T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

NİTİNOL VE ÇELİK TEL ÖZLÜ HİBRİT İPLİKLER KULLANILARAK ÜSTÜN MEKANİK ÖZELLİKLERE SAHİP ÜÇ BOYUTLU DOKUMA KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Doktora Tezi

Elif YILMAZ

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

NİTİNOL VE ÇELİK TEL ÖZLÜ HİBRİT İPLİKLER KULLANILARAK ÜSTÜN MEKANİK ÖZELLİKLERE SAHİP ÜÇ BOYUTLU DOKUMA KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Elif YILMAZ

Danışman : Doç. Dr. Sevda ALTAŞ

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı
Tekstil Mühendisliği Doktora Programı

İzmir
2019

Elif YILMAZ tarafından doktora tezi olarak sunulan "Nitinol ve Çelik Tel Özlü Hibrit İplikler Kullanılarak Üstün Mekanik Özelliklere Sahip Üç Boyutlu Dokuma Kumaşların Geliştirilmesi" başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 25.12.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:		**İmza**
Jüri Başkanı	**: Prof. Dr. Arzu MARMARALI**	.....
Raportör Üye	**: Doç. Dr. Gülşah PAMUK**	.....
Üye	**: Doç. Dr. Sevda ALTAŞ**	.....
Üye	**: Doç. Dr. Mustafa Sabri ÖZEN**	.....
Üye	**: Doç. Dr. Ozan KAYACAN**	.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum "Nitinol ve Çelik Tel Özlü Hibrit İplikler Kullanılarak Üstün Mekanik Özelliklere Sahip Üç Boyutlu Dokuma Kumaşların Geliştirilmesi" başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

25/ 12 / 2019

Elif YILMAZ

ÖZET

NİTİNOL VE ÇELİK TEL ÖZLÜ HİBRİT İPLİKLER KULLANILARAK ÜSTÜN MEKANİK ÖZELLİKLERE SAHİP ÜÇ BOYUTLU DOKUMA KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ

YILMAZ, Elif

Doktora Tezi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sevda ALTAŞ

Aralık 2019, 132 sayfa

Bu tezde nitinol ve çelik tel özlü hibrit ipliklerin üretilmesi ve bu ipliklerin dokuma kumaş üretiminde çözgü ipliği olarak kullanılması ile kompozit ön şekli olarak kullanılabilecek nitelikte üstün mekanik özelliklere sahip üç boyutlu dokuma kumaşların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle farklı kalınlıklara sahip nitinol ve çelik tellerin öz materyal olarak kullandığı hibrit iplik yapıları üretilmiştir. Sonrasında bu iplikler iki farklı örgüde kumaş yapısında çözgü ipliği olarak kullanılmıştır. Üretim sonrasında dokuma konstrüksiyonuna bağlı olarak kumaş yapısında oluşan kanallara uygun kalınlıkta iki farklı çapta yardımcı çelik çubuk yerleştirilerek, kumaşın desteklenmesi ve boşluklu bir form alması sağlanmıştır. Yapısında nitinol tel bulunduran kumaşlara şekil hafızası ve süperelastisite özelliklerinin kazandırılması için ayrıca ısıl işlemler uygulanmıştır.

Tez kapsamında nitinol ve çelik özlü hibrit iplikler ile tel takviyeli kumaşların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için iplik ve kumaş testleri eşzamanlı olarak yürütülmüştür. Tüm tel ve hibrit iplik numunelerine çekme testleri uygulanmış, ısıl işlem görmüş nitinol teller için DMA ve DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. Kumaş numunelerine düşük hızlı darbe, çekme ve kayma direnci testleri uygulanmıştır. Tel takviyeli kumaşların mekanik özelliklerine ait verilerin kıyaslanabilmesi amacıyla, tez kapsamında ayrıca yapısında tel barındırmayan referans kumaş numuneleri de üretilmiş, tel içeren numunelerle kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar çoklu doğrusal regresyon analizi ile “backward yöntemi” kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiş ve optimum kumaş üretimi

için gerekli olan tel cinsi, tel çapı, kumaş kanal genişliği parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Nitinol tel, çelik tel, tel özlü hibrit iplik, üç boyutlu dokuma kumaş, mekanik özellikler.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF THREE DIMENSIONAL WOVEN FABRICS WITH SUPERIOR MECHANICAL PROPERTIES BY USING NITINOL AND STEEL WIRE CORE HYBRID YARNS

YILMAZ, Elif

PhD in Textile Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevda ALTAŞ

December 2019, 132 pages

In this study, it was aimed to produce nitinol and steel wire core hybrid yarns and by using these yarns to develop three dimensional woven fabrics, which can be used as composite preform due to their superior mechanical properties. For this purpose, first, hybrid yarn structures, in which nitinol and steel wires in different diameters were used as a core material, were produced. Then these yarns were used as warp yarns in two different fabric constructions. After production, the fabric was supported and ensured to take a hollow form by placing auxiliary steel bars in two different diameters into the fabric gaps that were created depending on the woven construction. These fabrics with nitinol wire in their structure were also exposed to heat treatments to provide them shape memory and superelasticity properties.

Within the scope of this study, yarn and fabric tests were carried out simultaneously to evaluate the mechanical properties of nitinol and steel wire core hybrid yarns and wire reinforced fabrics. Tensile tests were applied to all wire and hybrid yarn samples, and DSC and DMA analyses were conducted for only heat treated nitinol wires. Low velocity impact, tensile and pull-out tests were applied to fabric samples. In order to provide a point of comparison to the data from the mechanical properties of wire reinforced fabrics, reference fabrics with no wire were produced and evaluated by comparing with wire reinforced samples.

Results obtained from the study were analyzed with regression analysis by using “backward method” and the parameters such as wire type, wire diameter, fabric gap width for optimum fabric production were determined.

Keywords: Nitinol wire, steel wire, wire core hybrid yarn, three dimensional woven fabric, mechanical properties.

ÖNSÖZ

Doktora süreci, akademik yaşamın en zorlu ama en kıymetli süreçlerinden biri olarak bilinir. Bir yanda öğrenciliğin son demleri yaşanırken, öte yandan akademik hayata adım atılır. Bu uzun yolu tamamlamak için yoğun çalışma, sabır ve kararlılık gerekir.

Tez konumun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar geçen süreçte, tıpkı bu süreci benden önce deneyimlemiş herkes gibi birçok zorlukla karşılaştım. Ancak şüphesiz ki bunun karşılığında paha biçilemez tecrübeler kazandım ve çok değerli bilgiler edindim. Doktora eğitimim bana sadece bilimsel anlamda değil, hayata dair de çok önemli katkılar sağladı.

Şimdi bu sürecin sonuna gelmiş olarak, bundan sonraki akademik hayatımda edindiğim bilgi birikimi ve deneyimi, ülkem adına faydalı bilimsel çalışmalar yapmak için kullanabilmeyi ve aktarabilmeyi diliyorum.

İZMİR

25/12/2019

Elif YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK ii

KABUL ONAY SAYFASI iii

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI v

ÖZET vii

ABSTRACT ix

ÖNSÖZ xi

İÇİNDEKİLER DİZİNİ xiii

ŞEKİLLER DİZİNİ xvii

TABLOLAR DİZİNİ xxiv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xxvi

1.GİRİŞ 1

2.GENEL BİLGİLER 3

2.1 Özlü/Hibrit İplikler 3

2.1.1 Tel özlü ipliklerle ilgili yapılan çalışmalar 4

2.2 Üç Boyutlu Dokuma Kumaşlar 6

2.3 Tekstil Takviyeli Kompozitler 12

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.3.1 Üç boyutlu dokuma kumaşların kompozitlerde kullanımı ile ilgili çalışmalar. 15

2.3.2 Karbon elyaf takviyeli kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar..... 17

2.4 Şekil Hafızalı Tekstiller 18

2.4.1 Şekil hafızalı malzemeler..... 18

2.4.2 Nitinol tel takviyeli kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar 19

3.GEREÇ VE YÖNTEM 23

3.1 Tezde Kullanılan Gereçler 23

3.1.1 Nitinol tel 23

3.1.2 Çelik tel..... 24

3.1.3 Karbon elyaf..... 25

3.1.4 PVA iplik 26

3.1.5 Yardımcı çubuklar..... 27

3.1.6 Numune tutucu çerçeveler 27

3.2 Tez Çalışmasında Kullanılan Yöntemler 28

3.2.1 Hibrit ipliklerin üretimi..... 28

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.2 Bükümlü karbon elyaf ipliklerin üretimi 32

3.2.3 Üç boyutlu dokuma kumaşların üretimi 34

3.2.4 PVA'nın uzaklaştırılması..... 41

3.2.5 Isıl işlemlerin gerçekleştirilmesi..... 46

3.2.6 Tel ve hibrit ipliklere mekanik testlerin uygulanması 51

3.2.7 Üç boyutlu dokuma kumaşlara mekanik testlerin uygulanması 56

4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 62

4.1 Tel ve Hibrit İpliklere Uygulanan Mekanik Testlere İlişkin Bulgular 62

4.1.1 DSC analizi..... 62

4.1.2 DMA analizi 67

4.1.3 Çekme testi 73

4.2 Kumaşlara Uygulanan Mekanik Testlere İlişkin Bulgular 85

4.2.1 Çekme testi 85

4.2.2 Kayma direnci testi 92

4.2.3 Darbe testi..... 99

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 111

KAYNAKLAR DİZİNİ 115

TEŞEKKÜR 131

ÖZGEÇMİŞ 132

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

2.1 Özlü ipliklere ait şematik görünümler 3

2.2 Kumaşların sınıflandırılması 7

2.3 Üç boyutlu dokuma kumaş yapılarına örnekler..... 7

2.4 Üç boyutlu dokuma kumaşların üretim yöntemleri..... 8

2.5 Tek yönlü ağızlık açımı (a) ve çift yönlü ağızlık açımı (b) görsel ve şematik gösterimleri 9

2.6 Üç boyutlu kumaşların yapılarına göre sınıflandırılması 10

2.7 Yaygın kullanılan üç boyutlu dolu kumaş yapıları: (a) Ortogonal dokuma, (b) Açılı interlok dokuma, (c) Çok katlı dokuma 10

2.8 Üç boyutlu boşluklu kumaş yapıları şematik gösterimi: (a) İkizkenar yamuk, (b) Üçgen, (c) Dikdörtgen, (d) Hücresel şekilli boşluklu kumaşlar 11

2.9 Üç boyutlu kabuk kumaş yapıları; (a) Farklı dokuma kombinasyonları ile üretilen kabuk kumaş, (b) Kalıplanarak başlık haline getirilmiş kabuk kumaş, (c) Farklı kumaş çekme hareketleri ile elde edilen kabuk kumaş yapıları 11

2.10 Üç boyutlu boğumlu dokuma kumaş yapısı 12

2.11 Kompozitlerde kullanılan malzeme türleri..... 13

3.1 Şekil hafızalı alaşım histerezis eğrisi 24

3.2 Isıl işlemlerde kullanılan numune tutucu çerçeveler..... 27

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

3.3 Hibrit iplik yapısının şematik gösterimi 28

3.4 DirecTwist C6’’/D6’’ makinesinde gerçekleştirilen hibrit iplik üretimi .29

3.5 Hibrit iplik üretimi esnasında karşılaşılan iplik hataları 30

3.6 Tez kapsamında üretilen hibrit iplik yapısı.....31

3.7 PVA iplik sarılı hibrit iplik 31

3.8 Bükümlü karbon elyaf iplik ile 3K bükümlü karbon elyaf makarası 33

3.9 PVA iplik ile sarılmış bükümlü karbon elyaf iplik.....33

3.10 Bükümlü karbon elyaf ipliğin PVA iplikle sarılması (Yeşil oklar akış yönünü belirtmektedir) 34

3.11 Üç boyutlu dokuma kumaş üretimlerinde kullanılan armür planı 35

3.12 Dar kanallı üç boyutlu dokuma kumaşa ait tekrarlı armür raporu ve kumaş kesit görünümü 37

3.13 Geniş kanallı üç boyutlu dokuma kumaşa ait tekrarlı armür raporu ve kumaş kesit görünümü 37

3.14 PVA iplikle sarılı hibrit iplik ve bükümlü karbon elyaf iplik kullanılarak el dokuma tezgahında üretilen boşluklu üç boyutlu dokuma kumaş ve kumaş boşluklarına yerleştirilmiş yardımcı çelik çubuklar 38

3.15 Çözgü levendi hazırlığı.....39

3.16 Kumaş üretimlerinin gerçekleştirildiği otomatik numune karbon dokuma makinesi 39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

3.17 Üç boyutlu dokuma kumaşın üretimi 40

3.18 Leventten salınan çözgü ipliklerinin görünümü 41

3.19 Sıcak suda bekletilerek PVA haşılı uzaklaştırılan el dokuma karbon kumaş 42

3.20 Sıcak suda bekletme ve kurutma sonrasında kumaşın görünümü 42

3.21 Kumaş boşluklarına yerleştirilen çelik çubuklar 43

3.22 PVA arındırma işlemi öncesinde kumaşın içine yerleştirildiği delikli tekne 44

3.23 Durgun sıcak su teknesinin hazırlanması 45

3.24 Durgun suya daldırılan kumaşın görünümü 45

3.25 Kumaşın PVA uzaklaştırma işlemi ve kurutma sonrası görünümü 46

3.26 Çıplak halde ve hibrit iplik formunda ısıl işlem gören nitinol tellerin oda sıcaklığında deformasyon sonrası ısıtma ile şekil geri kazanımı 47

3.27 Nitinol şekil hafızalı alaşımın tipik DSC eğrisi 48

3.28 DSC analiz cihazı 48

3.29 Nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere ısıl işlemin uygulandığı tüp fırın 49

3.30 Çerçeveler arasında sabitlenmiş üç boyutlu dokuma kumaş numunesi .. 50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

3.31 Protherm yüksek ısı fırını 51

3.32 DMA Q800 test cihazı 52

3.33 Shimadzu Universal çekme cihazında gerçekleştirilen tel çekme testi ...54

3.34 Hooke doğrusu 56

3.35 Shimadzu Universal çekme cihazında gerçekleştirilen kumaş çekme testi.....57

3.36 Kayma direnci testi sırasında çenelere tutturulmuş numunenin görünümü.....59

3.37 CEAST Fractovis Plus darbe cihazı.....60

3.38 Darbe kuvveti ile delinmiş bir numunenin önden ve yandan görünümü.61

4.1 300 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....63

4.2 400 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....63

4.3 500 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....64

4.4 300 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....64

4.5 400 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....65

4.6 500 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.....65

4.7 0,2 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen dinamik mekanik analizine ilişkin birim uzama-sıcaklık grafiği 68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

4.8 0,3 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen dinamik mekanik analizine ilişkin birim uzama-sıcaklık grafiği 69

4.9 0,2 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında farklı sabit kuvvetler altında gerçekleştirilen analizine ait depolama modülü-sıcaklık grafiği 70

4.10 0,3 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında farklı sabit kuvvetler altında gerçekleştirilen analizine ait depolama modülü-sıcaklık grafiği 71

4.11 0,2 mm nitinol tel için değişken kuvvet ve farklı sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilen DMA analizine ait gerilme-birim uzama grafiği 72

4.12 0,3 mm nitinol tel için değişken kuvvet ve farklı sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilen DMA analizine ait gerilme-birim uzama grafiği 72

4.13 Isıl işlem görmüş ve görmemiş 0,2 mm nitinol teller ve hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği 75

4.14 Isıl işlem görmüş ve görmemiş 0,3 mm nitinol teller ve hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği 75

4.15 Çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği 76

4.16 Nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği 77

4.17 0,2 mm tel ve hibrit ipliklerin gerilme-birim uzama grafiği 78

4.18 0,3 mm tel ve hibrit ipliklerin gerilme-birim uzama grafiği 78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

4.19 Çelik tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği 86

4.20 Nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği 87

4.21 0,2 mm tel içeren kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği 88

4.22 0,3 mm tel içeren kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği 89

4.23 Çelik tel içeren numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği 93

4.24 Nitinol tel içeren numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği 93

4.25 Dar kanallı kumaş numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği 95

4.26 Geniş kanallı kumaş numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği 95

4.27 Çelik tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği 101

4.28 Nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği 101

4.29 Dar kanallı kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği. 103

4.30 Geniş kanallı kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği 103

4.31 Dar kanallı kumaş numunelerine ait absorbe edilen enerji-zaman grafiği 104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

4.32 Geniş kanallı kumaş numunelerine ait absorbe edilen enerji-zaman grafiği 105

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo Sayfa

2.1 İki ve üç boyutlu dokuma proseslerinin karşılaştırılması 9

2.2 Scardino'nun sınıflandırmasına göre kompozitlerde kullanılan tekstil malzemeleri.....13

2.3 Fukuta ve Aoki'ye göre tekstil takviyelerinin sınıflandırılması 14

3.1 Tez kapsamında üretilen PVA iplik sarılı hibrit ipliklere ait detaylar.....32

3.2 Tez kapsamında üretilen PVA iplik sarılı bükümlü karbon elyaf ipliklere ait detaylar 33

3.3 Üç boyutlu kumaşların üretilmesinde kullanılan üretim parametreleri ...36

3.4 Test edilen tel ve hibrit iplik numunelerine ait açıklamalar 54

3.5 Test edilen kumaşlara ait açıklamalar.....56

4.1 DSC analizine ilişkin bulgular.....65

4.2 Tel ve hibrit iplik çekme testine ilişkin bulgular.....74

4.3 Çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.....80

4.4 Birim uzamanın tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.....81

4.5 Elastisite modülünün tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 83

4.6 Kumaş çekme testine ilişkin bulgular.....85

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

Tablo Sayfa

4.7 Kumaş çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 90

4.8 Kayma direnci testine ilişkin bulgular 92

4.9 Kayma kuvvetinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 96

4.10 Yer değiştirmenin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 98

4.11 Kumaş darbe testine ilişkin bulgular 99

4.12 Darbe temas kuvvetinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 106

4.13 Deformasyonun tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 107

4.14 Absorbe edilen darbe enerjisinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler 109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_s	Östenit başlangıç sıcaklığı (°C)
A_f	Östenit bitiş sıcaklığı (°C)
M_s	Martenzit başlangıç sıcaklığı (°C)
M_f	Martenzit bitiş sıcaklığı (°C)
E	Elastisite modülü
σ	Gerilme
ε	Birim uzama

Kısaltmalar

DMA	Dinamik mekanik analiz
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
NiTi	Nikel titanyum alaşımı, nitinol
PVA	Polivinil alkol
SMA	Şekil hafızalı alaşım (Shape memory alloy)

1. GİRİŞ

Bu tezde nitinol ve çelik tel kullanılarak üstün mekanik özelliklere sahip üç boyutlu dokuma kumaşların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, şekil hafızalı bir alaşım olan nitinol tel ile çelik tel hibrit iplik formuna getirilmiş ve kumaş yapısı içinde çözgü ipliği olarak kullanılmıştır.

Isıl işlem görmemiş halde temin edilen nitinol telin şekil hafıza, süperelastisite ve mekanik enerji absorbsiyonu gibi üstün özellikleri kazanması ve bu özellikleri yapısında bulunduğu kumaşa aktarması için çalışma kapsamında nitinol tel özlü hibrit iplik kullanılarak üretilen kumaşlara ısıl işlemler uygulanmıştır.

Nitinol tele istenen bu özellikler yüksek işlem sıcaklıklarında kazandırılabildiğinden, tez kapsamında gerçekleştirilen ısıl işlemler üç boyutlu kumaş yapılarına uygulandığından ve bu sıcaklıklara sıradan tekstil lifleriyle çıkılması mümkün olmadığından, tel özlü hibrit ipliklerin manto kısmında yüksek termal dayanıma sahip karbon elyaf kullanılmıştır. Kumaş üretiminde kullanılan atkı ve diğer çözgü iplikleri için de aynı sebeplerden ötürü karbon elyaf tercih edilmiş, katlı ve bükümlü hale getirilerek kullanılmıştır.

Nitinol ve çelik tel kullanılarak üretilen üç boyutlu dokuma kumaş yapılarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla, referans numune olarak, yapısında tel bulundurmayan aynı örgü yapısındaki üç boyutlu kumaş numuneleri de tez kapsamında üretilmiştir. Bu sayede hem farklı tel cinslerinin kumaş yapısı içinde kullanılmasının kumaşın mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması, hem de hiç tel kullanılmayan kumaşa göre mekanik özellikleri ne derece değiştirdiğinin tespiti amaçlanmıştır.

Tez kapsamında üretilen hibrit iplikler ile kumaş numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme, darbe, kayma direnci testleri ile ısıl işlem görmüş nitinol teller için DMA analizinden faydalanılmıştır.

Nitinol ve çelik hibrit iplikler kullanılarak üretilen üç boyutlu dokuma kumaşlar için gerçekleştirilen mekanik testlerden elde edilen veriler derlenmiş ve her bir tel cinsi için hem kendi içlerinde hem de ayrı ayrı kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda tel içeren kumaş numunelerine ait sonuçlar referans numune ile de karşılaştırılarak, tel kullanımının etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan istatistik değerlendirmelerde tüm numuneler için çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Analizlerde tel kalınlığı, tel cinsi, iplik cinsi ve kumaş kanal yapısı gibi parametrelerin kumaşın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Böylelikle tez kapsamında düşük hızlı darbelere dayanıklı kompozit ön şekli olarak geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaş yapısının sonraki çalışmalarda kompozit takviye malzemesi olarak üretilebilmesi için en uygun tel cinsi, tel çapı ve kumaş kanal genişliği parametreleri belirlenmiştir.

İstatistik analizlerle de desteklenilen deneysel sonuçlara göre çelik tel kullanımının kumaşın mekanik özelliklerini nitinol tele kıyasla iyileştirdiği, nitinol tel içeren kumaşların maruz kaldığı ısıl işlemlerin kumaşın mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilediği, ince tel çapının ve dar kanallı kumaş yapısının kullanıldığı kumaş numunelerinin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

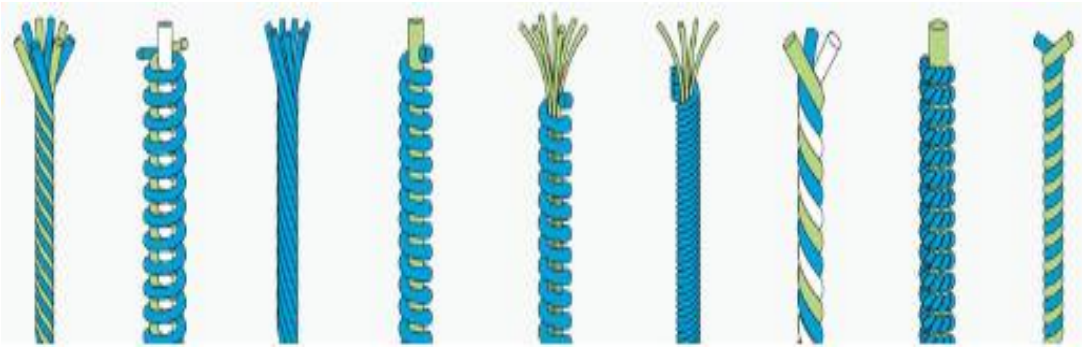
2. GENEL BİLGİLER

Tez konusu ile ilişkili olarak literatür 4 grup altında incelenmiş olup; bunlar (1) özlü/hibrit iplikler, (2) üç boyutlu dokuma kumaşlar, (3) tekstil takviyeli kompozitler ve (4) şekil hafızalı tekstiller şeklindedir.

Bu bölümde belirlenen bu dört grupla ilgili kısaca bilgi verilmiş ve daha önce yapılmış çalışmalara değinilmiştir.

2.1 Özlü/Hibrit İplikler

Özlü iplikler, iki farklı özellikteki bileşenin özelliklerinden aynı anda optimum ölçüde yararlanabilmek için geliştirilen, öz ve manto liflerinden oluşan hibrit bir iplik yapısıdır. (Celeb ve Dayık, 2009; Yılmaz, 2014; Ueng and Chen, 2001; Kaplan, 2016). Farklı sarım şekilleri ile üretilmiş özlü ipliklere ait şematik görünümler Şekil 2.1'de verilmektedir. Tez kapsamında üretilen iplik yapıları özlü ve hibrit iplik olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 2.1 Özlü ipliklere ait şematik görünümler (Agteks, 2019).

Bu ipliklerde öz kısmı, ipliğe yüksek mukavemet, boyutsal stabilite ile diğer mekanik ve fonksiyonel özellikleri sağlarken, manto kısmı ise ipliğe estetik görünüm, tutum ve konfor gibi özellikleri kazandırmaktadır (Celeb ve Dayık, 2009; Altaş ve Kadoğlu, 2009).

İpliğin merkezinde yer alan öz filament, kesikli lif veya elastan olabilmekte, manto kısmında kaplama görevi gören kesikli lifler kullanılmaktadır (Celeb ve

Dayık, 2009; Vuruşkan, 2010). Öz ve manto kısımları bir araya gelip kompozit bir iplik yapısı oluşturmaktadır (Yılmaz, 2014; Altaş ve Kadoğlu, 2009). Özlü iplik eğirme, bir filamentin etrafına kesikli liflerin bir kabuk gibi kaplanmasıyla yapılan işlem olarak tanımlanmaktadır (Çelik vd., 2009).

Özlü iplik yapısı farklı yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntemler ring iplik eğirme, friksiyon iplik eğirme, elektrostatik iplik eğirme, oyuk iğ yöntemi, örtülü (sarmalı) iplik eğirme, yapıştırma yöntemi ile iplik üretimi ve rotor iplik eğirme şeklindedir (Vuruşkan, 2010; Erez, 2011; Vuruşkan vd., 2013).

Tez kapsamında üretilen hibrit iplikler metal tel özlü olduğundan, sonraki bölümde tel özlü ipliklerle ilgili yapılmış çalışmalara değinilecektir.

2.1.1 Tel özlü ipliklerle ilgili yapılan çalışmalar

Literatürde, çelik tel başta olmak üzere bakır, nitinol, volfram gibi metal tellerin öz materyal olarak kullanıldığı birçok çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalarda metal özlü ipliklerin manto kısmında pamuk, poliester, poliamid, akrilik, rayon gibi lifler kullanılmakta ve üretilen hibrit ipliklerden elektromanyetik kalkanlama, ısıtma, antistatik özelliklere sahip fonksiyonel ve akıllı tekstiller üretilmektedir. Bu çalışmalarda tel özlü hibrit ipliklerden üretilen kumaşların buruşmazlık ve elektromanyetik kalkanlama özellikleri incelenmiştir (Vasile et al., 2011; Vasile et al., 2012; Altınok, 2016; Örtlek et al., 2012; Ueng and Chen, 2001; Cheng et al., 2003; Bedeloğlu et al., 2011; Bedeloğlu et al., 2012; Bedeloğlu, 2013; Telli et al., 2017; Asghar et al., 2016).

Vasile et al. (2011) tarafından yapılan çalışmada şekil hafızalı nitinol teller öz materyali olarak kullanılmış ve poliester elyaf ile sarılmıştır. Hibrit ipliklerin üretimi oyuk iğ makinesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada nitinol tel özlü hibrit ipliklerin kumaşların buruşmazlık özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Altınok (2016) doktora tezinde, 0,03 mm tungsten telinin etrafına pamuk, poliester ve naylon liflerinin sarılması ile kompozit iplik üretmiştir. İplik üretiminde ring iplik ve büküm makineleri kullanılmıştır. Isıtıcı kumaş üretiminde

kullanılan ipliklerin kopma yükü ve kopma uzaması testleri sonucunda iplik özünde tel kullanımının iplik özelliklerini olumlu etkilediği, kopma yükü ve kopma uzaması değerlerinde önemli artış sağladığı belirlenmiştir.

Örtlek et al. (2012) çalışmasında iletken hibrit iplikler üretmiş ve dokuma kumaş üretiminde atkı ve çözgü ipliği olarak kullanmıştır. Hibrit ipliklerin üretiminde oyuk iğ kaplama makinesi kullanılmış, 0,035 mm çelik tel etrafına 300 tur/m bükümle S yönünde poliester filament sarılmıştır. Çalışmada iletken hibrit ipliklerin farklı yön ve sıklıklarda yerleştirilmesi ile üretilen dokuma kumaşların elektromanyetik kalkanlama özellikleri araştırılmıştır.

Lou (2005) çalışmasında ring iplik makinesinde, bakır ve paslanmaz çelik telleri öz; rayon ve poliester/rayon fitili manto materyali olarak kullanarak hibrit iplikler üretmiştir. Farklı öz ve manto materyali kullanılarak üretilen bu ipliklerde, materyal, iplik numarası ve büküm parametrelerinin mukavemet ve iplik tüylülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Literatürde metal tel özlü hibrit ipliklerin elyaf takviyeli kompozit yapılarda kullanımına ilişkin çalışmalara da rastlanmıştır (Perumalraj et al., 2010; Ashir et al., 2016; Ashir et al., 2019).

Ashir et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada Dref 2000 friksiyon eğirme teknolojisi ile nitinol tel ve nitinol telin yanı sıra E-cam filament ve polipropilen fitillerin öz, kesikli E-cam ve poliprofilen elyaf fitillerin kabuk materyal olarak kullanıldığı dört farklı hibrit iplik yapısı üretilmiş, bu ipliklerin gerilme ve kayma özellikleri incelenmiştir. Nitinol tele ek olarak öz kısmında cam fitil kullanılan hibrit ipliklerin kayma testlerinden elde edilen düşük sonuçlar, termal aktivasyon sonrasında hibrit ipliğin kompozit içinde daha rahat hareket ettiğini gösterdiğinden, uyarlanabilir kompozitler için önerilmiştir.

Farklı kalınlıklarda bakır ve paslanmaz çelik tel ile 650 denye inceliğindeki cam filamentin özde, pamuk ve poliester elyafın manto kısmında kullanıldığı bir başka çalışmada, hibrit iplikler iki ve üç katlı olarak Dref II ve ring iplik eğirme makinelerinde üretilmiştir. Üretilen hibrit ipliklerden kompozit ön şekli olarak

kullanılmak üzere bezayağı, dimi ve saten konstrüksiyonlarında dokuma kumaşlar üretilmiştir. Kumaşlara uygulanan testler sonrasında atkı ve çözgü yönlerinde gerçekleştirilen çekme testlerinin sonuçlarında önemli farklar bulunduğu, eğilme rijitliği ve modülünün öz materyal içeriğine bağlı olarak arttığı belirlenmiştir (Perumalraj et al., 2010).

2.2 Üç Boyutlu Dokuma Kumaşlar

Üç boyutlu dokuma kumaşlar, iplik veya kumaş tabakaları tarafından oluşturulan kalınlıkları yönünde; belirli bir boyuta sahip olan yapılardır (Chen et al., 2011; Gürkan Ünal, 2012; Korkmaz, 2014).

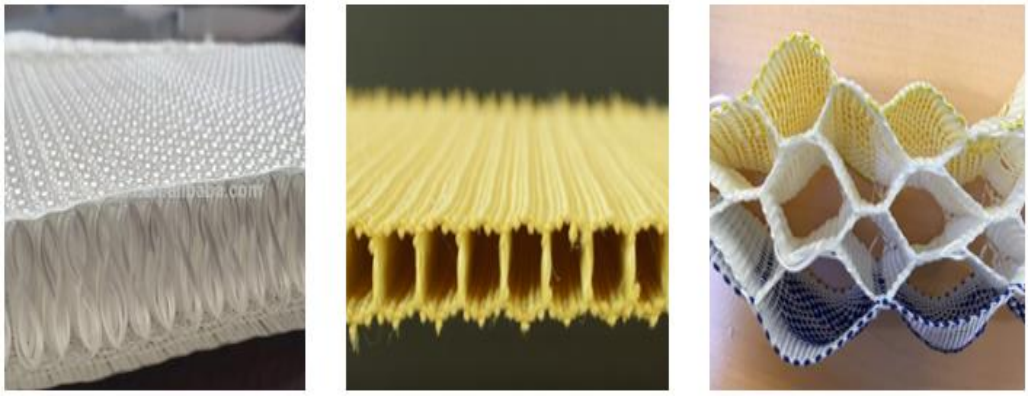
Bu açıdan değerlendirildiğinde aslında tüm kumaşların teknik olarak üç boyuta sahip olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte kumaşlar farklı şekillerde kategorize edilmektedir. Khokar (1996) kumaşları 2, 2,5 ve 3 boyutlu olarak gruplandırmıştır (Şekil 2.2). Buna göre:

- 2 boyutlu (2D) kumaşlar ipliklerin tek bir düzlemde,
- 2,5 boyutlu (2,5D) kumaşlar ipliklerin karşılıklı iki dik düzlemde,
- 3 boyutlu (3D) kumaşlar ise ipliklerin birbirine dik üç düzlemde yerleştiği kumaşlar olarak tanımlanmıştır (Khokar, 2001; Gokarneshan and Alagirusamy, 2009).

İpliklerin birbirine üç dik düzlemde yerleştiği üç boyutlu kumaşlarda, istenen yapıyı elde etmek için üç iplik seti kullanılması bir zorunluluk değildir. İki iplik seti kullanılarak üç boyutlu bir kumaş üretilebileceği gibi, beş iplik seti de kullanılabilmektedir.

Şekil 2.2 Kumaşların sınıflandırılması (Khokar, 2001).

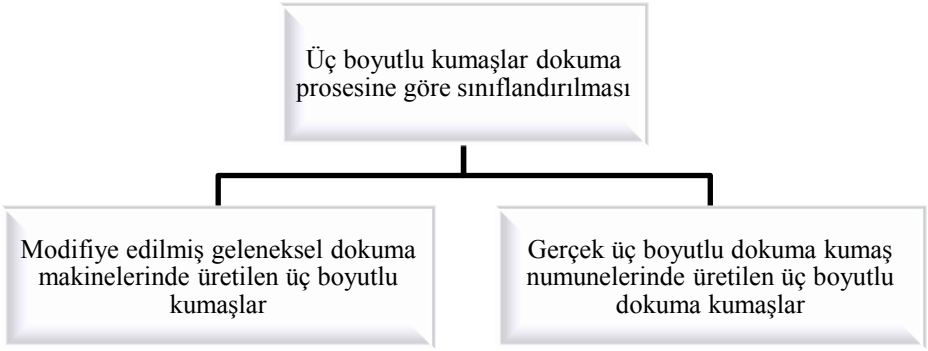
Üç boyutlu kumaşlar diyagonal saç örgüsü (Gündoğan, 2010; Potluri et al.,2008; Bilişik, 2013), örme (Gündoğan, 2010; Dorin et al., 2010; Hong et al., 1994) ve dokusuz yüzey teknikleri (Khokar, 2002; Khokar, 2013; Bilişik et al., 2016) ile üretilmekte, ancak kompozit yapıları için daha yüksek mukavemet değerlerine sahip kumaşların üretildiği dokuma tekniği tercih edilmektedir (Hearle and Chen, 2009; Korkmaz, 2014). Farklı üç boyutlu dokuma kumaş yapıları Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Üç boyutlu dokuma kumaş yapılarına örnekler.

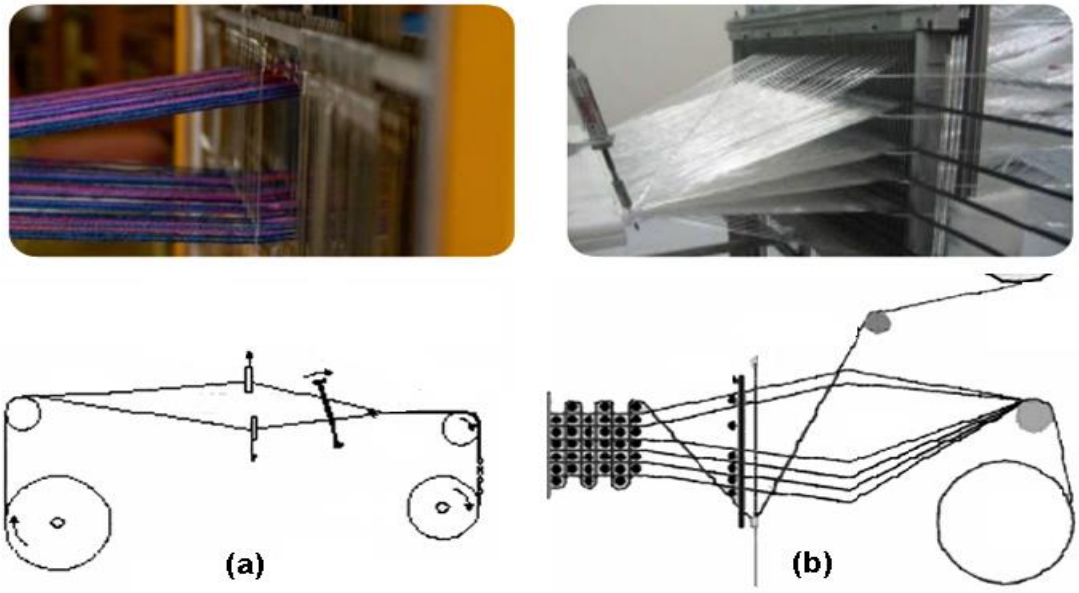
Üç boyutlu dokuma kumaşlar dokuma prosesine ve kumaş yapısına göre iki grupta incelenmektedir. Dokuma prosesine göre yapılan gruplandırmada üç boyutlu kumaşların üretim yöntemleri baz alınmaktadır (Şekil 2.4).

