



# DOKUSUZ YÜZEY JEOTEKSTİLLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİNDE LİF ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ

Ümit Halis Erdoğan, Nilüfer Erdem  
Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Tekstil Müh. Böl.

## ÖZET

Dokusuz yüzey jeotekstillerin mekanik davranışlarının hammadde ve ürün özellikleri üzerinden tahminlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada öncelikle jeotekstil numunelerinde kullanılan polipropilen liflerinin ve dokusuz yüzey kumaşların özellikleri standart test metodlarıyla analiz edilmiştir. Daha sonra kumaşlar için tabakalı kompozit yapılarıdaki benzer teorik bir yaklaşım yapılmış ve geniş enli çekme testini dikkate alan uygun bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Deneysel veriler ve oluşturulan model yaklaşımı kullanılarak bir sonlu elemanlar metodu paket program ile kumaşlarda gerilme analizleri yapılmıştır. Teorik ve deneysel bulguların karşılaştırılması sonucu, modelin kumaşlarda çekme testinde oluşan gerilme değerleri ve dağılımları açısından uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** jeotekstiller, sonlu elemanlar metodu, polipropilen lifleri

## EFFECTS OF FIBER PROPERTIES ON MODELING THE MECHANICAL BEHAVIOURS OF NONWOVEN GEOTEXTILES

### ABSTRACT

In this paper, it is aimed to predict the mechanical behaviour of nonwoven geotextiles using raw material and fabric properties. At first polypropylene fiber and nonwoven fabric properties of geotextile specimens were analyzed with standard test methods. Then a theoretical model, which considers wide-width tensile test of nonwoven fabrics, was constructed based on composite layer theory and finite element method. Stress analyses of fabrics were performed with a finite element computer program using experimental data and constructed model. The comparison of theoretical and experimental calculations indicates that compatible results were predicted in terms of stress values and stress distribution of fabrics in uniaxial tensile test.

**Key Words:** geotextiles, finite element method, polypropylene fibers.



## 1. GİRİŞ

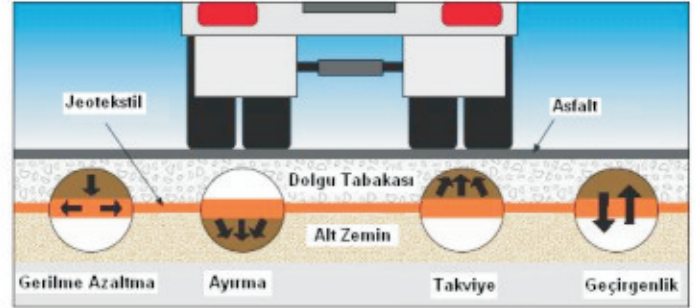
Bilim ve teknolojiadaki gelişmelere bağlı olarak tekstil yapıları için geleneksel uygulama ve kullanım alanlarının dışında farklı alternatifler ortaya çıkmıştır. Çok çeşitli ve geniş olan bu yeni kullanım alanları inşaat, otomotiv, savunma, spor, tıp, elektronik, denizcilik ve benzeri sektörlerde birçok teknik uygulamayı içermektedir. Bu ve benzeri amaçlar için kullanılan tekstil yapıları maddeler teknik tekstiller olarak adlandırılmaktadırlar. Bu malzemeler içerisinde jeosentetiklerin bir alt grubu olan jeotekstiller sahip oldukları birçok avantaj ile inşaat sahaları ve tarım alanları gibi kompleks uygulama alanlarında giderek daha fazla önem kazanmaktadırlar. "Jeotekstil" yeryüzü-toprak anlamına gelen jeo- kelimesi ile tekstil kelimelerinin birleşiminden meydana gelmiş bir terimdir. Jeotekstiller genel olarak polimer maddelerden oluşmuş geçirgen tekstil yapıları olarak tanımlanırlar ve çeşitli mühendislik uygulamalarında toprak, kaya ve/veya su ile etkileşimli olarak kullanılırlar (Ingold,1988-Adanur,1995). Jeotekstillerin uygulama yerlerindeki zemin özelliklerini geliştirme amaçlı birçok farklı alandaki kullanımları Tablo-1'de özetlenmiştir (Van Zaten,1986-Koerner,1986).

Tablo-1 Jeotekstillerin Kullanım Alanları

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

Jeotekstilin, Zemin/Jeotekstil yapısı içerisinde kullanım amacına fonksiyonu denir. Tablo-1'de görülen uygulama alanlarında kullanılan jeotekstillerin ayırma, takviye, koruma, filtrasyon, drenaj ve yalıtım gibi birçok mekanik ve hidrolik fonksiyonu yerine getirmesi gerekir (Ingold,1988). 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 tali fonksiyonlar

olarak değerlendirilir. 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).



Şekil-1 Jeotekstillerin Uygulama Alanında Sağladığı Farklı Fonksiyonlar

(<http://www.typargeotextiles.com/Typar-Geo-bro.pdf>)

Şekil-1 de görüldüğü gibi jeotekstil uygulaması sayesinde yapı üzerine gelen gerilmeler azaltılmaktadır. Böylece üst yüzeyde bulunan asfalt ya da beton tabakasının çatlaması/ kırılması ve dolgu malzemesinin alt zeminle karışmasını önlenerek yapının kullanım ömrü uzatılmış olur. Jeotekstil uygulaması sonucu oluşan yapılar çoğunlukla mekanik olarak stabilize edilmiş zeminler olarak ifade edilmektedir ve bu tip uygulamalar günümüzde hızla artmaktadır (Anonim,2002). Bu nedenle jeotekstillerin uygulama alanlarında kullanım özelliklerinin çeşitli test yöntemleri ve sayısal çözümlerle önceden tahminlenmesi ve buna göre ürün seçimi yapılması kullanım amacı ve fonksiyonu açısından önemli hale gelmiştir. Bu seçimi etkileyen en önemli faktörler ise kullanılan hammadde ve üretim teknikleridir.

Jeotekstil kumaşlar dokuma, örme ve dokusuz yüzeyler gibi klasik kumaş üretim teknikleri ile üretilirler. Günümüzde kullanılan jeotekstillerin yaklaşık %70-80'i dokusuz yüzeyler, %10-15'i dokuma kumaşlar ve %5-10'u örme kumaşlardan oluşmaktadır (Albrecht,2003). Dokusuz yüzey kumaşlar arasında ise jeotekstil uygulamalarında en çok tercih edilen kumaşlar nispeten daha kalın olmaları ve mekanik davranışları nedeni ile iğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzey kumaşlardır (Ingold,1988-Albrecht, 2003). Zemin/Jeotekstil yapısı içerisinde kullanılan kumaşların fiziksel ve kimyasal özellikleri ile mekanik davranışları uygulamalarda ve hesaplamalarda bilinmesi gereken önemli parametrelerdir.



