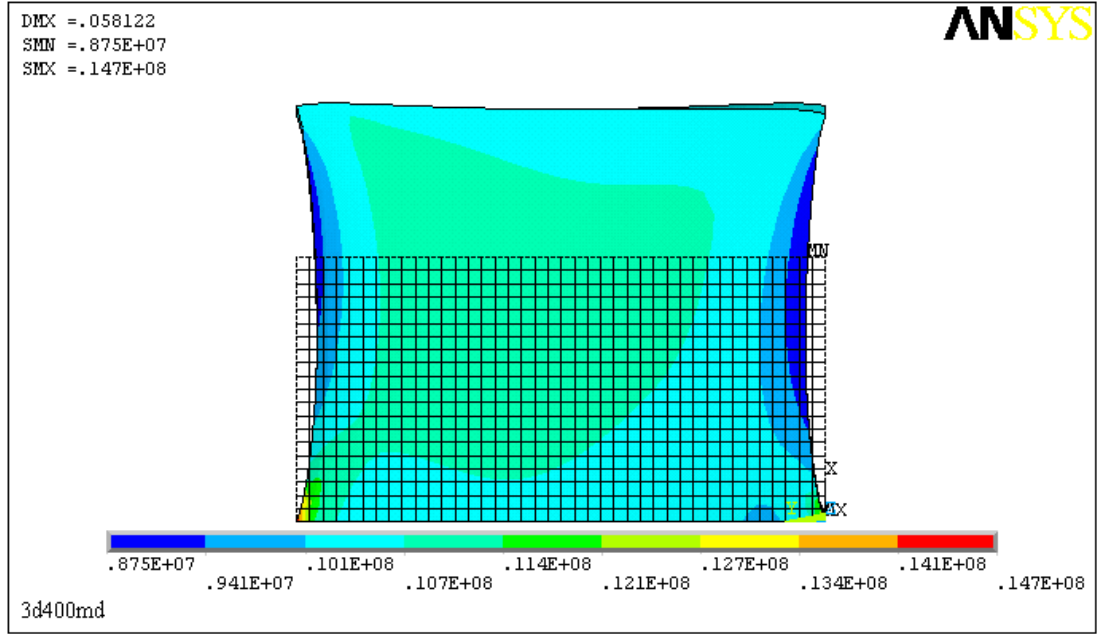
Şekil 3.70 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-200CD



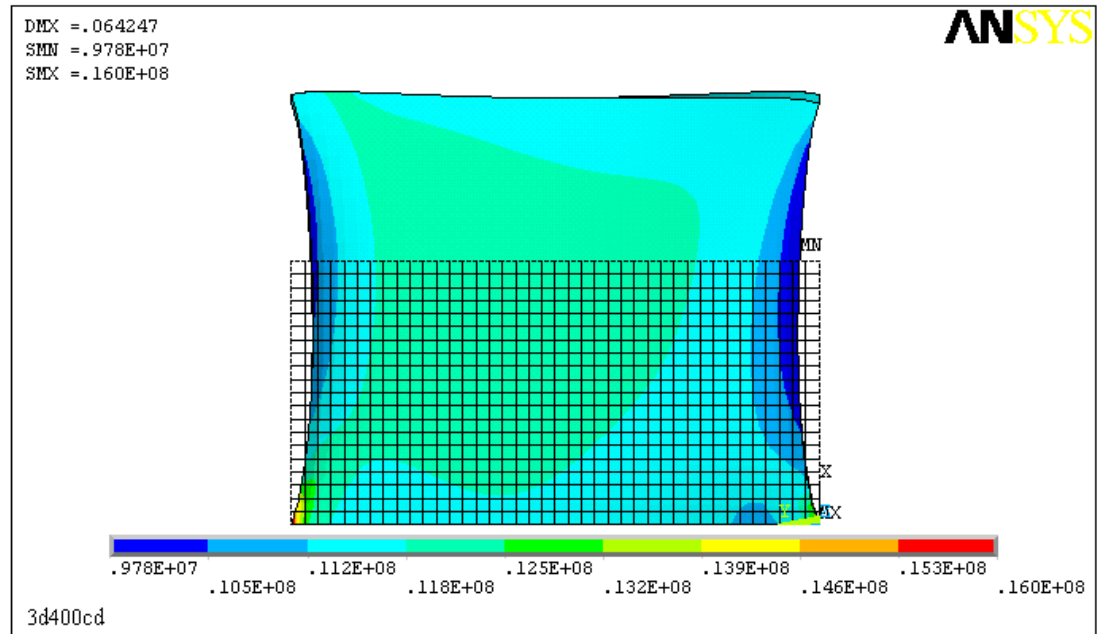
Şekil 3.71 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-300MD



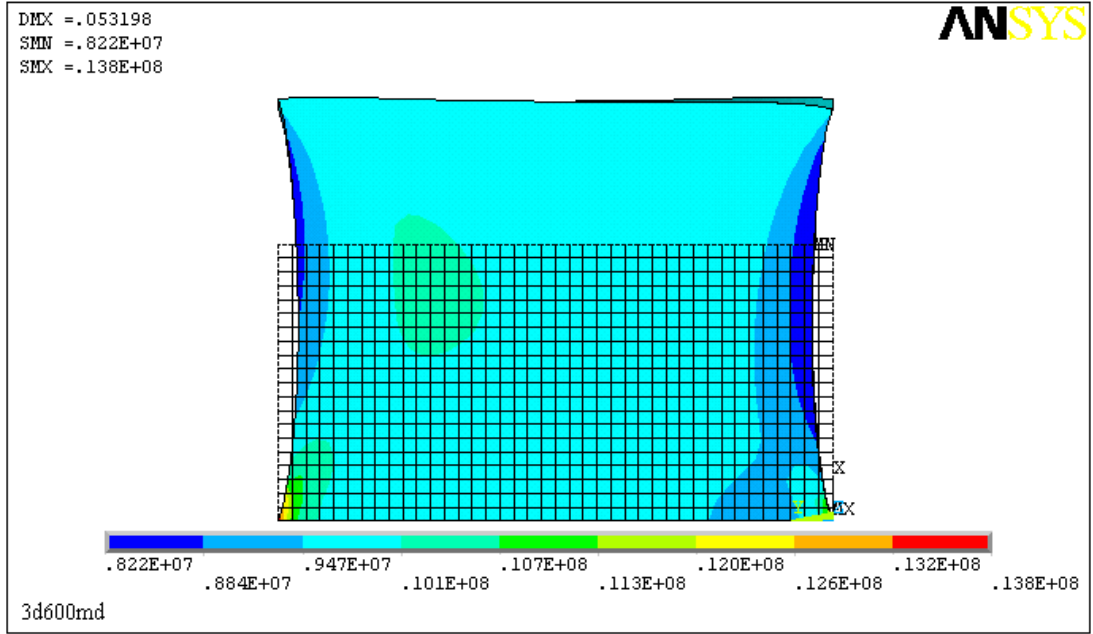
Şekil 3.72 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-300CD