Üç boyutlu dokuma kumaşlar, iki boyutlu kumaşların üretildiği modifiye edilmiş geleneksel dokuma makinelerinde ve üç boyutlu dokuma kumaş makinelerinde üretilmektedir (Korkmaz, 2014; Khokar, 2001; Gokarneshan and Alagirusamy, 2009; Gündoğan, 2010).



Şekil 2.4 Üç boyutlu dokuma kumaşların üretim yöntemleri.

Geleneksel dokuma makineleri ile üç boyutlu kumaşlar üretilebilse de, işlemin kendisi üç boyutlu dokuma prosesi olarak değerlendirilmemektedir (Khokar, 2001). Çünkü iki boyutlu dokumada (a) tek yönlü ağızlık açımı ve (b) üç boyutlu dokumada ise iki yönlü ağızlık açımı kullanılmaktadır (Şekil 2.5). Bu nedenle, üç boyutlu kumaşlar dokuma prosesine göre; üç boyutlu dokuma makinelerinde dokunmuş üç boyutlu kumaş ve iki boyutlu dokuma makinelerinde dokunmuş üç boyutlu kumaş olarak gruplanmaktadır (Gokarneshan and Alagirusamy, 2009; Behera and Mishra, 2008). İki ve üç boyutlu dokuma proseslerine ilişkin karşılaştırma tablosu ise aşağıda verilmektedir (Tablo 2.1).

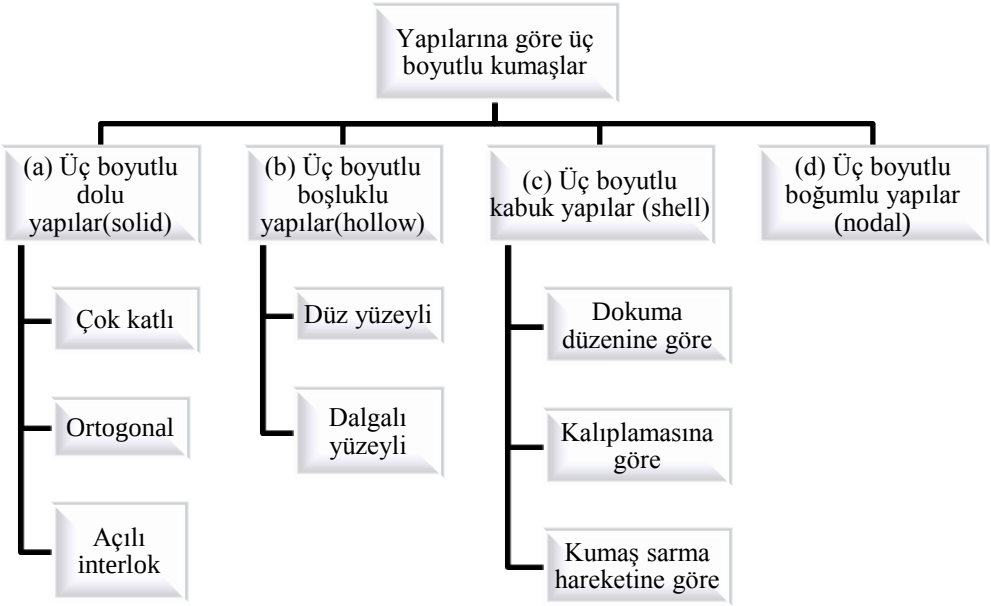


Şekil 2.5 Tek yönlü ağızlık açımı (a) ve çift yönlü ağızlık açımı (b) görsel ve şematik gösterimleri.

Tablo 2.1 İki ve üç boyutlu dokuma proseslerinin karşılaştırılması (Khokar, 2013).

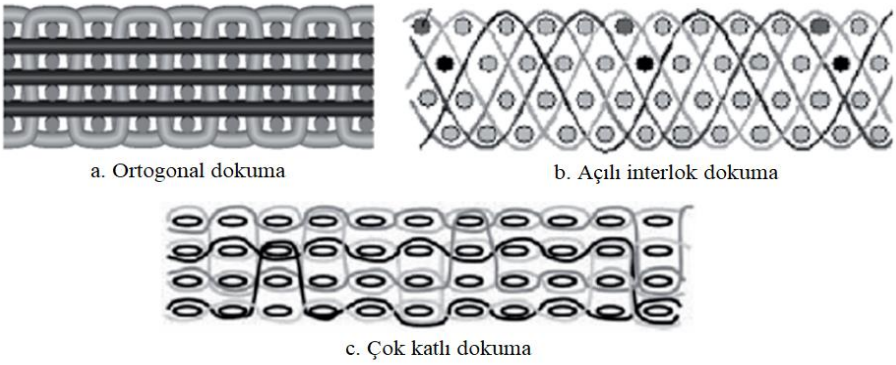
Özellik	**Proses**	
	İki Boyutlu Dokuma	**Üç Boyutlu Dokuma**
Kullanılan iplik grup sayısı	2	3
Kullanılan iplik gruplarının isimleri	Atkı ve çözgü	Çözgü, dikey atkı, yatay atkı
Ağızlık tipi	Tek yönlü	İki yönlü
Çözgü/eksenel iplik değişim yönü	Kumaş kalınlığı yönünde (aşağı ve yukarı)	*Kumaş eninde (sağa ve sola) *Kumaş kalınlığı yönünde (aşağı ve yukarı)
Çözgü/eksenel iplik sağlama düzeni	Çoklu katmanlar; iplikler yan yana hareketi ile oluşur	Çoklu katmanlar; ipliklerin atkı ve çözgü yönündeki hareketi ile oluşur
Ağızlık yönü	Yatay düzlemde	Yatay ve dikey düzlemde
Ağızlık sayısı	Tek	Yatay ve dikey yönde birden çok
Yatırılan atkı/bağlantı ipliği sayısı	Tek	Ağızlık sayısına göre tek/birden çok
Üretilen kumaş tipleri	2D, 2.5D, 3D	3D

Üç boyutlu dokuma kumaşlar yapılarına göre ise (a) üç boyutlu dolu yapılar (solid), (b) üç boyutlu boşluklu yapılar (hollow), (c) üç boyutlu kabuk yapılar (shell) ve (d) üç boyutlu boğumlu yapılar (nodal) olarak sınıflandırılmaktadır (Behera and Mishra, 2008; Chen et al., 2008a; Korkmaz, 2014). Üç boyutlu kumaşların yapılarına göre sınıflandırması Şekil 2.6'da verilmektedir.



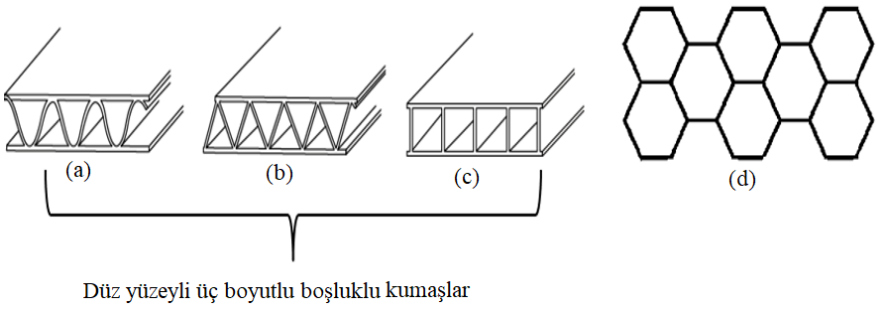
Şekil 2.6 Üç boyutlu kumaşların yapılarına göre sınıflandırılması.

Üç boyutlu dolu kumaş yapıları kendi içlerinde (a) çok katlı, (b) ortogonal ve (c) açılı interlok olarak üçe ayrılmaktadır. Geleneksel iki boyutlu dokuma makinelerinin modifiye edilmesi sonrasında üretilebilen bu yapılar Şekil 2.7'de verilmektedir (Behera and Mishra, 2008; Gürkan Ünal, 2012).

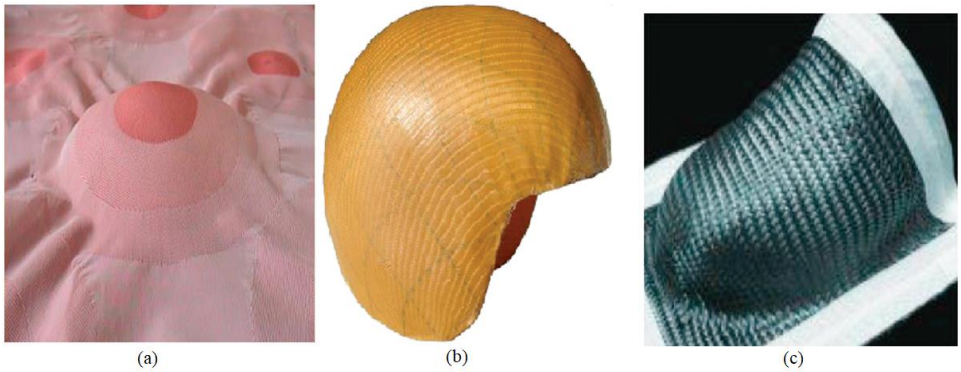


Şekil 2.7 Yaygın kullanılan üç boyutlu dolu kumaş yapıları: (a) Ortogonal dokuma, (b) Açılı interlok dokuma, (c) Çok katlı dokuma (Gürkan Ünal, 2012).

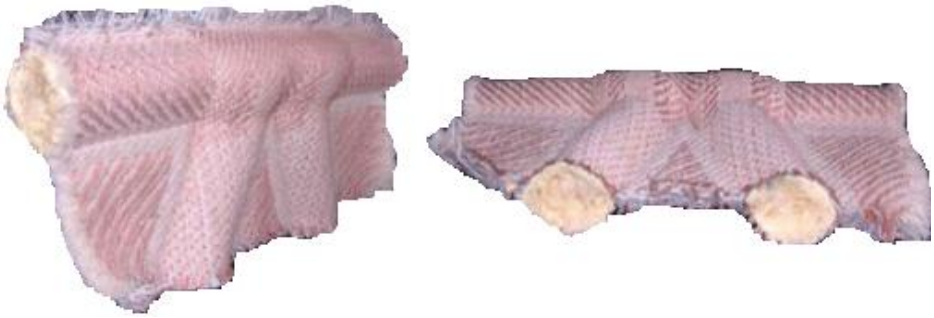
Üç boyutlu boşluklu kumaş yapıları düz ve dalgalı/düzgünsüz yüzeyli olmak üzere iki çeşittir (Chen and Wang, 2006). Üç boyutlu kabuk yapıları ise (a) dokuma düzenine, (b) kalıplamasına ve (c) kumaş sarma hareketine göre gruplanmaktadır (Behera and Mishra, 2008; Chen et al., 2016). Üç boyutlu boşluklu kumaş yapısına ait şematik gösterim ile kabuk ve boğumlu kumaş yapılarına ait görseller sırasıyla Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.8 Üç boyutlu boşluklu kumaş yapıları şematik gösterimi: (a) İkizkenar yamuk, (b) Üçgen, (c) Dikdörtgen ve (d) Hücresel şekilli boşluklu kumaşlar (Chen et al., 2016; Chen and Wang, 2006).



Şekil 2.9 Üç boyutlu kabuk kumaş yapıları: (a) Farklı dokuma kombinasyonları ile üretilen kabuk kumaş, (b) Kalıplanarak başlık haline getirilmiş kabuk kumaş, (c) Farklı kumaş çekme hareketleri ile elde edilen kabuk kumaş yapıları (Chen et al., 2016).



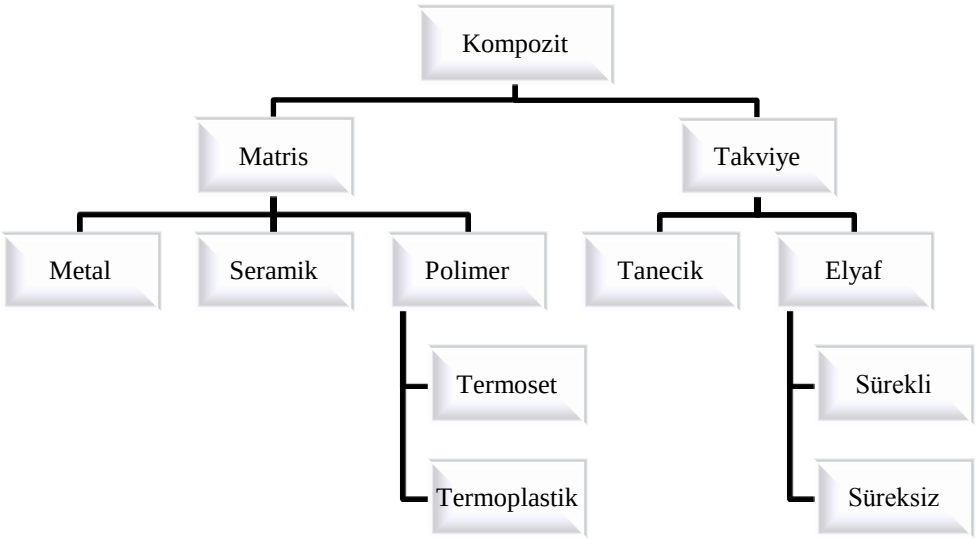
Şekil 2.10 Üç boyutlu boğumlu dokuma kumaş yapısı.

Bu tez kapsamında üretilen kumaşlar dokuma prosesine göre iki boyutlu dokuma makinesinde üretilen üç boyutlu kumaşlar kategorisine girmekte olup, kumaş yapısına göre ise çift katlı ve boşlukludur.

Yapısal bütünlük, hafiflik ve yüksek performans gibi özellikleri nedeniyle üç boyutlu dokuma kumaş yapılarının başlıca kullanım alanı kompozitlerdir. Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde de genel anlamda kompozitler üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölümde önce tekstil kompozitleri ile kısaca bilgi verilerek, üç boyutlu dokuma kumaşların kompozitlerde kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalara değinilecektir.

2.3 Tekstil Takviyeli Kompozitler

Matris ve takviye malzemesi adı verilen farklı türde iki ya da daha çok bileşenin bir araya gelmesi ile üretilen malzemeye kompozit malzemeler adı verilmektedir. Nihai kullanım alanına göre istenen özelliklere bağlı olarak, çeşitli matris ve takviye malzemeleri uygun koşullarda ve istenen oranlarda birleştirilmekte, bu sayede elde edilen kompozit yapı içerdiği matris ve takviye malzemelerin en iyi özelliklerine sahip olmaktadır (Şekil 2.11). Kompozit malzemelerin bu özelliği, farklı alanlardaki özel uygulamalar için çok farklı özellikte yeni kompozit malzemelerin tasarlanmasını ve üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede yüksek dayanım, rijitlik, yüksek yorulma dayanımı, aşınma direnci, darbe direnci, enerji absorbe edebilme yeteneği, yüksek sıcaklık kapasitesi, korozyon direnci, iyi termal ve ısıl iletkenlik, düşük ağırlık gibi farklı özelliklere sahip kompozitler üretilebilmektedir (Altaş ve Yılmaz, 2017).



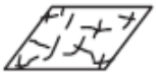
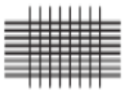
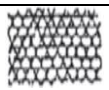
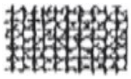
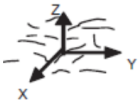
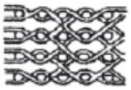
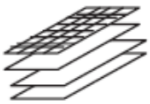
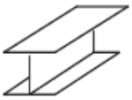
Şekil 2.11 Kompozitlerde kullanılan malzeme türleri (Kandaş,2018).

Takviye malzemesi olarak farklı formlara ve hammaddelere sahip tekstil materyallerinin kullanıldığı kompozitler tekstil takviyeli kompozitler ya da diğer bir adı ile tekstil kompozitleri olarak adlandırılmaktadır. Tablo 2.2'de Scardino tarafından takviye sistemi ve tekstil yapısına göre dört ayrı seviyede sınıflandırılan tekstil materyalleri ile Tablo 2.3'de Fukuta ve Aoki tarafından tekstil malzemesinin yapısı, boyutu ve yönüne göre yapılan sınıflandırma sistemi görülmektedir (Chen et al., 2011).

Tablo 2.2 Scardino'nun sınıflandırmasına göre kompozitlerde kullanılan tekstil malzemeleri (Chen et al., 2011).

Seviye	Takviye sistemi	Tekstil yapısı	Lif uzunluğu	Lif oryantasyonu	Lif kesişmesi
I	Ayrık	Kesik lif	Kesikli	Kontrolsüz	-
II	Doğrusal	Filament iplik	Kesiksiz	Doğrusal	-
II	Tabakalı	Basit kumaş	Kesiksiz	Düzlemsel	Düzlemsel
IV	Bütünleşmiş	Gelişmiş kumaş	Kesiksiz	Üç boyutlu (3D)	Üç boyutlu

Tablo 2.3 Fukuta ve Aoki'ye göre tekstil takviyelerinin sınıflandırılması (Chen et al., 2011).

Boyut		**Eksen**				
		Eksensiz	**Tek eksenli**	**Çift eksenli**	**Üç eksenli**	**Çok eksenli**
Bir boyutlu (1D)			Fitil iplik			
İki boyutlu (2D)		 Kesik lifler	Ön emdirme tabakası	 Düzlemsel dokuma	 Üç eksenli dokuma	 Çok eksenli dokuma
Üç boyutlu (3D)	**Doğrusal element**	 Keçe	Üç boyutlu diyagonal örgü	 Çok katlı dokuma	Üç eksenli üç boyutlu dokuma	Çok eksenli üç boyutlu dokuma
	Düzlemsel element		 Tabaka tipi	 H veya I kiriş	Bal peteği tipi	

Tekstil materyali olarak çoğunlukla tek yönlü elyaf takviyeleri ve iki boyutlu dokuma kumaş formlarının kullanıldığı tekstil kompozitleri geleneksel malzemelerden daha dayanıklı ve hafif olmaları nedeniyle birçok alanda tercih edilmektedir. Bununla birlikte daha gelişmiş özellikler için yapısal bütünlük ve lif devamlılığı sağlayan üç boyutlu kompozit takviyeleri geliştirildiği görülmektedir (Chen et al., 2008a).

İki boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin düşük darbe direnci, darbe altında delamine olması gibi nedenlerle geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozitler ilk kez 1960'lı yıllarda uçakların fren tertibatlarında kullanılan pahalı metal alaşımlar yerine kullanılmıştır. Üç boyutlu dokuma takviyeli kompozitlerin, iki boyutlu kumaş ve tek yönlü (UD) elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla avantajları, farklı üç boyutlu kompleks yapıların

geliştirilebilirliği, bu yapıların sahip oldukları yüksek darbe direnci ve enerji absorbe kabiliyetidir (Başal Bayraktar et al., 2018; Gündoğan vd., 2009; Dash and Behera, 2015; Behera and Dash, 2015).

Farklı yapıda üç boyutlu dokuma kumaşların kullanımı nihai ürünün de farklı özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Örneğin üç boyutlu boşluklu dokuma kumaş çeşidi olan bal peteği şekilli hücresel yapı kompozit takviyesi olarak kullanıldığında çok hafif, enerji absorbe edici, hacimli ve sağlam bir kompozit yapı elde edilirken, üç boyutlu dolu dokuma kumaş yapısı ile takviye edilen kompozit kalınlık ve delaminasyonu önleme yetisine sahiptir (Chen and Wang, 2006; Chen et al., 2008a).

Kompozit yapılarda takviye malzemesi olarak kullanılan tekstil materyallerinin, kompozit yapı içinde kullanıldığı formun yanı sıra hammaddesinin de kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Üstün mekanik özelliklere sahip yüksek performanslı lifler kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir.

Düşük yoğunluk, yüksek çekme modülü ve mukavemeti, düşük termal genişleme katsayısı gibi özelliklere sahip olan karbon elyaf da yüksek performanslı bir lif olup 3000 °C'nin üzerinde termal dayanım göstermektedir (Altaş ve Yılmaz, 2017). Tez kapsamında kompozit ön şekli olarak geliştirilen tel içeren üç boyutlu dokuma kumaşların üretiminde de termal dayanımı sebebiyle karbon elyaf tercih edilmiştir.

2.3.1 Üç boyutlu dokuma kumaşların kompozitlerde kullanımı ile ilgili çalışmalar

Bu bölümde üç boyutlu dokuma kumaşların kompozitlerde kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Yapılan çalışmalarda üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozitlerinin genel olarak mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşıldığı ve gerçekleştirilen mekanik testlerle bu özelliklerin araştırıldığı belirlenmiştir (Umer et al., 2016; Behera and Dash, 2015; El-Dessouky and Saleh, 2018; Saleh and Soutis, 2017; Conway, 2011; Stig, 2012; Justusson et al.,2012).

Başal Bayraktar et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada üç boyutlu boşluklu bir dokuma kumaş olan dört katmanlı balpeteği kumaş yapısı poliester filament kullanılarak numune dokuma tezgahında üretilmiştir. Dokuma sonrası kumaşların bir kısmının yapısındaki hücrelere politetrafloretilen (PTFE) çubuklar yerleştirilerek açılmış ve kumaşa bu haliyle epoksi reçine uygulanmıştır. Diğer kumaşlar ise, karşılaştırma amacıyla, hücreleri açılmaksızın kapalı formda kompozit haline getirilmiştir. Elde edilen kompozit numuneleri için ağırlık düşürme darbe test cihazında düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda kapalı hücreli kompozit yapının darbe kuvveti nedeniyle kırıldığı ve darbeye direnç gösteremediği, açık hücreli kompozit numunesinde ise küçük bir alanda darbe hasarı meydana geldiği ve yapının bir miktar darbe enerjisi absorbe edebildiği sonuç olarak paylaşılmıştır.

Gündoğan vd., (2009) üç boyutlu dokuma bir yapı olan sandviç dokuma kumaş ile takviye edilmiş kompozit yapıları üretmiş ve bu yapıların mekanik özellikleri gerçekleştirilen çekme testleri ile analiz edilmiştir. Kumaş üretiminde hammadde olarak E-cam elyaf kullanılmış, kadife dokuma tekniği ile sandviç kumaş üretilmiştir. Çalışmada matris malzemesi olarak vinilester reçine tercih edilmiş, el yatırma tekniği ile kompozit elde edilmiştir. Kompozit yapının sertleşmesinden sonra alt ve üst kumaş yüzeyi arasındaki boşluklara ara malzeme olarak poliüretan köpük uygulanmıştır. Çalışma sonucunda kompozit yapılarda kalınlık artışının kompozitin kopma uzunluğunu ve kopma yükünü arttırdığı, atkı yönünde yapılan testlerden elde edilen verilerin çözgü yönüne kıyasla daha yüksek olduğu, eklenen orta malzemesi olan poliüretan köpüğün, kompozit yapıdaki reçine hacimsel oranını azaltması nedeniyle mukavemeti arttırdığı ancak rijitliğinden ötürü uzamayı azalttığı belirtilmiştir.

Dash and Behera (2015), E-cam elyafı tek yönlü (UD), iki boyutlu kumaş ve ortogonal, açılı interlok, çok katmanlı çözgü interlok gibi üç boyutlu kumaş formlarında kompozit takviyesi olarak kullanmış, üretilen kompozitlerin düzlemsel gerilme, sıkıştırma, eğme ve darbe direnci, kesilme testleri ile dinamik mekanik analizini (DMA) gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda üç boyutlu dokuma kumaş ile takviye edilen kompozitlerin tek yönlü ve iki boyutlu kumaş ile

takviye edilen kompozitlere kıyasla üstün darbe direnci, kesilme direnci ve DMA davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Chen et al. (2008b) çalışmasında hücre açılma açısı, hücre boyutu, hücre duvar oranı, hücre yoğunluğu gibi farklı yapısal parametreler kullanarak 14 farklı üç boyutlu bal peteği kumaş yapısı üretilmiş ve bu kumaşlara, yapısal parametrelerin darbe davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla darbe testleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, bal peteği kompozit yapılarda hücre açılma açısının önemli olduğu; açı arttıkça daha az enerji absorbe edildiği ve kuvvet sönümlendiği, hücre boyutunun kuvvet sönümlemede daha etkili olduğu sonuçları paylaşılmıştır.

2.3.2 Karbon elyaf takviyeli kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar

Literatürde karbon elyaf takviyeli kompozitlerle ilgili yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarında, karbon elyaf farklı konstrüksiyonlarda dokuma kumaş ya da elyaf formunda kompozit yapısı içinde kullanılmış, farklı katman sayısı ve yerleştirme açısı gibi parametrelerin kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna göre kompozitlerin gerilme, bükülme ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri üzerinde kumaş konstrüksiyonun, elyaf yerleşim yönünün ve katman sayısının etkili olduğu belirlenmiştir (Rahmani et al., 2014; Yanen ve Solmaz, 2016; İmak vd., 2016).

Literatürde rastlanan bir çalışmada karbon elyaf kumaş takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin aramid ve cam elyaf kumaş takviyeli kompozitler ile karşılaştırılması amacıyla çekme testi gerçekleştirilmiş, karbon elyaf takviyeli kompozitin daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu belirtilmiştir (Öztürk, 2015).

Karbon elyafın yanı sıra alüminyum ile takviye edilen hibrit kompozitlerin bükülme ve darbe özelliklerinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise gerilme mukavemetinin belirli bir seviyeye kadar arttığı, sonrasında ise metal-elyaf

katmanlarındaki çeşitlilik nedeniyle düştüğü belirlenmiştir (Tamilarasan et al., 2015).

Öztürk (2015) çalışmasında, aramid elyaf kumaş, cam elyaf kumaş ve karbon elyaf kumaş ile takviye edilen kompozit yapıların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla çekme testi gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre üç farklı elyaf kumaş takviyesi içinde aramid elyaf kumaş takviyeli kompozitin çekme mukavemeti ve kopma uzamasının en yüksek olduğu, karbon elyaf kumaşı takviyeli kompozitin ise en yüksek elastisite modülüne sahip olduğu belirlenmiştir.

2.4 Şekil Hafızalı Tekstiller

2.4.1 Şekil hafızalı malzemeler

Şekil hafızalı malzemeler, kalıcı şeklini hafızasına alan ve deforme edildikten sonra bir dış uyaran etkisine maruz kaldığında, hafızasındaki orijinal şekle geri dönebilen malzemeler ailesindendir. Şekil geri dönüşümüne sebep olan dış uyaran sıcaklık, manyetik alan, elektrik akımı veya farklı bir kimyasal olabilmektedir.

Şekil hafızalı malzemeler alaşım ve polimerler olarak iki grupta incelenebilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaş yapısında kullanılan şekil hafızalı malzemeler şekil hafızalı alaşım olup, lif veya tel formundaki bu malzemeler, istenen hafıza özelliklerini kazanması için programlanarak geleneksel tekstil lifleri ile birlikte kompozit ipliğe dönüştürülmekte, daha sonra örme veya dokuma yöntemleri ile kumaş haline getirilebilmekte veya direkt tekstil ürünü içine entegre edilebilmektedir (Altaş ve Yılmaz, 2016).

Şekil hafızalı malzemeler sahip oldukları özellikleri sebebiyle, günümüzde birçok akıllı tekstil uygulamasında estetik görünümü ve fonksiyonel özellikleri geliştirmek amacı ile tercih edilmektedir.

Corpo Nove firmasının termal şekil hafızalı telleri bir kumaş gibi kullanarak ürettiği, oda sıcaklığı birkaç derece arttığında kolları kısalan gömlek (Gupta, 2008), firmaların Diaplex®, Oricalco® ve SmartSkin™ gibi ticari isimler ile ürettiği termal şekil hafızalı materyallerden dokunmuş kumaşlar (Coşkun ve Oğulata, 2008) akıllı tekstil uygulamalarına verilebilecek örneklerdendir.

Tez kapsamında üç boyutlu dokuma kumaş üretiminde kullanılacak olan nitinol teller tekstil materyalleri içine çeşitli şekillerde entegre edilebilmektedir. Kimi çalışmalarda ısı etkisiyle düz form alarak kumaş buruşukluğunu azaltmada kullanıldığı, kimi çalışmalarda elektrik akımı yardımıyla bir kas gibi kasılıp gevşeme hareketi yapabildiği, kimi çalışmalarda ise estetik amaçlarla kullanıldığı görülmektedir (Altaş and Yılmaz, 2016; Vasile et al., 2010-2012; Güney et al., 2009; Dede, 2013; Chan Vili, 2007).

Şekil hafızalı malzemelerin ilk teknik tekstil uygulamaları ise filtrasyonda ve damarlar içi stentlerde gerçekleştirilmiştir (Bedeloğlu, 2011). Bunun yanı sıra medikal tekstillerde kompresyon bandajı üretiminde kullanım alanı bulmakta, literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar bulunmaktadır (DeBaie et al., 2009; Moein and Menon,2014)

Tez konusuna ilişkin olarak, nitinol tellerin teknik amaçlı kullanımlarına bakıldığında ise literatürdeki çalışmaların şekil hafızalı tellerin kompozitlerde kullanımı üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle sonraki bölümde nitinol telin kumaşların veya kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmesine yönelik olarak kullanıldığı çalışmalara yer verilecektir.

2.4.2 Nitinol tel takviyeli kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar

Nitinol telin kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanımı ile ilgili olarak yapılan literatür taramasında, aktüatör özellikte NiTi tellerin kullanımı ile kompozit yapıya şekil hafıza özelliği kazandırıldığı (Wu et al., 2013), darbe sonrası matriste oluşan çatlağın ısıl işlem sayesinde aktüatör telin kasılarak kısalması sonucu telin matrise uyguladığı güç sayesinde kapandığı (Misra, 2013; Hamada et al., 2003) çalışmalara rastlanmıştır. Aktüatör özellikte NiTi tellerin

kompozit yapısı içine alternatif bir yöntem kullanarak entegre edildiği bir çalışmada aktif kompozit yapıları üretilmiş; soğuk işlenmiş, tavlanmış ve eğitilmiş NiTi tellerin kompozitin burkulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir (Araujo et al., 2008). Başka bir çalışmada ise TiNi lif entegre edilmiş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma davranışları araştırılmıştır (Jang and Kishi, 2006).

Düz halde tavlanmış süperelastik özellikteki NiTi tellerin kompozit yapılarında kullanıldığı çalışmalarda ise kompozitlerin mekanik özelliklerinin NiTi takviyesi ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Park et al., 2004; Zhang et al., 2006; Zhang et al., 2007; Ni et al., 2007; Pappada et al., 2009a). Rastlanan çalışmaların birinde NiTi alaşım teller kısa lif formuna getirilerek epoksi kompozitler üretilmiş ve kompozitlerin dinamik özellikleri DMA ile ölçülmüştür. NiTi lifi eklenmesinin kompozitin titreşim özelliklerini iyileştirdiği, en iyi sonuca % 3-5 oranında NiTi eklenmesi ile ulaşıldığı belirtilmiştir (Ni et al., 2007). Bir diğer çalışmada ise tek yönlü tel ve dokuma formunda tel tabakası kullanılarak iki farklı kompozit yapısı üretilmiş, çalışma sonucunda doğru ön gerilim ve doğru oranda SMA tel kullanımının kompozitin titreşim ve sönümleme özelliklerini iyileştireceği paylaşılmıştır (Zhang et al., 2006). Takviye malzemesi olarak cam elyaf kumaş ve matris malzemesi olarak epoksi kullanılan çalışmada NiTi entegre edilmiş hibrit kompozitlerin gerilme, sıkıştırma, kayma dayanımları araştırılmış, kompozit yapıya dahil edilen NiTi'nin boyuna yönde sıkıştırma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir (Gupta et al., 2017).

Literatürde nitinol tel kullanımının yapısına dahil olduğu kompozitin darbe dayanımını arttırdığı ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır. Süperelastik özellikteki şekil hafızalı alaşım tellerinin içyapısında meydana gelen faz değişimleri nedeniyle yüksek kopma gerilmesi ve geri dönebilir elastik gerilme özelliklerine sahip olması, NiTi liflerin diğer elyaflardan farklı olarak daha fazla gerilme enerjisini absorbe etmesini sağlamaktadır (Pappada et al., 2009b). Ayrıca NiTi tellerin yüksek dayanımlı metallerden daha düşük yoğunlukta olmasının daha fazla enerjiyi absorbe edebilmelerinde etkili olduğu bilinmektedir. Klasik bir kompozit yapısına şekil hafızalı alaşım teli eklenmesi kompozitin özelliklerini geliştirmekte ve hibrit kompozit darbe yüklemelerine karşı daha güçlü hale gelmektedir (Yang et al., 2005).

Foreman'ın (2007) çalışmasında kompozit yapısına düşük oranlarda (% 3-6) NiTi tel eklenmiş ve kompozitin absorbe ettiği darbe enerjisi % 23-41 civarında arttırılmıştır. Geliştirilen bu yapının yıldırım düşmelerine karşı darbe koruma özelliği geliştirilmiş kompozit yapılarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada kompozit yapıya eklenen NiTi tel kullanımının düşük hızlı darbe karşısında büyük miktarda enerji absorblamanın yanı sıra, kompozitin içyapısında oluşacak delaminasyonun yayılmasını azalttığı belirtilmiştir (Pinto and Meo, 2014).

NiTi telin matris malzemesi olarak kullanıldığı bir çalışmada ise, elyaf takviyeli kompozit içinde NiTi kullanımının polimer matrisin sönümleme kapasitesini arttırarak darbe özelliklerini iyileştirdiği paylaşılmıştır (Raghavan, 2010).

Chang and Lee (2011), çalışmasında farklı sayılarda tel içeren TiNi tel/epoksi kompozitlerin düşük frekanslı sönümleme özellikleri araştırılmış ve daha fazla sayıda TiNi tel içeren kompozitlerin daha yüksek depolama modülü ve daha fazla sönümleme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada kompozitin sönümleme özellikleri üzerinde tavlamanın etkisi de incelenmiş, kompozitlerin sönümleme özelliklerinin tavlama öncesi ve sonrasında anlamlı bir değişiklik göstermediği belirtilmiştir.

Nitinol ağ yapısının teknik kumaş içinde kullanıldığı bir çalışmada, NiTi tellerin dokumaya adapte edilebilirliği çelik tel ile karşılaştırılmış ve malzemenin kompozit yapılar içinde kullanılabilirliği konusunda çalışılmıştır. NiTi tellerin dokumaya uyumu çelik tellerden daha iyi bulunmuştur (Boussu ve Bailleul, 2002). Bir başka çalışmada poliamid, elastan iplik ve NiTi tel kullanılarak yuvarlak örme makinesinde hibrit tekstil yapıları elde edilmiştir. DMA cihazı ile kumaşların termomekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kumaşların iyi elastik özellikler gösterdiği, NiTi tellerin varlığının malzemenin sertliğini arttırdığı, sabit yükleme altında gerilme geri dönüş testlerinde kumaşların sadece düşük kuvvetler altında iyi özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir (Villa et al., 2009).

Aurrekoetxea et al. (2011) tarafından yapılan çalışmada düzlem dışı darbeye karşı hasar toleransı düşük karbon elyaf kompozitlerin darbe dayanım özelliklerini geliştirmek için süperelastik şekil hafızalı alaşım telleri kullanılmış ve tellerin absorbe edilen enerji açısından pozitif etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Pappada et al. (2009b) çalışmalarında tel içermeyen, NiTi tel ve çelik tel içeren karbon ve cam elyaf takviyeli hibrit kompozitler üretilmiş ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak NiTi tel sayısının darbe toleransını etkilediği, daha fazla tel entegre edilen kompozitlerin darbe performansı açısından daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Ayrıca NiTi tellerin cam elyaf takviyeli kompozitlerin hasar toleransını iyileştirirken, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin hasar toleransını kötüleştirdiği, bununla birlikte çelik tellerin NiTi tellerin aksine karbon elyaf takviyeli kompozitler üzerinde olumlu etkisinin olduğu paylaşılan diğer sonuçlardır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

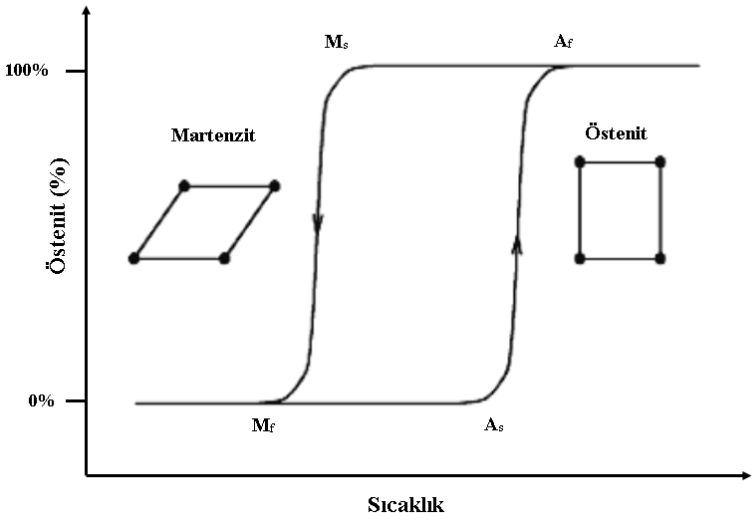
3.1 Tezde Kullanılan Gereçler

3.1.1 Nitinol tel

Şekil hafızalı alaşımlar, dönüşüm alanının altındaki düşük sıcaklıklardaki modifikasyonları sırasında yüksek sıcaklıktaki şekillerini hatırlayabilen ve ısıtıldıkları zaman başlangıç şekillerine dönebilen özel alaşımlardır. Şekil hafızalı alaşımlar sahip oldukları hafıza özelliğini uygulanan bir dizi sıcak/soğuk işlemler sonrasında kazanmaktadır. Gördükleri işleme göre tek veya çift yönlü şekil hafıza özelliğine sahip olan şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza özelliği haricinde süperelastisite ve yutma kabiliyeti gibi ilgi çekici iki üstün özelliği daha bulunmaktadır. Süperelastik yutma kapasitesi olarak adlandırılan bu özellikler, şekil hafızalı alaşımların süperelastik histerezden kaynaklanan enerji dağılımı nedeniyle mekanik enerjiyi emme ve mekanik enerjiden kaynaklanan titreşimleri azaltma ve yutma kabiliyeti olarak tanımlanabilmektedir (Boussu and Bailleul, 2002; Heller et al., 2008; Heller et al., 2012).