Kumaş özelliklerini belirleyen ana faktörler ise kumaşı oluşturan polimer madde, lif ve iplik çeşidi ile kumaşın yapısıdır. Jeotekstillerin üretiminde genellikle kimyasal lifler kullanılmaktadır. Nadiren de olsa bazı uygulamalarda doğal bir lif olan jüt kullanılmaktadır. Jeotekstil uygulamalarında en fazla kullanılan kimyasal lifler sırası ile polipropilen ve poliesterdir. Üretiminde kullanılan lif tipleri ise kumaş çeşidine göre stapel, monofilament, multifilament, bikomponent veya film şeklinde olabilmektedir (Adanur,1995-Koerner,1986).

Jeotekstil uygulamalarında en fazla tercih edilen dokusuz yüzejeoteksiller “Düzenli veya düzensiz bir lif oryantasyonu ile elde edilen lif tülbentlerinin sürtünme, kohezyon ve/veya adezyon yolu ile sabitleştirilmesi suretiyle elde edilen tekstil yüzeyleri” şeklinde tanımlanmaktadır (Albrecht,2003-Duran,2004). Dokusuz yüzejeoteksiller tülbent birleştirme işleminin yapıldığı makinelerdeki işlem akış yönü (makine yönü) ve buna dik yön olmak üzere iki temel kumaş yönünde farklı özelliklere sahiptirler. İğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzejeoteksiller, tülbent içerisindeki lifleri yeniden yönlendiren, karıştıran ve birbirine bağlayan çentikli iğnelerin mekanik hareketi ile oluşturulan kumaşlardır. Bu yöntemle elde edilen kumaşlar keçe görünümündedir ve kalın kumaşlardır (Raval,2006). Dokusuz yüzejeoteksillerin karakterleri lif özellikleri (polimer tipi, lif inceliği, mukavemeti, liflerin oryantasyonu vb.) ve üretim parametrelerine (tülbent birleştirme şekli, kumaş kalınlığı, gramajı vb.) bağlıdır. Dolayısı ile dokusuz yüzejeoteksillerin deformasyonu sırasında kopma, uzama, kayma, sürtünme, eğilme, burkulma gibi birçok mekanizma oluşur. Bu mekanizmaların birbirleri ile etkileşimi sonucu kumaşların mekanik olarak karakterize edilmesi daha da zorlaşmaktadır. Bununla birlikte dokusuz yüzejeoteksillerin çeşitli yükler altındaki mekanik davranışları araştırmacılar için her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur. Çok sayıda araştırmacı dokusuz yüzejeoteksillerin davranışlarını inceleyerek hammadde özellikleri üzerinden nihai ürünün kullanımındaki özelliklerini tahmin etmek için çeşitli teorik yaklaşımlar geliştirmişlerdir.

Dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik özelliklerinin matematiksel olarak modellenmesi ve mekanik davranışının önceden tahminlenmesine yönelik ilk çalışmalar 1960’lı yıllarda gerçekleşmiştir. Bu konunun temellerini oluşturan ilk çalışmada Backer ve Peterson (1960) lif gerilme özellikleri ile liflerin oryantasyon

dağılımlarını kullanarak ve kumaş bağlantı noktaları arasındaki liflerin düz bir şekilde yerleştiği varsayımından yararlanarak bir lif ağı teorisi geliştirmişlerdir. Hearle ve arkadaşları (1963, 1964, 1967, 1968, 1979) yaptıkları bir dizi çalışmada Backer ve Peterson tarafından geliştirilen teoriyi enerji metodunu, lif kıvrımının etkisini, bağlanma noktası deformasyonunu da dikkate alarak geliştirmişler ve kumaş mekanik özelliklerini etkileyen diğer parametreleri değerlendirmişlerdir. Zaman içerisinde görüntüleme tekniklerinin ilerlemesine bağlı olarak çalışmalar deformasyonun mekanizmasının ve lif oryantasyon dağılımının bu tekniklerle belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Pourdeyhimi ve arkadaşları (1996, 1997, 1999) yaptıkları çalışmalarda dokusuz yüzejeoteksillerde lif oryantasyonunu karakterize etmek için farklı görüntü analizi tekniklerini kullanmışlardır. Optik tarama ve görüntü analizi metodlarını karşılaştıran araştırmacılar özel olarak üretilmiş gerçek kumaşları da dikkate alan değerlendirmeler yapmışlardır. Öte yandan bilgisayar sistemleri ile modelleme ve simülasyon tekniklerinin gelişmesine paralel olarak dokusuz yüzejeoteksillerin davranışlarını tanımlamak için oluşturulan bilgisayar yazılımlarının sayısında da zamanla artış olmuştur. Yazılımlar genellikle geçmişte oluşturulan teorik altyapıyı kullanmışlardır. Brinton ve arkadaşları (1983, 1984) dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik özelliklerini tahminlemek için kumaşın temel mikroskobik görüntüsünü tanımlayan bilgisayar simülasyon tekniklerinin kullanılabilmesini göstermişlerdir. Ancak modellerinde gerçek kumaş yapısı ile çalışmamışlar sadece matematiksel olarak türetilen veriler üzerinden tahminlemelerini gerçekleştirmişlerdir. Bais-Singh ve arkadaşları (1995, 1996, 1998) spun-bond dokusuz yüzejeoteksillerde yaptıkları çalışmalarda, kumaşlarda tek eksenli çekme deneylerinde oluşan gerilme-uzama oranı bölgelerinin uniform olmadığını göstermek için analitik ve deneysel yöntemler kullanmışlardır. Bu durumu simüle etmek için kompozit teorisi ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir formülasyon geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda buldukları verileri gerçek kumaşlardan elde ettikleri verilerle kıyaslayarak materyal nonlineerliğini etkileyen hususları ve modelin uygunluğunu incelemişlerdir. Araştırmacılar spun-bond kumaşların iki eksenli çekme deneyini sonrası deformasyonu tahminlemek için de benzer yöntemi kullanmışlardır (Bais-Singh,1998). Liao ve Adanur (1997, 1999) benzer çalışmalarında spun-bond dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik davranışlarının belirlemek için lif