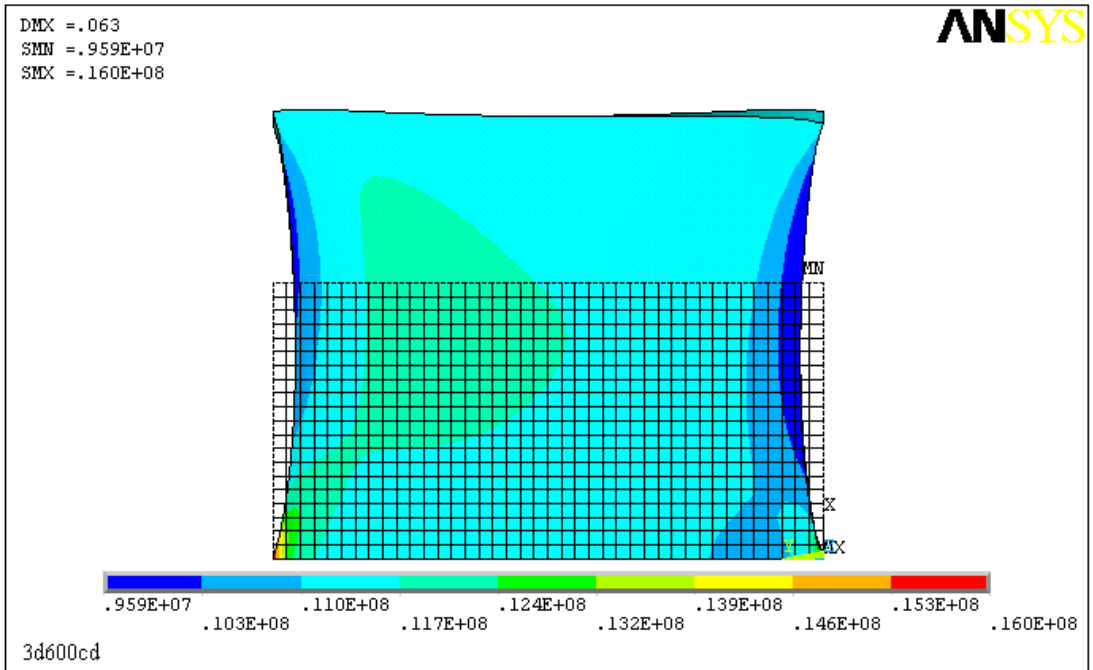
Şekil 3.73 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-400MD



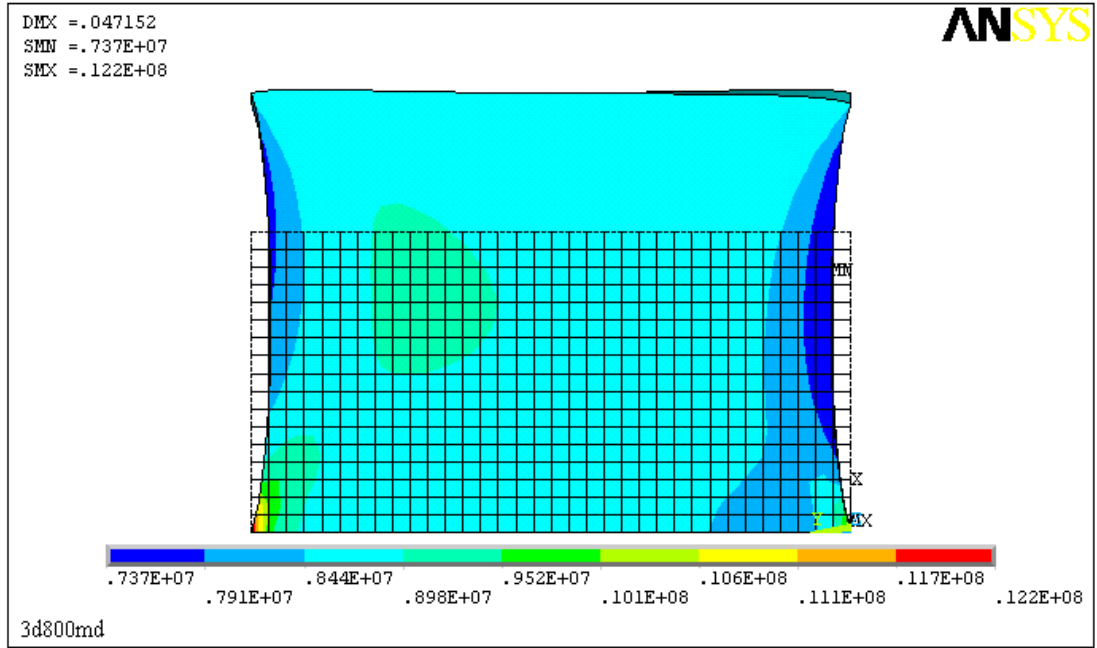
Şekil 3.74 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-400CD



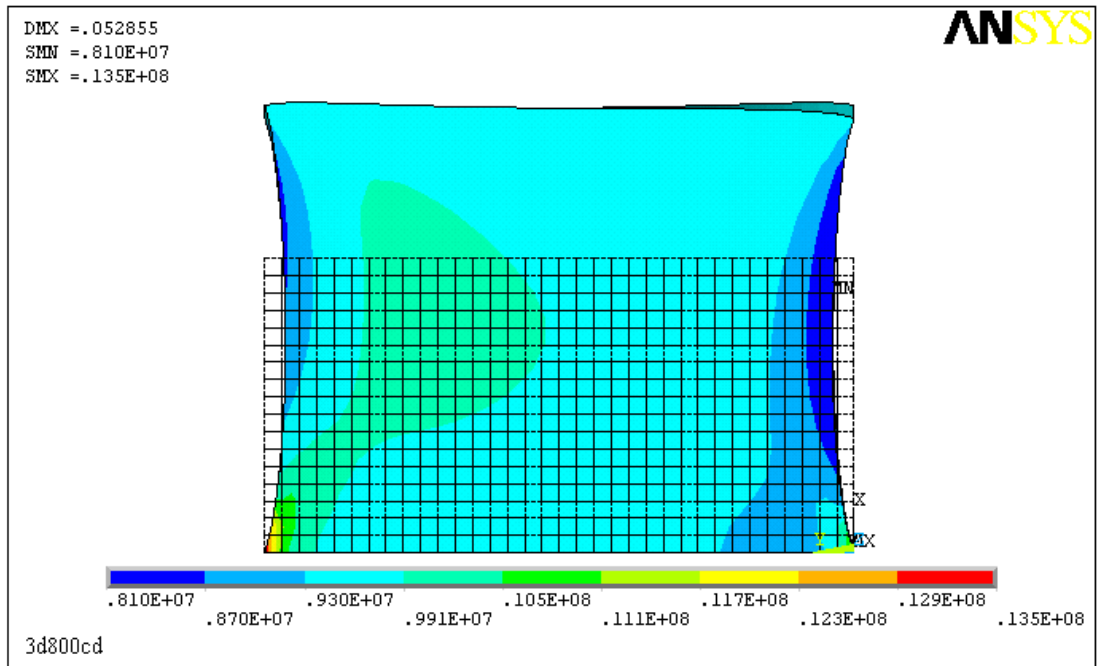
Şekil 3.75 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-600MD



Şekil 3.76 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-600CD



Şekil 3.77 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-800MD



Şekil 3.78 Referans kumaş yaklaşımı: Çekme doğrultusunda düğümlerdeki normal gerilme dağılımı 3D-800CD

3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için yukarıda verilen şekillerde referans kumaş yaklaşımına ait makina ve makina yönüne dik yöndeki gerilme analizi

sonuçları incelendiğinde, bu modellerde de farklı gerilme bölgeleri oluştuğu görülmektedir. Referans kumaş yaklaşımı ile yapılan önceki analiz sonuçlarına benzer şekilde maksimum ve minimum gerilmeler sınır koşullarına göre oluşmuştur. Bunun dışındaki kritik gerilme değerleri de yine kumaş orta noktası etrafında hesaplanmıştır. Şekil- 3.42, 3.45, 3.48, 3.51 ve 3.54’de verilen geniş enli çekme testi fotoğraflarında da görüldüğü gibi test sırasında kopuşlar genellikle orta nokta etrafında oluşmuştur. Modellerde çekme doğrultusunda orta noktaya yakın gerilme dağılımları incelendiğinde deneysel olarak elde edilen maksimum gerilmeye yakın değerler hesaplandığı görülmektedir. Kumaşlarda geniş enli çekme testi sırasında oluşan gerilme dağılımı model tarafından belirlenebilmiştir.