Şekil hafızalı alaşımların sahip olduğu bu üstün özellikler iki farklı sıcaklığa bağlı kristalin yapıya sahip olmasından kaynaklanır. Bunlardan ilki düşük sıcaklık fazı olan martenzit faz, diğeri ise yüksek sıcaklık fazı östenittir. Şekil hafızalı alaşımın kristalin yapısı sıcaklık veya gerilme etkisi ile değişmekte ve faz dönüşümü gerçekleşmektedir (Zanaboni, 2008; Dilibal, 2005; Toptaş ve Akkuş, 2007; Andrianesis et al., 2010). Şekil hafızalı alaşım histerezis eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Faz dönüşümleri, malzemenin ısıtılması veya soğutulmasına bağlı olarak bir sıcaklıkta başlamakta ve başka bir sıcaklıkta bitmektedir. Östenit fazdaki bir malzeme soğutulduğunda martenzite dönüşmeye başlamaktadır. Martenzit fazın başladığı bu sıcaklık M_s sıcaklığıdır. Malzeme soğutulmaya devam edildikçe tamamen martenzit hale gelir ki bu sıcalık M_f sıcaklığı olarak adlandırılır. Aynı şekilde martenzit fazdaki bir malzemenin ısıtılma durumunda östenit faza geçtiği ilk sıcaklık A_s olup, % 100 östenit duruma geldiği sıcaklık A_f sıcaklığıdır.



Şekil 3.1 Şekil hafızalı alaşım histerezis eğrisi (Toptaş ve Akkuş, 2007).

Tez kapsamında mekanik özellikleri geliştirilmiş üç boyutlu kumaşların yapısında 0,2 mm ve 0,3 mm çaplarında nitinol tel kullanılmıştır. Telin özellikleri % 55,5 Ni ve % 44,5 Ti, yoğunluk 6,5 g/cm³, erime sıcaklığı ise 1300 °C'dir (Memry Co., 2017).

Teller ısıl işlem görmemiş halde SAES Getters firmasından temin edilmiş olup, önce hibrit iplik formuna getirilmiş, sonra üç boyutlu dokuma kumaş yapısında çözgü ipliği olarak kullanılmış, ardından kumaş formunda ısıl işleme tabi tutulmuştur.

3.1.2 Çelik tel

Tez kapsamında nitinol tellerin yanı sıra üç boyutlu dokuma kumaş üretiminde kullanılmak üzere paslanmaz çelik tel de temin edilmiştir. 304 L kalite malzemeden çelik telin kalınlığı nitinol tel ile aynı olup, yoğunluğu 8 g/cm³ ve erime sıcaklığı 1450 °C'dir. Yapısında % 0,03'ten az oranda karbon bulundurmaktadır (Birçelik, 2017).

3.1.3 Karbon elyaf

İki ve üç boyutlu teknik dokuma kumaş yapılarının üretiminde genellikle kumaş hammaddesi olarak yüksek performanslı karbon, cam ve aramid lifleri tercih edilmektedir (Badawi, 2007). Özellikle aramid ve karbon lifleri düşük yoğunluğa, titreşim sönümleme özelliğine, yüksek darbe, yüksek aşınma ve yüksek yorulma dayanımına sahiptir (Baltacı vd., 2011).

Aramid lifleri cam, karbon ve seramik lifleri gibi kırılgan liflere nazaran dokuma tezgahlarında daha kolay bir şekilde dokunabilmektedir (Rebouillat, 2001). Ancak, aramid lifleri 500 °C'den itibaren bozunmaya başlamaktadır.

Teknik tekstil üretiminde en çok kullanılan liflerden bir diğeri olan cam liflerinin erime sıcaklığı ise E-Cam lifleri için 846 °C ve S-cam iplikleri için 1056 °C'dir (Hu and Liu, 2010). Cam lifleri aramid liflerinden daha yüksek erime sıcaklığına sahip olmakla beraber çok kırılgan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle üç boyutlu sandviç kumaş yapılarının üretimi esnasında elyaf yüzeyinin hasar görme riski çok fazla olup, mukavemetinin düşmemesi için elyaf yüzeyinin bir yüzey koruması ile desteklenmesi gerekmektedir (Mountasir et al., 2011; Çelikkanat, 2002). Cam lifleri gibi, karbon lifleri de kırılgan bir yapıya sahiptir, lif içindeki katmanlar güçlü kovalent bağlar ile bağlı olsa da eğilme gerilmesi altında lifler çok kolay kırılmaktadır (Çelikkanat, 2002).

Kompozit yapılarda diğer yüksek performanslı liflerde olduğu gibi karbon elyafın takviye malzemesi olarak kullanımındaki en büyük risklerden biri, karbon elyafın tekstil üretimi sırasında eğilme, bükülme ve aşınma gibi mekanik etkilere maruz kalması sonucu kolaylıkla kırılması ve hasar görmesidir. Bu nedenle bu tip hassas lifler kullanılarak üretim yapılan makineler elyafa uygun olmalı ya da uygun şekilde modifiye edilmelidir. Bu sayede elyaf hasarı mümkün olduğunca azaltılabilmektedir (Cox and Flanagan, 1997).

Ticari karbon lifleri genellikle içerdiği filament sayısı 1.000-12.000 arasında değişen ve tow olarak adlandırılan bükümsüz filamentler halinde bulunmaktadır. Karbon liflerinin bir kısmına üretim aşamasında "sizing" adı verilen özel bir

dolgulama işlemi uygulanmakta, bu işlem karbon liflerinin tutum özelliklerini iyileştirmekte, aynı zamanda liflerin bir arada durmasını (Chung, 1994) ve daha kolay işlenmesini sağlamaktadır.

Karbon liflerinin ilgi çekici özelliklerinden biri ise yüksek modüllü olmalarıdır. Bu özelliğe rağmen deforme olmayıp darbe etkisini kolay iletebilmekte, cam liflerine göre daha az enerji absorbe edebilmektedir. Yapılan çalışmalarda cam/epoksi kompozitlerin karbon/epoksi kompozite göre daha düşük yorulma direnci ve dolayısıyla daha iyi darbe hasar toleransı gösterdiği belirtilmektedir.

Bununla birlikte karbon liflerinin gösterdiği yüksek termal dayanım bu liflerin yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır (Yöney, 2007; Hu and Liu, 2010; Yaman vd., 2007; Shirvanimoghaddam et al., 2017; Chung, 1994).

Karbon elyaf ipliklerin nitinol tele uygulanacak ısıl işlemler için yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilecek çalışmalara dayanıklı olması nedeniyle, tez kapsamında üretilecek üç boyutlu dokuma kumaş üretiminde karbon elyaf iplikler ile çalışılmıştır. Öte yandan karbon elyafın cam elyafa göre daha düşük darbe dayanımına sahip olduğu bilinmektedir (Murray, 1997; Çelikkanat, 2002; Yılmaz İşman, 2010). Bu nedenle, tez kapsamında nitinol ve çelik tel özlü hibrit ipliklerin kumaş yapısına dahil edilmesi ile karbon kumaşın darbe dayanımı özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Tez kapsamında kullanılan karbon elyaflar 3K kalınlığında olup, DowAksa firmasından bükümsüz filament formunda temin edilmiş, hibrit iplik ve kumaş üretimlerinde kullanılmıştır.

3.1.4 PVA iplik

Tez kapsamında, karbon elyafın dokunması sürecinde karşılaşılan problemlere çözüm olması amacıyla hibrit iplik ve bükümlü karbon elyaf ipliklerin etrafına sarılması için 30 tex kalınlığında suda eriyen iplik

kullanılmıştır. Polivinil alkol (PVA) elyaftan üretilmiş olan bu iplikler Coats firmasından tedarik edilmiştir (Coats, 2019).

3.1.5 Yardımcı çubuklar

Tez kapsamında üretilen kumaşlardaki kanal boşluklarının kumaş üretimi sonrasında açılması, tel içeren hibrit ipliklere form verilmesi ve kumaşa üçüncü bir boyut kazandırılması, PVA'nın uzaklaştırılması işlemi sırasında boşluklu kumaş formunun bozulmadan korunması ve nitinol tel içeren kumaşlara uygulanan ısıl işlemlerde kullanılması amacıyla tez kapsamında, üretilen kumaş kanal boşluklarına uygun kalınlıklarda, yüksek sıcaklığa dayanıklı 316 L çelik malzemeden yardımcı çubuklar ürettirilmiştir.

3.1.6 Numune tutucu çerçeveler

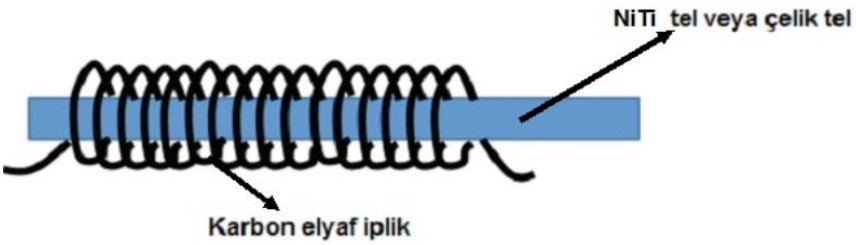
Kumaş numunelerinin ısıl işlem esnasında sabit formda tutulabilmesi amacıyla, tez kapsamında test numunesi boyutlarına uygun ölçülerde, yüksek sıcaklığa dayanıklı 304 L kalite çelik malzemeden çerçeveler yaptırılmıştır. Çerçevelere ait resim Şekil 3.2'de verilmiştir.

Şekil 3.2 Isıl işlemlerde kullanılan numune tutucu çerçeveler.

3.2 Tez Çalışmasında Kullanılan Yöntemler

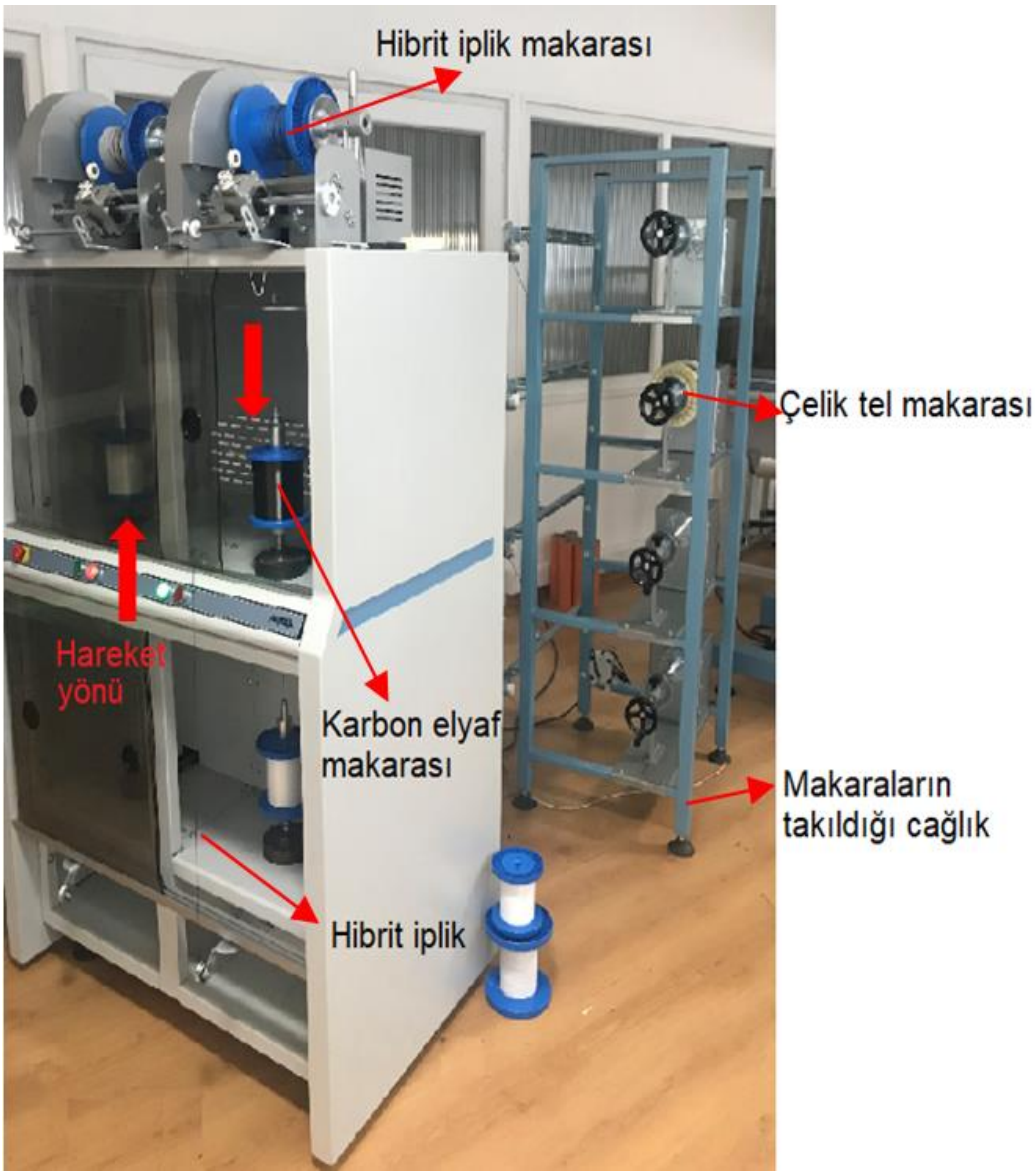
3.2.1 Hibrit ipliklerin üretimi

Tez kapsamında üç boyutlu kumaş üretiminde kullanılan hibrit ipliklerin üretimi Ağteks firmasına ait DirecTwist C6''/D6'' iplik katlama ve büküm makinesinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen hibrit ipliğin şematik gösterimi Şekil 3.3'te ve hibrit iplik üretim prosesi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Hibrit iplik yapısının şematik gösterimi.

Üretim öncesinde öncelikle bükümsüz ve bükümlü karbon elyaflar, çelik tel etrafına farklı büküm değerlerinde sarılarak denemeler yapılmış, en düzgün hibrit iplik yapısının elde edildiği parametreler belirlenmiştir.



Şekil 3.4 DirecTwist C6''/D6'' makinesinde gerçekleştirilen hibrit iplik üretimi.

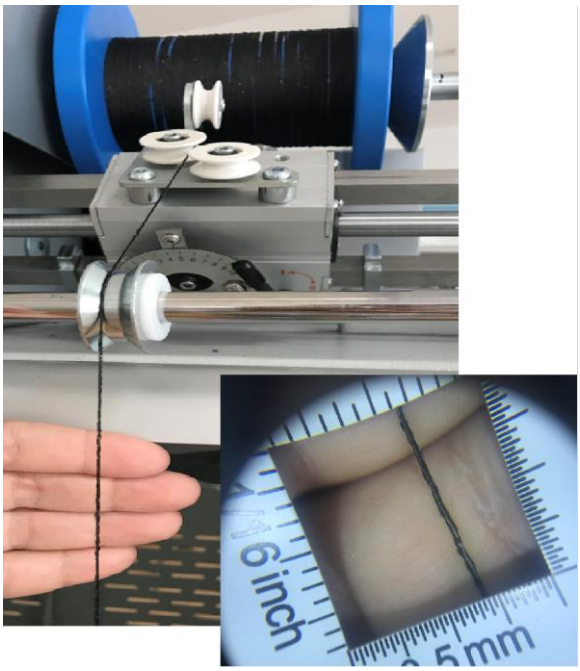
Karbon elyafın büküm verilmeksizin bobinden makaraya aktarılması ile gerçekleştirilen hibrit iplik üretimleri sırasında karbonun kırılması ve kopması nedeniyle düzgün bir sarım yapılamamış, ayrıca kopuşlardan ötürü üretim sık sık durdurulmak durumunda kalınmıştır. Şekil 3.5'te hibrit iplik üretimi esnasında düzgünsüz olarak üretilen hibrit iplik görseli görülmektedir.

Şekil 3.5 Hibrit iplik üretimi esnasında karşılaşılan iplik hataları.

Kopuşların önlenmesi amacıyla karbon elyafa bir miktar büküm verilerek (20 tur/m) makaraya aktarılmıştır. Bükümlü karbon elyafın çelik tel üzerine sarımında 200-400 tur/m aralığında farklı bükümler verilerek denemeler yapılmıştır. 200 tur/m bükümde hibrit iplik içindeki tel çok fazla görünmüş, homojen bir iplik yapısı elde edilememiştir. 400 tur/m bükümde ise karbon elyaf çok fazla zarar görmüş ve iplik yüzeyinde lif kırıkları oluşmuştur. Denemeler sonucunda hibrit iplik üretimi için optimum bükümün 240 tur/m olduğu belirlenmiş ve sonrasında 0,2 ve 0,3 mm kalınlığındaki nitinol ve çelik teller belirlenen parametreler doğrultusunda hibrit iplik formuna getirilmiştir. Tez kapsamında üretilen hibrit ipliğe ait görsel Şekil 3.6'da verilmektedir.

Hibrit iplik üretimi ve dokuma kumaş deneme üretimi sırasında edinilen tecrübeler doğrultusunda, hibrit ipliğin manto kısmında bulunan karbon elyafın mekanik etkiler sebebiyle kolayca hasar görmesi sonucu koparak telden ayrılması veya geriye sıyrılması gibi problemlerin önüne geçilmesi amacıyla tez kapsamında üretilen hibrit ipliklerin etrafı PVA iplik ile sarılmıştır.

Sarım işlemi, hibrit iplik üretimlerinin yapıldığı Ağteks firmasında bulunan DirecTwist C6''/D6'' makinesinde gerçekleştirilmiş olup, PVA iplik, hibrit iplik etrafına 2800 tur/m "S" büküm ile sarılmış ve PVA sarılı çelik ve nitinol tel özlü hibrit iplikler dokuma kumaş üretimi için hazır hale getirilmiştir. Tez kapsamında üretilen PVA sarılı hibrit iplik Şekil 3.7'de ve PVA sarılı hibrit ipliğe ait detaylar Tablo 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.6 Tez kapsamında üretilen hibrit iplik yapısı.

Şekil 3.7 PVA iplik sarılı hibrit iplik.

Tablo 3.1 Tez kapsamında üretilen PVA iplik sarılı hibrit ipliklere ait detaylar.

İplik tipi	Üretim detayı	Kullanım yeri
PVA sarılı hibrit iplik	▪ Karbon elyafa **20 tur/m** büküm verilmiştir. ▪ **240 tur/m** büküm ile tel etrafına sarılmıştır. ▪ PVA iplik hibrit iplik etrafına **2800 tur/m "S"** büküm ile sarılmıştır.	Çözgü ipliği
*Hibrit iplik üretiminde 3K karbon elyaf, 0,2 ve 0,3 mm çaplarında nitinol ve çelik teller ile 30 tex PVA iplik kullanılmıştır.		

3.2.2 Bükümlü karbon elyaf ipliklerin üretimi

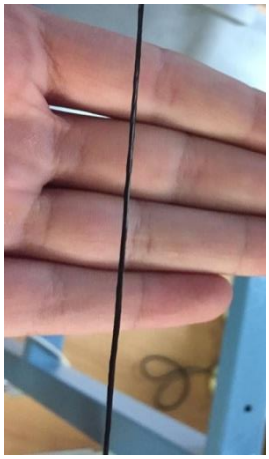
"Hibrit İpliklerin Üretimi" kısmında bahsedilmiş olduğu üzere, çalışma sırasında karbon elyafın kolaylıkla zedelenmesi nedeni ile karşılaşılan problemlerin giderilmesi ve dokuma kumaş üretiminin daha kolay gerçekleştirilebilmesi amacıyla, tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu karbon dokuma kumaş üretiminde kullanılan karbon elyaf çözgü ve atkı ipliklerine büküm verilmiştir. İpliklere verilen büküm için en uygun değer, bükümlü karbon elyaf üreten yurtdışındaki firmalarla yapılan görüşmeler ve Ağteks firmasında gerçekleştirilen denemeler sonrasında belirlenmiştir. Ardından bükümlü karbon elyaf ipliklerin etrafı PVA iplik ile sarılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan atkı ve çözgü iplikleri, ilk olarak 3 kat 3K karbon elyaf ipliğin 60 tur/m "Z" büküm verilerek birlikte katlanması ve üzerine 2700 tur/m "S" büküm ile PVA iplik sarılması ile üretilmiştir. Tez kapsamında üretilen PVA sarılı bükümlü karbon elyaf ipliklere ait detaylar Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2 Tez kapsamında üretilen PVA iplik sarılı bükümlü karbon elyaf ipliklere ait detaylar.

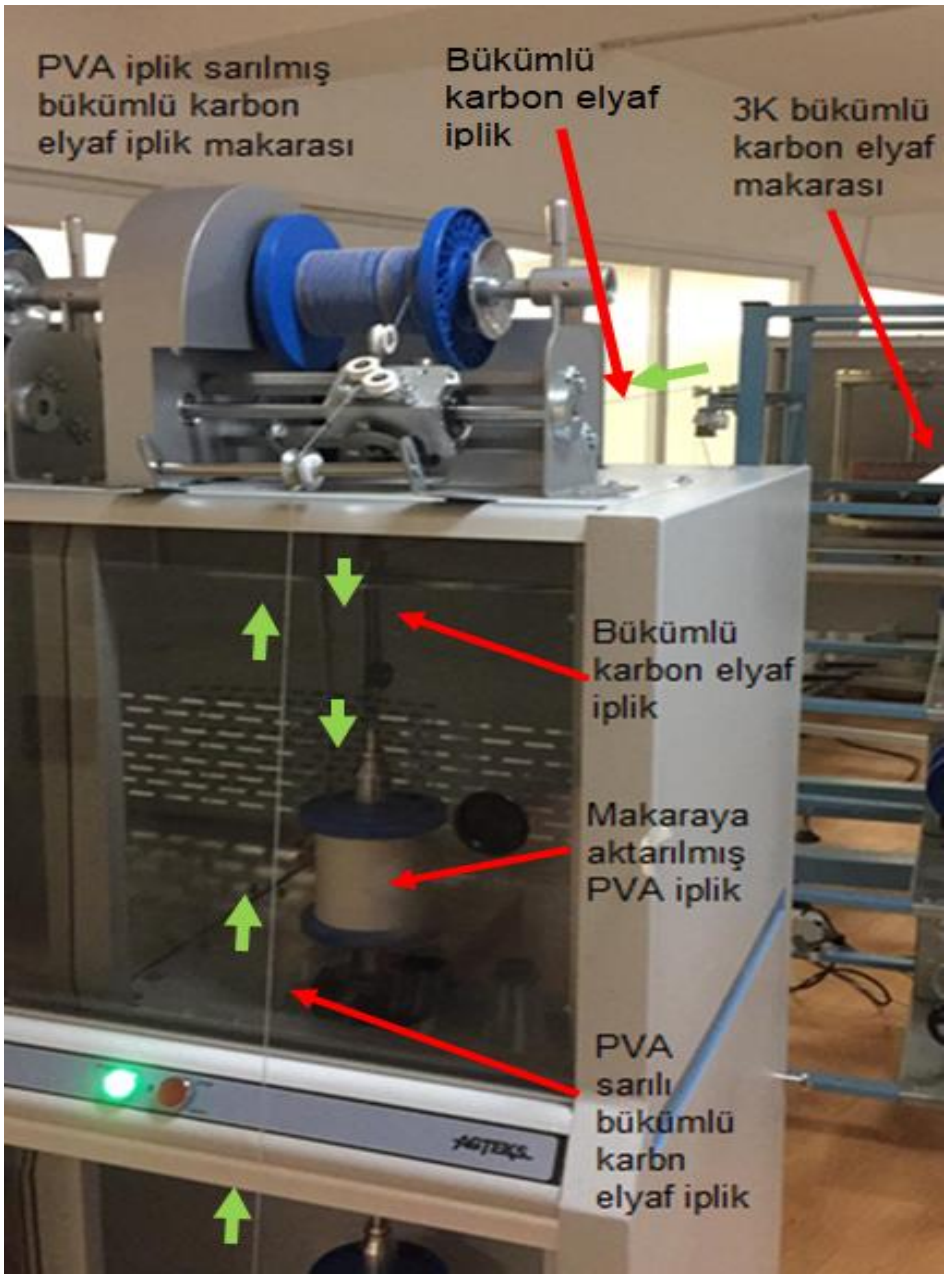
İplik tipi	Üretim detayı	Kullanım yeri
PVA sarılı karbon elyaf iplik	▪ **3 kat** 3K karbon elyaf **60 tur/m** "Z" büküm verilerek birlikte katlanmıştır. ▪ PVA iplik **2700 tur/m "S"** büküm ile bükümlü karbon elyaf iplik üzerine sarılmıştır.	Atkı ve çözgü ipliği

Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10'da sırasıyla 3 kat 3K karbon elyafın birlikte bükülmesi ile üretilen bükümlü karbon elyaf iplik, PVA iplik sarılı bükümlü karbon elyaf iplik ve PVA iplik ile sarım işlemine ait görsel verilmektedir.



Şekil 3.8 Bükümlü karbon elyaf iplik ile 3K bükümlü karbon elyaf makarası.

Şekil 3.9 PVA iplik ile sarılmış bükümlü karbon elyaf iplik.



Şekil 3.10 Bükümlü karbon elyaf ipliğin PVA iplikle sarılması (Yeşil oklar akış yönünü belirtmektedir).

3.2.3 Üç boyutlu dokuma kumaşların üretimi

Tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaşların üretiminde Şekil 3.11'de verilen armür planı ve Tablo 3.3'de verilen üretim parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 3.11 Üç boyutlu dokuma kumaş üretimlerinde kullanılan armür planı.

Şekil 3.11 incelendiğinde armür planında 4 farklı çözgü hareketi bulunduğu, 1. çözgünün 2. çözgü ile ve 5. çözgünün 6. çözgü ile aynı hareketi yaptığı görülmektedir. 2. ve 5. çözgüler hibrit ipliktir.

Tablo 3.3 Üç boyutlu kumaşların üretilmesinde kullanılan üretim parametreleri.

<table>
<tr><th>Numune cinsi</th><th>Numune kodu</th><th>Numune adı</th><th>Atkı ipliği</th><th colspan="2">Çözgü ipliği</th><th>Yardımcı çubuk</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Deney numunesi 1</td><td rowspan="2">N1</td><td rowspan="2">Nitinol tel içeren üç boyutlu dokuma kumaş</td><td rowspan="3">PVA kaplı karbon elyaf iplik</td><td rowspan="3">PVA kaplı karbon elyaf iplik</td><td>Nitinol tel özlü hibrit iplik

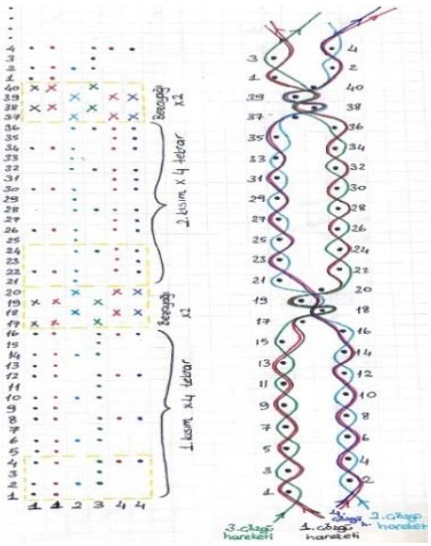
(0,2 mm ve 0,3 mm)</td><td rowspan="3">İnce (6 mm) ve kalın (10 mm) 316 L paslanmaz çelik çubuk</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Deney numunesi 2</td><td rowspan="2">N2</td><td rowspan="2">Çelik tel içeren üç boyutlu dokuma kumaş</td><td>Çelik tel özlü hibrit iplik

(0,2 mm ve 0,3 mm)</td></tr>
<tr><td>Referans numune</td><td>N3</td><td>Üç boyutlu karbon dokuma kumaş</td><td>-</td></tr>
</table>

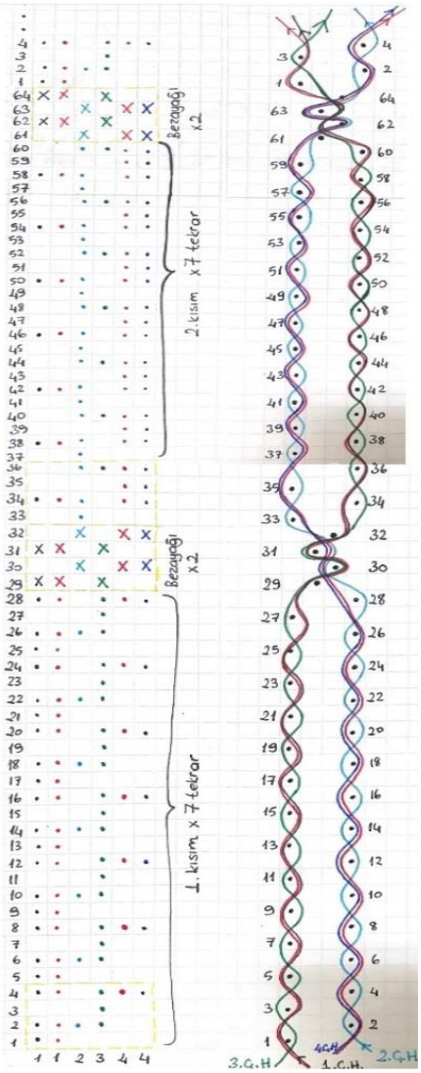
Tablo 3.3’de görüldüğü üzere, tez kapsamında iki farklı kalınlıkta (0,2 mm ve 0,3 mm çaplarında) nitinol ve çelik teller kullanılarak üç boyutlu dokuma kumaş yapıları üretilmiştir. Tel içeren kumaşların mekanik özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla tel içermeyen referans karbon dokuma kumaş numuneleri tez kapsamında üretilmiştir. Birbirinden bağımsız iki kumaş katı ve ara bağlantı kumaşından oluşan bu kumaş yapısında ara bağlantıda bezayağı konstrüksiyonu kullanılmıştır.

Bununla birlikte kumaş üretiminde iki farklı incelikte yardımcı çubuk kullanılmıştır. Bunun nedeni farklı boşluklardaki kumaş kanal yapılarının kumaşın mekanik özellikleri üzerinde yarattığı etkinin gözlemlenebilmesidir.

Kumaş içine yerleştirilecek olan ince ve kalın yardımcı çubuklar için armür raporu; ince çubukların yerleştirileceği dar kanallı kumaşlar için 4 tekrar, kalın çubukların yerleştirileceği geniş kanallı kumaşlar için ise 7 tekrar olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.11’de verilen armür planının ince ve kalın çubuğa göre rapor tekrarları ile oluşturulmuş çizimi ve kumaş kesit görünümü sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13’te verilmektedir.

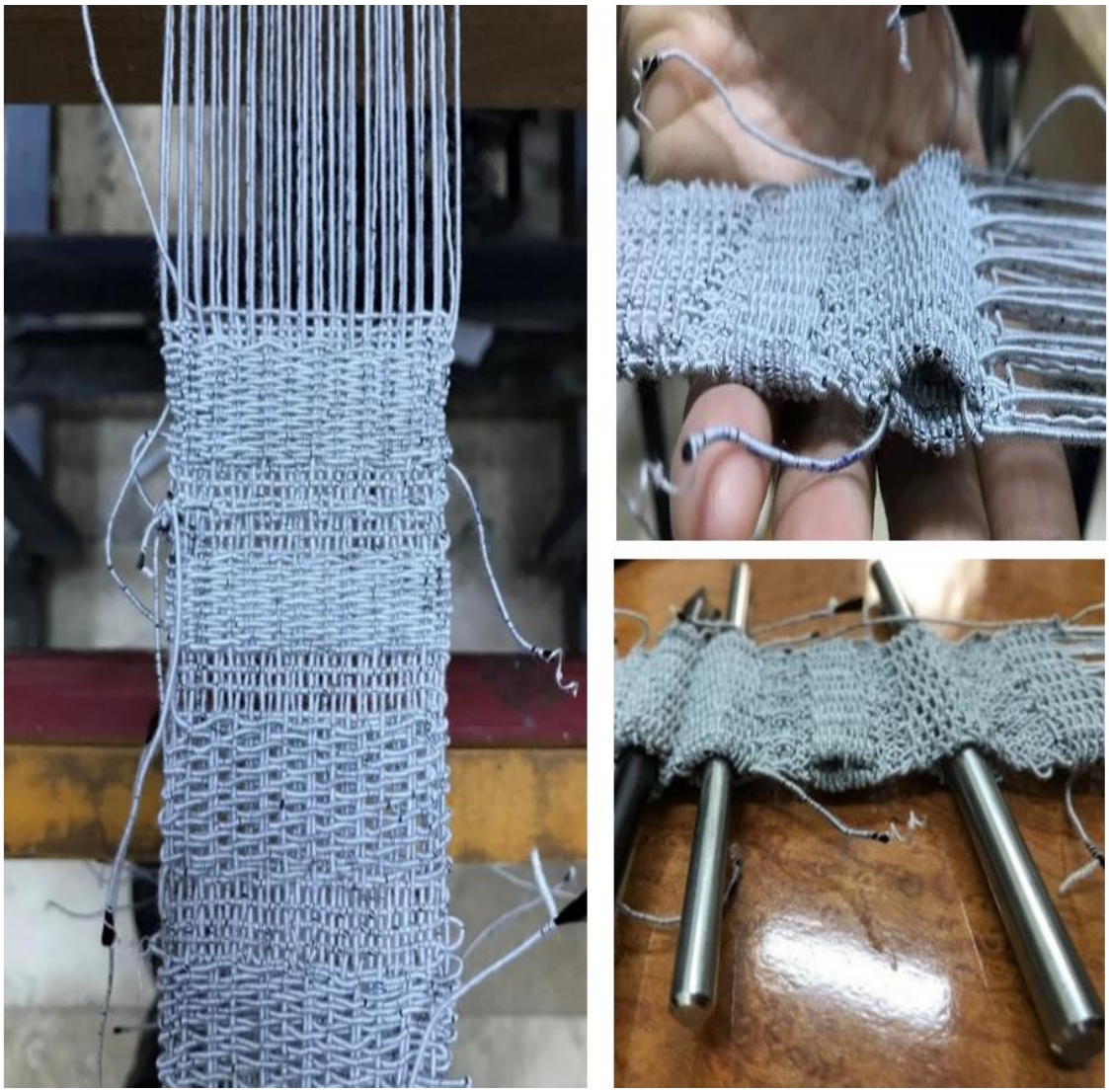


Şekil 3.12 Dar kanallı üç boyutlu dokumaşa ait tekrarlı armür raporu ve kumaş kesit görünümü.



Şekil 3.13 Geniş kanallı üç boyutlu dokumaşa ait tekrarlı armür raporu ve kumaş kesit görünümü.

Belirlenen parametreler doğrultusunda geliştirilmek istenen kumaş yapısının gözlemlenebilmesi amacıyla Gülas marka el dokuma tezgâhında bir ön deneme üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14). Yardımcı çelik çubuklar üretim sonrasında kumaş boşluklarına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14 PVA iplikle sarılı hibrit iplik ve bükümlü karbon elyaf iplik kullanılarak el dokuma tezgahında üretilen boşluklu üç boyutlu dokuma kumaş ve kumaş boşluklarına yerleştirilmiş yardımcı çelik çubuklar.

Dokuma hazırlık işlemleri kapsamında PVA iplik sarılı karbon elyaf iplikler ve hibrit iplikler armür planına uygun şekilde tek levent üzerine aktarılarak çözgü levendi hazırlanmıştır (Şekil 3.15). Çözgü levendi hazırlığı Ege Üniversitesi

Tekstil Mühendisliği Bölümüne ait numune çözgü hazırlama makinesinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.15 Çözgü levendi hazırlığı.

Çözgü hazırlık işleminden sonra üç boyutlu dokuma kumaşların üretimi, Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümünde bulunan otomatik numune karbon dokuma makinesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.16 ve 3.17).

Şekil 3.16 Kumaş üretimlerinin gerçekleştirildiği otomatik numune karbon dokuma makinesi.

Şekil 3.17 Üç boyutlu dokuma kumaşın üretimi.