mukavemet verileri ve oryantasyon açılarından yararlanarak tabakalı kompozit teorisine dayanan bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Kim (2004), ısı bağlama tekniği ile üretilmiş dokusuz yüzejeoteksillerin özelliklerini tahminleyebilmek için ortotropik simetri teorisini farklı açılarda kullanarak değerlendirmeler yapmıştır. Dokusuz yüzejeoteksiller için oluşturulan teorik matrislerdeki sabitleri bulmak için çalışmada polinomial regresyon analizini kullanan araştırmacı kumaşların düzlem gerilme durumunda tahminlenen kumaş sabitlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Limen ve Warner (2005) ise çalışmalarında kimyasal bağlama yöntemi ile üretilen dokusuz yüzejeoteksillerin gerilme özelliklerini tahminleyebilmek için lif, kimyasal ve tülbent özelliklerini dikkate alan kafes sistemi esaslı bir modeli sonlu elemanlar yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır. Gutier ve Arkadaşları (2007) dokusuz yüzejeoteksillerin tek eksenli gerilme altındaki davranışlarını ele aldıkları çalışmalarında kumaşın termo-mekanik özelliklerini incelemiştir. Kumaşlarda tek eksenli gerilme testinde gerilme ve uzama oranının yanında üçüncü bir parametre olarak örnek yüzejeoteksillerdeki sıcaklıkları da ölçmüşlerdir. Böylece lif ve filamentlerin sürtünme özelliklerini de gözlemleyerek kumaş deformasyonu sırasında meydana gelen anisotropik mekanik davranış çeşitli dokusuz yüzejeoteksiller için tanımlamaya çalışmışlardır.

Dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik davranışlarını tahminleyebilmek için önceki çalışmalarda da kullanılan sonlu elemanlar metodu karmaşık bir yapının küçük ve analiz edilebilir parçalara (sonlu eleman) ayrılması fikrini temel almaktadır. Elemanlar birbirlerine zincirleme ve sonlu sayıda olacak şekilde düğümlerle bağlantılıdır. Bu küçük yapıların davranışlarının incelenmesi ve bunların tüm yapıyı temsil edecek şekilde matematiksel ve fiziksel yöntemlerle birleştirilmesi sonlu elemanlar metodunun esasını oluşturur. Metod yapısal ya da yapısal olmayan sistemlerin bilgisayarda simülasyonuna dayanması nedeniyle uygulama alanının çeşitliliği bilgisayar sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak hızla artmıştır. Bu gelişme aynı zamanda günümüzde birçok alanda sıkça kullanılan sonlu elemanlar paket yazılımların da artmasını sağlamıştır.

Yapılan önceki araştırmalar dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik davranışlarının, kumaşı oluşturan liflerin özellikleri ve liflerin kumaş içindeki yerleşimleri

dikkate alınarak çeşitli teorik yöntemler ile önceden belirlenebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzejeoteksillerin mekanik davranışları tahminlenmeye çalışılmıştır. Önceki çalışmalarda ele alınan dokusuz yüzejeoteksillerde daha kalın ve karmaşık bir yapıya sahip olan iğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzejeoteksiller için tabakalı kompozit teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrıntıları aşağıdaki bölümlerde açıklanan teorik bir model oluşturulmuştur. Böylece hammadde ve ürün özelliklerinden hareketle jeoteksillerin mekanik davranışlarının önceden belirlenmesine yardımcı olacak bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Materyal

Çalışmada materyal olarak iğneleme yöntemi ile üretilmiş %100 polipropilen (PP) dokusuz yüzejeoteksiller kullanılmıştır. 100gr/m<sup>2</sup>, 200gr/m<sup>2</sup>, 300gr/m<sup>2</sup>, 500gr/m<sup>2</sup> ve 800gr/m<sup>2</sup> olmak üzere 5 farklı gramajda temin edilen jeoteksillerin üretim yöntemi Şekil-2'de şematik olarak gösterilmiştir. Kumaşların tamamı 6 deneye incelendiğinde 60mm uzunluğunda stapel polipropilen liflerinden üretilmiştir.



Şekil-2 Dokusuz Yüzejeoteksillerin Üretim Şeması

### 2.2. Metod

Çalışmada öncelikle dokusuz yüzejeoteksillerin çeşitli lif ve kumaş parametreleri standart test yöntemleri kullanılarak belirlenmiş, daha sonra kumaşların mekanik özelliklerini önceden tahminleyebilmek için bu parametrelere bağlı bir model geliştirilmiştir. Bu amaçla kumaşlar için önceki çalışmalardan da yararlanılarak tabakalı kompozit yapılarındakine benzer teorik bir yaklaşım yapılmış ve geniş enli çekme testini dikkate alan uygun sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Teorik modelde kullanılacak malzeme sabitleri belirlenirken kumaşı oluşturan liflerin özellikleri dikkate alınmıştır. 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, tüm



kumaşlarda hem makine yönünde hem de makine yönüne dik yönde gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Modelden elde edilen teorik veriler ile deney sonuçları karşılaştırılarak sonuçların birbiri ile uyumluluğu değerlendirilmiştir.

### 2.2.1. Deneysel Çalışmalar

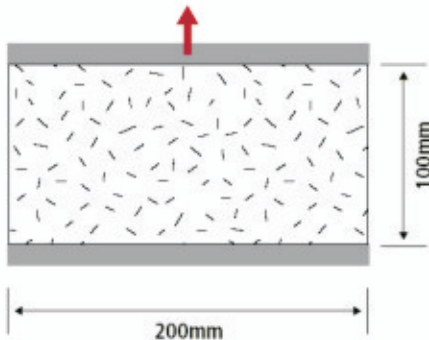
Sonuçların değerlendirilmesinde ve teorik analizlerde başlangıç verisi olarak kullanılacak lif ve kumaş parametrelerini elde etmek için numunelerinde aşağıda açıklanan ölçümler gerçekleştirilmiştir.

#### -Lif Mukavemet Ölçümleri

Kumaşları oluşturan polipropilen liflerin mukavemetleri TS EN ISO 5079'e göre çok amaçlı mukavemet ölçer Instron 4411 aletinde belirlenmiştir. Toplamda 100 adet lif test edilerek liflere ait yük-uzama eğrileri elde edilmiş, yük uzama eğrileri verilerinden lifler için ortalama gerilme-uzama oranı eğrisi saptanmıştır. Testler 1kgf'lük "load cell" kullanılarak 20mm ölçüm aralığında gerçekleştirilmiştir.