3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için de teorik gerilme analizleri sonucu elde edilen kumaş konfigürasyonları, çekme testleri sonucunda oluşan kumaş şekillerine benzemektedir. Modelde çenelerin tuttuğu kısımlarda çekme yönüne dik yönde herhangi bir yanal daralma oluşmazken, kumaş orta noktasına doğru daralmanın arttığı ve burada maksimum değerini aldığı görülmektedir. Referans kumaş yaklaşımında, tek lif yaklaşımına göre daha yüksek uzamaların hesaplanabilmesi, bu kumaşlarda da elde edilen kumaş konfigürasyonlarının çekme testi sonucu oluşan kumaş şekline daha uygun olmasını sağlamıştır. Her iki temel üretim yönünde yapılan teorik gerilme analizi sonucu elde edilen kumaş şekilleri geniş enli çekme deneyleri sırasında elde edilen görüntüler ile benzerdir.

3 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönündeki deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.23’de görülmektedir.

Tablo 3.23 Makina yönündeki deneysel veriler ve referans kumaş yaklaşımı teorik sonuçları

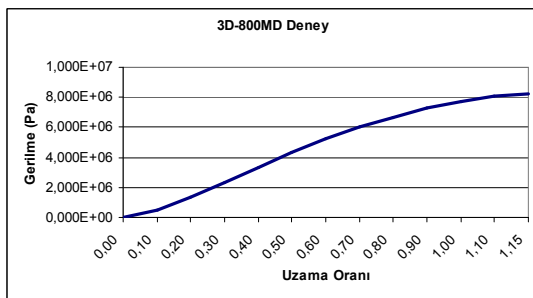
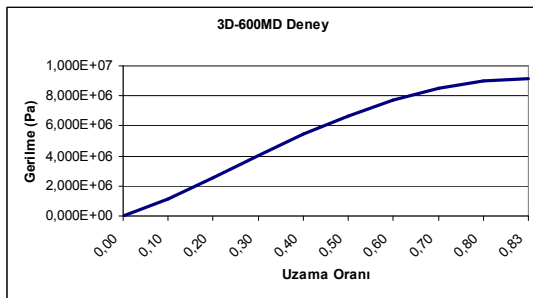
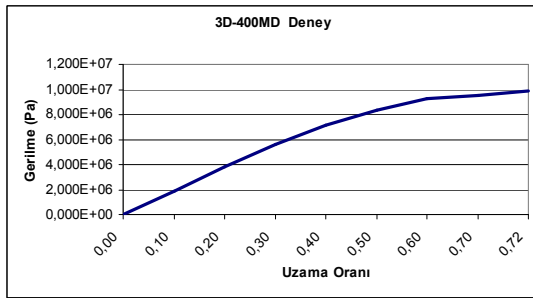
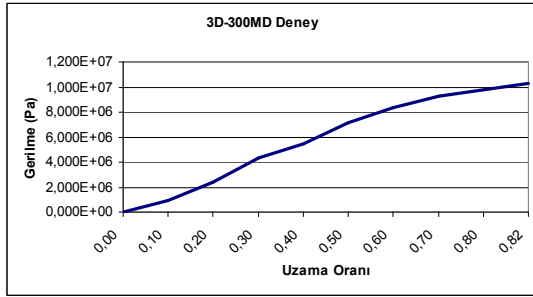
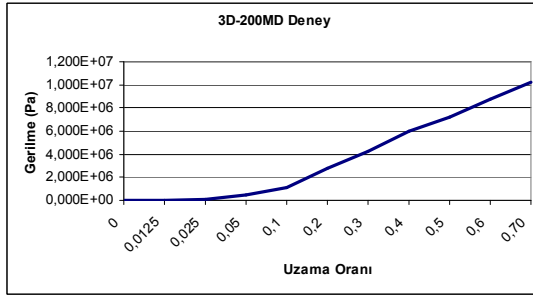
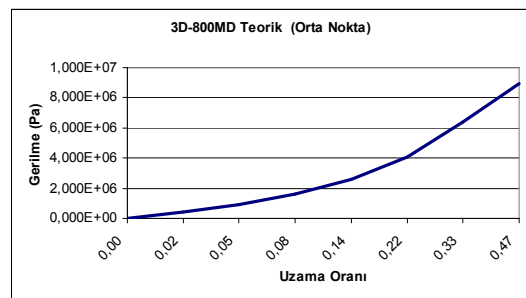
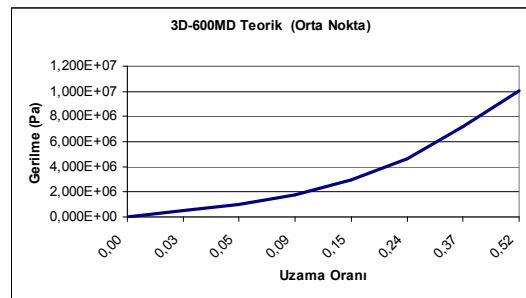
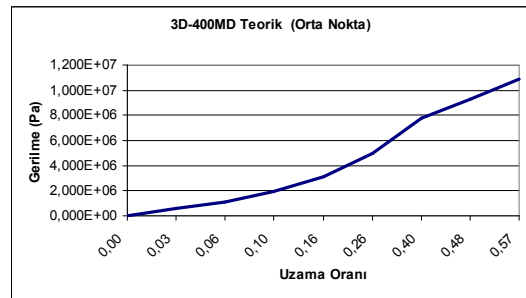
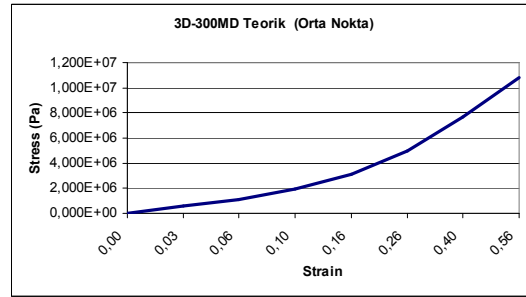
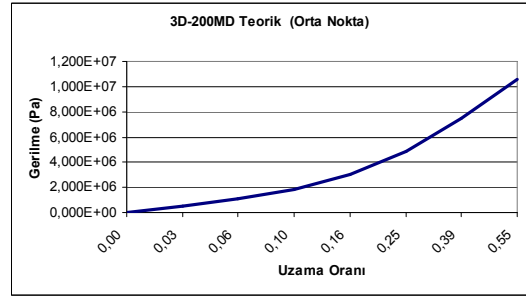
Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Orta Nokta Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
3D-200*	10,30E+06	69,92	10,50E+06	55,08	2,22	-21,22
3D-300	10,10E+06	82,27	10,70E+06	57,60	6,04	-29,99
3D-400	10,10E+06	72,05	10,50E+06	58,12	3,76	-19,33
3D-600	9,36E+06	83,33	10,00E+06	53,19	7,26	-36,17
3D-800	8,32E+06	115,14	8,95E+06	47,15	7,57	-59,05