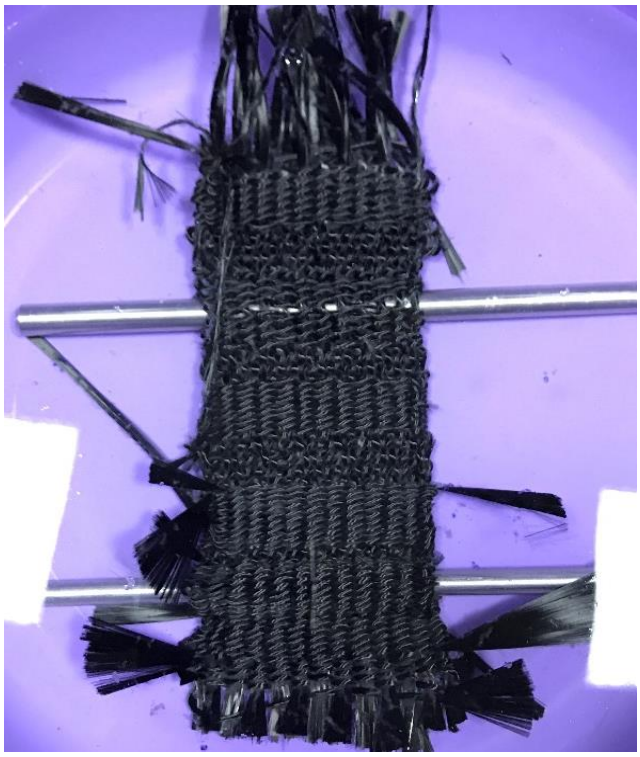
Üretim hazırlık aşamasında hibrit iplikler ile karbon elyaf ipliklerin aynı levent üzerine sarılmış olması nedeniyle, hem çözgü hazırlama hem de kumaş üretimi aşamasında bir takım problemler yaşanmıştır. Çünkü tel ve karbon iplikler birbirinden farklı davranış sergilemekte, bükümlü karbon elyaf iplikler ve tel özlü hibrit iplikler arasında gerginlik farkı oluşmaktadır. Bunun sonucunda, dokuma sırasında hibrit iplik özündeki tellerde sık sık kopuşlar yaşanmıştır. Karşılaşılan bu problemlerin giderilmesi ve mümkün olduğunca düzgün bir kumaş elde edilebilmesi için üretim süresince, gereken durumlarda, makine durdurularak çalışılmış ve çözgü salma, kumaş çekme için hassas ayarlamalar yapılmıştır (Şekil 3.18).

Şekil 3.18 Leventten salınan çözgü ipliklerinin görünümü.

3.2.4 PVA'nın uzaklaştırılması

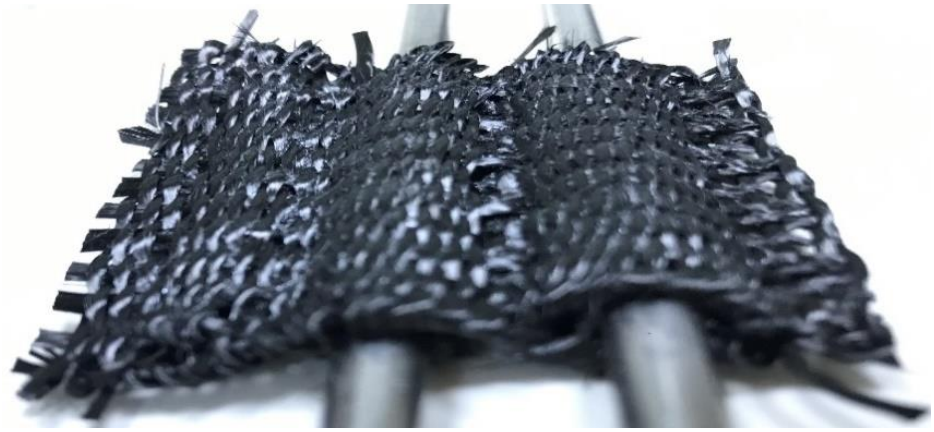
Karbon elyafın dokunmasını kolaylaştırmak için bükümlü karbon elyaf iplikler ile tel özlü hibrit ipliklerin ertrafına sarılan PVA'nın kumaş üretimi sonrasında uygun koşullarda uzaklaştırılması gerekmiştir.

PVA'nın üretilen karbon kumaştan uzaklaştırılması için gerekli olan işlem sıcaklığı ve süresi literatür bilgileri (Cai and Qui, 2006; Honeycutt, 1993; Ueda et al., 1993) ile gerçekleştirilen ön denemelerden edinilen deneyim ile belirlenmiştir. Yapılan ön denemeye ait fotoğraf Şekil 3.19'da verilmiştir. PVA'lı karbon dokuma kumaş sıcak su ile muamele edilerek iplikler üzerindeki PVA haşılının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ön denemede suyun sıcaklığı yaklaşık 80-85 °C olup, numune kumaş 2 dakika kadar suda bekletilmiştir.



Şekil 3.19 Sıcak suda bekletilerek PVA haşılı uzaklaştırılan el dokuma karbon kumaş.

Yapılan işlem sonrasında karbon dokuma kumaşta, ipliklerin yüzeyinde kalan az miktarda PVA'nın iplikleri birbirine yapıştırıcı bir etki sağladığı da gözlemlenmiştir. Bu etki karbon kumaş numunelerinin istenen ölçülerde kesilip testlere hazırlanması aşamasında da kolaylık sağlamıştır (Şekil 3.20).



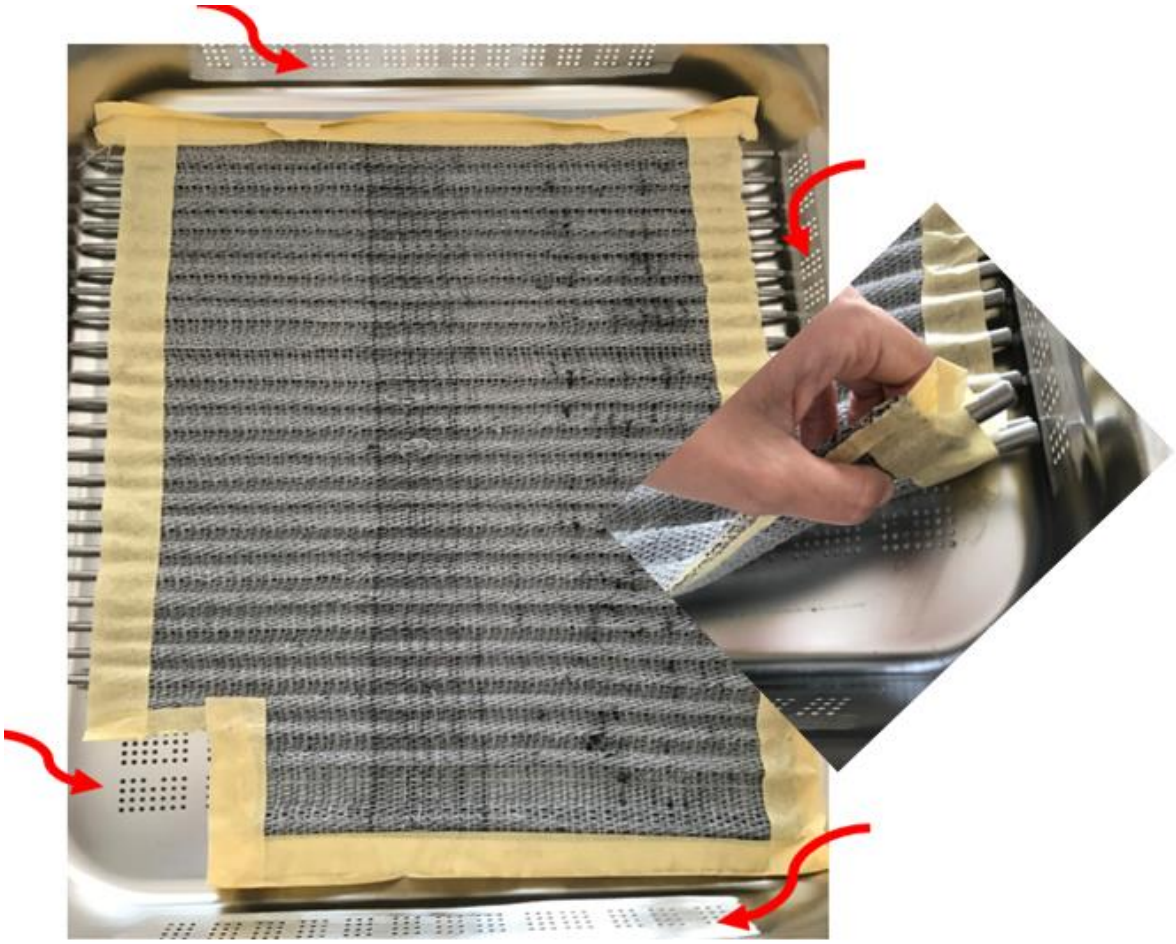
Şekil 3.20 Sıcak suda bekletme ve kurutma sonrasında kumaşın görünümü.

PVA'dan arındırma işlemi öncesinde, sulu işlem sırasında ıslanan kumaş dokusunun bozulmadan korunabilmesi için çelik çubuklar kumaş boşluklarına

yerleştirilmiştir (Şekil 3.21). Ancak kumaş dokusuna yerleştirilen çelik çubuklar kumaşı ağırlaştırdığından, işlem sırasında çelik çubukların ıslak kumaştan dokuyu zedeleyerek çıkması riski bulunduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, PVA'dan arındırma işlemi durgun sıcak suya batırma, bir süre suda bekletme ve sudan çıkarma şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.21 Kumaş boşluklarına yerleştirilen çelik çubuklar.

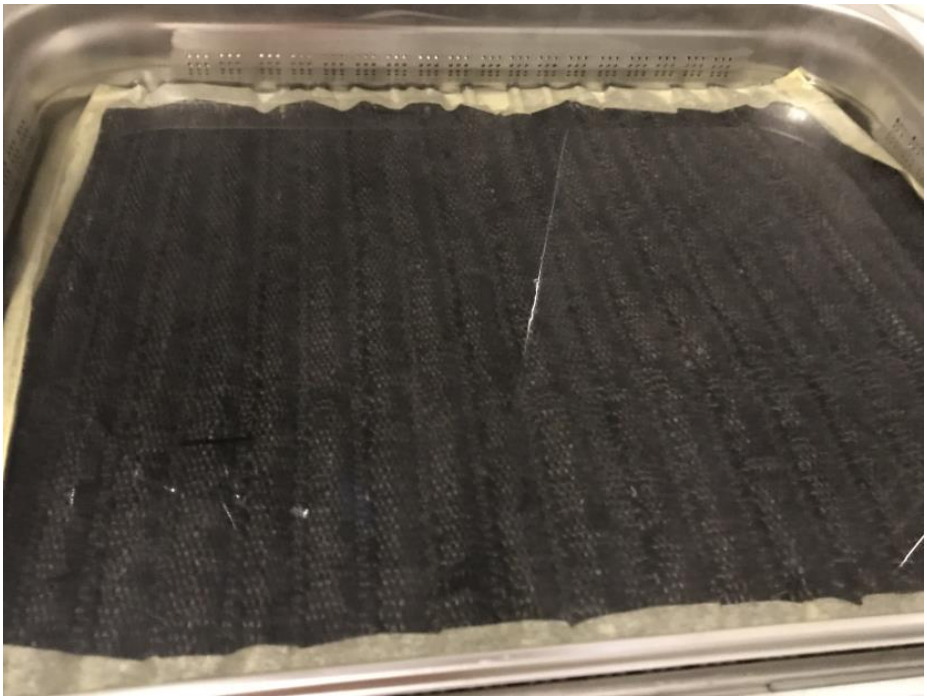
Hassas çalışılabilmesi amacıyla, kumaş suya daldırma öncesinde daldırma teknesi boyutlarıyla birebir uyumlu delikli tekne içine yerleştirilerek kumaşın sudan çıkarılması esnasında desteklenmesi ve zarar görmemesi sağlanmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 PVA arındırma işlemi öncesinde kumaşın içine yerleştirildiği delikli tekne.

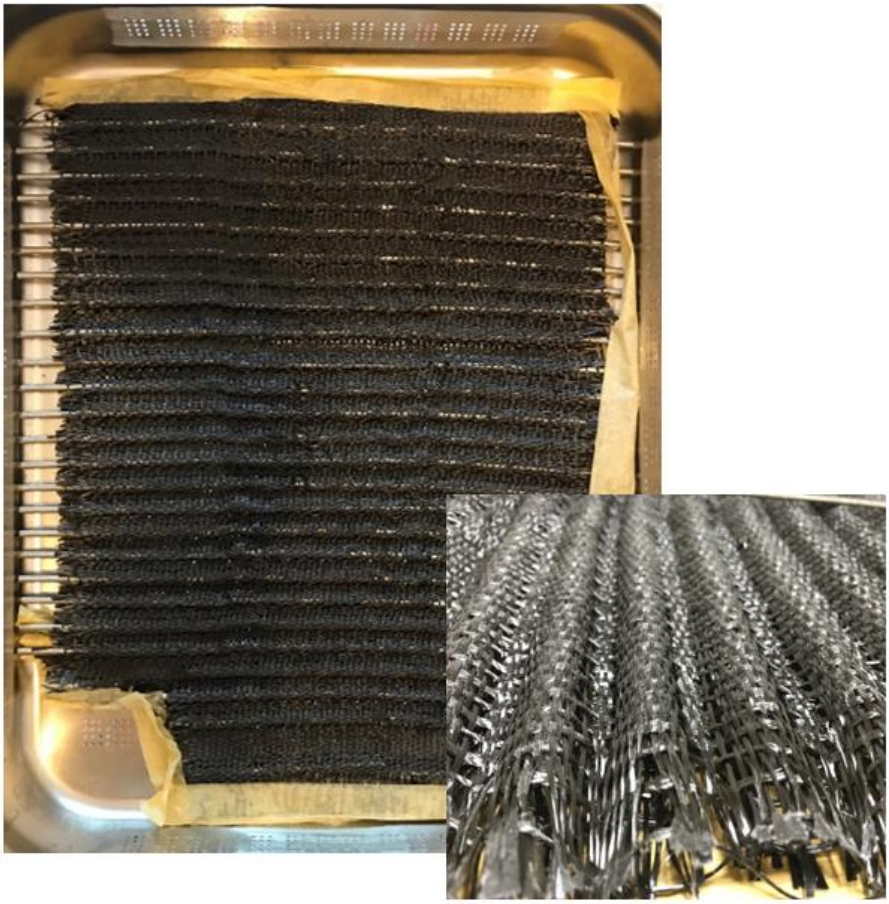
PVA'dan arındırma işleme ait sıcaklık ve süre parametreleri, ön denemede edinilen bilgiler doğrultusunda belirlenmiş olup, işlem durgun suda, su sıcaklığı yaklaşık 80 °C ve bekletme süresi 1 dk 30 sn olarak uygulanmıştır. İşlemin standart tutulması amacıyla bu parametreler tüm numuneler için aynı tutulmuştur (Şekil 3.23). Durgun suya daldırılan kumaş Şekil 3.24'te verilmektedir.

Şekil 3.23 Durgun sıcak su teknesinin hazırlanması.



Şekil 3.24 Durgun suya daldırılan kumaşın görünümü.

PVA haşılı uzaklaştırılan kumaş numuneleri, oda sıcaklığında sererek kurutulmuştur. Kumaşın PVA uzaklaştırma işlemi ve kurutma sonrası görünümü ise Şekil 3.25'de verilmektedir.



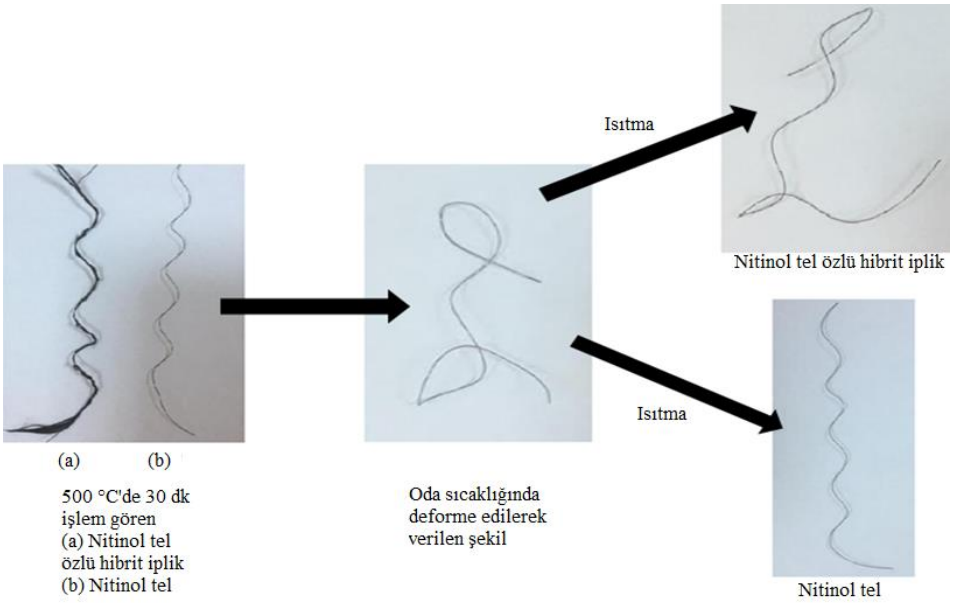
Şekil 3.25 Kumaşın PVA uzaklaştırma işlemi ve kurutma sonrası görünümü.

3.2.5 Isıl işlemlerin gerçekleştirilmesi

3.2.5.1 DSC analizi ile optimum ısıl işlem süre ve sıcaklığının belirlenmesi

Tez kapsamında nitinol tellere şekil hafıza ve süperelastisite özelliklerini kazandırabilmek amacıyla üç boyutlu dokuma kumaşlara uygulanacak optimum ısıl işlem süre ve sıcaklıklarının belirlenmesi için 0,3 mm kalınlığındaki nitinol tel ve hibrit ipliğe, literatürde yapılan çalışmalar (Guide, 2004; Zanaboni, 2008; Pilch et al., 2009; Heller et al., 2012; Molnar and Humbeeck, 2011; Malard et al., 2009) göz önünde bulundurularak iki farklı sıcaklık değerinde (400-500 °C) ve 30 dk süreli ısıl işlemler uygulanarak bir ön deneme gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26). Ön deneme ile ısıl işleme tabi tutulan tel ve hibrit ipliklerin önceki ve sonraki davranışlarını gözlemlemek, ısıl işlem konusunda deneyim kazanmak ve nitinol

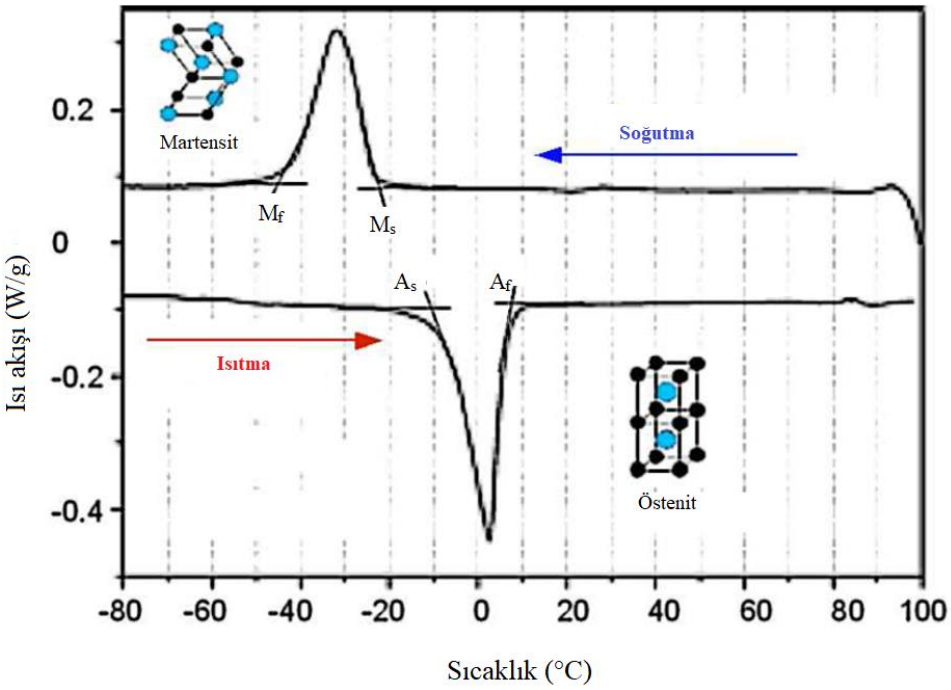
tellere şekil hafıza kazandırılabilecek süre ile sıcaklıkların tespit edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.26 Çıplak halde ve hibrit iplik formunda ısıl işlem gören nitinol tellerin oda sıcaklığında deformasyon sonrası ısıtma ile şekil geri kazanımı.

Ön denemeler sonrasında nitinol tel ve hibrit iplik oda sıcaklığında deforme edilmiş ve ısıtma ile eski şeklini alıp almadığı, yani başka bir deyişle şekil hafıza kazanıp kazanmadığı gözlemlenmiştir. Buna göre, 500 °C'de 30 dk. ısıl işlem sonrasında çıplak haldeki nitinol telin şekil hafıza kazandığı belirlenmiş, hibrit iplik için ise 30 dk. işlem süresinin yeterli gelmediği anlaşılmıştır. Ön denemeden edinilen tecrübeler doğrultusunda, iki farklı incelikteki (0,2 ve 0,3 mm çaplı) nitinol teller, argon atmosferinde, dört farklı sıcaklıkta (200 °C, 300 °C, 400 °C ve 500 °C), 1 saat süreyle ısıl işleme tabii tutulmuştur. Isıl işlemler, her bir sıcaklık değeri için, ısıl işlem görmemiş farklı numunelere uygulanmıştır. Numuneler ısıl işlem sonrasında tuzlu buzlu suda ani olarak soğutulmuştur.

Isıl işlemler sonrasında nitinol tellere DSC analizi uygulanmıştır. DSC analizi sonucunda nitinol telin östenit ve martenzit faz dönüşüm sıcaklıkları ısı akış eğrisindeki ekzotermik ve endotermik piklerden yararlanarak belirlenmiş; M_s, M_f, A_s ve A_f sıcaklıkları tespit edilmiştir. Nitinol şekil hafızalı alaşımın tipik DSC eğrisi Şekil 3.27'de verilmektedir.



Şekil 3.27 Nitinol şekil hafızalı alaşımın tipik DSC eğrisi (Zanaboni, 2008).

Analiz, Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü'nde bulunan Pyris 6 DSC cihazında, -40 ºC ile +80 ºC ve +80 ºC ile -120 ºC arasında, 5 ºC/dk. tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. DSC analiz cihazı Şekil 3.28'de verilmiştir.

Şekil 3.28 DSC analiz cihazı.

3.2.5.2 Nitinol tel ve hibrit ipliklere ısıl işlemlerin uygulanması

Mekanik özellikleri çekme testi ve DMA analizi yardımıyla değerlendirilecek olan nitinol teller ile nitinol tel özlü hibrit ipliklere, DSC analizinden elde edilen veriler doğrultusunda ısıl işlem uygulanmıştır.

Isıl işlemler Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde bulunan tüp fırında (Şekil 3.29) 1 saat süre ile 400 °C'de gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem esnasında numunelerin oksijen, nem ve diğer gazlarla girebileceği arzu edilmeyen kimyasal tepkimelerden korunması amacıyla inert argon gazı kullanılmıştır. Isıl işlem bitiminde numuneler tuzlu buzlu suya (Buytoz ve Harputlugil, 2018) atılarak, ani soğutulmuştur.

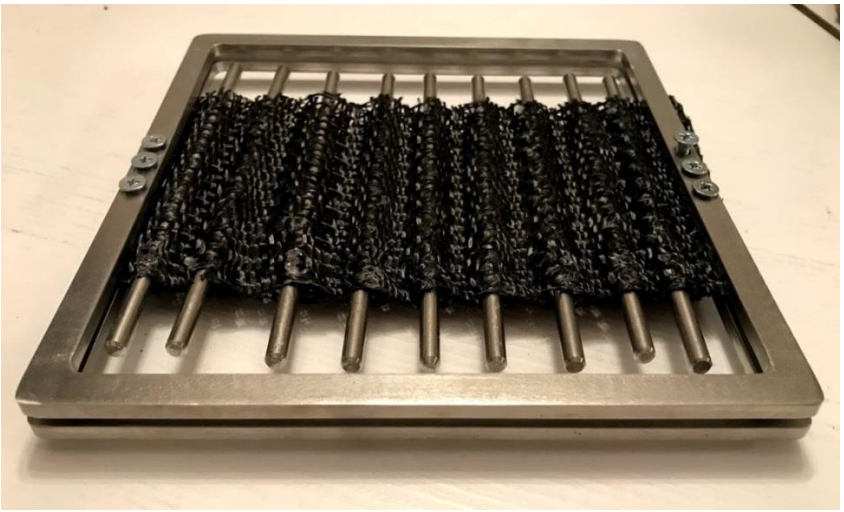
Şekil 3.29 Nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere ısıl işlemin uygulandığı tüp fırın.

3.2.5.3 Nitinol tel içeren üç boyutlu dokuma kumaşlara ısıl işlemlerin uygulanması

Tez çalışması için temin edilen nitinol teller ısıl işlem görmemiş olup, temin edildikleri halde önce hibrit iplik formuna getirilmiş, sonra çözgü ipliği olarak dokuma kumaş üretiminde kullanılmıştır. Isıl işlem görmemiş nitinol teller herhangi bir şekil hafıza veya süperelastisite özelliği göstermemektedir (Matthey, 2019). Bu nedenle tellerin dokunabilirliği daha fazladır. Öte yandan ısıl işlem

görmemiş nitinol tel özlü hibrit iplikler kullanılarak üretilen üç boyutlu dokuma kumaş numunelerinin optimum işlem sıcaklıklarında ısıl işlem görmesi sonucu nitinol tellere istenen formda şekil verilmesi mümkün olmuştur.

Isıl işlem öncesinde kumaş boşluklarına paslanmaz çelik çubuklar yerleştirilmiş olan nitinol tel içeren kumaş numuneleri tez kapsamında numune boyutlarına uygun şekilde özel ürettirilmiş olan çelik çerçeveler arasına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir (Şekil 3.30). Bu sayede kumaş formunun ısıl işlem sırasında bozulmadan korunması sağlanmıştır.



Şekil 3.30 Çerçeveler arasında sabitlenmiş üç boyutlu dokuma kumaş numunesi.

Isıl işlemler Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde bulunan Protherm marka yüksek ısı fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.31). İşlem sıcaklığı ve süresi, nitinol tel ve hibrit ipliklerde olduğu gibi 400 °C ve 1 saat olup, kumaşlar ısıl işlem sonrası soğuk suda ani olarak soğutulmuştur.

Şekil 3.31 Protherm yüksek ısı fırını.

3.2.6 Tel ve hibrit ipliklere mekanik testlerin uygulanması

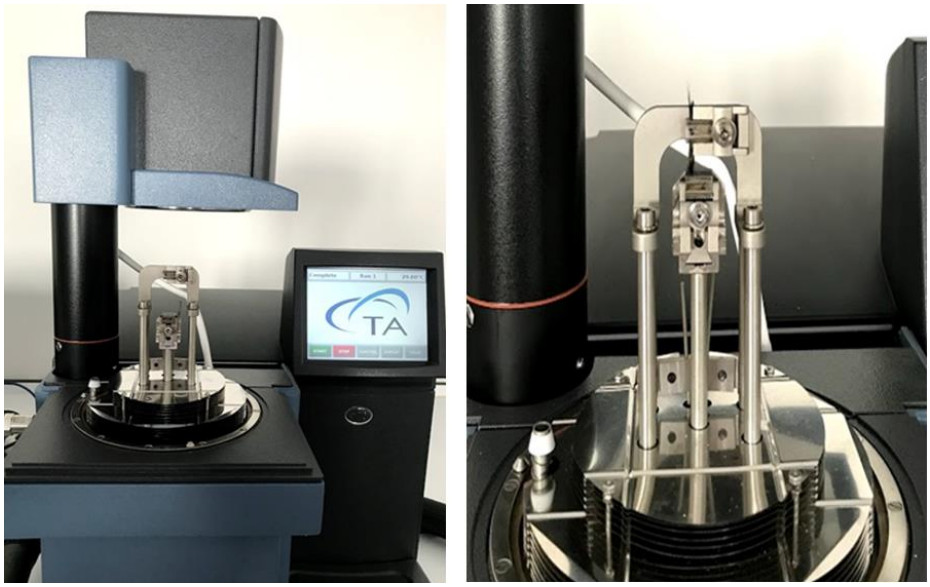
Tez kapsamında ısıl işlem görmüş nitinol tellere DMA analizi, tüm nitinol ve çelik teller ile tel özlü hibrit ipliklere ise çekme testi uygulanmıştır.

3.2.6.1 DMA analizi

Dinamik mekanik analiz, hibrit ve kompozit yapıların mekanik özellikleri ile sıcaklık, gerilim ve termo-elastik dönüşümler arasındaki ilişkileri belirlemek üzere kullanılan bir yöntemdir (Villa et al., 2009; Baiardo and Lubens, 2019)

Literatürde nitinol tellerin mekanik özelliklerinin DMA cihazı kullanılarak araştırıldığı birçok çalışmaya rastlanmıştır. Casati et al. (2011) çalışmasında nitinol tellerin dinamik mekanik analizini 190 MPa sabit gerilme altında -80 °C ile +60 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Lah et al. (2016) nitinol filamentlerin dinamik mekanik davranışlarını 10 Hz frekansta 0 °C-120 °C sıcaklık aralığında gözlemlemiştir. Raghavan et al. (2010) ise çalışmasında SMA lifinin gerilme özellikleri ile östenit ve martenzit fazlar arasındaki kritik gerilme değerleri 2 N/dk kontrollü kuvvet modunda DMA ile test edilmiştir.

Tez kapsamında, ısıl işlem görmüş nitinol tel özlü hibrit ipliklere DMA analizi uygulanmıştır. Analizler için Ege Üniversitesi MATAL'da bulunan TA Instruments Q800 Cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.32). Analizlerin gerçekleştirildiği DMA cihazının tüm teknik kalibrasyonları firma tarafından yapılmış olup, her test öncesinde klemp kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.32 DMA Q800 test cihazı.

İki aşamalı olarak gerçekleştirilen DMA analizinin birinci aşamasında hibrit ipliklerin farklı sabit gerilmeler altında (2 N, 4 N ve 6 N) belirli bir sıcaklık aralığındaki dinamik davranışları incelenmiştir. Analiz inert azot atmosferinde gerçekleştirilmiş olup, analiz 5 °C/dk tarama hızı ile -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda numunelerin farklı sıcaklıklardaki birim uzama grafikleri ile depolama modülü-sıcaklık grafikleri elde edilmiştir.

DMA analizinin ikinci aşamasında ise hibrit ipliklerin seçilen sabit sıcaklıklarda farklı gerilmeler altındaki birim uzama özellikleri ölçülmüştür. Ölçüm hava atmosferinde ve nitinol tellerin DSC analizinden elde edilmiş verilerden yola çıkılarak belirlenmiş farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

Numunelere belirlenen sıcaklıklarda gerilim modunda gerilme/birim uzama metodu kullanılarak 1 N/dk hız ile 0,001 N-18 N ile 18 N-0,001 N aralığında kuvvet uygulanmış ve (%) birim uzama grafikleri elde edilmiştir.

3.2.6.2 Çekme testi

Çekme testi, birçok malzemenin elastisite modülü, çekme mukavemeti ve maksimum şekil değiştirme gibi özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır (Doğan, 2014). Test malzemenin sabit sıcaklıkta belirli bir hızda kopuş oluncaya dek çekilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Pürçek, 2014).

Tez kapsamında çelik teller, çelik tel özlü hibrit iplikler, ısıl işlem görmüş ve görmemiş olan nitinol teller ile nitinol tel özlü hibrit ipliklerin çekme mukavemeti (gerilme), elastisite modülü ve maksimum birim uzama özelliklerinin tespiti amacıyla tel ve hibrit ipliklerin çekme testi Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan 100 kN yük kapasiteli Shimadzu Universal Çekme Cihazında, ASTM E8 standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.33). Test Tablo 3.4'te verilen her bir numune için üç kez tekrar edilmiştir.

Şekil 3.33 Shimadzu Universal çekme cihazında gerçekleştirilen tel çekme testi.

Tablo 3.4 Test edilen tel ve hibrit iplik numunelerine ait açıklamalar.

Numune Kodu	Numune Açıklaması
02-S	0,2 mm çelik tel
02-H-S	0,2 mm çelik tel özlü hibrit iplik
03-S	0,3 mm çelik tel
03-H-S	0,3 mm çelik tel özlü hibrit iplik
02-N	0,2 mm nitinol tel
02-H-N	0,2 mm nitinol tel özlü hibrit iplik
03-N	0,3 mm nitinol tel
03-H-N	0,3 mm nitinol tel özlü hibrit iplik
02-N-CW	Isıl işlem görmemiş 0,2 mm nitinol tel
02-H-N-CW	Isıl işlem görmemiş 0,2 mm nitinol tel özlü hibrit iplik
03-N-CW	Isıl işlem görmemiş 0,3 mm nitinol tel
03-H-N-CW	Isıl işlem görmemiş 0,3 mm nitinol tel özlü hibrit iplik

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen testler sırasında tel ve hibrit ipliklere 1 mm/dk sabit hızla çekme kuvveti uygulanmış, kopma kuvveti (N) ve kopma uzaması (mm) verileri elde edilmiştir. Aşağıdaki formüller yardımı ile çekme gerilmesi (1), birim şekil değiştirme (2) ve elastisite modülü (3) değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{Fmaks}{A_0} \tag{1}$$

F maksimum kopma kuvveti ve A_0 numunenin çekme kuvvetine dik doğrultudaki başlangıç kesit yüzeyidir. σ birim alana etkiyen maksimum kuvvet olup numunenin çekme gerilmesini belirtmektedir. Birimi N/mm² (MPa)'dir.

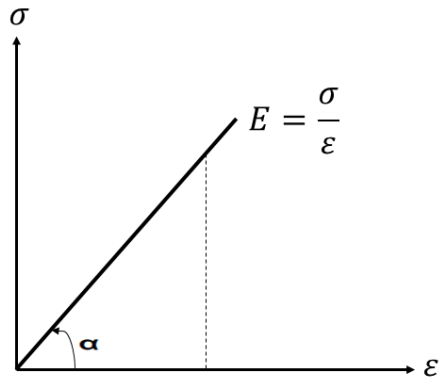
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2}$$

ε birim şekil değiştirme, birim uzama veya gerinim olarak ifade edilmekte olup, test sırasında oluşan toplam uzama miktarının (Δl), numunenin başlangıçtaki uzunluğuna (l_0) oranı olarak tanımlanır.

Her bir numuneye ait gerilme ve birim uzama eğrilerinden ise elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elastisite modülü çekme gerilmesinin birim uzamaya oranıdır ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3}$$

Hooke Kanunu olarak bilinen bu denklemdeki E orantı sabiti Young modülü olarak da adlandırılır. Şekil 3.34'te verilen doğrunun eğimi elastisite modülünü vermektedir.



Şekil 3.34 Hooke doğrusu

Elastisite modülü bir malzemenin elastik şekil değişimine karşı gösterdiği direnç olup, rijitliğini gösterir. Elastisite modülünün yüksek olması bir malzemenin rijit yani uygulanan kuvvet sonrası elastik birim şekil değişiminin düşük olduğu anlamına gelir (Yıldızlı, 2011).

3.2.7 Üç boyutlu dokuma kumaşlara mekanik testlerin uygulanması

Tez kapsamında üretilen üç boyutlu dokuma kumaşların mekanik özelliklerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla, kumaş numunelerine çekme, darbe ve kayma direnci testleri uygulanmıştır. Test edilen kumaş numunelerine ait açıklamalar Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Test edilen kumaşlara ait açıklamalar.

Numune Kodu	Numune Açıklaması
02-S-N	0,2 mm çelik tel içeren, dar kanallı numune
02-N-N	0,2 mm nitinol tel içeren, dar kanallı numune
02-S-T	0,2 mm çelik tel içeren, geniş kanallı numune
02-N-T	0,2 mm nitinol tel içeren, geniş kanallı numune
03-S-N	0,3 mm çelik tel içeren, dar kanallı numune
03-N-N	0,3 mm nitinol tel içeren, dar kanallı numune

03-S-T	0,3 mm çelik tel içeren, geniş kanallı numune
03-N-T	0,3 mm nitinol tel içeren, geniş kanallı numune
R-N	Dar kanallı referans numune (tel içermeyen)
R-T	Geniş kanallı referans numune (tel içermeyen)

3.2.7.1 Çekme testi

Kumaşlara uygulanan çekme testleri, tel ve hibrit iplik çekme testlerinin de gerçekleştirildiği Shimadzu Universal Çekme Cihazında ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Cihazın çeneleri arasına yerleştirilen kumaş numunelerine çözgü yönünde 5 mm/dk sabit hızla kuvvet uygulanmıştır (Şekil 3.35). Elde edilen verilerden gerilme mukavemeti, birim uzama ve elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Test her bir numune için birden çok kez tekrarlanmıştır.

Şekil 3.35 Shimadzu Universal çekme cihazında gerçekleştirilen kumaş çekme testi.