#### -Kumaş Kalınlık ve Mukavemet Ölçümleri

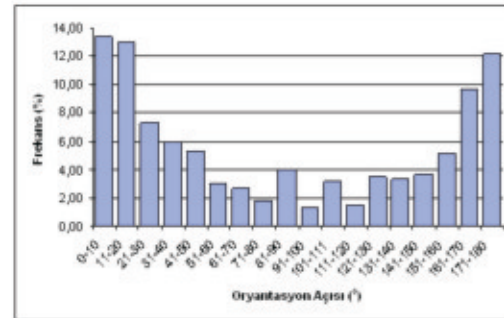
Kumaşların kalınlık ölçümleri TS EN ISO 9863-1'e göre dijital kalınlık ölçüm aletinde deney numuneleri üzerine 2 kPa basınç uygulanması ve belirli bir süre sonra kalınlık değerinin okunması ile gerçekleştirilmiştir. Kumaş mukavemetlerinin belirlenmesinde ise Şekil-3'de şematik gösterimi verilen geniş enli çekme testi kullanılmıştır. Geniş enli çekme testi, şerit çekme testinde gerilme yığılması nedeni ile oluşan aşırı uzama oranlarından sakınmak ve test sırasında çekme yönüne dik yönde meydana gelen kenar kıvrılmalarını en aza indirmek için dokusuz yüzeyle kumaşların karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan standart bir yöntemdir. Testler TS EN ISO 10319'e göre Shimadzu mukavemet ölçüm aletinde 100 mm ölçüm aralığı 200 mm çene genişliğinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil-3 Geniş Enli Çekme Testi Şematik Gösterim-

#### -Lif Oryantasyon Açılarının Belirlenmesi

Dokusuz yüzeyle kumaş üretim hattında, tülbent yüzeyler içerisinde başlangıçta aynı doğrultuda yönlendirilmiş lifler katlama ve iğneleme işlemleri sonucunda kumaş içerisinde farklı doğrultulara yönlendirilerek rasgele veya bilinen bir dağılım sergilerler. Bununla birlikte iğne ile keçeleştirilmiş jeotekstil kumaşlar gibi ağır gramajlı dokusuz yüzeyle kumaşlarda tabalardaki lif oryantasyon dağılımının deneysel olarak saptanması çok zordur (Pourdeyhimi, 2001). Bu nedenle çalışma numunelerini oluşturan en hafif gramajlı kumaş üzerinde lif oryantasyon açısı dağılımı deneysel olarak saptanmaya çalışılmış ve diğer kumaşların lif oryantasyon açısı dağılımları modelde kumaşları oluşturan tülbent tabakası sayılarına göre düzenlenerek teorik analizde veri olarak kullanılmıştır. Lif oryantasyon açısı ölçümleri için 100 gr/m<sup>2</sup>'lik kumaştan alınan numuneler projeksiyon mikroskopu tablasına yerleştirilerek elde edilen görüntüler üzerinden 50 adet lifin makine yönüne göre oryantasyon açıları saptanmıştır. Toplamda 20 numune üzerinden 1000 ölçüm yapılarak liflerin oryantasyon açısı dağılımlarını saptamak için 10° aralıklı bir histogram oluşturulmuştur (Şekil-4).



Şekil-4 100gr/m<sup>2</sup>'lik Kumaş İçin Lif Oryantasyon Açısı Dağılımları

### 3. Teorik Modelin Oluşturulması

Dokusuz yüzeyle jeotekstil kumaşların teorik analizinde kullanılacak model önceki çalışmalar (Bais-Singh, 1995, 1998- Liao, 1997) ve tabakalı kompozit teorisi (Kaw, 1997) dikkate alınarak oluşturulmuştur. Modelde dokusuz yüzeyle kumaşlar tabakalı kompozit malzemeler gibi düşünülerek kumaşı oluşturan tülbent katmanları bir kompozit tabakası olarak ele alınmıştır. Sonlu elemanlar metodunu kullanarak gerilme analizini gerçekleştirmek için kumaş yapısının sonlu sayıda sürekli olmayan birim ünitelerden (sonlu eleman) oluştuğu ve her bir birim ünitenin lif tabakalarından meydana geldiği kabul edilmiştir. Her bir tabaka



içindeki liflerin aynı doğrultuda yönlendiği ve liflerin sonlu elemanların düğüm noktalarında birbirlerine bağlanarak kumaşı oluşturduğu varsayımları yapılmıştır. Modelde sonlu elemanın tabaka malzeme özellikleri olarak kumaşı oluşturan liflerin özellikleri göz önüne alınmış ve liflerin uniform olmayan gerilme-uzama oranı davranışlarına göre veriler lineer elastik ortotropik ve nonlinear (multilinear) inelastik olmak üzere iki kısımda tanımlanmışlardır.

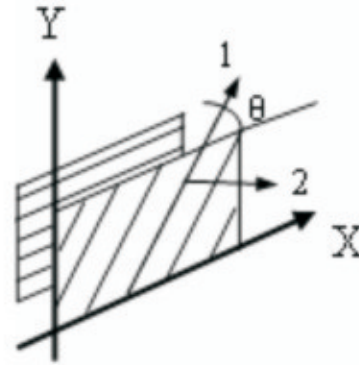
### 3.1. Model Parametreleri Arasındaki İlişkiler

Kalınlık kumaşlarda diğer boyutlara göre çok küçük olduğu için kumaş tabakaları ortotropik bir malzeme gibi düşünülebilir. Eğer tabakanın kalınlığı diğer boyutlarına göre çok küçük ise düzlem dışındaki yükleri taşımaz ve bu durumda ince tabaka için düzlem gerilme koşulları dikkate alınabilir. Düzlem gerilme durumunda ortotropik malzemelerde gerilme-uzama oranı ilişkisi ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada  $E_1$  ve  $E_2$  iki temel yöndeki (çekme yönü ve çekmeye dik yön) elastisite modülleridir.  $G_{12}$  düzlemdeki kayma modülü  $\nu_{12}$  ve  $\nu_{21}$  bu yönlerdeki poisson oranlarıdır

Yukarıdaki kısımlarda da bahsedildiği gibi dokusuz yüzey kumaşların, özellikle de çok ağır gramajlı olan jeotekstillerin Şekil-5'de görüldüğü gibi farklı açılarda yerleşmiş tülbent tabakalarından oluştuğu varsayılmıştır. Bu durumda tüm kumaş yapısı ele alınır Şekil-5'de verilen X ve Y eksenleri 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). Tabakadaki tüm lifler 1 doğrultusunda yönlendiği 2 doğrultusu liflere dik yöndür.



Şekil-5 Dokusuz Yüzey Kumaşların Tabakalı Yapısı

Şekil-5'de görüldüğü gibi global ve lokal gerilmeler arasındaki ilişki tabakaların oryantasyon açısına bağlıdır. Kumaş kalınlığına dik yönde bir kuvvet uygulandığında global ve lokal sistemler arasındaki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki formüller ile ifade edilebilir (Kaw, 1997).