*Referans Kumaş

3 denye liflerden üretilmiş kumaşlar için Tablo-3.23'de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, referans kumaş yaklaşımı ile model orta noktasında hesaplanan gerilme değerlerinin de geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %2,22 ile %7,57 arasında değişmektedir. Teorik analizlerde başlangıç verisi olarak kullanılan referans kumaşlarda, deneysel ve teorik gerilme değerleri arasındaki fark sadece %2,22'dir. Bununla birlikte kumaş gramajı attıkça bu fark artmakta ve en ağır jeotekstil numunesi için %7,57 olmaktadır.

Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise, teorik olarak hesaplanan değerlerin deney verilerinden düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte referans kumaş yaklaşımında, 3 denye kumaşlar için de uzama değerleri açısından tek lif yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Uzama değerleri model tarafından numune kumaşlar için %20 ile %60 arasında değişen sapma değerleri ile hesaplanabilmiştir. Referans kumaş yaklaşımında malzeme özelliklerini tanımlamakta kullanılan eğrinin yapısı geniş enli çekme testlerinde numune kumaşlar için elde edilen eğrilere benzediğinden teorik ve deneysel veriler arasındaki farklar azalmıştır. Öte yandan 3 denye kumaş yüzeylerine uygulanan ısı işlem referans kumaşlarda çekme testi başlangıcında oluşan aşırı uzamaları sınırlamıştır. Dolayısı ile 6 denye liflerinden üretilmiş ağır gramajlı kumaşlarda buna bağlı olarak oluşan yüksek teorik uzama değerleri, 3 denye liflerden üretilmiş kumaş çözümlerinde hesaplanmamıştır. 3 denye liflerden üretilmiş tüm kumaşlarda başlangıç uzamalarının yaklaşık olarak aynı olması teorik çözümlerinde elde edilen verilerin de benzer değerler almasına neden olmuştur.

Şekil-3.79'da makina yönündeki teorik analizler sonucu 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.

Deney Sonuçları-MD**Teorik Analiz Sonuçları-MD**

Şekil 3.79 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönünde deneysel ve teorik gerilme -uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil-3.79’da görüldüğü gibi, 3 denye liflerden üretilmiş kumaşlarda referans kumaş yaklaşımı sonucu orta noktada elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri de deneysel eğriler gibi nonlineerdir. Referans kumaş yaklaşımında gerilme ve uzama değerleri açısından tek lif yaklaşımına göre daha yüksek ve gerçek kumaşlara daha yaklaşık değerler elde edildiği eğrilerden de görülmektedir.

3 denye liflerden üretilmiş jeotekstil kumaşlar için makina yönüne dik yönde deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri Tablo-3.24’de görülmektedir.

Tablo-3.24 Makina yönüne dik yöndeki deneysel veriler ve referans kumaş yaklaşımı teorik sonuçları

Kumaş Kodu	DENEY		TEORİK		Gerilmelerdeki Fark %	Uzamalardaki Fark %
	Gerilme (Pa)	Uzama (mm)	Gerilmesi (Pa)	Uzama (mm)		
3D-200*	11,40E+06	76,99	11,60E+06	61,69	1,84	-19,87
3D-300	8,96E+06	90,89	9,67E+06	51,89	7,92	-42,91
3D-400	11,10E+06	96,78	12,00E+06	64,24	7,84	-33,63
3D-600	10,90E+06	110,80	11,70E+06	63,00	7,71	-43,14
3D-800	9,16E+06	118,60	9,90E+06	52,85	8,08	-55,44