3.2.7.2 Kayma direnci testi

Literatürde tellerin içerisinde bulunduğu yapı içerisinden çekilerek kayma direncinin araştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğunda (Kim et al., 1991; Takaku ve Arridge, 1973; Sadrnezhaad et al., 2009; Merlin et al., 2015; Poon et al., 2005) tellerin içerisinde bulunduğu kompozit yapı içerisinden çekilmesi ile telin matrisle olan ara yüzey yapışması incelenmektedir. Tellerin kumaş yapısı içinden çekilmesi ile kayma kuvvetinin tespit edildiği bir çalışmada ise, kayma direnci test edilmek istenen tel üst çeneye kumaş ise alt çeneye tutturulmuş olup, tel 20 mm/s sabit hızla çekilmiştir (Ashir et al., 2017).

Tez kapsamında üç boyutlu dokuma kumaş yapısı içinde çözgü ipliği olarak bulunan tel özlü hibrit ipliklerin yapı içerisindeki kayma direncinin araştırılması amaçlanmıştır. Testler Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Shimadzu Universal Çekme Cihazı'nda gerçekleştirilmiştir.

Literatürde bu test için özel bir standart bulunmamakta olup (Ashir et al., 2017), test için kumaş numunesi alt çeneye, test edilecek tel özlü hibrit iplik ise üst çeneye tutturulmuş ve 1 mm/dk sabit hızla çekilmiştir. Test sonucunda kumaş yapısı içerisinden bir hibrit ipliği çekmek için gereken kuvvet ve yer değiştirme değerleri tespit edilmiştir.

Şekil 3.36 Kayma direnci testi sırasında çenelere tutturulmuş numunenin görünümü.

3.2.7.3 Darbe testi

Darbe bir malzemenin maruz kaldığı anlık bir dış kuvvettir. Bu kuvvetin hızına göre, darbe düşük veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılmaktadır. 10 m/s altındaki hızlarda gerçekleşen darbeler düşük hızlı darbe olarak adlandırılmaktadır (Özdemir, 2012; Karacan, 2018).

Kompozitler çoğunlukla düşük hızlı darbelere maruz kalabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaş yapıları kompozit ön şekli olarak kullanılacağından düşük hızlı darbe karşısındaki davranışlarını bilmek önemlidir.

Numune üzerine darbe enerjisi uygulandığında, vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi farklı darbe davranışları gözlemlenebilmektedir. Darbe testinden elde edilen verilerle kuvvet-deformasyon (F-d), kuvvet-zaman (F-t), deformasyon-zaman (d-t), absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t) ve hız-zaman (V-t) grafikleri hazırlanabilmektedir (Sayer, 2009).

Tez kapsamında gerçekleştirilen darbe testlerinde Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde bulunan CEAST Fractovis Plus darbe cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.37). Ağırlık düşürme prensibine göre çalışan bu cihaz ile 1800 Joule enerjiye kadar darbe deneyleri yapabilmektedir. Cihazın test sırasında sekme durumunun gözlenmesi halinde tekrarlı darbeyi önleyici bir sistemi de bulunmaktadır.

Şekil 3.37 CEAST Fractovis Plus darbe cihazı.

Darbe testinde kullanılan vurucu uç yarı küresel olup, ağırlığı 626 g ve çapı 12,7 mm'dir. Vurucu uca bağlı kuvvet dönüştürücünün yük kapasitesi 22,4 kN'dir.

Darbe testi öncesinde numunelere ön deneme amacıyla 20, 40 ve 60 Joule enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe uygulanmıştır. En uygun enerji seviyesinin belirlenmesinin amaçlandığı bu denemede, 40 Joule numunelerin delinme sınırı olduğu için uygun enerji seviyesi olarak belirlenmiş ve tüm numuneler için testler aynı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. ASTM D3763 standardına göre gerçekleştirilen testler her bir numune için birden fazla kez tekrarlanmıştır. Ortalama maksimum darbe hızı 4,025 m/s'dir. Darbe kuvvetine maruz kalmış numunenin önden ve yandan görünümü Şekil 3.38'de verilmektedir.

Şekil 3.38 Darbe kuvveti ile delinmiş bir numunenin önden ve yandan görünümü.

Analiz sonucunda temas kuvveti, deformasyon, enerji ve zaman değerleri elde edilmiş, tablo ve grafik halinde sunulmuştur.

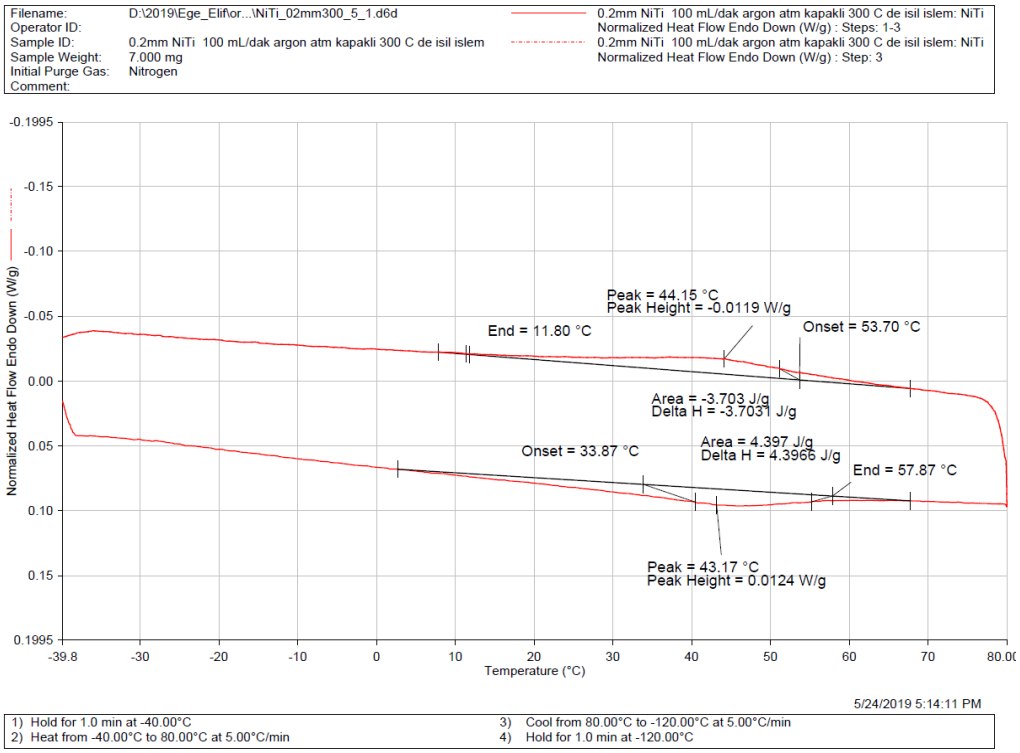
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Tel ve Hibrit İpliklere Uygulanan Mekanik Testlere İlişkin Bulgular

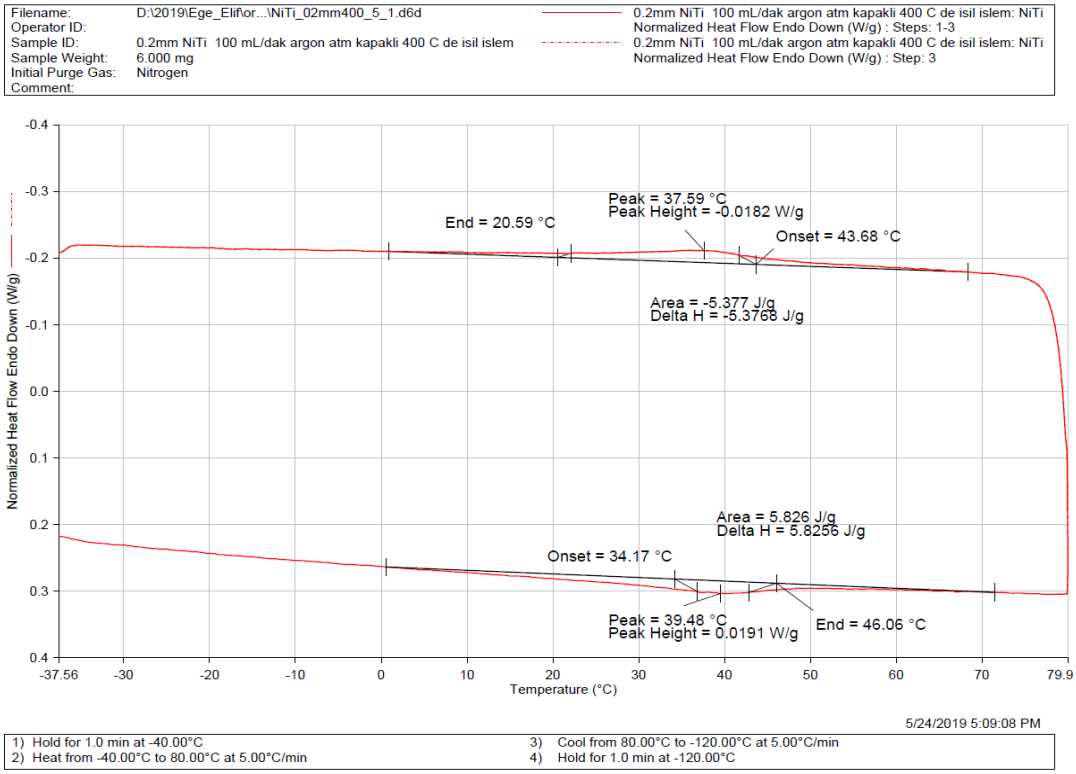
4.1.1 DSC analizi

Tez kapsamında ısıl işlem görmemiş halde temin edilen nitinol tellere uygulanan ısıl işlemler sonrasında nitinol tellerin östenit ve martenzit fazlar arasında dönüşüm sergileyip sergilemediğini gözlemlemek, faz dönüşüm sıcaklıkları ile optimum ısıl işlem sıcaklığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen DSC analiz sonucunda 200 °C'de 1 saat süreyle işlem gören nitinol tellerin hiçbir dönüşüm sergilemediği gözlenmiştir. Dönüşümün gözlenmemesi nitinol tellere bu sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemin şekil hafıza özelliği kazandırmak için yeterli olmadığını göstermektedir. Diğer sıcaklıklarda (300 °C, 400 °C ve 500 °C) ise nitinol tel dönüşüm göstermiş, diğer bir ifade ile şekil hafıza özelliği kazanabilmiştir.

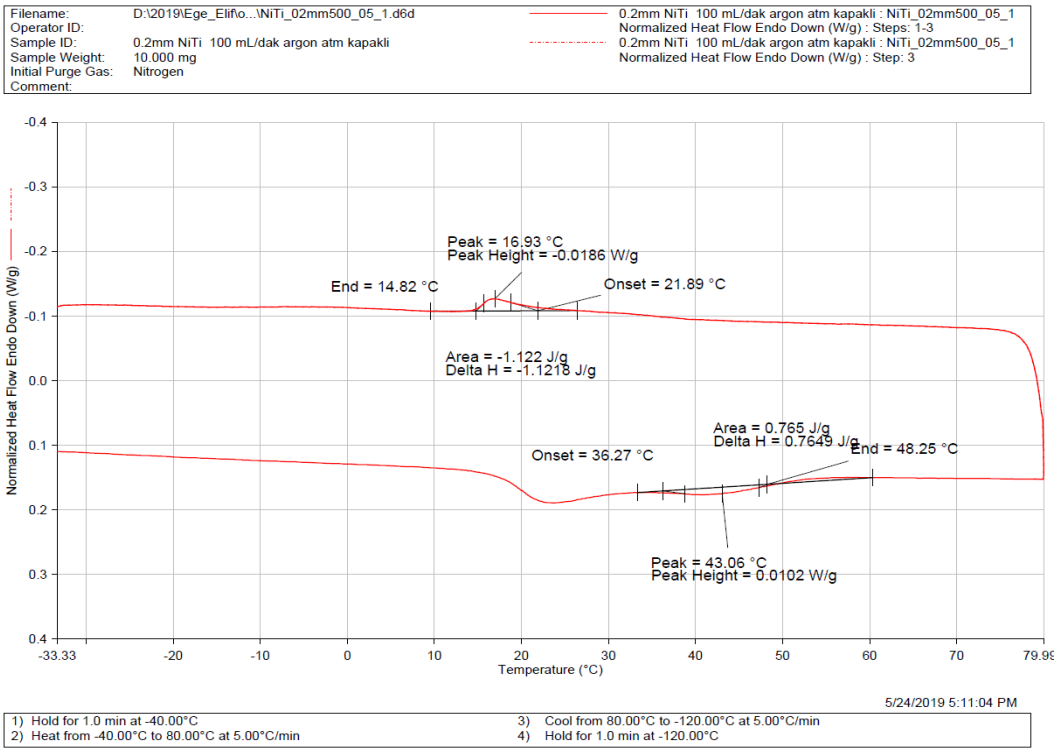
Üç farklı sıcaklık değerinde ısıl işlem gören farklı kalınlıklarda nitinol tellerin östenit ve martenzit fazlar arasındaki dönüşüm sıcaklıklarını gösteren grafikler 300 °C, 400 °C ve 500 °C için sırasıyla Şekil 4.1-4.6'da, bu grafiklerden derlenen veriler ise Tablo 4.1'de verilmiştir.



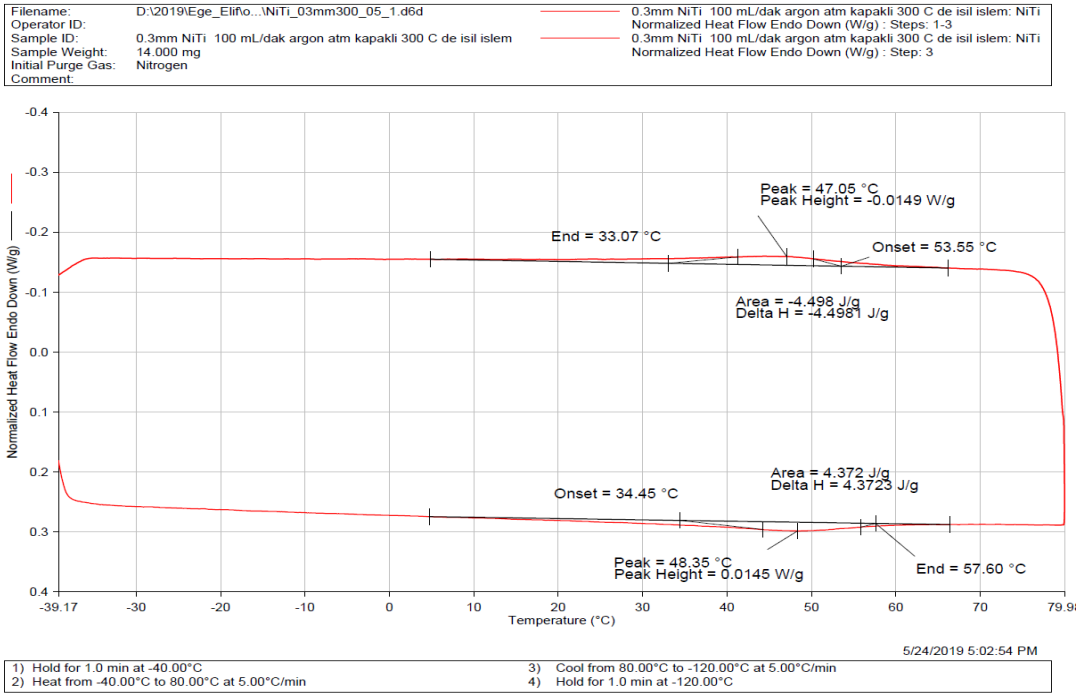
Şekil 4.1 300 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.



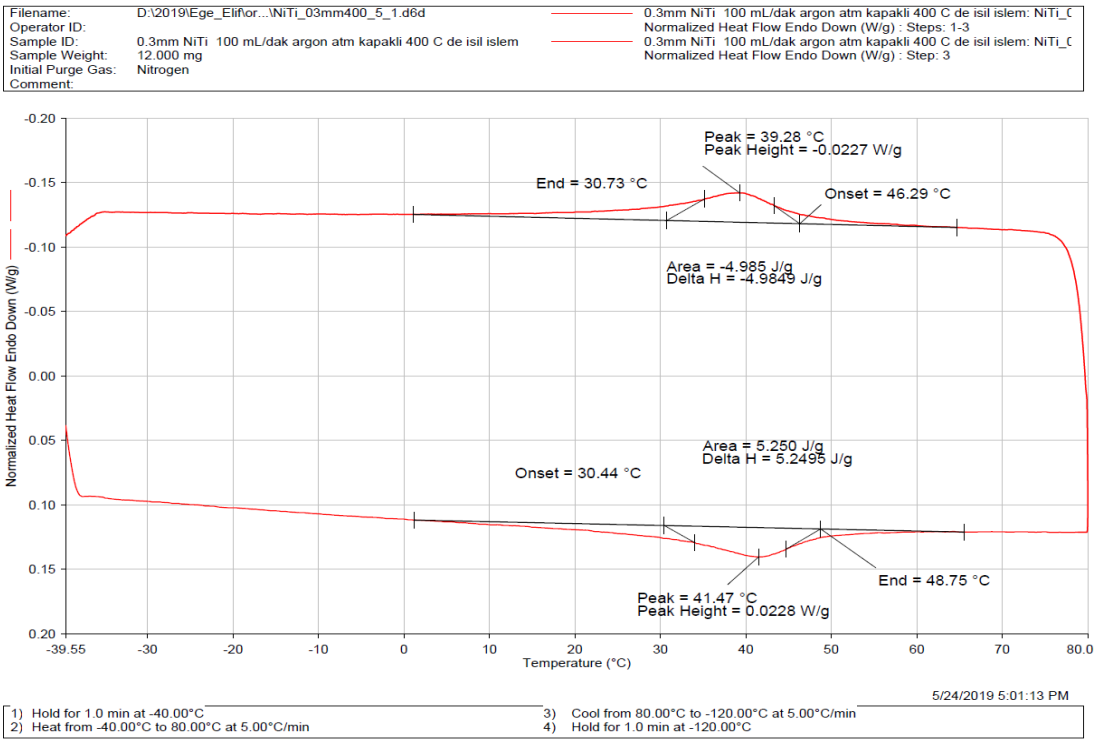
Şekil 4.2 400 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.



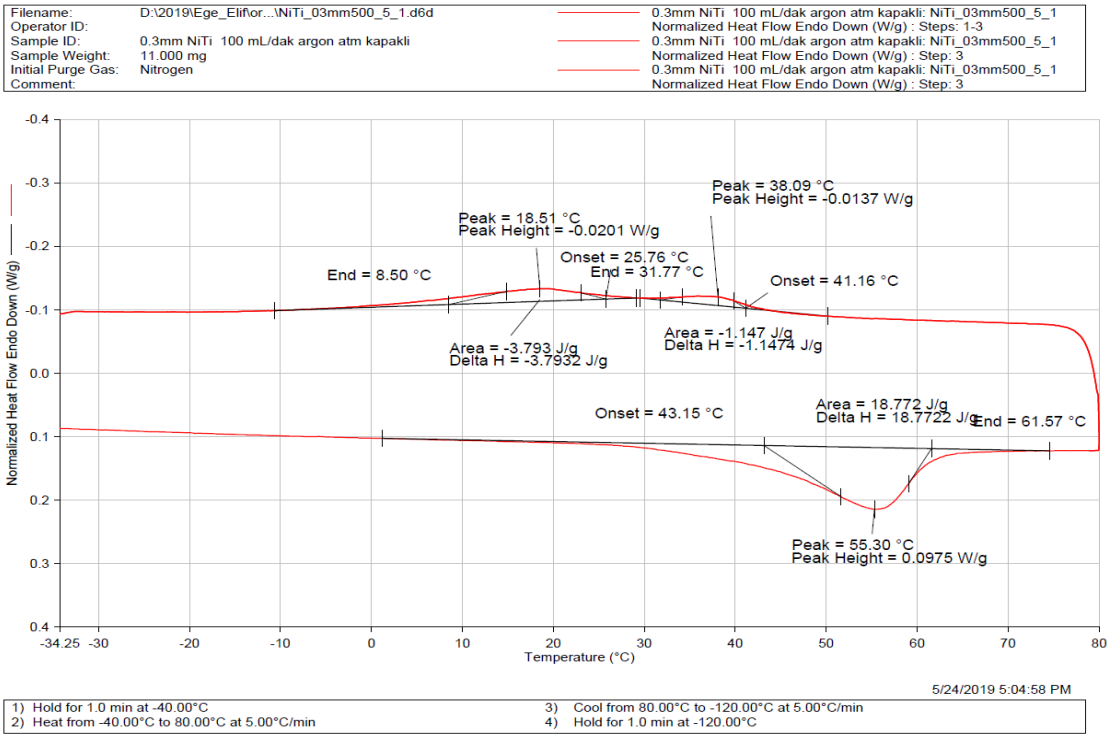
Şekil 4.3 500 °C'de ısıl işlem gören 0,2 mm nitinol tele ait DSC grafiği.



Şekil 4.4 300 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.



Şekil 4.5 400 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.



Şekil 4.6 500 °C'de ısıl işlem gören 0,3 mm nitinol tele ait DSC grafiği.

Tablo 4.1 DSC analizine ilişkin bulgular.

Tel çapı (mm)	Sıcaklık (ºC)	A_s (ºC)	A_{tepe} (ºC)	A_f (ºC)	ΔH Isıtma-Endotermik (j/g)	M_s (ºC)	M_{tepe} (ºC)	M_f (ºC)	ΔH Soğutma-Ekzotermik (j/g)
0,2	300	33,87	43,17	57,87	4,397	53,7	44,15	11,80	-3,703
	400	34,17	39,48	46,06	5,826	43,68	37,59	20,59	-5,377
	500	36,27	43,06	48,25	0,765	21,89	16,93	14,82	-1,122
0,3	300	34,45	48,35	57,60	4,372	53,55	47,05	33,07	-4,498
	400	30,44	41,47	48,75	5,250	46,29	39,28	30,73	-4,985
	500	43,15	55,30	61,57	18,772	41,16	38,09	31,77	-1,147
						25,76	18,51	8,5	-3,793

DSC analizinden elde edilen sonuçlara göre nitinol tellerin faz dönüşümü esnasında gerçekleşen endotermik ve ekzotermik reaksiyonlarda en yüksek enerji alışverişi her iki tel kalınlığı için de 400 °C'de gerçekleşmiştir (Tablo 4.1). Yüksek dönüşüm enerjisi, ilgili sıcaklıkta ısıl işlem görmüş malzemenin diğer sıcaklıklara (300 °C ve 500 °C) kıyasla daha kararlı bir dönüşüm sergilediğini göstermektedir. Başka bir deyişle 400 °C'de ısıl işlem görmüş nitinol telin faz dönüşümünün gerçekleşmesi için sistem daha fazla enerji alışverişine ihtiyaç duymaktadır (Acar, 2016; Ergen, 2018; Dağdelen vd., 2015). Tez kapsamında nitinol tellere uygulanan tüm ısıl işlemlerde optimum sıcaklık 400 °C olarak belirlenmiş ve uygulanmıştır.

Optimum sıcaklıkta ısıl işlem görmüş 0,2 mm çaplı nitinol tellerin DSC analiz grafiği değerlendirildiğinde telin ısıtılması ile başlayan endotermik faz dönüşümünün başlangıç sıcaklığının 34,17 °C olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.2). Bu aynı zamanda östenit fazın başlangıç sıcaklığı (A_s) olup, malzemenin bu sıcaklıktan itibaren östenit faza geçmeye başladığı anlamına gelmektedir. Endotermik reaksiyon 39,48 °C'de tepe noktasına (A_{tepe}) ulaşmış ve 46,06 °C'de sona ermiştir. Östenit bitiş sıcaklığı (A_f) olarak da adlandırılan bu sıcaklıktan

itibaren nitinol telin % 100 östenitik durumda olduğu bilinmektedir. Östenit faza dönüşüm entalpisi 5,826 J/g bulunmuştur. Nitinol telin soğutulmasıyla martenzit fazdan östenit faza ekzotermik dönüşüm başlamaktadır. Buna göre ekzotermik dönüşümün başladığı martenzit başlangıç sıcaklığı (M_s) 43,68 °C olup, bu sıcaklıktan itibaren malzemenin martenzit faza dönüşmeye başladığı anlaşılmaktadır. Ekzotermik dönüşümün tepe noktası (M_{tepe}) 37,59 °C olup, martenzit bitiş sıcaklığı (M_f) olan 20,59 °C'den itibaren ise malzemenin martenzit faz dönüşümü tamamlanmıştır. Ekzotermik dönüşüm entalpisi -5,377 J/g'dır.

Diğer tel kalınlığı olan 0,3 mm çaplı nitinol telin DSC analiz sonucuna göre endotermik faz dönüşümü A_s=30,44 °C'de başlamakta, A_{tepe}=41,47 °C'de tepe noktasına ulaşmakta ve A_f=48,75 °C'de sonlanmaktadır. 48,75 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda malzeme % 100 östenit fazda bulunmaktadır. Telin soğutulmasıyla östenit fazdan martenzit faza ekzotermik dönüşüm başlamaktadır. Buna göre M_s=46,29 °C, M_{tepe}=39,28 °C ve M_f=30,73 °C'dir. 30,73 °C altındaki sıcaklıklarda malzeme tamamen martenzit haldedir. Malzemenin östenit faza dönüşüm entalpisi +5,250 J/g, martenzit faza dönüşüm entalpisi ise -4.985 J/g'dır (Bkz. Şekil 4.5). Aynı sıcaklıkta aynı süre ısıl işlem gören 0,2 ve 0,3 mm çaplı nitinol tellerin faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpileri birbirlerinden farklılık göstermektedir.

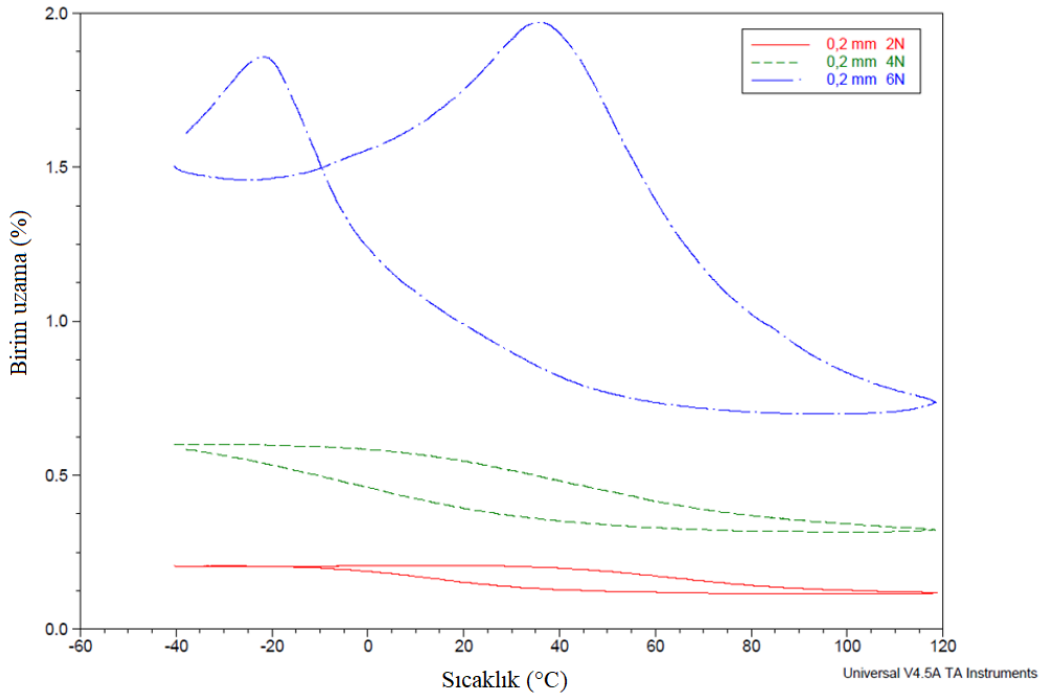
DSC analizinden elde edilen sonuçlar, DMA analizi kapsamında farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlerde, farklı kalınlıklardaki nitinol tellerin östenit ve martenzit fazlarda bulunduğu sıcaklık değerlerinin tespit edilmesinde de kullanılmıştır.

4.1.2 DMA analizi

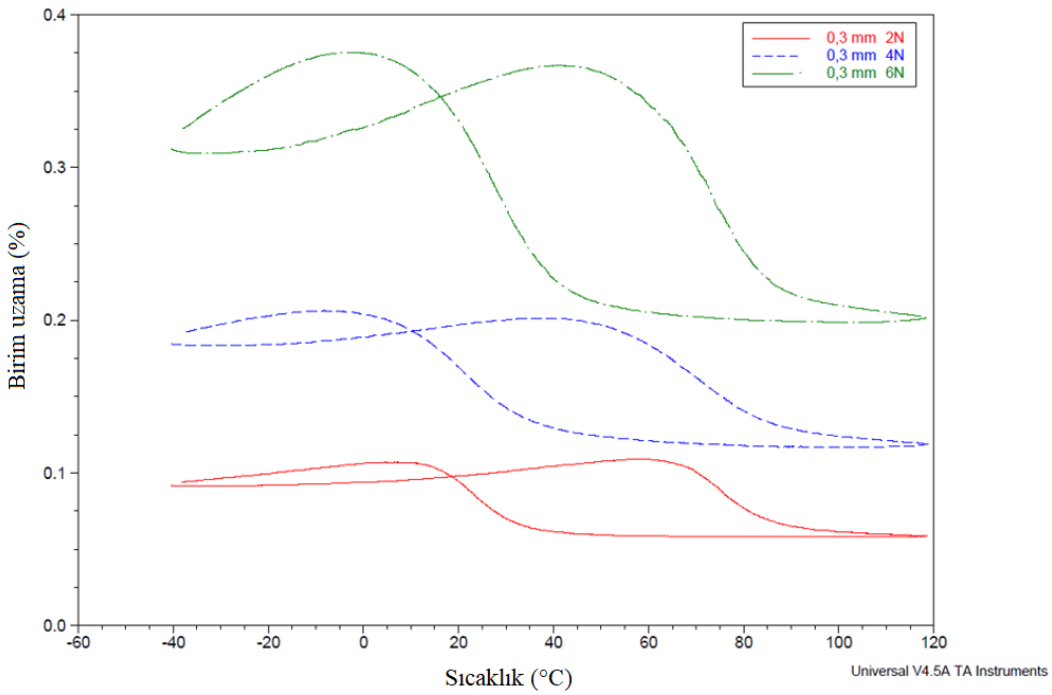
DMA Q800 cihazında yapılan analiz kapsamında, ısıl işlem görmüş 0,2 mm ve 0,3 mm nitinol tellerin sıcaklığa bağlı değişen mekanik özelliklerinin gözlemlenebilmesi amacıyla, farklı sabit kuvvetler altında dinamik testler ile farklı sabit sıcaklıklarda statik testler gerçekleştirilmiştir. Çelik tellerin mekanik özellikleri sıcaklığa bağlı olmadığından (Heller et al., 2012), analizler sadece ısıl işlem görmüş nitinol tellere uygulanmıştır.

4.1.2.1 Sabit kuvvet altında gerçekleştirilen dinamik analizlere ilişkin bulgular

Nitinol tellerin östenit ve martenzit fazlar arasında dönüşüm sergilediği sıcaklık aralığında (-40 °C ile +120 °C), literatür verileri ile ön denemelerden edinilen bilgiler ışığında belirlenen sabit kuvvetler (2 N, 4 N ve 6 N) uygulanarak gerçekleştirilen testlerden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan birim uzama-sıcaklık grafikleri 0,2 mm ve 0,3 mm çaplı teller için sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmektedir.



Şekil 4.7 0,2 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen dinamik mekanik analizine ilişkin birim uzama-sıcaklık grafiği.



Şekil 4.8 0,3 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen dinamik mekanik analizine ilişkin birim uzama-sıcaklık grafiği.

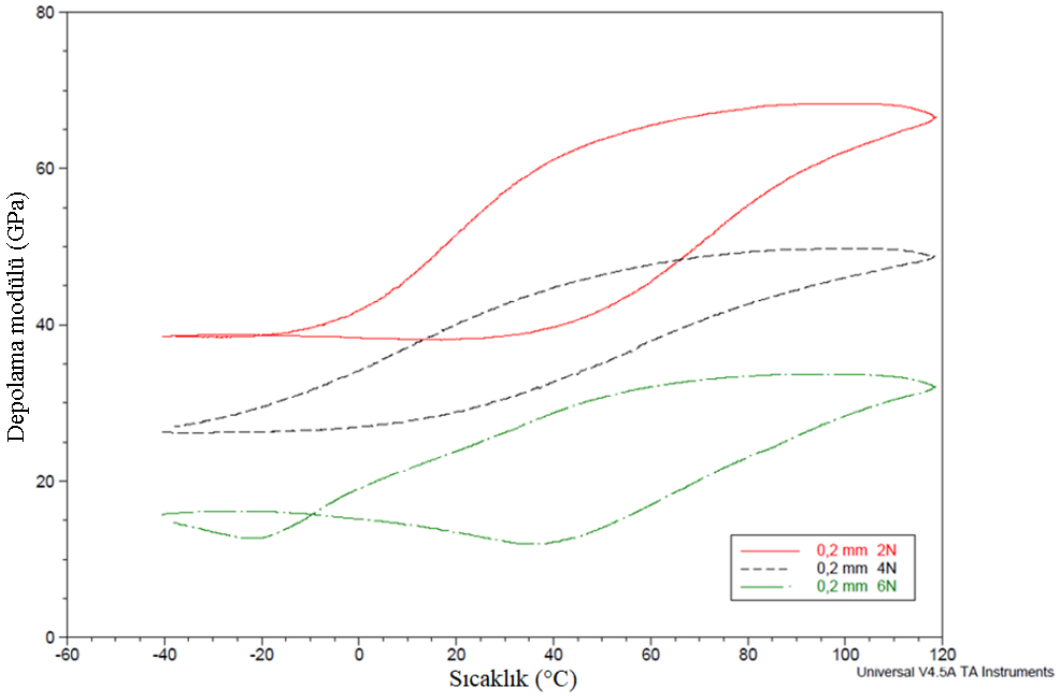
Elde edilen sonuçlara göre nitinol tele belirli sıcaklık aralığında sabit kuvvet uygulandığında, birim uzama oranının sıcaklığa ve uygulanan kuvvete bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Her iki tel çapı için de birim uzama oranı tele uygulanan kuvvet arttıkça artmaktadır.

Sıcaklık değişimi ile nitinol telin östenit ve martenzit fazlar arasında dönüşüm sergilediği, diğer bir ifade ile şekil hafızası gösterdiği gözlemlenmiştir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak birim uzama, 6 N kuvvet uygulanan 0,2 mm tel ile tüm 0,3 mm teller için sıcaklık artışı ile önce artmış daha sonra azalmaya başlamıştır. Döngünün östenit fazdan martezit faza geri dönüşünde ise sıcaklığın azalmasına bağlı olarak birim uzamanın önce arttığı, daha sonra azaldığı belirlenmiştir. 2 N ve 4 N sabit kuvvete maruz bırakılan 0,2 mm tellerde ise sıcaklık artışı ile birim uzamanın azaldığı, sıcaklığın azalması ile arttığı gözlemlenmiştir.

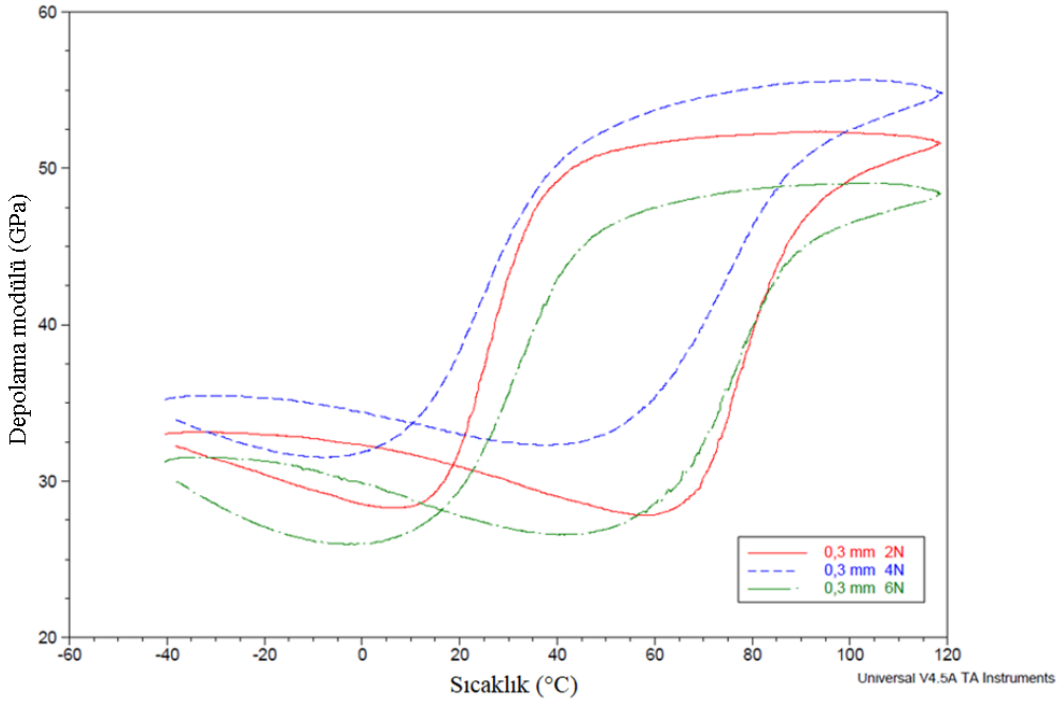
Her iki tele aynı sabit kuvvetler uygulanmasına rağmen tellerin kesit alanlarının birbirinden farklı olmasından dolayı teller farklı gerilmelere maruz

kalmaktadır. Bu nedenle 0,3 mm telin birim uzama oranları 0,2 mm tele kıyasla daha düşük bulunmuştur.