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

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

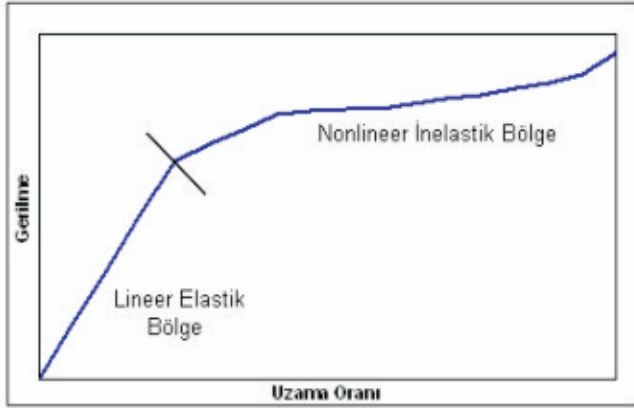
burada ;  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  X-Y koordinat sistemindeki tabaka gerilmeleri  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  1-2 koordinat sistemindeki tabaka gerilmeleri,  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  X-Y koordinat sistemindeki tabaka uzama oranları,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$  1-2 koordinat sistemindeki tabaka uzama oranları ve  $\theta$ : tabakadaki tüm liflerin oryantasyon açısıdır.

Denklem 3 ve 2 ile 1 nolu denklem birleştirilerek her bir lif tabakası için gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir ve bilinen bir oryantasyon açısında global gerilmeler bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta \cos^2\theta & \sin\theta \cos^3\theta \\ \sin^2\theta \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin^3\theta \cos\theta \\ \sin\theta \cos^3\theta & \sin^3\theta \cos\theta & \cos^2\theta \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Denklem 4 de verilen ifade gerilme ve uzama oranının lineer olarak ilişkili olduğu durumlarda geçerlidir. Öte yandan tülbent tabakalarını oluşturan ve esas yük taşıyıcı elemanlar olan polipropilen liflerin gerilme-uzama oranı eğrileri Şekil-6'da görüldüğü gibi uniform olmayan bir yapı sergilemektedir. Lifler gerilme-uzama oranı eğrisi başlangıcında lineer bir davranış gösterirken akma noktasından sonra nonlinear bir davranış göstermektedirler.





Şekil-6 Liflere Ait Gerilme-Uzama Oranı Eğrisi

Kumaşı oluşturan liflerin uniform olmayan bu gerilme-uzama oranı davranışları nedeni ile kumaş yapısını oluşturan her bir sonlu eleman için de uniform olmayan bir gerilme-uzama oranı davranışı kabul edilirse her bir tabakanın gerilmesinin de iki kısımda düşünülmesi gerekir. İlk kısımda gerilme uzama oranı artışı ile lineer olarak değişmektedir, ikinci kısımda ise gerilme uzama oranı artışı ile nonlineer olarak değişmektedir. Bu durumda ortotropik bir tabaka için lokal koordinatlardaki gerilme-uzama oranı ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Bais-Singh, 1998).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada lineer kısımdaki matrisin sabitleri denklem (1)'de verilen malzeme sabitleridir. Nonlineer kısımdaki matris ise lif doğrultusundaki gerilme ve uzamaya bağlı olan tek bir terim içermektedir. 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 4 ve 5 birleştirilerek uniform olmayan gerilme-uzama oranı davranışı sergileyen liflerden oluşan her bir tabaka için global koordinat sistemindeki gerilmeler hesaplanabilir. Her bir tabakada 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 sembolik matris formunda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (6)$$

Burada  $[D]$  sonlu elemanın yapısal matrisidir

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \tau_{xy} \end{bmatrix} \text{ ve } \{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \gamma_{xy} \end{bmatrix} \text{ dir.}$$

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

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (7)$$

ve

$$[K] = [B]^T [D] [B] A T \quad (8)$$

Burada  $\{F\}$  elemana ait kuvvet vektörü,

$[K]$  elemana ait direngenlik matrisi,  $\{U\}$  elemana

ait düğümlerdeki şekil değiştirme vektörü,  $[B]$

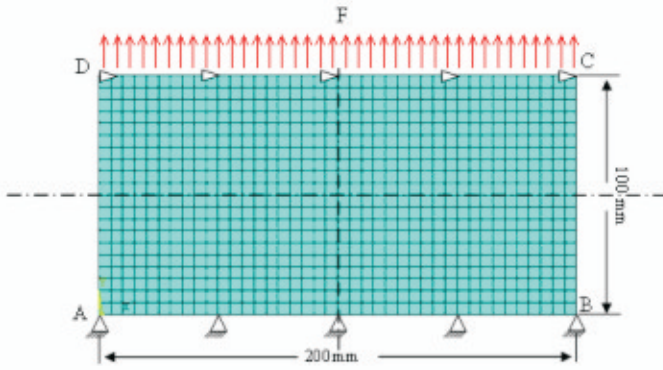
elemana ait uzama oranı matrisi, A elemanın alanı, T ise kalınlığıdır.

Sonlu elemana ait yukarıdaki kısımlarda açıklanan parametreler arasındaki temel ilişkiler ve denklemler dikkate alınarak gerilme analizlerinin gerçekleştirildiği sonlu elemanlar paket programı ANSYS'de malzeme ve eleman özellikleri belirlenmiştir. Elastisite modülünün sabit olduğu lineer-elastik kısımda ortotropik malzeme sabitleri programda veri olarak kullanılmıştır. Her bir lif tabakası için  $E_1$ , lifin elastisite modülü olan  $E_{\text{lif}}$  (1,26GPa)'e eşit alınmıştır. Boylarına göre incelikleri çok küçük olan liflerde diğer sabitlerin ölçümü zor olduğu için  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{21}$  sabitleri sıfır olarak kabul edilmiş, poisson oranı  $\nu_{12}$  ise polipropilen lifleri için 0,35 olarak alınmıştır (Karian, 2003). Nonlineer-inelastik kısımda ise multi-lineer gerilme-uzama oranı yaklaşımına göre belirli aralıklardaki uzama oranı değerlerine karşılık gelen 15 adet gerilme değeri veri olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte her bir lif tabakasında sadece liflerin kapladığı hacimsel oranın gerilme ve uzamaya etkisi olduğundan veri olarak kullanılan elastisite modülü ve gerilme değerleri her bir kumaş için kalınlık, gramaj ve lif yoğunluğuna göre hesaplanan hacimsel oranlar ile çarpılarak programa girilmiştir.

### 3.2. Sonlu Elemanlar Ağı Model Yapısı

Dokusuz yüzey jeotekstil kumaşlar için oluşturulan sonlu elemanlar model geometrisi Şekil-7'de görüldüğü gibi geniş enli çekme testi dikkate alınarak oluşturulmuştur.