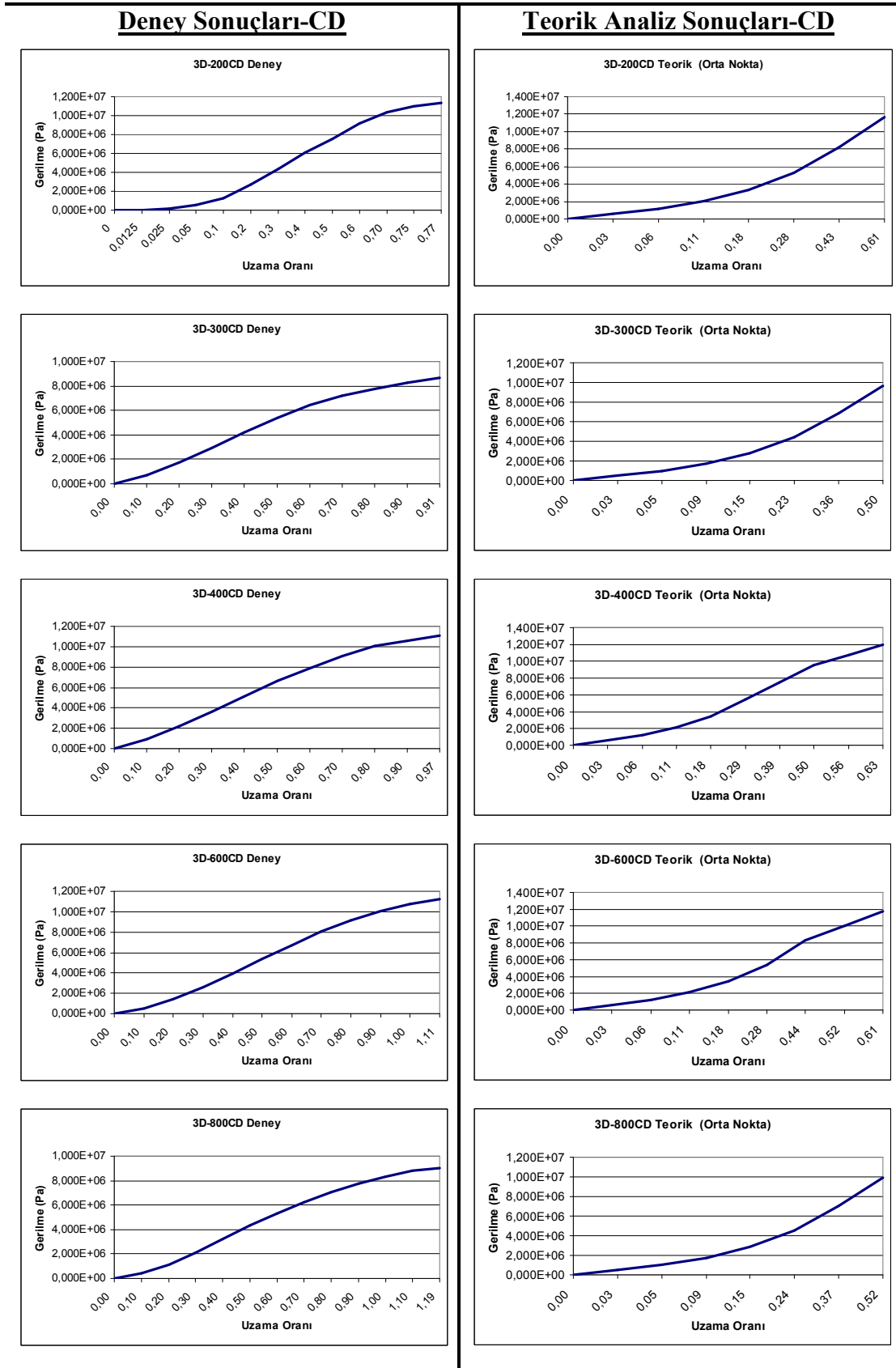
* Referans Kumaş

Tablo-3.24’de verilen gerilme değerleri incelendiğinde, makina yönüne dik yöndeki teorik analizlerde de model orta noktasında elde edilen çekme doğrultusundaki gerilme değerlerinin geniş enli çekme testlerinde ölçülen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark numune kumaşlar için %1,84 ile %8,08 arasında değişmektedir. Teorik analizlerde başlangıç verisi olarak kullanılan referans kumaşlarda deneysel ve teorik gerilme değerleri arasındaki fark sadece %1,84’dür. Bununla birlikte kumaş gramajı attıkça bu fark artmakta ve en ağır jeotekstil numunesi için % 8,08 olmaktadır.

Uzama değerleri açısından referans kumaş yaklaşımında, makina yönüne dik yönde de tek lif yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ancak teorik olarak hesaplanan uzamalar deneysel değerlerden düşüktür. Uzama

değerleri model tarafından numune kumaşlar için %20 ile %55 arasında değişen farklarda hesaplanabilmiştir.

Şekil-3.80'de makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucu 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların orta noktasında oluşan gerilme-uzama oranı davranışının, deneysel verilerden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileri ile kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 3.80 3denye liflerden üretilmiş kumaşlarda makina yönüne dik yönde deneysel ve teorik gerilme -uzama oranı eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil-3.80’de görüldüğü gibi makina yönüne dik yöndeki teorik analizler sonucu orta noktada elde edilen gerilme uzama oranı eğrileri de deneysel eğrilere benzer şekilde nonlineerdir. Gerilme ve uzama değerleri açısından tek lif yaklaşımına göre daha yüksek ve gerçek kumaşlara daha yaklaşık değerler elde edildiği makina yönüne dik yöndeki teorik eğrilere de görülmektedir.

3.4 Sonuçlar

Bu çalışmada, jeotekstil uygulamalarında en çok kullanılan kumaş tipi olan iğneleme ile birleştirilmiş dokusuz yüzey kumaşların mekanik özelliklerini önceden belirleyebilmek için teorik bir model oluşturulmuştur. Teorik modelin oluşturulması ve model parametreleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde tabakalı kompozit teorisi ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Teorik model çözümlerinde ise polipropilen lif özellikleri ve referans kumaş özelliklerine göre oluşturulan iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Çözümler mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar paket programı ANSYS’de gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler ve teorik analizlerde elde edilen tüm veri, şekil ve grafiklerin değerlendirilmesi ile elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Her iki teorik yaklaşım çözümlerinde, tüm kumaşlarda çekme doğrultusundaki düğümlerde iki temel üretim yönü için oluşan normal gerilme dağılımları incelendiğinde, model kumaşlar üzerinde farklı gerilme bölgeleri olduğu görülmüştür. Sınır koşulları nedeni ile maksimum gerilmeler çenelere yakın kısımlarda, minimum gerilmeler ise serbest kenarlarda hesaplanmıştır. Bunun dışındaki kritik gerilme değerleri, dokusuz yüzey kumaş numunelerinin geniş enli çekme testlerinde kopuşların ve gerilme yığılmalarının meydana geldiği kumaş orta noktası etrafında oluşmuştur. Modellerde serbest kenarlardan orta noktaya doğru gidildikçe gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür. Model orta noktası etrafındaki gerilme değerleri incelendiğinde ise deneysel olarak elde edilen gerilmelere yakın değerler hesaplandığı belirlenmiştir. Çözümlerde, çekme yönündeki gerilme dağılımlarının kumaş orta eksenine göre genellikle simetrik olmadığı görülmüştür.

Bu durum, kumaş içerisindeki tabakaların farklı açılarda yerleşmesinden kaynaklanmaktadır ve teorik olarak deney verilerine daha yakın uzama değerlerinin hesaplandığı referans kumaş yaklaşımında daha belirgindir. Sonuç olarak, numune kumaşlarda geniş enli çekme testi sırasında oluşan uniform olmayan gerilme dağılımı teorik yaklaşımlar tarafından doğru bir şekilde belirlenebilmiştir.

Teorik gerilme analizleri sonucu elde edilen kumaş şekilleri incelendiğinde, çenelerin tuttuğu kısımlarda çekme yönüne dik yönde herhangi bir yanal daralma oluşmazken, kumaş orta noktasına doğru daralmanın arttığı ve burada maksimum değerini aldığı görülmüştür. Bu durum geniş enli çekme testleri sonucunda kumaşlarda oluşan görünüme benzemektedir. Ancak tek lif yaklaşımında oluşan uzama ve daralmalar düşük olduğundan bu yaklaşımda elde edilen model şekilleri, çekme testleri sonucunda gerçek kumaşlarda oluşan görünümlere tam olarak benzememektedir.

Her iki yaklaşımında, tüm kumaşlar için çekme doğrultusunda hesaplanan gerilme değerlerinin deneysel ölçümler sonucu elde edilen gerilme değerleri ile genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte teorik yaklaşımlarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan eğrilerin yapısı farklı olduğundan kumaş gramajı arttıkça teorik ve deneysel gerilme değerleri arasındaki fark tek lif yaklaşımında azalmakta, referans kumaş yaklaşımında ise artmaktadır.

Kumaşların uzama özellikleri incelendiğinde ise tek lif yaklaşımı ve referans kumaş yaklaşımı için farklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Tek lif yaklaşımında tüm kumaşlar için çekme doğrultusunda hesaplanan uzama değerleri deneysel verilerden oldukça düşüktür. Bu durum dokusuz yüzey kumaşlarda geniş enli çekme testi başlangıcında lif yer değiştirmeleri nedeni ile oluşan uzamalardan ve malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan eğrinin yapısından kaynaklanmıştır. Tek lif yaklaşımında bu lif yer değiştirmelerinden kaynaklı uzamalar ve bu sırada oluşan lif-lif etkileşimleri değerlendirilememiştir. Öte yandan gerçek kumaşlarda, kumaş gramajındaki artış ile başlangıç uzamaları azalmaktadır. Dolayısı ile kumaş gramajı arttıkça teorik uzama sonuçları ile deney verileri arasındaki fark azalmaktadır. 3