Sabit kuvvet altında gerçekleştirilen dinamik analiz verileri kullanılarak, farklı kalınlıklardaki nitinol teller için depolama modülünün sıcaklığa bağlı değişimi de incelenmişir. Depolama modülü malzemenin sertliğinin bir göstergesi olup, yükleme sırasında depolanan enerji ile orantılıdır. Elastisite modülüne çok benzerdir (Sezgin, 2018). Nitinol tellere ait depolama modülü-sıcaklık grafikleri 0,2 mm ve 0,3 mm tel çapları için sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.9 0,2 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında farklı sabit kuvvetler altında gerçekleştirilen analizine ait depolama modülü-sıcaklık grafiği.



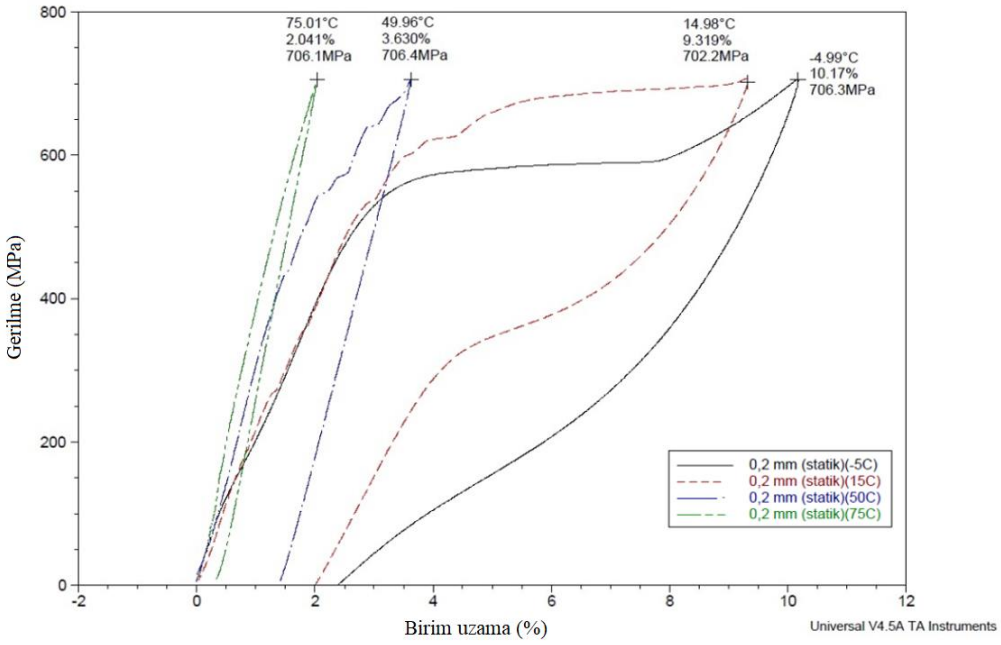
Şekil 4.10 0,3 mm nitinol telin -40 °C ile +120 °C sıcaklık aralığında farklı sabit kuvvetler altında gerçekleştirilen analizine ait depolama modülü-sıcaklık grafiği.

Depolama modülünün her iki tel kalınlığı için de sıcaklığa bağlı olarak önce bir miktar düştüğü, daha sonra arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.9 ve 4.10). Bu sonuç literatür ile de uyum göstermektedir (Lah et al., 2016). Bununla birlikte farklı tel çaplarında farklı kuvvetler için farklı sonuçlar alınmıştır. Örneğin 0,2 mm nitinol tel için en yüksek depolama modül değeri 2 N kuvvet altında elde edilmişken, 0,3 mm nitinol tel için en yüksek depolama modülü 4 N kuvvet altında elde edilmiştir. 0,2 mm telin depolama modülünün 0,3 mm telden daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu da 0,2 mm nitinol telin deformasyon karşısında daha dayanıklı olduğunu, daha fazla enerji depolayabildiğini göstermektedir.

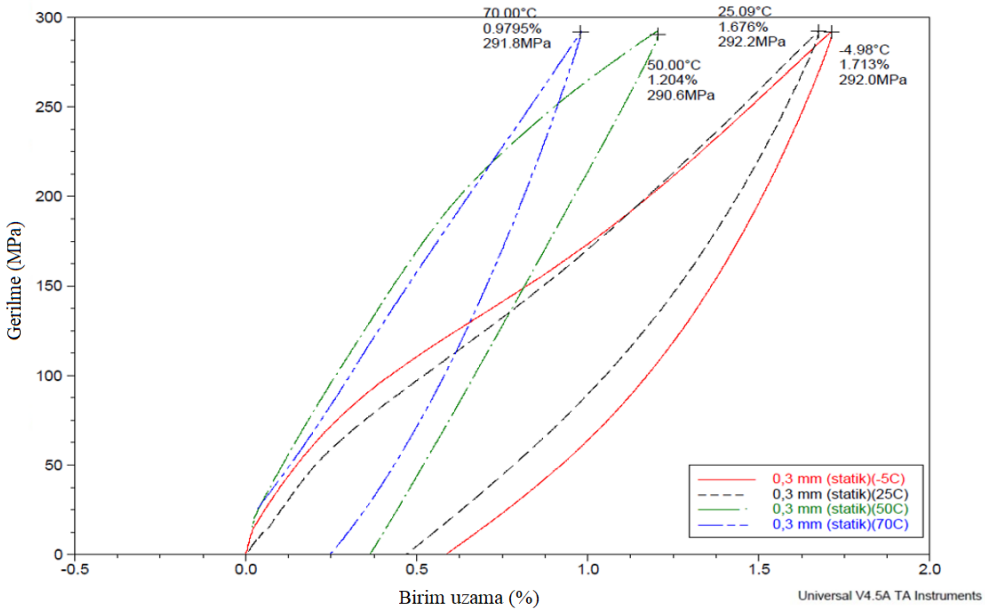
4.1.2.2 Sabit sıcaklıkta gerçekleştirilen statik analizlere ilişkin bulgular

Gerçekleştirilen statik analizler öncesinde 0,2 mm ve 0,3 mm nitinol teller için DSC grafiklerinden yararlanarak tellerin östenit ve martenzit fazda bulunduğu dört ayrı sıcaklık değeri belirlenmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda tellere 0,001 N-18 N aralığında artan-azalan kuvvet uygulanmıştır.

Belirlenen sıcaklıklar 0,2 mm çaplı nitinol tel için -5 °C, 15 °C, 50 °C ve 75 °C; 0,3 mm tel için -5 °C, 25 °C, 50 °C ve 70 °C'dir. Analiz verileri kullanılarak hazırlanan gerilme-birim uzama grafikleri 0,2 mm ve 0,3 mm tel çapları için sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmektedir.



Şekil 4.11 0,2 mm nitinol tel için değişken kuvvet ve farklı sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilen DMA analizine ait gerilme-birim uzama grafiği.



Şekil 4.12 0,3 mm nitinol tel için değişken kuvvet ve farklı sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilen DMA analizine ait gerilme-birim uzama grafiği.

Belirlenen sabit sıcaklıklarda tellere kuvvet yüklemesi-boşaltması uygulanarak gerçekleştirilen analizden edilen grafiklerde yükleme ve boşaltma eğrilerinin birbiri ile çakışmadığı gözlenmektedir. Gerilme-birim uzama döngüsünde tıpkı ısıtma-soğutma döngüsünde olduğu gibi histerezis eğrisi elde edilmiştir. Bu durum, ısıl işlemler ile nitinol tellerin şekil hafıza özelliğinin yanı sıra süperelastisite özelliği kazandığını da göstermektedir.

Statik analizlerden elde edilen sonuca göre üzere nitinol tellerin mekanik özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Her iki tel kalınlığı için geçerli olmak üzere tellerin martenzit fazda bulunduğu sıcaklıklarda birim uzamanın daha fazla olduğu, sıcaklık artışı ile bu oranın azaldığı gözlenmektedir. Bu durum, martenzit fazda bulunan telin daha kolay deforme edilebilmesinden kaynaklanmaktadır (Toptaş ve Akkuş, 2007). Birim uzama değerleri 0,2 mm çaplı nitinol tel için -4,99 °C'de % 10,17; 14,98 °C'de % 9,319; 49,96 °C'de % 3,63 ve 75,01 °C'de % 2,041'dir (Şekil 4.11). 0,3 mm çaplı nitinol tel için birim uzama değerleri ise -4,98 °C'de % 1,713; 25,09 °C'de % 1,676; 50 °C'de % 1,204 ve 70 °C'de % 0,9795'dir (Şekil 4.12). Görüldüğü üzere 0,2 mm tel için bu azalma daha da belirgindir. Bu veriler ışığında 0,2 mm tellerin martenzit fazdaki birim uzama oranlarının, 0,3 mm tele kıyasla daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.3 Çekme testi

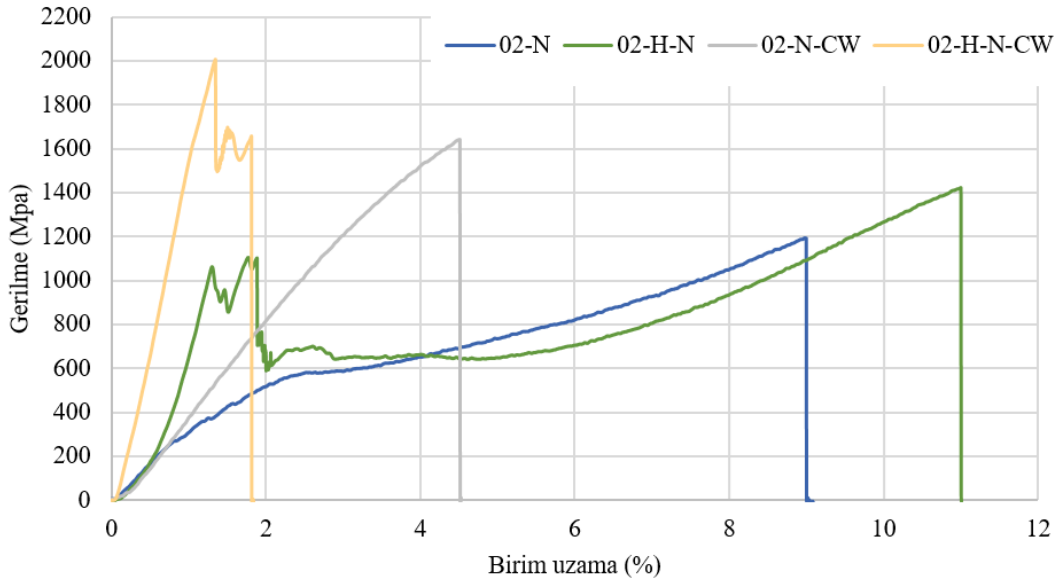
Tez kapsamında üretilen tel özlü hibrit ipliklerin mekanik özelliklerinin tek teller ile karşılaştırılması amacıyla çelik ve nitinol teller ile tel özlü hibrit ipliklere çekme testi uygulanmıştır. Öte yandan nitinol tel ve hibrit ipliklere uygulanan ısıl işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin tespit edilmesi için ısıl işlem görmemiş olan nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit iplikler için de çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen ortalama maksimum çekme gerilmesi, ortalama maksimum birim uzama ve elastisite modülü parametrelerine ait bulgular Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Tel ve hibrit iplik çekme testine ilişkin bulgular.

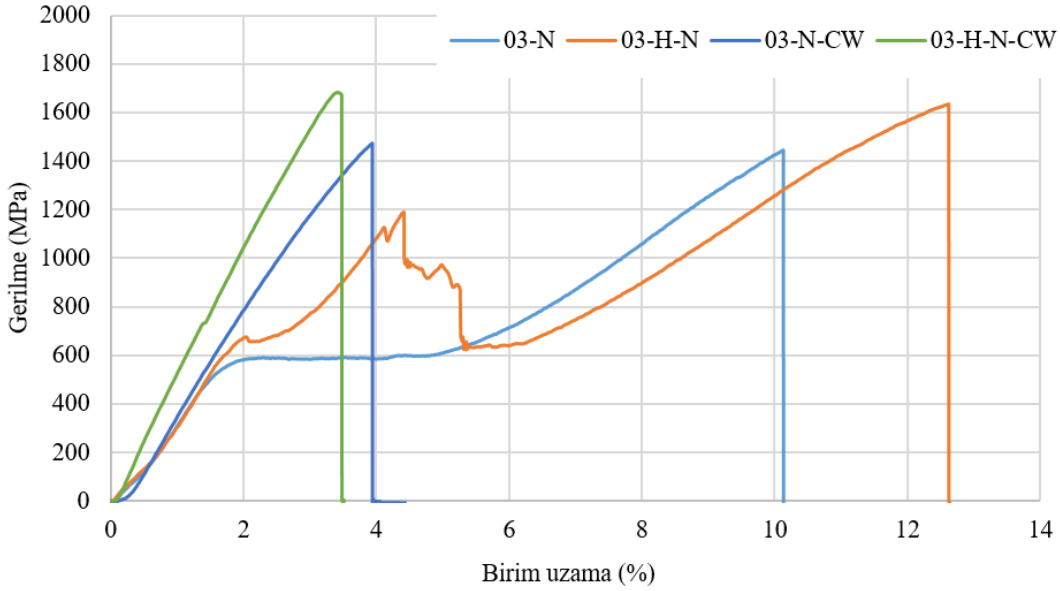
Numune Kodu	Ortalama Maksimum Gerilme (N/mm²)	Ortalama Maksimum Gerilme St. Sapma	Ortalama Maksimum Birim Uzama (%)	Ortalama Maksimum Birim Uzama St. Sapma	Elastisite Modülü (N/mm²)	Elastisite Modülü St. Sapma
02-S	623,47	99,74	36,04	15,11	499,03	17,08
02-H-S	1617,64	569,22	41,41	1,38	1335,14	52,18
03-S	671,89	2,81	51,70	1,28	475,49	31,70
03-H-S	784,38	20,59	44,54	0,27	415,92	150,66
02-N	1085,12	333,67	8,57	2,23	308,23	21,19
02-H-N	1356,44	279,98	10,02	3,20	1259,92	24,68
03-N	1370,56	73,34	10,28	0,01	363,98	22,69
03-H-N	1373,71	227,42	12,29	0,32	410,05	55,27
02-N-CW	1285,74	369,06	3,58	0,88	428,94	39,73
02-H-N-CW	2082,83	161,02	2,67	1,34	1573,03	191,12
03-N-CW	1577,08	105,29	4,73	0,31	397,18	24,06
03-H-N-CW	1712,82	52,94	3,61	0,45	707,65	134,01

Elde edilen veriler kullanılarak numunelerin gerilme-birim uzama grafikleri hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar tüm numuneler için ısıl işlem (ısıl işlem görmüş veya görmemiş), iplik cinsi (tel veya hibrit iplik), tel cinsi (nitinol veya çelik) ve tel çapı (0,2 mm veya 0,3 mm) parametreleri açısından incelenmiştir.

İlk olarak ısıl işlem görmemiş halde temin edilmiş olan nitinol tellere ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere, tez kapsamında uygulanan ısıl işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Isıl işlem görmüş ve görmemiş olan nitinol teller ile nitinol tel özlü hibrit ipliklerin gerilme-birim uzama grafikleri 0,2 mm ve 0,3 mm tel çapları için sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.13 Isıl işlem görmüş ve görmemiş 0,2 mm nitinol teller ve hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği.

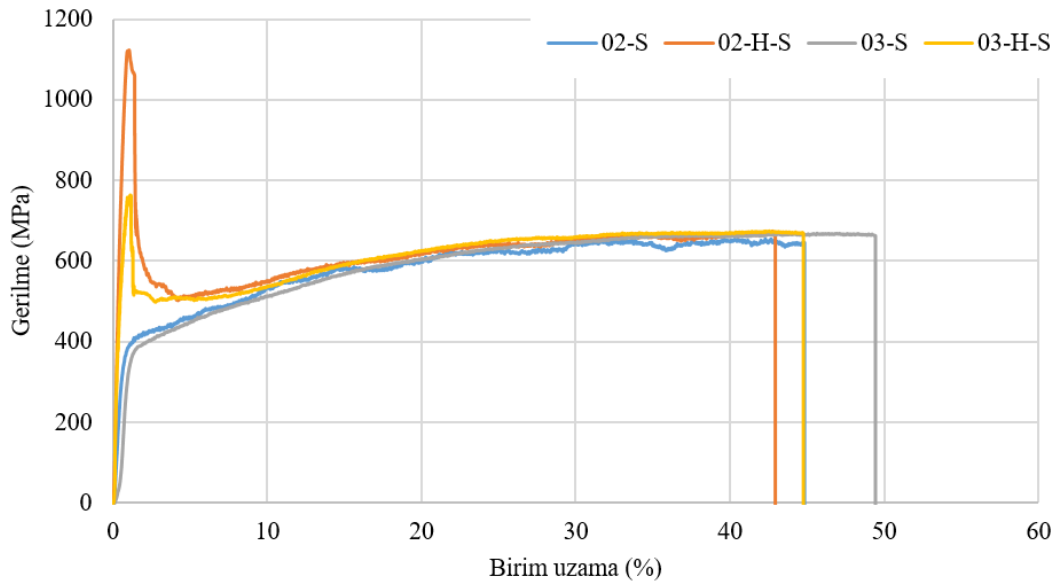


Şekil 4.14 Isıl işlem görmüş ve görmemiş 0,3 mm nitinol teller ve hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği.

Elde edilen sonuçlara göre her iki tel çapı için de ısıl işlem görmemiş olan nitinol tel ve hibrit ipliklerin daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olduğu, bununla birlikte birim uzama oranlarının düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14). Bunun nedeni ısıl işlem görmemiş nitinol telin içyapısındaki yüksek yoğunluklu dislokasyonlardır. Dislokasyon kristal yapıdaki kusurlar olup, atomların yanlış yerleşmesi sonucu oluşur. Dislokasyonlar malzemenin mukavemetini artırırken, esnekliğini azaltmaktadır. Isıl işlem sayesinde

martenzitik dönüşümü engelleyen dislokasyonlar elimine edilmekte, bu sayede malzemenin geri dönebilir uzama oranı artmaktadır (Yan and Humbeeck, 2011; Chang and Lee, 2011; Ay, 2019).

İplik cinsinin numunelerin gerilme-birim uzama özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için ise test edilen numuneler numune cinsine göre (çelik veya nitinol) göre gruplandırılarak grafikler hazırlanmıştır. Çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklere ait grafik Şekil 4.15'te, nitinol teller ile nitinol tel özlü hibrit ipliklere ait grafik Şekil 4.16'da verilmektedir. Nitinol tel ve hibrit iplikler ısıl işlem görmüştür.



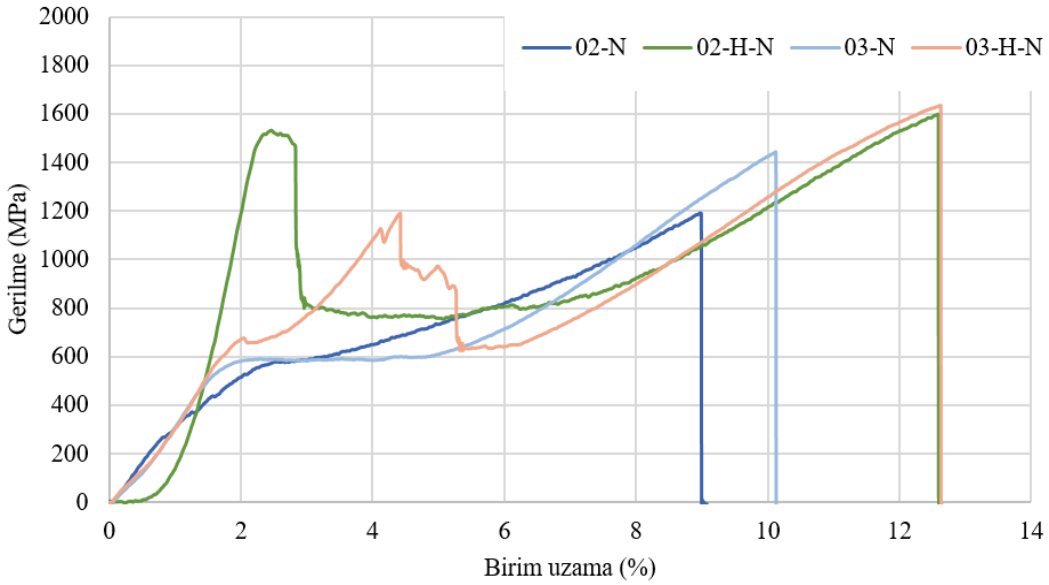
Şekil 4.15 Çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği.

Çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklerin çekme testinden elde edilen sonuçlara göre çelik tel özlü hibrit ipliklerin en yüksek çekme gerilmesine sahip olduğu belirlenmiştir. Tele kıyasla hibrit ipliklerin daha yüksek dayanıma sahip olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü öz kısımda bulunan tel, bükümlü karbon iplikle desteklenerek özlü hibrit iplik yapısı elde edilmiştir (Şekil 4.15).

Elde edilen bir diğer sonuca göre 0,2 mm çelik tel 0,3 mm tele kıyasla daha düşük gerilme dayanımına sahipken, hibrit iplik formuna getirildiğinde gerilme dayanımı 0,3 mm çelik tel özlü hibrit ipliğe kıyasla daha yüksek bulunmuştur.

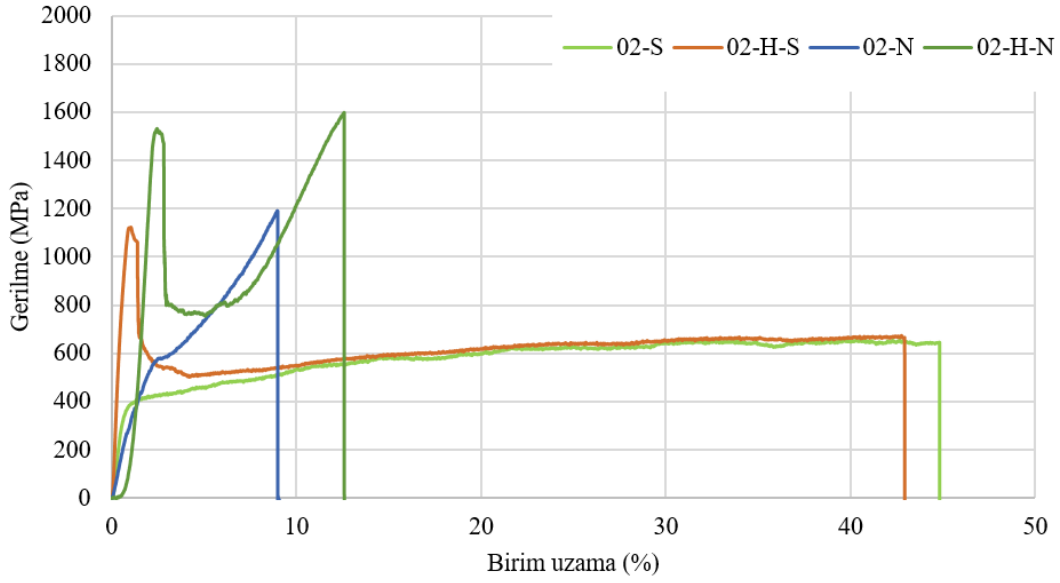
Bununla birlikte 0,3 mm çelik tel ve hibrit ipliklerin birim uzama yüzdesi de 0,2 mm çelik tel ve hibrit ipliklerden daha yüksektir.

Nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere uygulanan çekme testi sonuçlarına göre ise nitinol tel özlü hibrit ipliklerin gerilme mukavemetinin, çelik tel özlü hibrit ipliklerde de olduğu gibi, tek nitinol tele kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, nitinol tel özlü hibrit ipliklerin birim uzama yüzdeleri de tek nitinol telden daha fazladır (Şekil 4.16). Buna ek olarak, çapı büyük olan (0,3 mm) nitinol tel ve hibrit ipliklerin hem daha yüksek gerilme dayanımına hem de daha yüksek birim uzama oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.

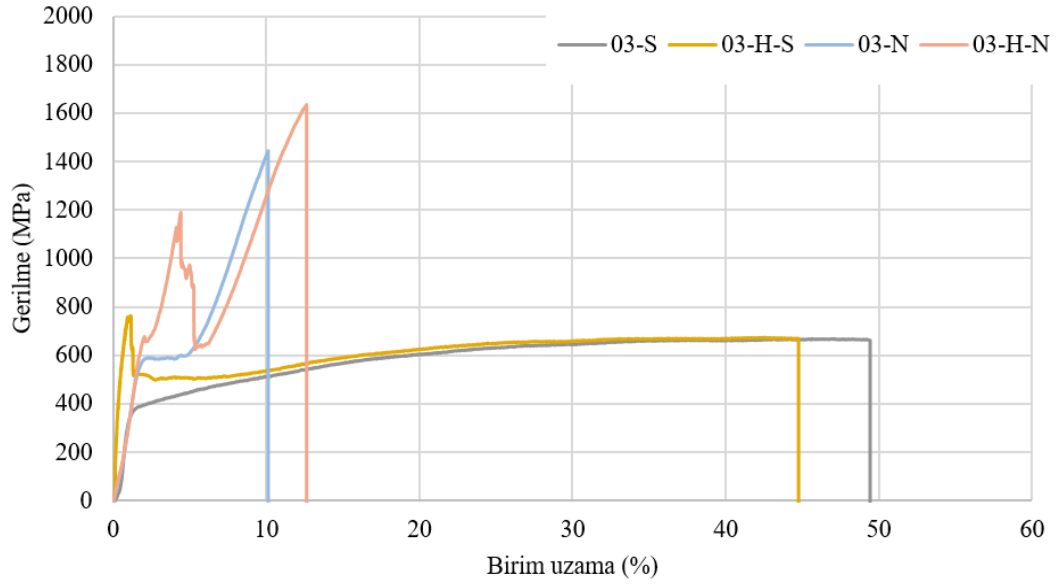


Şekil 4.16 Nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklere ait gerilme-birim uzama grafiği.

Çelik veya nitinol tel kullanımının numunelerin gerilme-birim uzama özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi için tel ve hibrit iplik numuneleri tel çaplarına göre gruplandırılmıştır. Bu şekilde aynı kalınlıktaki çelik ve nitinol teller ile çelik ve nitinol tel özlü hibrit ipliklerin mekanik özellikleri karşılaştırılabilmiştir. 0,2 mm ve 0,3 mm tel ve hibrit iplikler için hazırlanan gerilme-birim uzama grafikleri sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17 0,2 mm tel ve hibrit ipliklerin gerilme-birim uzama grafiği.



Şekil 4.18 0,3 mm tel ve hibrit ipliklerin gerilme-birim uzama grafiği.

Elde edilen sonuçlara göre aynı tel kalınlığına sahip çelik tel ve çelik hibrit ipliklerin birim uzama değerleri nitinol tel ve hibrit iplik numunelerine kıyasla çok daha yüksektir. Bununla birlikte nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit iplikler çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklere kıyasla daha yüksek gerilme dayanımı göstermektedir.

4.1.3.1 Çekme testi sonuçlarının istatistiksel analizi

Çalışma kapsamında ısıl işlem, iplik cinsi, tel cinsi ve tel çapı değişkenlerinin numunelerin gerilme-birim uzama özellikleri üzerindeki etkileri istatistiksel olarak da değerlendirilmiştir. İstatistik analiz için çoklu doğrusal regresyon, "Backward" metodu kullanılmış olup, analiz IBM SPSS Statistics 22 paket programında gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi % 5 olarak alınmıştır.

Çoklu doğrusal regresyon, Y bağımlı değişken ve X_1, X_2,…X_k bağımsız değişkenler olmak üzere, bir tane bağımlı ve birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel bir model yardımı ile ortaya koyan bir analiz yöntemi olup, *k* sayıda bağımsız değişkene sahip regresyon modeli şu şekilde ifade edilmektedir (Özdamar, 2013; Ünver vd., 2006):

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+\ldots+b_kX_k \quad (4)$$

Denklemde b_0 sabit terim, b_1, b_2 ve b_k bağımsız değişkenlere ait katsayılar, Y bağımlı değişken, X_1, X_2 ve X_k bağımsız değişkenlerdir.

Tel ve hibrit ipliklere uygulanmış çekme testi verilerinin değerlendirileceği regresyon analizinde gerilme, birim uzama ve elastisite modülü bağımlı değişkenler olarak ele alınmıştır. Tel çapı bağımsız sürekli değişken olup, tel cinsi, iplik cinsi ve ısıl işlem bağımsız kategorik değişkenlerdir.

Bağımsız sürekli değişken olan tel çapı programa "1: 0,2 mm ve 2: 0,3 mm olarak girilmiştir. Kategorik değişkenler ise "ısıl işlem varsa 1, yoksa 0"; iplik cinsi "hibrit iplik ise 1, tel ise 0"; tel cinsi "çelik ise 1, nitinol ise 0" şeklinde kodlanmış ve değerlendirmeler bu kodlamalara göre yapılmıştır.

Regresyon analizi sayesinde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin anlamlılığı ortaya konmuş olup, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni ne kadar tahminleyebildiği, hangi bağımsız değişkenin bağımlı

değişken üzerinde ne derece etkili olduğu ve bunun istatistiksel açıdan önemi tespit edilmiştir.

Gerilme

Backward metodu kullanılarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon modellerine ait Anova sonuçları incelendiğinde; birinci regresyon modeli $F(4,35)=11,307$, $p<0,001$ ve ikinci regresyon modeli $F(3,35)=14,937$, $p<0,001$ önemli bulunmuştur.

Tel ve hibrit ipliklerin çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ait katsayılar ve kodları, anlamlılık değerleri (p) ile modellere ait belirleme katsayıları (R^2) Tablo 4.3'te verilmiştir. Bağımsız değişkenlerden sürekli değişken olan tel çapı X kodu ile belirtilmiş, kategorik değişkenler ise D kodu ile tanımlanmıştır.

Tablo 4.3 Çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	1611,986	0,000	0,593
	Tel çapı	X	-93,466	0,391	
	Isıl işlem	D_1	-368,162	0,009*	
	İplik cinsi	D_2	385,660	0,001*	
	Tel cinsi	D_3	-372,113	0,008*	
2	Sabit	-	1471,788	0,000	0,583
	Isıl işlem	D_1	-368,162	0,008*	
	İplik cinsi	D_2	385,660	0,001*	
	Tel cinsi	D_3	-372,113	0,008*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.3'den yararlanılarak regresyon denklemleri elde edilmiştir.

$$\text{Çekme gerilmesi}=1611,986-93,466X-368,162D_1+385,660D_2-372,113D_3 \quad (5)$$

Denklem (5) incelendiğinde tüm bağımsız değişkenlerin modele dahil olduğu görülmektedir. Katsayılara göre tel çapındaki artış çekme gerilmesinde düşüşe neden olmaktadır. Nitinol tellere uygulanan ısıl işlem çekme gerilmesini

azaltmakta, hibrit iplikler tellere göre daha yüksek gerilme özelliği göstermektedir. Çelik tel ve hibrit ipliklerin gerilme dayanımı nitinol tellerden daha düşüktür. Çekme gerilmesini istatistiksel olarak anlamlı seviyede etkileyen faktörler ısıl işlem, iplik cinsi ve tel cinsidir. Tel çapının ise istatistiksel olarak önemli bir etkisi yoktur (p=0,391). Bu nedenle tel çapı değişkeni modelden çıkarılarak analiz yenilenmiş ve aşağıdaki regresyon denklemi elde edilmiştir.

$$\text{Çekme gerilmesi}=1471{,}788-368{,}162D_1+385{,}660D_2-372{,}113D_3 \qquad (6)$$

Elde edilen regresyon modelinde modele giren tüm bağımsız değişkenler (ısıl işlem p=0,008; iplik cinsi p=0,001 ve tel cinsi p=0,008) istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 4.3). Modelin belirleme katsayısına (R^2) bakıldığında bağımsız değişkenlerin çekme gerilmesini % 58,3 oranda tahminleyebildiği belirlenmiştir.

İstatistik analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel çekme testi sonuçlarını desteklemektedir.

Birim uzama

Birim uzama bağımlı değişkeninin tahminlenmesi için gerçekleştirilen istatistik analiz sonucunda elde edilen regresyon modelleri anlamlı bulunmuştur (Model 1: F(4,35)=112,937, p<0,001 ve Model 2: F(3,35)=155,434, p<0,001).

Uygulanan çekme testi sonrasında tel ve hibrit ipliklerin birim uzama özelliğine ilişkin olarak elde edilen regresyon analizi sonuçları Tablo 4.4'de verilmektedir.

Tablo 4.4 Birim uzamanın tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	-2,539	0,399	0,936
	Tel çapı	X	4,147	0,017*	
	Isıl işlem	D_1	6,640	0,003*	

	İplik cinsi	D_2	-0,060	0,971	
	Tel cinsi	D_3	33,133	0,000*	
2	Sabit	-	-2,569	0,367	0,936
	Tel çapı	X	4,147	0,016*	
	Isıl işlem	D_1	6,640	0,002*	
	Tel cinsi	D_3	33,133	0,000*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.4'te verilen katsayı değerlerine göre elde edilen regresyon denklemleri aşağıda verilmektedir.

$$\text{Birim uzama}=-2{,}539+4{,}147X+6{,}640D_1-0{,}060D_2+33{,}133D_3 \quad (7)$$

Denklem (7)'ye göre tel çapındaki artış birim uzama miktarını arttırmaktadır. Buna göre 0,3 mm tel ile 0,3 mm tel özlü hibrit ipliğin birim şekil değiştirmesi 0,2 mm tel ve hibrit ipliklerden daha fazladır. Isıl işlem gören nitinol tellerin birim uzaması ise ısıl işlem görmemiş olanlardan daha yüksektir. Tel cinsine göre çelik tellerin birim uzama oranı nitinol tellerden yüksek bulunmuştur. İplik cinsinin birim uzama üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde hibrit ipliklerin telden daha düşük birim uzama oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucuna göre numunenin birim uzama özelliklerini istatistiksel olarak önemli düzeyde etkileyen faktörler tel çapı, ısıl işlem ve tel cinsidir. İplik cinsinin etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p=0{,}971$). Bu nedenle iplik cinsi değişkeni modelden çıkarılarak analiz yenilenmiştir. Elde edilen regresyon denklemi aşağıda verilmiş olup, modele giren bağımsız değişkenler (tel çapı $p=0{,}016$; ısıl işlem $p=0{,}002$ ve tel cinsi $p<0{,}001$) ise önemli bulunmuştur.

$$\text{Birim uzama}=-2{,}569+4{,}147X+6{,}640D_1+33{,}133D_3 \quad (8)$$

Modele ait belirleme katsayısına (R^2) bakıldığında modelin numunelerin birim uzama özelliğini % 93,6 oranla tahminleyebildiği belirlenmiştir.

Regresyon analizinden elde edilen sonuçlar çekme testinden elde edilen deneysel verilerle de uyumludur.

Elastisite modülü

Elastisite modülünün bağımlı değişken olarak alındığı regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon modellerinin tümü istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş olup, istatistiki veriler birinci model için $F(4,35)=16,813$, $p<0,001$; ikinci model için $F(3,35)=22,277$, $p<0,001$ ve üçüncü model için $F(2,35)=30,857$, $p<0,001$ şeklindedir.

Tablo 4.5'te regresyon analizinden elde edilen regresyon modellerine dahil olan bağımsız değişkenler, bu değişkenlere ait katsayılar ve belirleme katsayıları görülmektedir.

Tablo 4.5 Elastisite modülünün tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	1166,128	0,000*	0,684
	Tel çapı	X	-439,002	0,000*	
	Isıl işlem	D_1	-191,152	0,082	
	İplik cinsi	D_2	538,147	0,000*	
	Tel cinsi	D_3	95,845	0,374	
2	Sabit	-	1166,128	0,000*	0,676
	Tel çapı	X	-439,002	0,000*	
	Isıl işlem	D_1	-143,229	0,129	
	İplik cinsi	D_2	538,147	0,000*	
3	Sabit	-	1070,642	0,000*	0,652
	Tel çapı	X	-439,002	0,000*	
	İplik cinsi	D_2	538,147	0,000*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.5'ten yararlanılarak regresyon denklemleri elde edilmiştir.

$$\text{Elastisite modülü}=1166,128-439,002X-191,152D_1+538,147D_2+95,845D_3 \qquad (9)$$

Denklem (9)'a göre tel çapının artması elastisite modülünü anlamlı olarak azaltmaktadır. Hibrit ipliklerin elastisite modülü ise tellerden daha yüksek bulunmuştur. İstatistiksel olarak önemli bulunan bu sonuç deneysel sonuçlar ile de uyum göstermektedir. Hibrit ipliklerin gerilme mukavemetinin tellerden daha yüksek olması elastisite modülünün doğrusal olarak artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte hibrit ipliklerde tel çapının artışı elastisite modülünün istatistiksel olarak anlamlı şekilde azaltmaktadır.