Şekil-7 Model Kumaşın Başlangıç Yapısı

Şekil-7 model kumaşın başlangıç yapısının yanı sıra test sırasında 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. Oluşturulan teorik model yaklaşımı doğrultusunda kumaş geometrik modelini elemanlara ayırmak için programda “Yapısal Tabakalı Kompozit” sonlu elemanı seçilmiştir. Eleman tabakalı yapıların anisotropik nonlineer davranışının hesaplayabilmektedir (ANSYS 8.0). Oluşturulan modele DC kenarı boyunca kumaşlarda deneysel olarak hesaplanan kopma yüküne yakın yayılı yük (negatif basınç) uygulanarak makine yönünde ve makine yönüne dik yönde gerilme analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılan tabakalara ve elemanlara ait başlangıç verileri Tablo-2’de görülmektedir.

Tablo-2 Tabakalara ve Elemanlara Ait Başlangıç Verileri

Kumaş Gramajı (gr/m <sup>2</sup> )	Toplam Tabaka Sayısı	Tabaka Oryantasyon Açısı (°)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Toplam Eleman Kalınlığı (mm)
100	2	10, 70	1,30	2,60
200	5	10, 30, 90, 150, 170	0,59	2,96
300	8	0, 20, 40, 70, 110, 140, 160, 180	0,44	3,56
500	14	0, 10, 20, 30, 40, 60, 75, 105, 120, 140, 150, 160, 170, 180	0,28	4,01
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

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Çalışma numunesi olarak kullanılan dokusuz yüzey jeotekstil kumaşların sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan gerilme analizlerinin sonuçları ve bunların deneysel veriler ile kıyaslanması aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir. Tablo-3 ve 4’de sırası ile makine yönünde ve makine yönüne dik yönde geniş enli çekme testine ait deneylerden ve teorik analizlerden elde edilen gerilme ve uzama değerleri görülmektedir.

Tablo-3 Makine Yönündeki Deneysel ve Teorik Veriler

Kumaş Gramajı (gr/m <sup>2</sup> )	Deneysel		Teorik			Maks. Uzama (mm)
	Maks. Gerilme (MPa)	Maks. Uzama (mm)	Gerilmeler $\sigma_x$ (MPa)			
			Min.	Orta Nokta	Maks.	
100	2.04	131.25	1,45	2,10	3,48	7,20
200	4.05	148.54	3,15	4,24	6,49	20,13
300	5.13	171.36	4,17	5,33	7,82	32,45
500	7.22	208.72	6,14	7,44	10,4	53,53
800	7.80	223.81	6,77	7,99	10,7	70,51

Tablo-4 Makine Yönüne Dik Yönde Deneysel ve Teorik Veriler

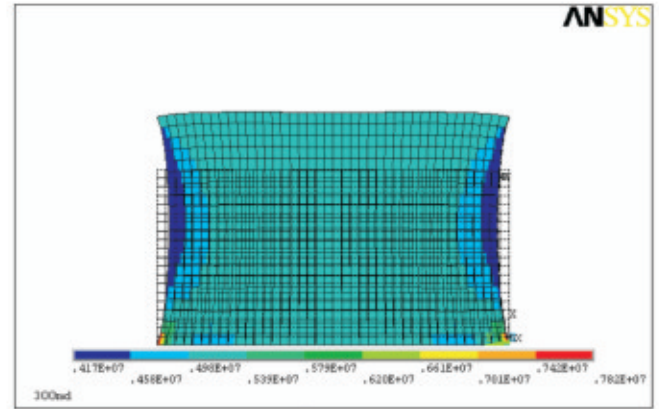
Kumaş Gramajı (gr/m <sup>2</sup> )	Deneysel		Teorik			Maks. Uzama (mm)
	Maks. Gerilme (MPa)	Maks. Uzama (mm)	Gerilmeler $\sigma_x$ (MPa)			
			Min.	Orta Nokta	Maks.	
100	1.54	108.00	1,08	1,63	2,65	5,45
200	3.43	197.20	2,62	3,60	5,57	17,09
300	4.30	229.86	3,44	4,48	6,70	27,29
500	6.85	217.39	5,80	7,06	9,90	50,84
800	8.39	236.01	7,33	8,58	11,40	75,75

Tablo-3 ve Tablo-4’deki deneysel veriler incelendiğinde kumaşlara ait maksimum gerilme değerlerinin 800gr/m<sup>2</sup>’lik en ağır kumaş hariç makine yönünde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum çekme sırasında esas yük taşıyıcı eleman olarak davranan liflerin kumaş içerisindeki oryantasyon açılarından kaynaklanmaktadır. İğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzey kumaşlarda lifler çoğunlukla makine yönüne paralel buldukları için kumaşların bu yöndeki mukavemetleri makine yönüne dik doğrultuya göre daha yüksektir (Raval, 2006). Bununla birlikte kumaş gramajındaki ve lif tabakası sayısındaki artışa bağlı olarak iğneleme sonrası kumaş içerisinde makine yönünden farklı açılarda yerleşen lif sayısı artmaktadır. Bu durumda en ağır jeotekstil kumaş numunesi gibi çok sayıda tülbent tabakasından oluşan dokusuz yüzey kumaşlar liflerin neredeyse isotropik yerleşimleri nedeni ile makine ve makine yönüne dik yönde benzer özellikler gösterebilmektedirler. Kumaş numunelerine ait deneysel olarak elde edilen uzama verileri incelendiğinde ise en hafif kumaş olan 100gr/m<sup>2</sup>’lik kumaş hariç diğer kumaşlarda makine yönüne dik yöndeki uzamaların daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum çekme doğrultusuna paralel olmayan çok sayıda lif nedeniyle kumaşta deney başlangıcında oluşan uzamadan kaynaklanmaktadır. Lifler kumaşa yük uygulandığında kumaş içerisinde yeniden yönlendirilerek çekme doğrultusuna paralel hale gelip daha sonra yük almaktadırlar. Bununla birlikte 100 gr/m<sup>2</sup>’lik en hafif kumaş az sayıda tülbent tabakasından oluştuğundan makine yönüne dik yöndeki maksimum uzama daha düşük ölçülmüştür.