denye liflerden üretilmiş kumaşlara uygulanan ısı işlem sonucu, yüzeydeki lifler arasında oluşan yeni bağlar bu tip kumaşlarda geniş enli çekme testi başlangıcında oluşan uzamaları kısmen sınırlamaktadır. Dolayısı ile tek lif yaklaşımında bu tip kumaşlarda uzama değerleri açısından teorik ve deneysel veriler arasındaki fark daha azdır. Ancak kumaş iç katmanlarındaki lif yer değiştirmeleri ve etkileşimlerinden kaynaklanan uzamalar hala etkin olduğundan uzama değerleri açısından elde edilen teorik veriler deney sonuçlarından düşüktür. Referans kumaş yaklaşımında ise çekme doğrultusunda hesaplanan uzama değerleri deneysel verilere kısmen daha yakındır. Referans kumaş yaklaşımında eleman ve malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan veriler geniş enli çekme testi başlangıcında oluşan uzamaları ve lif-lif etkileşimlerini dikkate almaktadır. Dolayısı ile teorik olarak hesaplanan uzama değerleri ile deney verileri arasında oluşan fark azalmıştır. Öte yandan 6 denye liflerden üretilen kumaşlar için kullanılan referans kumaşın başlangıç uzaması ağır gramajlı kumaşların başlangıç uzamasına göre daha yüksek olduğundan kumaş gramajı arttıkça teorik olarak hesaplanan uzama değerleri de artmıştır. 3 denye liflerden üretilmiş kumaşların teorik analizinde kullanılan referans kumaşlar, bu kumaşlarda ısı işlem nedeni ile yüzeyde oluşan bağlardan kaynaklı uzama değişimini de dikkate alabilmektedir. Dolayısı ile bu tip kumaşlar için de referans kumaş yaklaşımında tek lif yaklaşımına göre daha uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte kumaş gramajı arttıkça, kumaş iç katmanları arasındaki lif sayısı artmakta ve çekme testlerinde referans kumaştakine göre daha fazla yer değiştiren lif bulunmaktadır. Ancak kumaş gramajındaki artış ile uzamaları sınırlayan kumaş kalınlığı boyunca yönlenmiş lif sayısı da artmaktadır. Gerçek kumaşlarda zayıf bağlantı noktalarının olması ise teorik ve deneysel veriler arasındaki farkı etkileyen diğer bir faktördür.

Teorik analizde kumaş orta noktasına ait düğümlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri, deneysel olarak belirlenen gerilme şekil değiştirme eğrileri ile kıyaslandığında eğrilerin gerçek grafiklerdeki gibi nonlineer davranış sergilediği ve hesaplanan gerilme değerlerinin ölçülen gerilme değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Tek lif yaklaşımı ve referans kumaş yaklaşımında başlangıç verisi olarak kullanılan eğrilerin farklı olması teorik olarak hesaplanan gerilme-uzama

oranı eğrilerinde farklı uzama oranı değerleri oluşmasına neden olmuştur. Tek lif yaklaşımında uzama oranı açısından düşük değerler hesaplanırken, referans kumaş yaklaşımında deneysel verilere daha uygun değerler elde edilmiştir.

Sonuç olarak oluşturulan teorik yaklaşımlar; stapel liflerden iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların yük altındaki gerilme davranışlarını ve kumaş üzerindeki gerilme dağılımını yaklaşık olarak belirleyebilmektedirler. Ancak teorik yaklaşımlarda hesaplanan uzama değerleri ile deneylerde ölçülen uzama değerleri arasındaki fark fazladır. Araştırmamızda oluşturulan lif özellikleri esaslı yaklaşım, çekme testi başlangıcındaki lif etkileşimlerini ve yer değiştirmelerini dikkate alamadığından kumaşların uzama davranışlarının belirlenmesinde uygun veriler elde edilememiştir. Referans kumaş yaklaşımında ise bu mekanizmalar kısmen dikkate alınmış ve uzama değerleri açısından tek lif yaklaşımına göre numune kumaş değerlerine daha yaklaşık sonuçlar hesaplanmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan teorik model ile jeotekstillerin fonksiyonlarına göre gerekli mekanik davranışları hammadde ve ürün verileri ile önceden belirlenmeye çalışılmıştır. Jeotekstil uygulamalarında genellikle ağır gramajlı, kalın dokusuz yüzey kumaşlardan kullanılmaktadır. Bu tip kumaşların mekanik özelliklerinin testler ile belirlenmesi çoğunlukla zaman alıcı ve uzmanlık isteyen işlemler gerektirmektedir. Üreticilerin kullandıkları hammadde parametreleri ya da benzer kumaşlar ile daha önce yaptıkları testlere ait verilerden yararlanarak yeni ürünler geliştirmesi ve bu yeni ürün özellikleri hakkında tahminde bulunması sıkça kullanılan bir yöntemdir. Yaygın olarak kullanılan bu ürün geliştirme yöntemi, bu çalışmada dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlar için matematiksel ve fiziksel parametreler kullanılarak oluşturulan model ile ifade edilmiştir. Modelin, jeotekstil üretiminde kullanılacak hammadde ve ürün tipi seçimi kolaylaştırarak tasarım aşamasını kısaltacağı düşünülmektedir. Ayrıca model yardımı ile jeotekstillerin mekanik davranışı hakkında önceden fikir edinilmesi, jeotekstillerin kullanılacağı projelerde ürün seçimi sürecini de basitleştirecektir. Dolayısı ile tasarımcı ve uygulayıcıların zaman ve maliyet açısından yarar sağlayabilecekleri bu ve benzeri teorik çalışmalardan faydalanmaları uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adanur, S. (1995). *Wellington sears handbook of industrial textiles*. Lanchaster & Basel: Technomic Pub. Co. Inc.
- Adanur, S. ve Liao, T. (1999). Fiber arrangement characteristics and their effects on nonwoven tensile behavior. *Textile Research Journal*, 69(11), 816-824.
- Akay, L. (2005). *Kompozit boruların darbe yüklerine karşı davranışlarının incelenmesi*. Bitirme Projesi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü.
- Albrecht, W., Fuchs, H. ve Kittelman W. (Ed.). (2003). *Nonwoven fabrics raw materials, manufacture, applications, characteristics, testing processes*. Weinheim: Wiley-VCH Inc.
- ANSYS 8.0. Yardım Dosyaları.
- Backer, S. ve Peterson, D.R. (1960). Some principles of nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 30 (9), 704-711.
- Bais-Singh S. ve Goswami, B.C. (1995). Theoretical determination of the mechanical response of spun-bonded nonwovens. *Journal of Textile Institute*, 86 (2), 271-289.
- Bais-Singh, S., Rajesh, D.A. ve Goswami, B.C. (1996). Characterizing lateral contraction behavior of spunbonded nonwovens during uniaxial tensile deformation. *Textile Research Journal*; 66(3), 131-140.
- Bais-Singh S. ve Goswami B.C. (1998). Predicting the biaxial tensile deformation behavior of spunbonded nonwovens. *Textile Research Journal*, 68(3), 219-227.