Öte yandan istatistiksel olarak önemli bulunmayan nitinol tellere ısıl işlem uygulaması, elastisite modülünün düşmesine sebep olmaktadır. Son olarak, çelik tel kullanımının elastisite modülünü nitinol tellere kıyasla arttırdığı belirlenmiştir. Bu durumda çelik telin nitinole kıyasla daha rijit olduğu söylenebilmektedir. Ancak bu sonuç istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Bu doğrultuda, p değeri en yüksek olan tel cinsi bağımsız değişkeni modelden çıkarılarak analiz yenilenmiş ve aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\text{Elastisite modülü}=1166{,}128-439{,}002X-143{,}229D_1+538{,}147D_2 \qquad (10)$$

Elde edilen yeni denkleme (10) göre tel çapı ($p<0{,}001$) ve iplik cinsi ($p<0{,}001$) elastisite modülünü önemli düzeyde etkileyen faktörlerdir. Nitinol tellere ısıl işlem uygulanması ise istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip değildir. Bu nedenle ısıl işlem değişkeni modelden çıkarılarak analiz yenilenmiştir. Elde edilen yeni denklem aşağıda verilmektedir:

$$\text{Elastisite modülü}=1070{,}642-439{,}002X+538{,}147D_2 \qquad (11)$$

Kabul edilen modele ait R^2 değerine göre modelin elastisite modülünü tahminleyebilme gücü % 65,2'dir.

4.2 Kumaşlara Uygulanan Mekanik Testlere İlişkin Bulgular

4.2.1 Çekme testi

Tez kapsamında çekme testleri gerçekleştirilen çelik ve nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin gerilme, birim uzama ve elastisite modülüne ait bulgular Tablo 4.6'da verilmektedir.

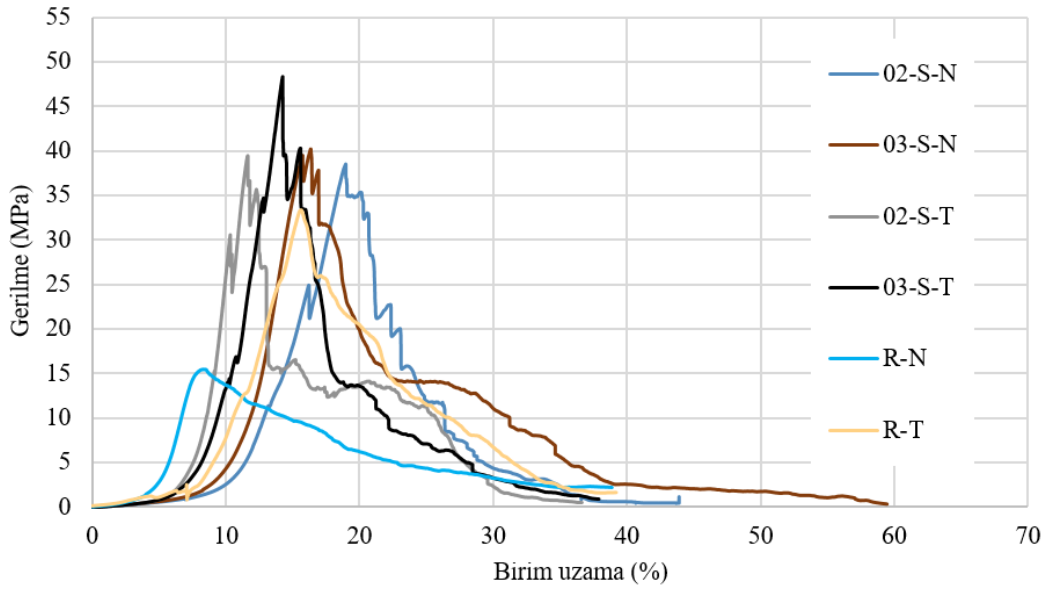
Tablo 4.6 Kumaş çekme testine ilişkin bulgular.

Numune Kodu	Ortalama Maksimum Gerilme (N/mm²)	Ortalama Maksimum Gerilme St. Sapma	Ortalama Maksimum Birim Uzama (%)	Ortalama Maksimum Birim Uzama St. Sapma	Elastisite Modülü (N/mm²)	Elastisite Modülü St. Sapma
02-S-N	36,18	3,29	19,88	1,33	477,07	49,43
02-N-N	22,08	6,70	15,99	0,88	459,54	30,04
02-S-T	38,06	1,96	12,17	0,81	685,72	44,44
02-N-T	23,02	0,72	12,22	1,05	607,30	52,66
03-S-N	40,06	0,20	16,93	0,88	693,67	123,89
03-N-N	23,64	3,86	15,56	2,38	541,47	10,84
03-S-T	43,30	7,10	13,26	1,36	423,93	108,66
03-N-T	19,00	1,10	13,12	0,63	328,52	10,42
R-N	12,24	4,56	9,37	0,43	412,93	124,06
R-T	39,32	8,44	15,25	0,61	498,33	80,02

Kumaş çekme testinden elde edilen verilere göre kumaş numunelerinin gerilme-birim uzama grafikleri hazırlanmıştır. Numunelerin gerilme-birim uzama özellikleri numune cinsi (çelik tel içeren, nitinol tel içeren veya tel içermeyen), tel çapı (0,2 mm veya 0,3 mm) ve kanal genişliği (dar veya geniş kanallı) parametrelerine göre incelenmiştir.

Tel çapı ve kanal genişliğinin gerilme-birim uzama özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için numuneler "çelik tel içeren numuneler ve referans numuneler" ile "nitinol tel içeren numuneler ve referans numuneler" olarak gruplandırılmış ve grafikler hazırlanmıştır. Çelik tel içeren numuneler ile referans

kumaş numunelerinin gerilme-birim uzama eğrilerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.19'da, nitinol tel içeren numuneler ile referans kumaş numunelerine ait grafik ise Şekil 4.20'de verilmektedir.

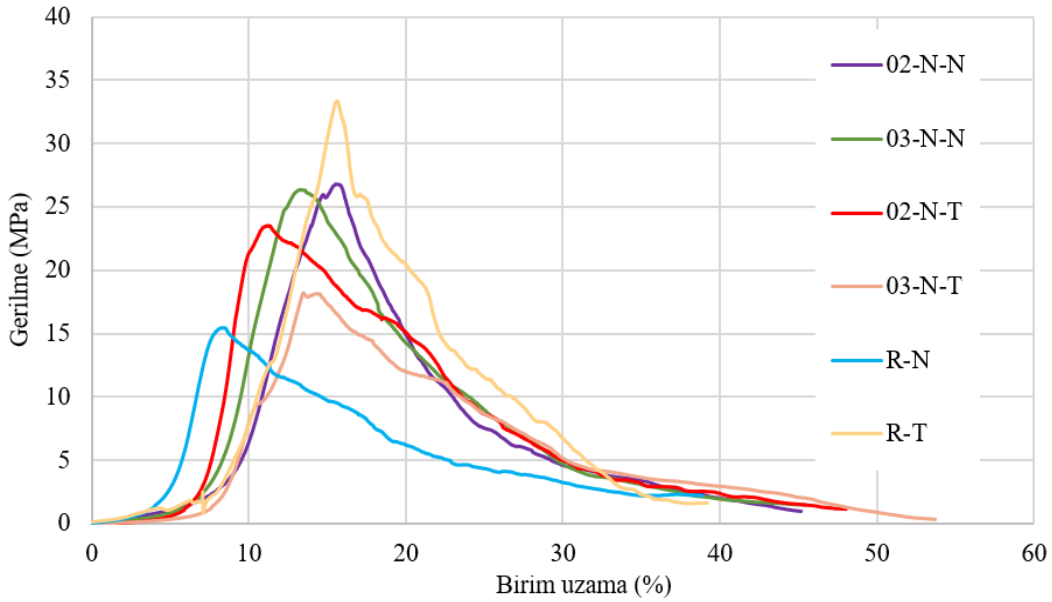


Şekil 4.19 Çelik tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği.

Çelik tel içeren kumaş numunelerinin çekme testi sonuçlarına göre 0,3 mm tel içeren ve geniş kanallı olan numunenin (03-S-T) en yüksek gerilme dayanımına sahip olduğu, bunu 0,3 mm tel içeren dar kanallı (03-S-N) numunenin izlediği görülmektedir. Aynı şekilde 0,2 mm çelik tel içeren numune için de geniş kanallı numunenin (02-S-T), dar kanallıya (02-S-N) kıyasla daha yüksek gerilme mukavemeti gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.19). Bu veriler ışığında çelik tel içeren numuneler için tel çapının artışı ve geniş kanal seçiminin gerilme mukavemetini arttırdığı yorumu yapılabilmektedir. Çelik tel çapındaki artışın kumaş gerilme dayanımını arttırması beklenen bir sonuçtur. Çünkü tel ve hibrit ipliklere uygulanan çekme testinde de tel çapı artışına bağlı olarak gerilmenin arttığı belirlenmiştir. Elde edilen bir diğer sonuca göre dar kanallı tel içermeyen referans numune (R-N) en düşük gerilme dayanımını sergilemekte olup, geniş kanallı referans numune (R-T) 0,3 mm çelik tel içeren numunelerden daha kötü, ancak 0,2 mm çelik tel içeren numunelerden daha iyi sonuç vermiştir.

Çelik tel içeren kumaş numunelerinin birim uzama değerlerine göre ise dar kanallı numunelerin geniş kanallı olanlara kıyasla daha fazla birim uzama gösterdikleri tespit edilmiştir. 0,2 mm çelik tel içeren dar kanallı kumaş numunesinin (02-S-N) en yüksek ve 0,2 mm tel içeren geniş kanallı kumaş numunesinin (02-S-T) en düşük birim uzama oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer veriler de göz önünde bulundurulduğunda çelik tel içeren numunelerde ince tel çapı ve dar kanallı kumaş yapısının birim uzama oranını arttırdığı söylenebilmektedir.

İnce kanallı tel içermeyen referans numune (R-N) birim uzama oranı açısından da en kötü sonucu veren numunedir. R-N numunesinin hem gerilme hem birim uzama açısından en kötü sonucu vermesi bu numunenin en düşük dayanıma ve esnekliğe sahip kumaş numunesi olduğunu göstermektedir.



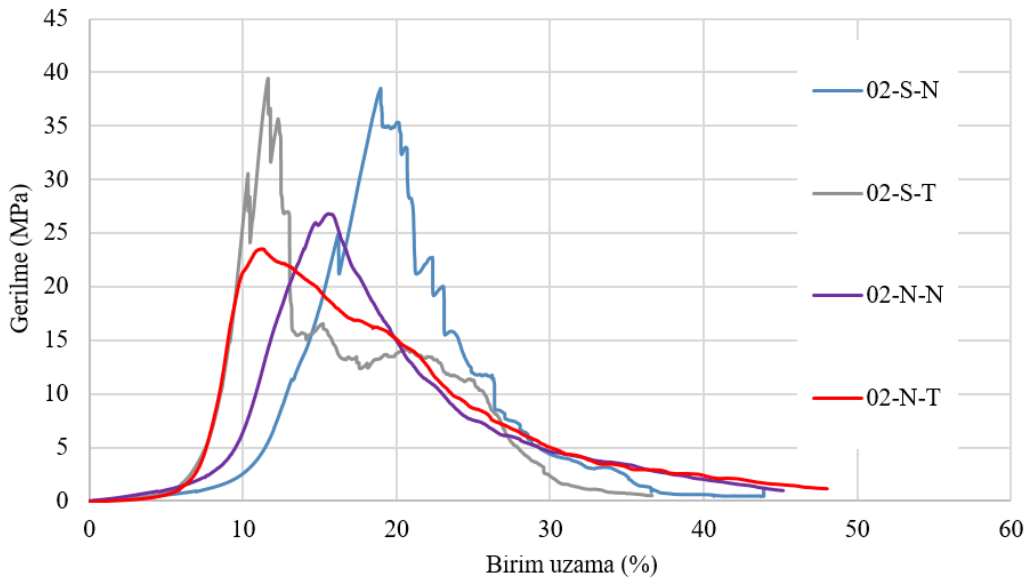
Şekil 4.20 Nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği.

Nitinol tel içeren ve tel içermeyen referans kumaş numunelerine ait sonuçlar değerlendiğinde en iyi gerilme dayanımına 0,3 mm tel içeren dar kanallı kumaş numunesinin (03-N-N), en düşük gerilme dayanımına ise 0,3 mm tel içeren geniş kanallı kumaş numunesinin sahip olduğu belirlenmiştir. Nitinol tel içeren numuneler için dar kanallı kumaşların daha iyi gerilme dayanımı sergilediği söylenebilmektedir (Şekil 4.20). Geniş kanallı referans numunenin gerilme

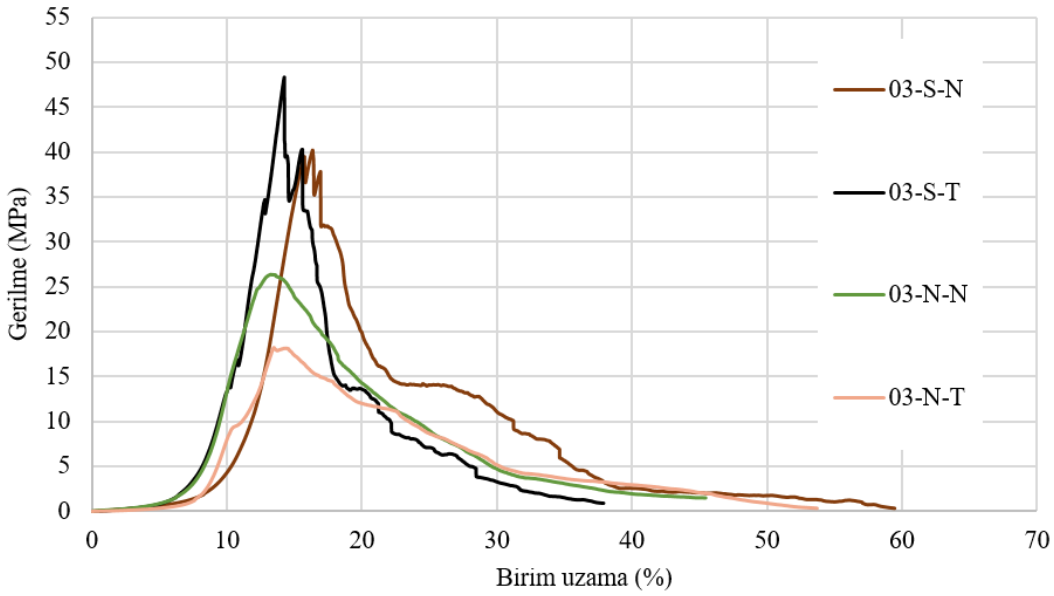
dayanımı tüm nitinol tel içeren numunelerden daha yüksek, dar kanallı referans numunenin gerilme dayanımı ise tüm nitinol tel içeren numunelerden daha düşük bulunmuştur. R-T ve R-N kodlu numuneler arasındaki farkın kumaş kanal yapısından kaynaklandığı öngörülmektedir.

Geniş kanallı referans numunenin (R-T), 0,3 mm çelik tel içeren kumaş numuneleri hariç tüm çelik ve nitinol tel içeren kumaş numunelerinden daha iyi gerilme dayanımına sahip olması şekilde açıklanabilmektedir. Karbon, cam gibi yüksek performanslı ancak kırılganlığı yüksek elyaflarda tel takviyesi mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde katkı sağlasa bile, mikro düzeyde hasar başlangıcına neden olabilmektedir. Dolayısı ile içyapıda oluşan bu deformasyonlar mekanik özelliklerde de düşüşe sebep olmaktadır (Pappada et al., 2009b). Öte yandan tez kapsamında, nitinol tele şekil hafıza ve süperelastisite özellikleri kumaş formunda uygulanan ısıl işlemler ile kazandırılmıştır. Ancak kumaş formunda yapılan ısıl işlemler karbon elyafın gerilme dayanımının düşmesine neden olmuştur (Feih et al., 2009).

Numune cinsinin gerilme-birim uzama üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için ise tel takviyeli kumaş numuneleri içerdikleri tel çapına göre gruplandırılmıştır. Hazırlanan gerilme-birim uzama grafikleri 0,2 mm ve 0,3 mm teller için sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.21 0,2 mm tel içeren kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği.



Şekil 4.22 0,3 mm tel içeren kumaş numunelerine ait gerilme-birim uzama grafiği.

Elde edilen sonuçlara göre her iki tel çapı için çelik tel içeren kumaş numunelerinin nitinol tel içeren numunelerden daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olduğu ortaya konmuştur.

Her iki numune cinsi (nitinol ve çelik tel) için ise 0,2 mm ve 0,3 mm tel içeren dar kanallı numunelerin birim uzama oranları geniş kanallı numunelerden daha yüksek bulunmuştur.

4.2.1.1 <u>Çekme testi sonuçlarının istatistiksel analizi</u>

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar çoklu doğrusal regresyon analizi, "Backward" metodu ile değerlendirilmiştir. Çekme testinden elde edilen gerilme, birim uzama ve elastisite modülü verileri bağımlı değişken olarak analize dahil edilirken, numune cinsi, tel çapı ve kanal genişliği parametreleri bağımsız değişkenler olarak alınmıştır.

Bağımsız değişkenlerden tel çapı sürekli, numune cinsi ve kanal genişliği kategorik değişkenlerdir. Numune cinsi üç kategorili bir kategorik değişken olduğundan yapay kodlama ile numune cinsi için iki adet kukla değişken oluşturulmuştur (Dikmen, 2018; Şen, 2019). Analizler kodlamalara göre

değerlendirileceğinden bağımsız değişkenler için veri girişinin nasıl yapıldığı aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Bağımsız sürekli değişken olan tel çapı programa "0,2 mm tel için 1; 0,3 mm tel için 2 ve tel yok ise 0" olarak girilmiştir. Kategorik değişkenlerden numune cinsi için iki ayrı kukla değişken (K1:nitinol tel içeren ve K2:çelik tel içeren) oluşturulmuştur. K1 değişkeni için "nitinol tel var ise 1, yok ise 0", K2 değişkeni için "çelik tel var ise 1, yok ise 0" şeklinde kodlama yapılmıştır. Son olarak kanal genişliği "geniş ise 1, dar ise 0" olarak kodlanmıştır.

Kumaş gerilmesi

Regresyon analizi sonucunda elde edilen modellere ait Anova sonuçları incelendiğinde; birinci regresyon modeli $F(4,19)=6,418$, $p=0,003$, ikinci regresyon modeli $F(3,19)=8,943$, $p=0,001$ ve üçüncü regresyon modeli $F(2,19)=13,264$, $p<0,001$ önemli bulunmuştur.

Kumaş çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik olarak elde edilen modellere ilişkin katsayılar ve kodları, anlamlılık değerleri (p) ile belirleme katsayıları (R^2) Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7 Kumaş çekme gerilmesinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	22,934	0,000*	0,631
	Tel çapı	X	1,665	0,666	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-6,349	0,400	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	11,119	0,150	
	Kanal genişliği	D_6	5,702	0,113	
2	Sabit	-	22,934	0,000*	0,626
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-3,851	0,406	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	13,616	0,008*	
	Kanal genişliği	D_6	5,702	0,103	
3	Sabit	-	20,367	0,000*	0,609

	K2 (çelik tel içeren)	D_5	16,184	0,000*	
	Kanal genişliği	D_6	5,702	0,099	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.7'den elde edilen regresyon denklemleri aşağıda verilmektedir:

$$\text{Çekme gerilmesi}=22{,}934+1{,}665X-6{,}349D_4+11{,}119D_5+5{,}702D_6 \quad (12)$$

Regresyon denkleminden (12) görüldüğü üzere tel çapının artması çekme gerilmesini arttırmakta, nitinol tel kullanımı ise gerilmeyi azaltmaktadır. Geniş kanallı numunelerin çekme gerilmesi ise dar kanallı numunelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Ancak bu sonuçlar istatistiksel açıdan anlamlı bulunmamıştır. Anlamlılık değeri en yüksek değişken olan tel çapı modelden çıkarılarak analiz yenilenmiş ve ikinci regresyon denklemi elde edilmiştir.

$$\text{Çekme gerilmesi}=22{,}934-3{,}851D_4+13{,}616D_5+5{,}702D_6 \quad (13)$$

Elde edilen ikinci denklemde (13) modele giren K1, K2 ve kanal genişliği değişkenleri arasında önemli bulunan bağımsız değişken ise K2'dir ($p=0{,}008$). Anlamlı bulunmayan K1 (nitinol tel içeren) değişkeni modelden çıkarılmış ve analiz tekrar edilmiştir. Elde edilen yeni denklem aşağıdaki gibi olup, çelik tel kullanımının (K2) gerilmeyi istatistiksel olarak anlamlı şekilde arttırdığı ortaya konmuştur ($p<0{,}001$). İstatistik analiz sonuçları deneysel verilerle uyumludur.

$$\text{Çekme gerilmesi}=20{,}367+16{,}184D_5+5{,}702D_6 \quad (14)$$

Kabul edilen modele ait belirleme katsayısına göre bağımsız değişkenler kumaş çekme gerilmesini en az % 60 oranla tahminleyebilmektedir ($R^2=0{,}609$).

Birim uzama

Gerçekleştirilen istatistik analiz sonucunda elde edilen regresyon modelleri ile modellere giren bağımsız değişkenlerin birim uzama üzerindeki etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Elastisite modülü

Regresyon analizi sonuçlarına göre elde edilen modeller ile modellere dahil olan bağımsız değişkenlerin elastisite modülü üzerindeki etkisi istatistiksel açıdan anlamlı değildir.

4.2.2 Kayma direnci testi

Tez kapsamında tel içeren kumaş numunesinin içinden bir tel özlü hibrit ipliğin çekilmesi için gereken kuvvet ve yer değiştirme miktarının belirlenmesi için gerçekleştirilmiş kayma direnci testine ilişkin bulgular Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8 Kayma direnci testine ilişkin bulgular.

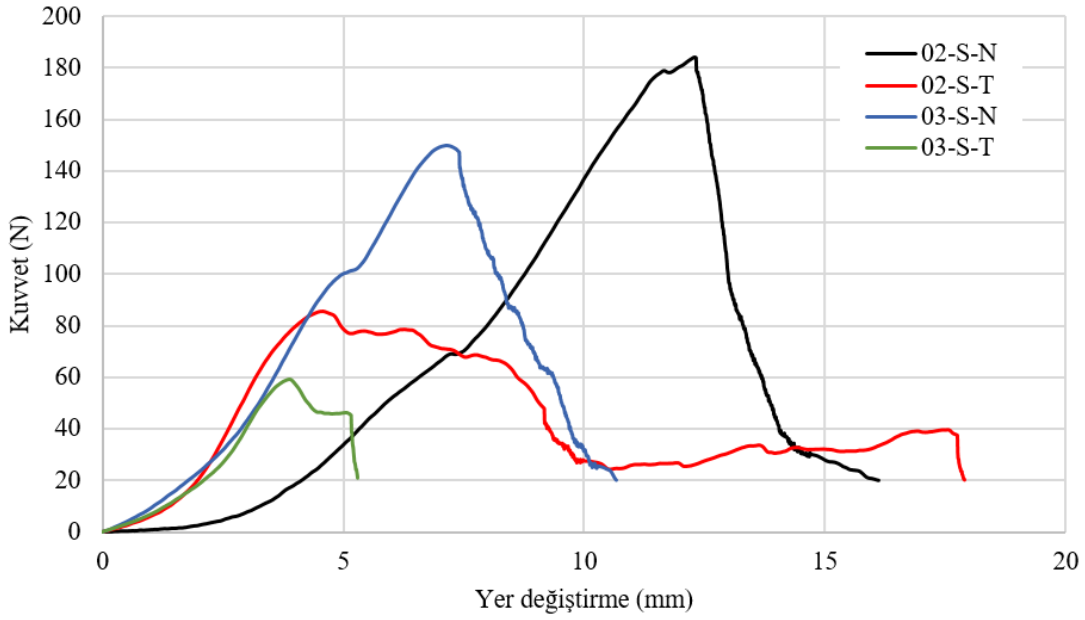
Numune Kodu	Ortalama Maksimum Kayma Kuvveti (N)	Ortalama Maksimum Kayma Kuvveti St. Sapma	Ortalama Maksimum Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Maksimum Yer Değiştirme St. Sapma
02-S-N	184,22	*	12,31	*
02-N-N	39,10	1,03	7,34	0,82
02-S-T	98,35	18,08	6,20	2,37
02-N-T	11,71	0,22	3,43	0,58
03-S-N	196,97	66,87	8,80	2,35
03-N-N	25,29	*	11,02	*
03-S-T	60,92	2,64	3,94	0,04
03-N-T	17,56	7,19	4,01	3,10

**Test edilen numune sayısının az olması nedeniyle hesaplanamamıştır.*

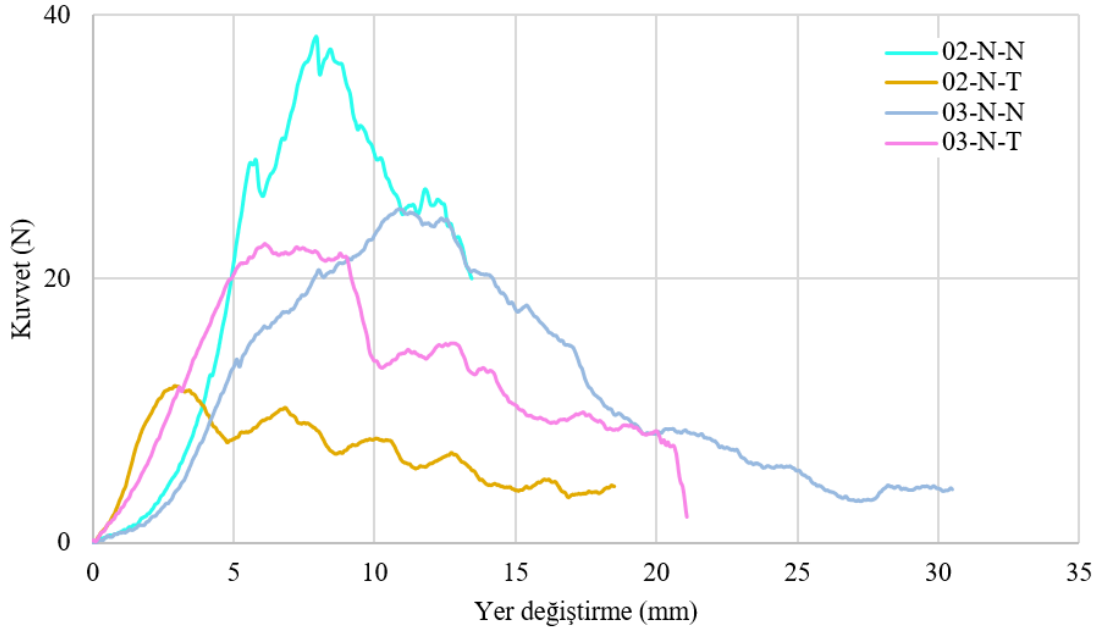
Elde edilen verilere göre numunelerin kayma direnci özelliğinin numune cinsi (çelik veya nitinol tel içeren), tel çapı (0,2 mm veya 0,3 mm) ve kanal genişliği (dar veya geniş kanallı) parametrelerine göre incelenmesi amacıyla kumaş numunelerinin kayma kuvveti-yer değiştirme grafikleri hazırlanmıştır.

Kanal genişliği ve tel çapı parametrelerinin kayma direnci üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için numunelerin numune cinsine göre gruplandırıldığı

kayma kuvveti-yer değiştirme grafikleri çelik ve nitinol tel içeren numuneler için sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23 Çelik tel içeren numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.24 Nitinol tel içeren numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Kayma direnci testinden elde edilen sonuçlara göre çelik tel içeren numuneler için en yüksek kayma kuvvetine ve yer değiştirmesine 0,3 mm tel

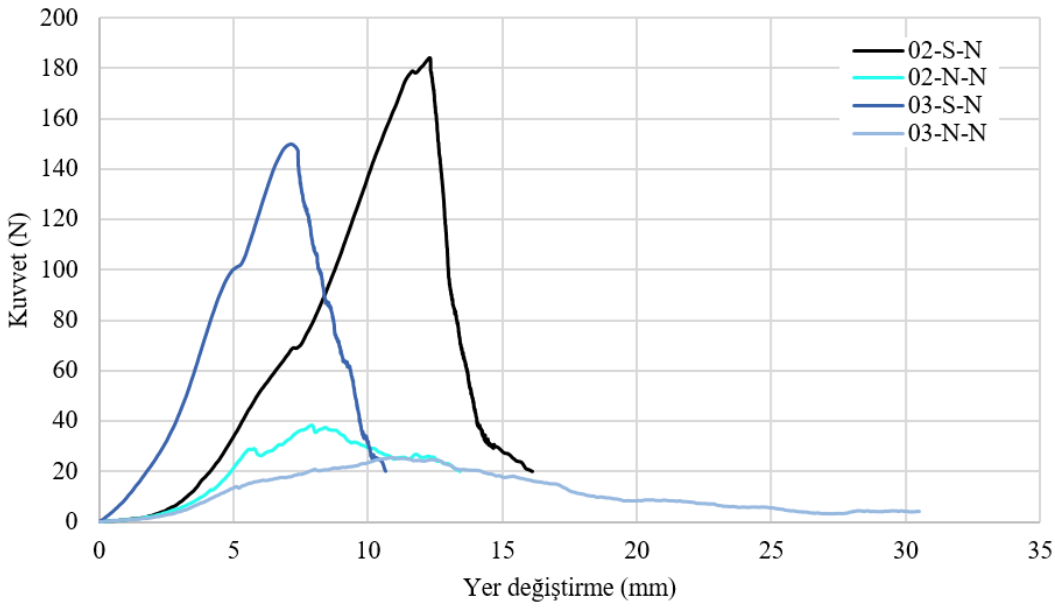
içeren dar kanallı numunenin (03-S-N) sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük kayma kuvveti ve yer değiştirme değeri ise 0,3 mm tel içeren geniş kanallı numuneden (03-S-T) elde edilmiştir (Şekil 4.23). Bu veriler ışığında, çelik tel içeren numuneler için dar kanallı numune içinden bir hibrit ipliği çekmek için gereken kayma kuvvetinin daha yüksek olduğu, dar kanallı numunelerin geniş kanallı numunelere kıyasla daha yüksek kayma direncine sahip olduğu söylenebilmektedir.

Nitinol tel içeren kumaş numunelerinin kayma direnci testinden elde edilen sonuçlara göre ise en yüksek kayma kuvvetine 0,2 mm tel içeren dar kanallı numune, en düşük kayma kuvvetine ise 0,2 mm tel içeren geniş kanallı numune sahiptir. 0,3 mm nitinol tel içeren numuneler için de dar kanallı numunenin kayma kuvveti, geniş kanallıya kıyasla daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4.24).

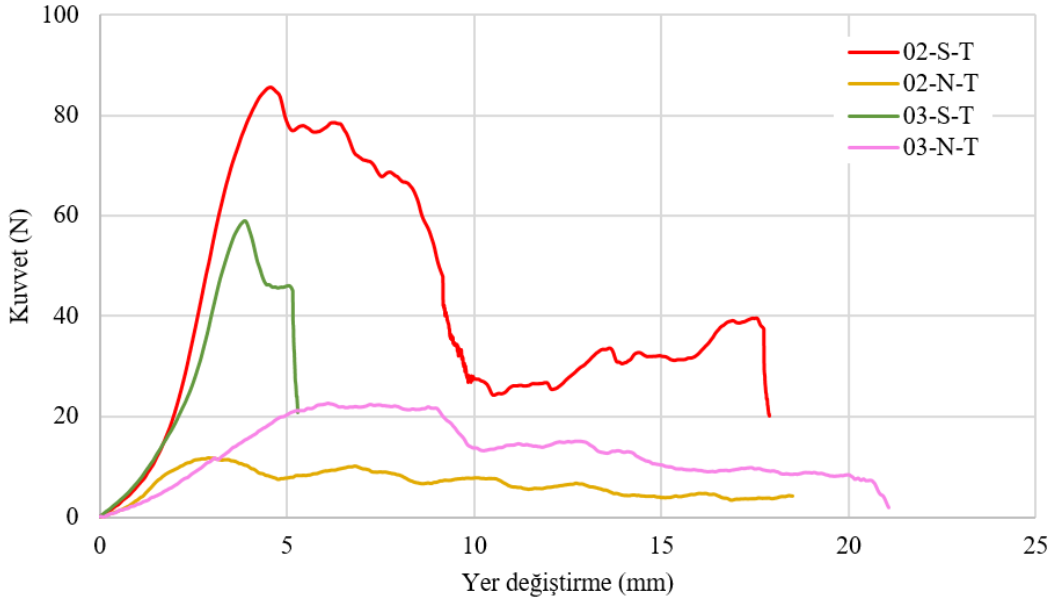
Sonuçlar değerlendirildiğinde hem çelik hem nitinol tel içeren numuneler için dar kanallı numunelerin kayma direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü dar kanallı kumaş numuneleri geniş kanallı numunelerden daha sıkı kumaş dokusuna sahiptir.

Tel içeren kumaş numuneleri ayrıca kanal genişliğine göre gruplandırılmış, bu sayede numune cinsi ve tel çapının kayma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dar ve geniş kanallı kumaş numuneleri için hazırlanan kuvvet-yer değiştirme grafikleri sırası ile Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmektedir.

Dar kanallı kumaş numunelerinin kayma direnci üzerinde numune cinsinin etkisi değerlendirildiğinde, çelik tel içeren numunelerin kayma direnci, nitinol tel içeren kumaş numunelerinden daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 Dar kanallı kumaş numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.26 Geniş kanallı kumaş numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Geniş kanallı numunelerde ise çelik tel içeren numunelerden bir hibrit ipliğin çekilebilmesi için nitinol tel içeren numunelere kıyasla daha fazla kuvvete gereksinim duyulduğu belirlenmiştir (Şekil 4.26).

4.2.2.1 Kayma direnci testi sonuçlarının istatistiksel analizi

Kayma direnci testinden elde edilen kayma kuvveti ve yer değiştirme parametreleri üzerinde numune cinsi, tel çapı ve kanal genişliği bağımsız değişkenlerinin etkisinin belirlenmesi için elde edilen deneysel veriler regresyon analizi ile istatistiksel olarak da değerlendirilmiştir. Kayma direnci testi sadece tel içeren numunelere uygulandığından Bölüm 4.2.1'de detaylı olarak açıklanan kodlama yönteminden farklı olarak tel çapı için "0,2 mm tel için 1 ve 0,3 mm tel için 2" şeklinde veri girişi yapılmış ve numune cinsi için ise tek bir kukla değişken oluşturulmuştur. Oluşturulan K1 değişkeni "nitinol tel var ise 1, yok ise 0" şeklinde kodlanmıştır.

Kayma kuvveti

Regresyon analizi sonucunda kayma kuvvetini tahminleyen modellere ait Anova istatistiklerine göre modeller istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Model 1: $F(3,15)=17,659$, $p<0,001$ ve Model 2: $F(2,15)=28,086$, $p<0,001$).

Tel içeren kumaş numunelerinin kayma kuvvetinin tahminlenmesine ilişkin gerçekleştirilen regresyon analizi sonucu elde edilen katsayılar ve kodları, anlamlılık değerleri (p) ile belirleme katsayıları (R^2) Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9 Kayma kuvvetinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	179,483	0,000	0,815
	Tel çapı	X	-8,162	0,654	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-111,694	0,000*	
	Kanal genişliği	D_6	-64,259	0,003*	
2	Sabit	-	167,241	0,000	0,812
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-111,694	0,000*	
	Kanal genişliği	D_6	-64,259	0,002*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Regresyon analizi sonuçlarına göre (Tablo 4.9) elde edilen regresyon denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kayma kuvveti}=179{,}483-8{,}162X-111{,}694D_4-64{,}259D_6 \quad (15)$$

Tüm bağımsız değişkenlerin yer aldığı regresyon denklemine göre (15) tel çapının artması kayma kuvvetini azaltmaktadır. Ancak bu sonuç istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Tel çapı değişkeni modelde çıkarılarak analiz yenilenmiş ve ikinci regresyon denklemi elde edilmiştir.

$$\text{Kayma kuvveti}=167{,}241-111{,}694D_4-64{,}259D_6 \quad (16)$$

Denklem (16)'ya göre nitinol tel içeren numuneler çelik tel içeren numunelere kıyasla daha düşük kayma kuvvetine sahiptir. Dar kanallı numunelerin kayma kuvveti geniş kanallı numunelerden daha yüksektir. Nitinol tel kullanımı (K1) ve kanal genişliği değişkenleri istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0{,}005$). Elde edilen istatistiksel sonuçlar deneysel verileri destekler niteliktedir.

Kabul edilen regresyon modeline ait belirleme katsayısı $R^2=0{,}812$ bulunmuş olup, bağımsız değişkenlerin kayma kuvvetini tahminleme gücü yüksektir.

<u>Yer değiştirme</u>

Regresyon analizinden elde edilen modellere ait istatistikler birinci model için $F(3,15)=9{,}733$ ve $p=0{,}002$; ikinci model için $F(2,15)=15{,}574$ ve $p<0{,}001$; üçüncü model için $F(1,15)=27{,}740$ ve $p<0{,}001$ şeklindedir. Tüm modeller anlamlı bulunmuştur.