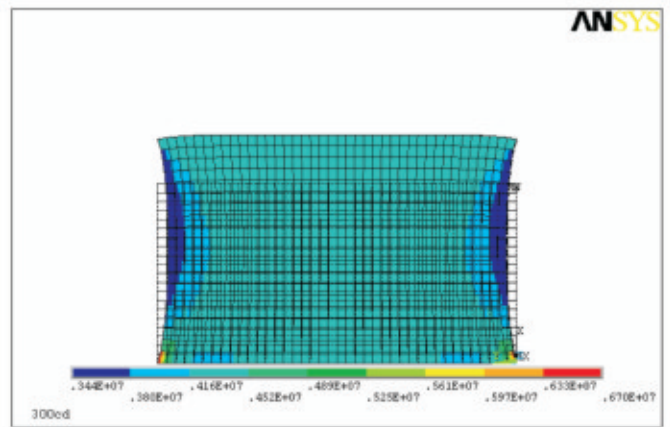


Her iki kumaş doğrultusunda Tablo-3 ve Tablo-4'deki deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldığında gerilme değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Teorik modeldeki orta noktada hesaplanan gerilme değerleri kumaşa deneysel olarak ölçülen maksimum gerilme değerlerine çok yakındır. Modelde elde edilen ve deneysel ölçümlerden daha yüksek olan maksimum gerilmeler modelin çeneler tarafından tutulan köşelerinde hesaplanmıştır, minimum gerilmeler ise serbest kenarlarda saptanmıştır. Kumaşların uzama özellikleri ele alındığında ise teorik olarak hesaplanan maksimum uzama miktarlarının deneysel verilerden çok düşük olduğu görülmektedir. Deneylerde başlangıç sırasında çekme yönünden farklı doğrultuda yer alan lifler yük uygulandıktan sonra çekme doğrultusuna gelecek şekilde yeniden yönlenebilirler ve daha sonra yük almaktadırlar, bu sırada meydana gelen uzamalar liflerin gerilme-uzama özelliklerine göre oluşturulan model tarafından hesaplanmadığından teorik olarak elde edilen maksimum uzama değerleri düşüktür.

Analizler sonucu teorik modelde çekme doğrultusunda elde edilen örnek gerilme dağılımları Şekil-8'de verilmiştir. Şekil-8'de 300gr/m<sup>2</sup> lik kumaş modeline ait elemanlardaki gerilme dağılımı görülmektedir, diğer kumaşlarda da benzer çözümler elde edilmiştir. Şekil-9'da ise aynı kumaşa ait testler sırasında çekilen fotoğraflar verilmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen gerilme konfigürasyonları birbirine benzerdir. Teorik gerilme dağılımları incelendiğinde kumaş üzerindeki gerilmelerin tüm noktalarda aynı olmadığı görülmektedir. Çekme doğrultusundaki maksimum gerilmelerin sınır koşullar nedeni ile genel olarak çenelere yakın kenarlarda, minimum gerilmelerin ise serbest bırakılan kenarlar civarında olduğu görülmüştür. Ayrıca çekme yönüne dik yönde oluşan daralmalar nedeni ile de kumaş üzerinde farklı gerilme bölgeleri oluşmaktadır. Model orta noktasında hesaplanan gerilme değerleri deneyler sonucu elde edilen maksimum gerilme değerlerine çok yakındır. Şekil-9'da da görüldüğü gibi deneylerde kopmanın çoğunlukla orta nokta etrafında olduğu saptanmıştır. Dolayısı ile kumaş orta noktası etrafında, model deneylere uyumlu gerilme değerleri hesaplayabilmiştir.



a



b

Şekil-8 Teorik Gerilme Analizi- 300 gr/m<sup>2</sup> lik kumaş  
a) makine yönünde b) makine yönüne dik yönde



a



b

Şekil-9 Geniş enli çekme testi - 300gr/m<sup>2</sup> lik kumaş  
a) makine yönünde b) makine yönüne dik yönde



Şekil-8'de kumaşlarda çekme sonucu oluşan yanıl daralmalar da görülmektedir. Çenelerin tuttuğu kısımda herhangi bir yanıl darılma oluşmazken darılma kumaş orta noktasına kadar artarak burada maksimum değerini almaktadır. Benzer durum Şekil-9'da görüldüğü gibi gerçek kumaşlarda da oluşmaktadır. Tek eksenli çekme testinde dokusuz yüzeyle kumaşların sabit olmayan yanıl darılmaları oluşturulan model tarafından simüle edilebilmiştir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada iğneleme yöntemi ile üretilen dokusuz yüzeyle jeotekstil kumaşların mekanik davranışlarının tahminlenebilmesi için tabakalı kompozit teorisi ve sonlu elemanlar modeli kullanılarak teorik bir model oluşturulmuştur. Modelde geniş enli çekme testi uygulanan kumaşlar dikkate alınmıştır. Diğer dokusuz yüzeyle kumaşlara göre daha ağır gramajlarda olan jeotekstillerin özelliklerini tahminleyebilmek için oluşturulan modelde veri olarak kumaşı oluşturan liflerin kumaş içerisindeki yerleşimleri ve tek lif gerilme-uzama oranı özellikleri dikkate alınmıştır. Liflerin uniform olmayan gerilme-uzama oranı davranışlarının kumaş özelliklerine etkisi de düşünülerek teorik model bu doğrultuda düzenlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan gerilme analizi sonucunda elde edilen teorik değerler, deneysel veriler ile karşılaştırıldığında kumaşlardaki gerilme dağılımının model tarafından yaklaşık olarak hesaplanabileceği saptanmıştır. Ayrıca teorik analizinde yüklemeye sonucu deneylerdeki benzer kumaş konfigürasyonları elde edilmiştir.

Sonuç olarak oluşturulan teorik model; iğneleme yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzeyle jeotekstil kumaşların yük altındaki gerilme davranışlarını ve kumaş üzerindeki gerilme dağılımını yaklaşık olarak tahminleyebilmektedir. Ancak araştırmamızda oluşturulan lif özellikleri esaslı bu model yaklaşımı test başlangıcındaki lif yer değiştirmelerini dikkate alamadığından kumaşların uzama davranışlarının belirlenmesinde yetersiz kalmıştır. Bu nedenle benzer teorik temele dayalı ancak farklı malzeme parametrelerinin kullanılarak oluşturulan diğer bir model yaklaşımının sonuçları şu an devam eden çalışmamızda ele alınmaktadır. Bu makalede teorik altyapısı ayrıntılı olarak sunulan model ile jeotekstillerin fonksiyonlarına göre gerekli mekanik davranışlarının hammadde ve ürün özellikleri üzerinden belirlenmesi için bir yöntem oluşturulmaya