- Bais-Singh, S., Biggers, S. ve Goswami B.C. (1998). Finite element modeling of the non-uniform deformation of the spun-bonded nonwovens. *Textile Research Journal*, 68(5), 327-342.
- Bergado, D.T., Youwai, C.N., Hai, P. ve Voottipruex, P. (2001) Interaction of nonwoven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 299-328.
- Bogdanovich, A. E. ve Pastore, C.M. (1996). *Mechanics of textile and laminated composites*. İngiltere: Chapman & Hall.
- Britton, P.N., Sampson, A.J. ve Gettys, W.E. (1983). Computer simulation of mechanical properties of nonwoven fabrics part I: Method. *Textile Research Journal*, 53(6), 363-368.
- Britton, P.N., Sampson, A.J. ve Gettys, W.E. (1984a). Computer simulation of mechanical properties of nonwoven fabrics part II: Bond breaking. *Textile Research Journal*, 54(1) 1-5.
- Britton, P.N., Sampson, A.J. ve Gettys W.E. (1984b). Computer simulation of mechanical properties of nonwoven fabrics part III: Fabric failure. *Textile Research Journal*, 54(7) 425-428.
- Chandrupatla, T.R. ve Belegundu, D.A. (2002). *Introduction to finite elements in engineering* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Chen, Z. (2005). *Finite element methods and their applications*. New York: Springer.
- Chou, T. ve Frank, K. (1989). *Textile structural composites*. New York: Elsevier.

Chris, B. (2000). Technical textiles market – an overview. Horrocks, A.R. ve Anand, S.C. (Ed.). *Handbook of technical textiles* içinde (1-23). Cambridge: Woodhead Publishing.

Civil engineering, (b.t). 11 Şubat 2008, [http:// www.fibertex.com / en-GB / business-areas / Geotextiles / Brochures / Documents / 03137101 _ Civil _ Engineering _GB_low_res.pdf](http://www.fibertex.com/en-GB/business-areas/Geotextiles/Brochures/Documents/03137101_Civil_Engineering_GB_low_res.pdf)

David Rigby Associates (2008). *Technical textiles and nonwovens: world market forecasts to 2010*. 28 Şubat 2008. [http:// www.davidrigbyassociates.co.uk / TTandN.pdf](http://www.davidrigbyassociates.co.uk/TTandN.pdf).

Denton, M. J. ve Daniels, P. N. (Ed.). (2002). *Textile terms and definitions* (11th ed.). Manchester: The Textile Institute.

Duran, K.(2004). *Dokusuz yüzeyler*. İstanbul: Teknik Fuarçılık Ltd. Şti.

Emek, A., (2004). *Teknik tekstiller dünya pazarı, Türkiye'nin üretim ve ihraç imkanları*. Uzmanlık Tezi. Ankara. T.C.Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi.

European Association for Textile Polyolefins (2008). *Industry data*. 11 Şubat 2008. http://www.eatp.org/industrydata_polytextiles.htm.

European Disposable and Nonwovens Association-EDANA (2008). *Nonwovens*. 11 Şubat 2008. <http://www.edana.org>.

Fried, J. R. (1995). *Polymer science and technology*. New Jersey: Prentice Hall.

Geosynthetic functions technical notes:1, (b.t). 17 Ekim 2006, [http:// www.geotextile.com / application.aspx?ID=2230](http://www.geotextile.com/application.aspx?ID=2230)

- Geosynthetic Materials Association (2002). *Handbook of geosynthetics*. 11 Şubat 2008. http://www.gmanow.com/pdf/GMAHandbook_v002.pdf.
- Gautier, K.B., Kocher, C.W. ve Drean, J.Y. (2007). Anisotropic mechanical behavior of nonwoven geotextiles stressed by uniaxial tension. *Textile Research Journal*, 77(1), 20-28.
- Gibson, R. F. (1994). *Principles of composite material mechanics*. ABD: McGraw-Hill, Inc.
- Gupta, V. P. (2000). Needling technology applied to geotextiles. *Asian Textile Journal*, October 81-87.
- Hall, D.M. (1982). *Practical fiber identification*. Auburn: Auburn University.
- Harmancıoğlu, M. (1981). *Tekstil maddeleri II: rejenere ve sentetik lifler*. İzmir: Ege Üniversitesi Matbaası.
- Hartmann, F. ve Katz, C. (2007). *Structural analysis with finite elements*. New York: Springer.
- Hearle, J.W.S ve Stevenson, P.J. (1963). Studies in nonwoven fabrics part III: The anisotropy of nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 33(10), 877-888.
- Hearle, J.W.S, ve Stevenson, P.J. (1964). Studies in nonwoven fabrics part IV: Prediction of tensile properties. *Textile Research Journal*, 34(3), 181-191.
- Hearle, J.W.S ve Newton, A. (1967). Nonwoven fabric studies part XIV: Derivation of generalized mechanics the energy method. *Textile Research Journal*. 37(9), 778-797.

- Hearle, J.W.S. ve Sultan, M.A.I. (1967). Study of needled fabrics, part I: Experimental method and properties - *Journal of Textile Institute*, 58, 251-265.
- Hearle, J.W.S. ve Newton, A. (1968). Nonwoven fabric studies part XV: The application of the fiber network theory. *Textile Research Journal*, 38(4), 343-351.
- Hearle, J.W.S. ve Sultan, M.A.I. (1968). A study of needled fabrics, part III: The influence of fiber type and dimensions. *Journal of Textile Institute*, 59, 137-147.
- Hearle, J.W.S. ve Husain, A. (1971). Studies in needled fabrics, part VIII: The effect of friction on the processing and properties of needle-bonded fabrics. *Journal of Textile Institute*, 62, 83-107.
- Hearle, J.W.S. ve Ozlansav, V. (1979). Studies of adhesive bonded nonwoven fabrics part I: A theoretical model of tensile response incorporating binder deformation. *Journal of Textile Institute*. 70, 19-28.
- Horrocks, A.R. ve Anand S.C. (Ed.). (2000). *Handbook of technical textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Hörschelmann, A. (2007). Agrotextiles, construction and geotextiles a grow market also for nonwovens. *Allgemeiner Vliesstoff-Report AVR*, 31-35.
- Ingold, T.S. ve Miller, K.S. (1988). *Geotextiles Handbook*. Londra: Thomas Telford.
- Jirsak, O., Lukas, D. ve Charvat, R. (1993). A two dimensional model of the mechanical properties of textiles. *Journal of Textile Institute*, 84(1), 1-15.
- Kaw, K. (1997). *Mechanics of composite materials*. New-York: CRC Press.
- Karian, H.G. (Ed.). (2003). *Handbook of polypropylene and polypropylene composites*. ABD: Marcel Dekker Inc.

- Kim, H.S., Poudeyhimi, B., Desai, P. ve Abhiraman, A. (2001). Anisotropy in the mechanical properties of thermally spot-bonded nonwovens: experimental observations. *Textile Research Journal*, 71(11), 965-976.
- Kim, H.S. (2004a). Orthotropic theory for the prediction of mechanical performance in thermally point-bonded nonwovens. *Fibers and Polymers*, 5(2), 139-144.
- Kim, H.S., (2004b). Relationship between fiber orientation distribution function and mechanical anisotropy of thermally point-bonded nonwovens. *Fibers and Polymers*, 5(3), 177-181.
- Koch, P. A. (2000). Polypropylene fiber table second issue, *Chemical Fibers International*, 50, 233-253.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (5th ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Koerner, R.M. ve Hsuan, Y.G. (2001). Geosynthetics: charecteristing and testing. Rowe, R.K. (Ed.). *Geotechnical and Geoenviromental Engineering Handbook* içinde (173-194). Berlin: Springer.
- Koslowski, H.J. (Ed.). (2007). *Man-Made fiber year book*. Almanya: Chemical Fibers International.
- Leclerco, B. (1993). Geotextiles. Brunsschweiler, D. ve Hearle, J.W.S. (Ed.). *Polyester 50 years of achievement* içinde (254-257). Manchester: The Textile Institute.
- Liao, T., Adanur, S. ve Drean, J.Y. (1997). Predicting the mechanical properties of nonwoven geotextiles with the finite element method. *Textile Research Journal*, 67(10), 753-760.

- Liao, T. ve Adanur, S. (1999). Computerized failure analysis of nonwoven fabrics based on fiber failure criterion. *Textile Research Journal*, 69(7) 489-496.
- Lieberenz, K. (2003). Geononwovens. Albrecht, W., Fuchs, H. ve Kittelman W. (Ed.) *Nonwoven fabrics raw materials, manufacture, applications, characteristics, testing processes* içinde (576-586). Weinheim: Wiley-VCH Inc.
- Limen, S. ve Warner, S.B. (2005). Adhesive point bonded spunbond fabrics. *Textile Research Journal*, 75(1), 62-72.
- Lin, J.H., Xu, Z.H. ve Lei C.H. (2003). Effect of fiber arrangement on the mechanical properties of thermally bonded nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 73(10) 917-920.
- Massenaux, G. (2003). Introduction to nonwovens. Albrecht, W., Fuchs, H. ve Kittelman W. (Ed.) *Nonwoven fabrics raw materials, manufacture, applications, characteristics, testing processes* içinde (1-11). Weinheim: Wiley-VCH Inc.
- Moaveni, S. (2007). *Finite element analysis theory and application with ANSYS* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Natta, G. (1954). İtalian Patent, 53512.
- Oden, T. (1987). Some historic comments on finite elements. *Proceedings of the ACM conference on history of scientific and numeric computation*, 125-130.
- Önder, E. (1995). *Tekstil mekaniği II dokunmuş kumaş geometrisi ve mekaniği*. İstanbul: İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi.
- Parys, V.M. (1998). PP fiber engineering: latest developments. *Chemical Fibers International*, 12-19.

- Polymer science learning center*, (b.t). 11 Şubat 2008, <http://pslc.ws/macrogcss/crystal.html>.
- Pourdeyhimi, B. ve Ramanathan R. (1996a). Measuring fiber orientation in nonwovens part I: Simulation. *Textile Research Journal*, 66(11), 713-722.
- Pourdeyhimi, B., Ramanathan, R. ve Dent, R. (1996b). Measuring fiber orientation in nonwovens: part II: Direct tracking. *Textile Research Journal*, 66(12), 747-753.
- Pourdeyhimi, B., Dent, R. ve Davis, H. (1997a). Measuring fiber orientation in nonwovens part III: Fourier transform. *Textile Research Journal*, 67(2), 143-51.
- Pourdeyhimi, B. ve Dent, R. (1997b). Measuring fiber orientation in nonwovens. part IV: Flow field analysis. *Textile Research Journal*, 1997, 67(3), 181-190
- Pourdeyhimi, B., Dent, R., Jerbi, A., Tanaka, S. ve Deshpande, A. (1999). Measuring fiber orientation in nonwovens part V: Real webs. *Textile Research Journal*, 69(3), 185-192.
- Pourdeyhimi, B. (2005). Fiber orientation distribution in heavy nonwovens. *NCRC Newsletter*, 7.
- Rankilor, P. R. (2000). Textile in civil engineering Part-1 geotextiles. Horrocks, A.R. ve Anand S.C. (Ed.). *Handbook of technical textiles* içinde (358-371). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Rao, S.S. (2004). *The finite element method in engineering*. İngiltere: Butterworth-Heinemann.
- Rawal, A. ve Anandjivala, R. (2006). Relationship between process parameters and properties of multifunctional needlepunched geotextiles. *Journal of Industrial Textiles*, 35(4) 271-285.

- Rawal, A., Lomov, S., Ngo, T., Verpoest, I. ve Vankerrebrouck, J. (2007). Mechanical behaviour of thru-air bonded nonwoven structures. *Textile Research Journal*, 77(6) 417-431.
- Rilem, (Ed.). (1988). *Durability of geotextiles*. England: Routledge
- Rodriguez, F. (1987). *Principles of polymer systems*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- Taşcan, M. ve Demir, A. (1999). Polipropilen BCF hali ipliği üretim teknolojisi ve özellikleri. *I. Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi*. Adana: Çukurova Üniversitesi.
- Tensile tests for geotextiles technical note no. 19*, (b.t). 17 Ekim 2006, [http://www.geotextile.com / application.aspx?ID=2230](http://www.geotextile.com/application.aspx?ID=2230)
- Troughton, M. (Ed.). (2008). *Handbook of plastics joining: A practical guide* (2nd ed.). Newyork: Plastics Design Library.
- Typar SF. technical handbook*, (b.t). 5 Mart 2008, [http://www2.dupont.com /Typar /en_US /assets/downloads/technical_handbook/introduction.pdf](http://www2.dupont.com/Typar/en_US/assets/downloads/technical_handbook/introduction.pdf).
- Typar geotextiles*, (b.t). 5 Mart 2008, <http://www.typargeotextiles.com/Typar-Geo-bro.pdf>.
- TSE EN ISO 10319. (1998). *Jeotekstil malzemeler–Genişlik doğrultusunda gerilme mukavemeti deneyi*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- TSE 2874 EN ISO 1973. (1998). *Tekstil lifleri-Doğrusal yoğunluk tayini- gravimetrik metod ve vibroskop metodu*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- TSE EN 918. (2000). *Jeotekstillere ve jeotekstillere ile ilgili mamüller-Dinamik delinme deneyi (konik delici düşürme deneyi)*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.

- TS EN ISO 5079. (2003). *Tekstil lifleri-Tek liflerin kopma noktasındaki kopma mukavemeti ve uzama oranı tayini*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- TSE 715 ISO 6989. (2003). *Tekstil lifleri-Kesikli liflerin uzunluğunun ve uzunluk dağılımının tayini (tek liflerin ölçülmesi ile)*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- TS EN ISO 9864. (2006). *Jeosentetikler-Deney metotları-Jeotekstil ve jeotekstiller ile mamullerde birim alan kütesinin tayini*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- TS EN ISO 9863-1. (2006). *Jeosentetikler-Belirtilen basınçlarda kalınlık tayini*. Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.
- Sadıkoglu, T.G. (2003). Jeotekstilleri Türkiye’de nasıl bir gelecek bekliyor. *Uluslararası Nonwoven-Teknik Tekstil Teknoloji Dergisi*, 3,18-21.
- Saville, B.P. (2000). *Physical testing of textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Shukla, S. (Ed.). (2003). *Geosynthetics and their applications*. London: Thomas Telford Services Ltd.
- Ulçay, Y. ve Altun, Ş. (1997). Polipropilen üretimi. *Tekstil Maraton*, 2, 27-31.
- Usta, İ., Akalin, M. ve Özen, M.S. (2004). Nonwoven (dokusuz yüzeyler) ve lifler. *Tekstil Maraton*, 1, 18-
- Van Zanten, R.V. (Ed.). (1986). *Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. Newyork/Toronto: John Wiley & Sons.
- Zhu, M.F. ve Yang, H.H. (2006). Polypropylene fibers. Lewin, M., (Ed.) *Handbook of fiber chemistry (3rd ed.)* içinde (139-261). Newyork: CRC Press.