çalışılmıştır. Yöntemin geliştirilmesi ile hammadde ve ürün tipi seçimi kolaylaştıracağı ayrıca üreticilerin hammadde özelliklerinden nihai ürün hakkında fikir edinmesinin tasarım aşamasını kısaltacağı düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Şube Müdürlüğü Tarafından desteklenen 2005.KB.FEN.004 nolu projenin bir kısmını içermektedir. Maddi desteği için üniversitemize teşekkür ederiz. Ayrıca çalışma numunelerinin temininde yardımcı olan Hassan Firması ile deneysel ve teorik çalışmaların yapıldığı Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği ve Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı sorumlu ve görevlilerine de teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- Adanur S. (ed.), Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles, Technomic Pub Co, 1995.
- Adanur S., Liao T., Computerized Failure Analysis of Nonwoven Fabrics Based on Fiber Failure Criterion, Textile Research Journal, 1999, 69(7) 489-496.
- Adanur S., Liao T., Fiber Arrangement Characteristics and Their Effects on Nonwoven Tensile Behavior, Textile Research Journal, 1999, 69(11), 816-824.
- Albrecht W., Fuchs H., Kittelmann W. (eds.), Nonwoven Fabrics, John Wiley Sons Inc. 2003.
- Anonim, Handbook of Geosynthetics, Geosynthetic Materials Association, [http://www.gmanow.com/pdf/GMAHandbook\\_v002.pdf](http://www.gmanow.com/pdf/GMAHandbook_v002.pdf), 2002.
- ANSYS 8.0 Yardım Dosyaları.
- Backer S. and Peterson D.R., Some Principles of Nonwoven Fabrics, Textile Research Journal 1960, 30 (9), 704-711.
- Bais-Singh S., Goswami B.C., Theoretical Determination of the Mechanical Response of Spunbonded Nonwovens, Journal of Textile Institute, 1995, 86 (2), 271-289.
- Bais-Singh S., Rajesh D. A., Goswami B. C., Characterizing Lateral Contraction Behavior of Spunbonded Nonwovens During Uniaxial Tensile Deformation, Textile Research Journal 1996; 66(3), 131-140.
- Bais-Singh S., Goswami B.C., Predicting the Biaxial Tensile Deformation Behavior of Spunbonded Nonwovens, Textile Research Journal, 1998, 68, 219-227.



- Bais-Singh S., Biggers S. Goswami B.C., Finite Element Modeling of the Non-uniform Deformation of the Spun-bonded Nonwovens, *Textile Research Journal*, 1998, 68(5), 327-342.
- Britton P.N., Sampson A.J., Gettys W.E., Computer Simulation of Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics Part I: Method, *Textile Research Journal*, 1983, 53(6), 363-368.
- Britton P.N., Sampson A.J., Gettys W.E., Computer Simulation of Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics Part II: Bond Breaking, *Textile Research Journal*, 1984, 54(1) 1-5.
- Britton P.N., Sampson A.J., Gettys W.E., Computer Simulation of Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics Part III: Fabric Failure, *Textile Research Journal*, 1984, 54(7) 425-428.
- Chandrupatla T.R., Belegundu D.A., *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall, New Jersey 2002.
- Duran K., Dokusuz Yüzeýler, Teknik Fuarçılık Ltd. Şti., 2004.
- Gautier K. B., Kocher C. W., Drean J.Y., Anisotropic Mechanical Behavior of Nonwoven Geotextiles Stressed by Uniaxial Tension, *Textile Research Journal*, 2007, 77(1), 20-28.
- Hearle J.W.S, Stevenson P.J., *Studies in Nonwoven Fabrics Part III: The Anisotropy of Nonwoven Fabrics*, *Textile Research Journal*, 1963, 33, 877-888.
- Hearle J.W.S, Stevenson P.J., *Studies in Nonwoven Fabrics Part IV: Prediction of Tensile Properties*, *Textile Research Journal* 1964, 34(3) 181-191.
- Hearle J.W.S, Newton A., *Nonwoven Fabric Studies Part XIV: Derivation of Generalized Mechanics the Energy Method*, *Textile Research Journal*, 1967, 37(9), 778-797.
- Hearle J.W.S., Sultan, M.A.I., *A Study of Needled Fabrics Part III: The Influence of Fiber Type and Dimensions*, *Journal of Textile Institute*, 1968, 59, 137-147.
- Hearle J.W.S, Ozlansav V., *Studies of Adhesive Bonded Nonwoven Fabrics Part I: A Theoretical Model of Tensile Response Incorporating Binder Deformation*, *Journal of Textile Institute*, 1979, 70, 19-28.
- Hearle J.W.S, Ozlansav V., *Studies of Adhesive Bonded Nonwoven Fabrics Part III: The Determination of Fiber Orientation and Curl*, *Journal of Textile Institute*, 1979, 78, 487-498.
- <http://www.typargeotextiles.com/Typar-Geo-bro.pdf>
- Ingold T.S., Miller K.S., *Geotextiles Handbook*, Thomas Telford, Londra, 1988.
- Karian H. G. (Ed.), *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*, Marcel Dekker Inc. USA, 2003.
- Kaw K., *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press New-York 1997.
- Kim H.S., *Orthotropic Theory for the Prediction of Mechanical Performance in Thermally Point-bonded Nonwovens*, *Fibers and Polymers*, 2004 (5), 2, 139-144.
- Kim, H.S., *Relationship Between Fiber Orientation Distribution Function and Mechanical Anisotropy of Thermally Point-Bonded Nonwovens*, *Fibers and Polymers*, 2004 (5), 3, 177-181.
- Koerner R.M., *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall, N.J., 1986.
- Liao T., Adanur S., Drean J.Y., *Predicting the Mechanical Properties of Nonwoven Geotextiles with the Finite Element Method*, *Textile Research Journal*, 1997, 67(10), 753-760.
- Limen S., Warner S.B., *Adhesive Point Bonded Spunbond Fabrics*, *Textile Research Journal*, 2005, 75(1) 62-72.
- Pourdeyhimi B., Ramanathan R., *Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part I: Simulation*, *Textile Research Journal*, 1996, 66 (11), 713-722.
- Pourdeyhimi, B., Ramanathan, R. Dent, R., *Measuring Fiber Orientation in Nonwovens: Part II: Direct Tracking*, *Textile Research Journal*, 1996; 66 (12), 747-753.
- Pourdeyhimi B., Dent R., Davis H., *Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part III: Fourier Transform*, *Textile Research Journal*, 1997, 67, 143-51.
- Pourdeyhimi B., Dent R., *Measuring Fiber Orientation in Nonwovens. Part IV : Flow Field Analysis*, *Textile Research Journal*, 1997, 67, 181-.
- Pourdeyhimi B., Dent R., Jerbi A., Tanaka S., Deshpande A., *Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part V: Real Webs*, *Textile Research Journal* 1999, 69(3), 185-192.
- Pourdeyhimi B., *Fiber Orientation Distribution in Heavy Nonwovens*, *NCRC Newsletter*, 2001, 7.
- Raval A., Anandjivala R., *Relationship Between Process Parameters and Properties of Multifunctional Needle-punched Geotextiles* *Journal of Industrial Textiles*, 2006, 35(4) 271-285.
- Van Zaten R.V. (ed.), *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*, John Wiley & Sons, Newyork / Toronto, 1986.