Yer değiştirme bağımlı değişkeninin tahminlenmesine yönelik gerçekleştirilen regresyon analizinden elde edilen istatistiki veriler Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10 Yer değiştirmenin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	11,114	0,000	0,709
	Tel çapı	X	-0,379	0,724	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-1,359	0,218	
	Kanal genişliği	D_6	-5,474	0,000*	
2	Sabit	-	10,546	0,000	0,706
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-1,359	0,202	
	Kanal genişliği	D_6	-5,474	0,000*	
3	Sabit	-	9,866	0,000	0,665
	Kanal genişliği	D_6	-5,474	0,000*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Yer değiştirme değişkenine ilişkin olarak regresyon analizinden elde edilen denklemler aşağıda verilmektedir.

$$\text{Yer değiştirme}=11{,}114-0{,}379X-1{,}359D_4-5{,}474D_6 \quad (17)$$

Denklem (17)'de verilen katsayılara göre tel çapının artışı yer değiştirmede azalmaya neden olmaktadır. Çelik tel içeren numunelerdeki yer değiştirme miktarı nitinol tel içeren kumaşlara göre daha fazladır. Geniş kanallı numunelerin yer değiştirme miktarı ise dar kanallı kumaşlara kıyasla düşük bulunmuştur. Modellerde istatistiksel olarak önemli bulunmamış olan tel çapı ve K1 (nitinol tel içeren) bağımsız değişkenleri sırasıyla modellerden çıkarılarak analiz yenilenmiş ve denklemler sadeleştirilmiştir.

$$\text{Yer değiştirme}=10{,}546-1{,}359D_4-5{,}474D_6 \quad (18)$$

$$\text{Yer değiştirme}=9{,}866-5{,}474D_6 \quad (19)$$

Elde edilen tüm modeller için kanal genişliği bağımsız değişkeninin, yer değiştirme bağımlı değişkenini istatistiksel açıdan önemli derecede etkileyen tek faktör olduğu belirlenmiştir ($p<0,001$).

Regresyon analizinden elde edilen modele ait belirleme katsayısı $R^2=0,665$'dir.

4.2.3 Darbe Testi

Gerçekleştirilen darbe testi ile elde edilen temas kuvveti, deformasyon ve absorbe edilen darbe enerjisi parametrelerine ait bulgular Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Kumaş darbe testine ilişkin bulgular.

Numune Kodu	Ortalama Maks. Temas Kuvveti (N)	Ortalama Maks. Temas Kuvveti St. Sapma	Ortalama Maks. Deformasyon (mm)	Ortalama Maks. Deformasyon St. Sapma	Absorbe Edilen Ortalama Maks. Enerji (Joule)	Edilen Ortalama Maks. Enerji St. Sapma
02-S-N	2490,23	511,12	35,24	0,39	40,00	0,14
02-N-N	1542,04	80,18	34,47	5,74	39,18	0,24
02-S-T	1811,33	212,47	29,80	0,87	34,07	8,59
02-N-T	1225,98	246,54	46,84	1,46	31,25	9,31
03-S-N	1550,55	436,96	39,71	5,07	40,00	1,34
03-N-N	1098,42	22,05	44,70	0,34	38,20	1,32
03-S-T	1926,14	350,77	33,74	3,68	40,00	0,12
03-N-T	1002,04	42,09	53,71	3,99	34,17	3,82
R-N	2083,46	12,03	34,00	0,52	40,00	0,15
R-T	2038,10	248,54	35,40	0,67	36,44	6,50

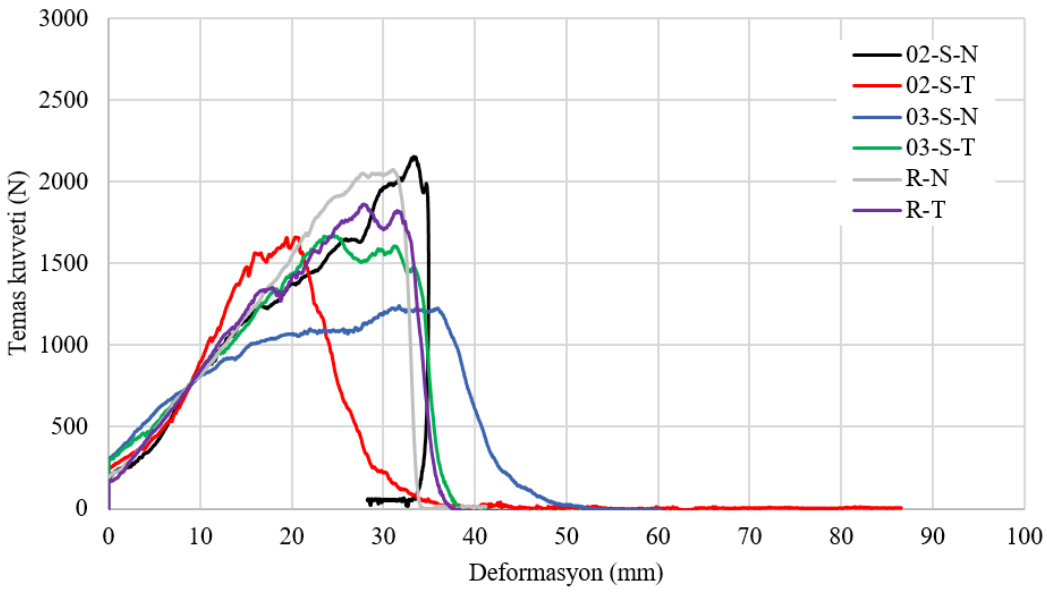
Kumaş darbe testinden elde edilen sonuçlara göre kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon ve enerji-zaman grafikleri hazırlanmıştır.

Numunelerin darbe özellikleri numune cinsi (çelik tel içeren, nitinol tel içeren veya tel içermeyen), tel çapı (0,2 mm veya 0,3 mm) ve kanal genişliği (dar veya geniş kanallı) parametreleri açısından incelenmiş ve yorumlanmıştır.

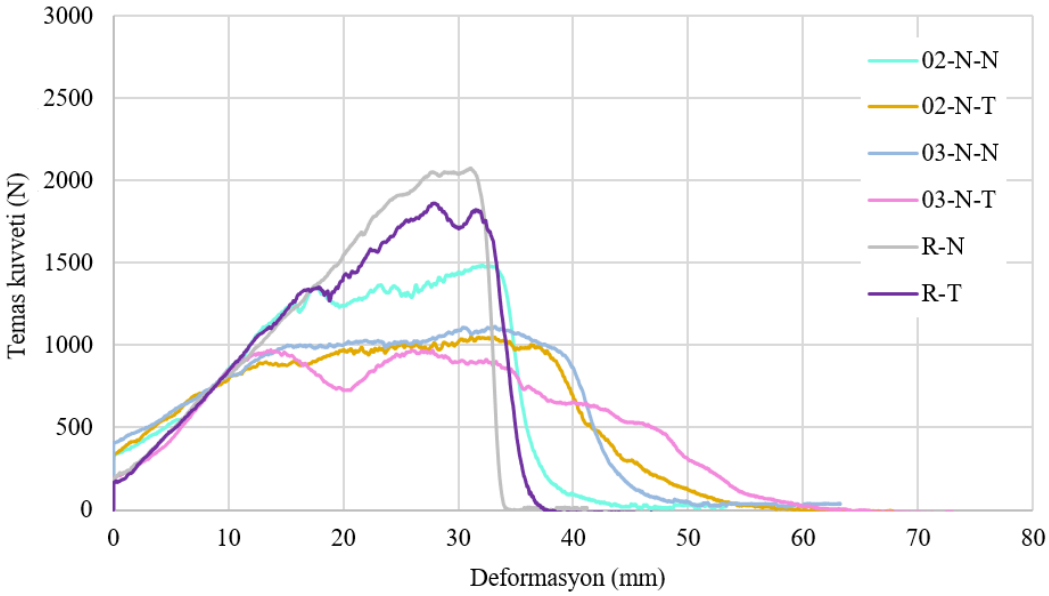
Tel içeren numunelerin darbe davranışlarının değerlendirilmesi için numuneler tel cinslerine göre gruplandırılmış ve referans numunelerle karşılaştırılmıştır. Çelik ve nitinol tel içeren kumaş numunelerinin referans kumaş numuneleri ile karşılaştırıldığı temas kuvveti-deformasyon grafikleri sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmektedir.

Çelik tel içeren kumaş numunelerinin referans kumaş numuneleri ile karşılaştırılması sonucu en yüksek temas kuvvetine 0,2 mm tel içeren ve dar kanallı olan numunenin (02-S-N) sahip olduğu belirlenmiştir. Numuneye ait temas kuvveti-deformasyon eğrisi incelendiğinde (Şekil 4.27), 40 J enerji seviyesinde eğrinin kapalı formda olduğu görülmektedir. Bu durum, vurucu ucun numuneden geri sektiğini ve uygulanan darbenin numunede delinmeye neden olmadığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre 02-S-N kodlu numuneden sonra en yüksek temas kuvvetine sırasıyla dar kanallı ve geniş kanallı referans numunelerin sahip olduğu belirlenmiştir. Tel içermeyen referans numunelerin (02-S-N dışındaki) çelik tel içeren numunelerden daha yüksek temas kuvveti göstermesi, dokuma sırasında kumaşın içyapısında meydana gelmiş olası hasarların tel takviyesi sonucu ilerlemesi ve bu durumun tel içeren karbon kumaşın mekanik özelliklerinde düşüşe sebep olmasından (Pappada et al., 2009b) kaynaklandığı öngörülmektedir. En düşük temas kuvvetini ise 0,3 mm çelik tel içeren geniş kanallı numune (03-S-T) göstermektedir. Teldeki çap artışının temas kuvveti üzerindeki etkisi olumsuzdur.



Şekil 4.27 Çelik tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği.



Şekil 4.28 Nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği.

Nitinol tel içeren kumaşlar ile referans kumaş numunelerinin darbe testi sonuçları karşılaştırıldığında, sırasıyla dar ve geniş kanallı referans numunelerin nitinol tel içeren kumaşlara kıyasla daha yüksek temas kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.28). Buna göre, referans numunelerin nitinol tel içeren

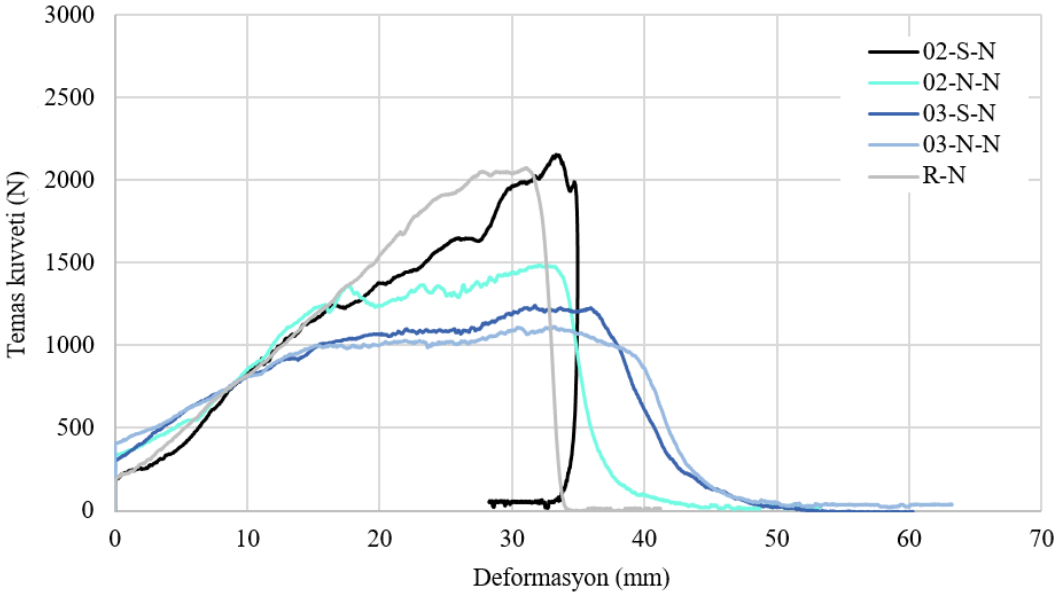
numunelerden daha iyi darbe dayanımı gösterdiği söylenebilmektedir. Daha önce "4.2.1. Çekme testi" bölümünde de değinilmiş olduğu üzere bu durum iki şekilde açıklanabilmektedir. İlk olarak nitinol telin karbon elyaftan daha düşük elastisite modülüne sahip olması, içyapıda oluşacak bir hasarın ilerlemesine yol açmaktadır. Bu da mekanik özelliklerde düşüşlere sebebiyet verebilmektedir. Öte yandan nitinol tele şekil hafızası ve süperelastisite özelliklerinin kumaş formunda kazandırılması için nitinol tel içeren karbon kumaşların 400 °C'de 1 saat süreyle ısıl işlem görmüş olması, referans kumaşlara kıyasla daha düşük mekanik özellikler sergilemesinin bir diğer açıklamasıdır.

Isıl işlemin karbon elyaf üzerindeki etkisinin daha iyi gözlemlenebilmesi için tez kapsamında tel içermeyen dar ve geniş kanallı referans kumaş numuneleri, tel içeren numunelerle aynı şekilde 400 °C'de 1 saat ısıl işleme tabii tutulmuş ve ısıl işlem gören referans kumaş numunelerine darbe testi uygulanmıştır. Sonuçlara göre karbon kumaşa uygulanan ısıl işlem temas kuvvetini dar kanallı numunelerde % 12,04 ve geniş kanallı numunelerde % 53,27 düşürdüğü belirlenmiştir. Bu sonuç ısıl işlem uygulanan nitinol tel içeren kumaşların darbe dayanımındaki düşüşü açıklamaktadır.

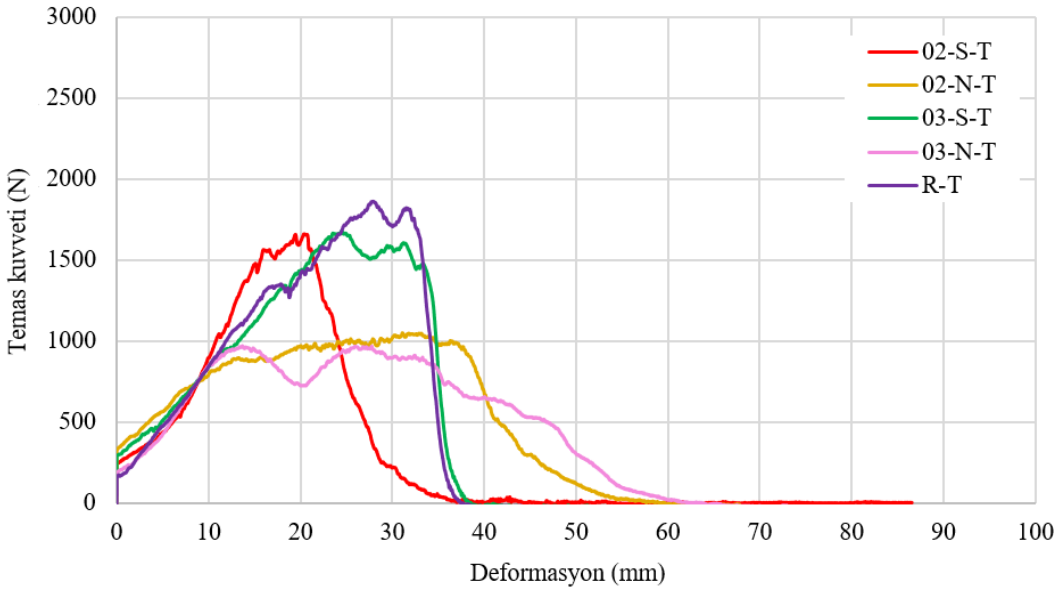
Nitinol tel içeren numuneler kendi içlerinde değerlendirildiğinde ise 0,2 mm tel içeren ve dar kanallı olan numunenin (02-N-N) darbe testi sonrası en yüksek temas kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunu sırasıyla 02-N-T, 03-N-N ve 03-N-T kodlu numuneler izlemektedir. Buna göre dar kanallı numunelerin geniş kanallılara göre daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğu söylenebilmektedir. Bu sonuç, dar kanallı kumaş yapısının daha sıkı olması ve darbe kuvveti karşısında daha fazla dayanım göstermesi ile açıklanabilmektedir. Elde edilen bir diğer sonuç ise tel çapı arttıkça temas kuvvetinin azaldığıdır.

Darbe testi sonuçlarına göre 0,3 mm nitinol tel içeren numunelerin (hem dar, hem geniş kanallı için) düşük temas kuvvetinin yanı sıra, yüksek deformasyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da 0,3 mm nitinol tel içeren kumaş numunelerinin darbe dayanımlarının düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuç DMA analizinden elde edilen verilerle de uyum göstermektedir.

Numune cinsi ve tel çapı parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi için kumaş numunelerinin darbe testinden elde edilen veriler aynı kanal genişliğine sahip numuneler için ayrıca değerlendirilmiştir. Numunelerin kanal genişliğine göre gruplandırıldığı temas kuvveti-deformasyon grafikleri dar ve geniş kanallı numuneler için sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmektedir.



Şekil 4.29 Dar kanallı kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği.

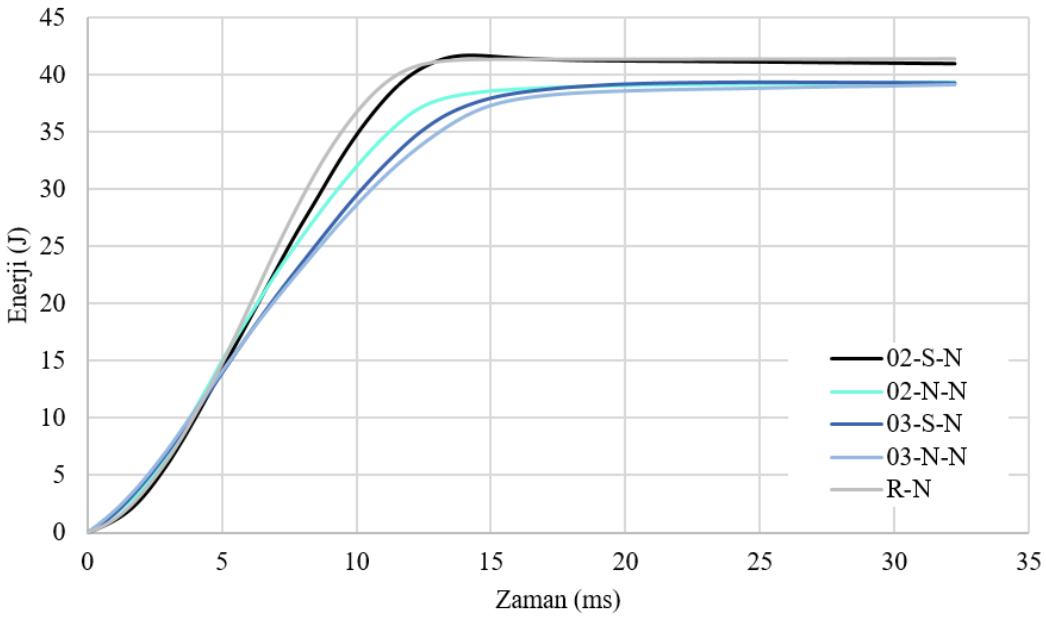


Şekil 4.30 Geniş kanallı kumaş numunelerinin temas kuvveti-deformasyon grafiği.

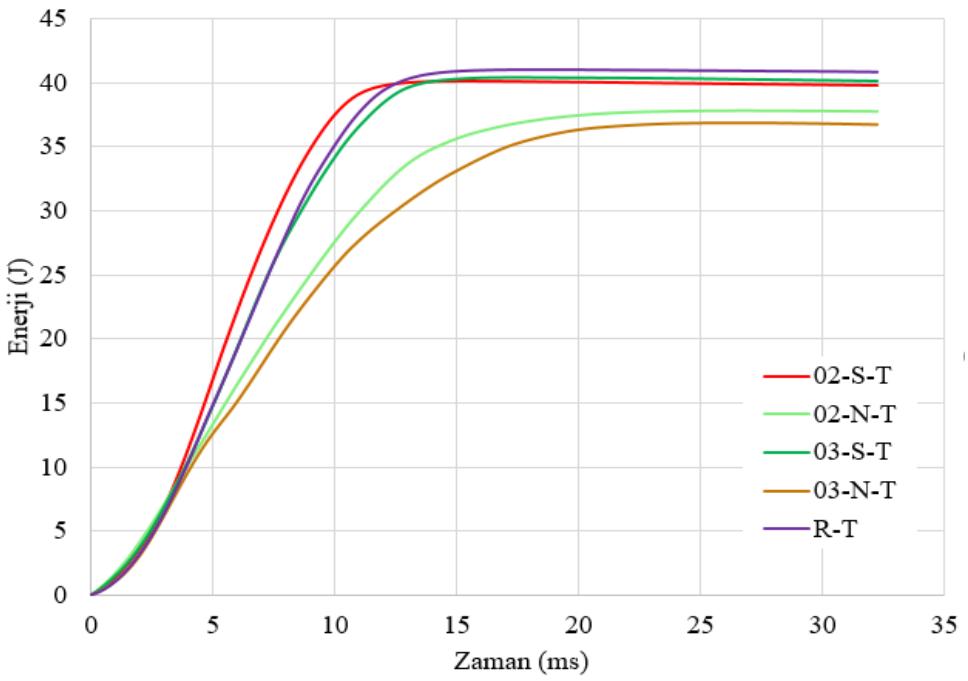
Sonuçlara göre dar kanallı numuneler için 0,2 mm tel içeren numunelerin temas kuvvetinin 0,3 mm tel içeren numunelere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.29). Geniş kanallı numunelerde ise en yüksek temas kuvvetine referans numune sahip olup, tıpkı dar kanallı numunelerde olduğu gibi 0,2 mm tel içeren numuneler 0,3 mm tel içeren numunelere kıyasla daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.30).

Darbe testinden elde edilen verilere göre en düşük temas kuvvetine 0,3 mm tel içeren kumaş numuneleri sahiptir. Bununla birlikte 0,3 mm tel içeren numuneler için geniş kanallı kumaşların dar kanallı olanlara kıyasla darbe karşısında daha fazla deforme olduğu belirlenmiştir. Bu durum geniş kanallı kumaşın daha gevşek bir kumaş yapısına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Kanal genişliğine göre gruplandırılan kumaş numunelerinin enerji zaman grafikleri ise dar ve geniş kanallı numuneler için sırasıyla Şekil 4.31 ve 4.32'de verilmektedir. Sonuçlara göre tüm numuneler için dar kanallı olan kumaşların enerji absorbsiyonunun daha iyi olduğu, çelik tel içeren numunelerin nitinol tel içeren numunelere göre daha fazla darbe enerjisini absorbe edebildiği, 0,2 mm nitinol tel içeren ve geniş kanallı olan numunenin (02-N-T) darbe sonrası enerji absorbe etme kabiliyetinin en düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.31 Dar kanallı kumaş numunelerine ait absorbe edilen enerji-zaman grafiği.



Şekil 4.32 Geniş kanallı kumaş numunelerine ait absorbe edilen enerji-zaman grafiği.

4.2.3.1 Darbe testi sonuçlarının istatistiksel analizi

Darbe testinden elde edilen bulgular da tez kapsamında istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizinde temas kuvveti, deformasyon ve absorbe edilen enerji bağımlı değişkenler olarak ele alınmış olup, bağımsız kategorik değişkenlerin kodlanması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.2.1'de verilmiştir.

Temas kuvveti

Bağımsız değişkenlerin temas kuvveti üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen regresyon analizinden elde edilen regresyon modellerine ilişkin test istatistikleri Model 1 için $F(4,19)=9,758$ ve $p<0,001$; Model 2 için $F(3,19)=13,819$ ve $p<0,001$ ve Model 3 için $F(2,19)=19,628$ ve $p<0,001$ olup, tüm regresyon modelleri önemli bulunmuştur.

Kumaşların darbe davranışlarının belirlenmesine yönelik olarak temas kuvvet tahminlenmesinde kullanılacak regresyon modellerine ait katsayılar ile anlamlılık değerleri (p) ve R^2 değerleri Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.12 Darbe temas kuvvetinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	2136,888	0,000	0,722
	Tel çapı	X	-3731,088	0,025*	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	89,113	0,834	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	816,552	0,070	
	Kanal genişliği	D_6	-152,217	0,275	
2	Sabit	-	2148,387	0,000	0,722
	Tel çapı	X	-3443,626	0,000*	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	733,188	0,000*	
	Kanal genişliği	D_6	-152,217	0,260	
3	Sabit	-	2072,278	0,000	0,698
	Tel çapı	X	-3443,626	0,000*	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	733,188	0,000*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.12'den elde edilen regresyon denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\text{Temas kuvveti}=2136{,}888-3731{,}088X+89{,}113D_4+816{,}552D_5-152{,}217D_6 \qquad (20)$$

Denklem (20)'ye göre tel çapındaki artış temas kuvvetini anlamlı olarak azaltmaktadır. Buna göre 0,2 mm tel içeren numunelerin 0,3 mm tel içeren numunelere kıyasla daha yüksek temas kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. Katsayılara bakıldığında nitinol tel içeren numunelerin temas kuvvetinin referans numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bu sonuç istatistiksel açıdan anlamlı bulunmamıştır. Bununla birlikte çelik tel kullanımı referans numuneye kıyasla kumaşın temas kuvvetini anlamlı olarak arttırmaktadır. Geniş kanallı kumaşlar ise temas kuvvetinde düşüşe neden olmaktadır. Bu sonuç istatistiksel olarak önemli bulunmamış olmakla birlikte temas kuvveti-deformasyon grafikleri ile uyumludur.

Elde edilen ilk regresyon modelinden istatistiksel olarak önemli bulunmamış olan K1 (nitinol tel içeren) ve kanal genişliği değişkenleri sırasıyla çıkarılarak, aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$\text{Temas kuvveti}=2148{,}387-3443{,}626X+733{,}188D_5-152{,}217D_6 \quad (21)$$

$$\text{Temas kuvveti}=2072{,}278-3443{,}626X+733{,}188D_5 \quad (22)$$

Denklem (21)'de önemli bulunan değişkenler tel çapı ($p<0{,}001$) ve K2 ($p<0{,}001$)'dir. Anlamlı bulunmayan kanal değişkeni çıkarılarak yenilenen analizden elde edilen üçüncü modelde yine tel çapı ve K2 değişkenleri istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0{,}001$ ve $p<0{,}001$).

Elde edilen son regresyon modeline ait belirleme katsayısı $R^2=0{,}698$ olarak bulunmuştur.

Deformasyon

Darbe sonrası deformasyonun bağımlı değişken olarak alındığı regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon modellerine ait anova sonuçları birinci regresyon modeli için $F(4,19)=6{,}757$ ve $p=0{,}003$; ikinci regresyon modeli için $F(3,19)=8{,}985$ ve $p=0{,}001$; üçüncü regresyon modeli için $F(2,19)=12{,}943$ ve $p<0{,}001$ olup, önemli bulumuştur. Regresyon modellerine ilişkin istatistiksel veriler Tablo 4.13'te verilmektedir.

Tablo 4.13 Deformasyonun tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	33,565	0,000	0,643
	Tel çapı	X	63,775	0,024*	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-5,716	0,431	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	-16,029	0,038*	
	Kanal genişliği	D_6	2,275	0,332	
2	Sabit	-	32,827	0,000	0,628
	Tel çapı	X	45,335	0,001*	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	-10,681	0,001*	
	Kanal genişliği	D_6	2,275	0,326	
3	Sabit	-	33,965	0,000	0,604

	Tel çapı	X	45,335	0,001*	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	-10,681	0,000*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Tablo 4.13'ten elde edilen regresyon denklemleri aşağıda verilmektedir:

$$\text{Deformasyon}=33,565+63,775X-5,716D_4-16,029D_5+2,275D_6 \quad (23)$$

Denklem (23) incelendiğinde tel çapının artmasının deformasyonu önemli derecede arttırdığı, çelik tel kullanımının darbe sonrası deformasyonu anlamlı olarak düşürdüğü görülmektedir. Katsayılara göre nitinol kullanımının referans numuneye kıyasla deformasyonu azalttığı ve geniş kanallı numunelerde deformasyonun daha fazla olduğu yorumu yapılabilse de, bu sonuçlar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Öncelikle önemli bulunmayan K1 (nitinol tel içeren) değişkeni, sonrasında kanal genişliği değişkeni modelden çıkarılarak analizler yenilenmiş ve sırasıyla aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\text{Deformasyon}=32,827+45,335X-10,681D_5+2,275D_6 \quad (24)$$

$$\text{Deformasyon}=33,965+45,335X-10,681D_5 \quad (25)$$

Regresyon analizinden elde edilen sonuca göre tel çapı ve K2 (çelik tel içeren) bağımsız değişkenlerinin deformasyon üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi bulunmaktadır ($p<0,005$).

Modele ait belirleme katsayısı $R^2=0,604$ bulunmuş olup, bağımsız değişkenlerin deformasyonu tahminlemedeki başarısı en az % 60,4'tür.

Regresyon analizinden elde edilen sonuçlar, deneysel verileri destekler niteliktedir.

Absorbe edilen darbe enerjisi

İstatistik analiz sonucunda absorbe edilen darbe enerjisini tahminleyen regresyon modellerine ait test istatistikleri sırasıyla ($F(4,19)=2,635$ ve $p=0,076$, $F(3,19)=3,461$ ve $p=0,041$ ve son olarak $F(2,19)=5,352$ ve $p=0,016$ şeklindedir.

Absorbe edilen darbe enerjisine ilişkin olarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçları Tablo 4.14'de verilmektedir.

Tablo 4.14 Absorbe edilen darbe enerjisinin tahminlenmesine yönelik elde edilen regresyon modellerine ilişkin veriler.

Regresyon modeli	Bağımsız değişken	Bağımsız değişken kodu	Katsayı	p değeri	R^2
1	Sabit	-	41,418	0,000	0,413
	Tel çapı	X	17,225	0,427	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-7,571	0,217	
	K2 (çelik tel içeren)	D_5	-4,106	0,495	
	Kanal genişliği	D_6	-4,906	0,020*	
2	Sabit	-	40,888	0,000	0,394
	Tel çapı	X	3,979	0,669	
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-3,730	0,087	
	Kanal genişliği	D_6	-4,906	0,018*	
3	Sabit	-	41,551	0,000	0,386
	K1 (nitinol tel içeren)	D_4	-3,398	0,084	
	Kanal genişliği	D_6	-4,906	0,015*	

**İstatistiksel olarak önemlidir*

Absorbe edilen enerjinin tahminlenmesine yönelik olarak elde edilen regresyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\text{Absorbe edilen enerji}=41,418+17,225X-7,571D_4-4,106D_5-4,906D_6 \qquad (26)$$

Denklem (26)'ya göre tel çapının artması absorbe edilen enerjiyi arttırırken, hem çelik hem nitinol tel kullanımı absorbe edilen enerjiyi azaltmaktadır. Bununla birlikte tel çapı, K1 ve K2 bağımsız değişkenlerinin absorbe edilen enerji üzerindeki etkileri istatistiksel açıdan önemli bulunmamıştır. İlk olarak K2, sonrasında tel çapı değişkeni modelden çıkarılarak analizler yenilenmiş ve aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$\text{Absorbe edilen enerji}=40{,}888+3{,}979X-3{,}730D_4-4{,}906D_6 \quad (27)$$

$$\text{Absorbe edilen enerjisi}=41{,}551-3{,}398D_4-4{,}906D_6 \quad (28)$$

Denklem (28)'e göre kanal genişliği absorbe edilen enerji bağımlı değişkenini istatistiksel açıdan anlamlı olarak etkilemekte olup (p=0,015), geniş kanallı numunelerin absorbe ettiği darbe enerjisi dar kanallı numunelere kıyasla daha düşüktür. Bu sonuç deneysel verilerle de

Elde edilen sonuca göre kabul edilen regresyon modelinin belirleme katsayısı oldukça düşük olup, R^2=0,386 bulunmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında nitinol ve çelik teller öz materyal olarak kullanılmış ve hibrit iplik haline getirilmiştir. Üretilen hibrit iplikler, kumaşın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çözgü ipliği olarak üç boyutlu dokuma kumaş üretiminde kullanılmıştır.

Kumaş üretimi öncesinde, telin daha kolay işlenebilmesi ve kumaş yapısına dahil edildikten sonra istenen formda şekil hafızası kazandırılması için nitinol teller ısıl işlem görmemiş halde temin edilmiş ve çeşitli sıcaklıklarda ısıl işlemlere tabii tutulmuştur. Isıl işlemler sonrasında faz dönüşüm sıcaklıkları DSC analizi ile belirlenmiş, faz dönüşüm eğrileri yardımı ile en uygun işlem sıcaklığının her iki tel çapı için de 400 °C olduğu belirlenmiştir.

DMA analizleri kapsamında ısıl işlem görmüş nitinol tellerin sıcaklığa bağlı mekanik özellikleri farklı sabit sıcaklıklar altında gerçekleştirilen statik testler ve farklı sabit gerilmeler altında gerçekleştirilen dinamik testler ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nitinol telin farklı fazlarda farklı birim uzama oranları gösterdiği belirlenmiştir. Her iki tel çapı için de martenzit fazdan östenit faza geçildiğinde birim uzama değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Bununla birlikte tele sabit sıcaklıkta uygulanan gerilmenin artışı birim uzamayı da doğrusal olarak arttırmaktadır. Elde edilen birim uzama-sıcaklık eğrilerine göre tez kapsamında uygulanan ısıl işlemler sonrasında nitinol telin östenit ve martenzit fazlar arasında dönüşüm sergilediği, şekil hafıza özelliği kazandığı belirlenmiştir.

Tez çalışmaları kapsamında nitinol ve çelik tel özlü hibrit ipliklerin mekanik özelliklerinin tespiti için uygulanan çekme testleri sonucunda ısıl işlemin nitinol tel ve hibrit ipliklerin mekanik özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir. Isıl işlem gören nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklerin gerilme dayanımının düştüğü, bununla birlikte birim uzama oranlarının belirgin bir şekilde arttığı ortaya konmuştur. Bu doğrultuda nitinol tel ve nitinol tel özlü ipliklere uygulanan ısıl işlemlerin başarılı olduğu söylenebilmektedir. Isıl işlemin çekme gerilmesi ve birim uzama üzerindeki etkisi istatistiksel olarak da önemli bulunmuştur.

Nitinol ve çelik teller ile hibrit ipliklere uygulanan çekme testinden edinilen bir diğer sonuç ise her iki tel cinsi için de tel özlü hibrit ipliklerin tek tele kıyasla daha yüksek çekme gerilmesine sahip olduğudur. Bu sonuç istatistiksel olarak da anlamlıdır. Tez kapsamında gerçekleştirilen hibrit iplik üretimi, kumaşın mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından olumludur.

Tez kapsamında varılan bir diğer sonuç ise nitinol tel ve nitinol tel özlü hibrit ipliklerin maksimum çekme gerilmelerinin çelik tel ve çelik tel özlü hibrit ipliklerden istatistiksel olarak önemli şekilde yüksek olmasıdır. Buna ek olarak, nitinol tel ve hibrit ipliklerin çekme gerilmeleri ile tel çapı arasında doğru orantı bulunmuştur.

Üç boyutlu dokuma kumaş numunelerine uygulanan çekme testi verilerine göre ise kumaş numunelerinin gerilme dayanımını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkileyen başlıca parametrenin numune cinsi olarak çelik tel kullanımı olduğu ortaya konmuştur. Çelik tel kullanımı gerilme dayanımı üzerinde pozitif bir etki yaratmakta ve kumaşın gerilme mukavemetini referans numuneye kıyasla arttırmaktadır.

Tel özlü hibrit ipliklerin üç boyutlu dokuma kumaş içerisinden çekilebilmesi için gereken kayma kuvvetinin tespitinde tez kapsamında sadece tel içeren kumaş numunelerine kayma testi uygulanmış, kumaş parametrelerinden numune cinsi ve kanal genişliğinin etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Çelik tel kullanılan dar kanallı kumaşların içinden bir hibrit ipliğin çekilebilmesi için gereken kayma kuvveti daha yüksek olup, bu durum kumaşın birbiri ile bütünleşmiş sıkı bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Çelik tel yapıya daha iyi uyum sağlamıştır. Kayma testi sonucunda meydana gelen yer değiştirmeyi anlamlı derecede etkileyen faktör kanal genişliği olup, kayma kuvvetiyle de ilişkili olarak dar kanallı kumaşların daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Tez kapsamında düşük hızlı darbelere dayanıklı kompozitlerde ön şekil olarak kullanılması amacıyla geliştirilen üç boyutlu dokuma kumaşların darbe davranışlarının değerlendirmesi için uygulanan darbe testi sonuçlarına göre temas

kuvveti ve deformasyon parametrelerini anlamlı şekilde etkileyen faktörlerin tel çapı ve çelik tel kullanımı olduğu belirlenmiştir. Tel çapındaki artış darbe sonrası kumaşta oluşan deformasyonu arttırmakta, temas kuvvetini ve dolayısı ile darbe dayanımını azaltmaktadır. Çelik tel içeren kumaş numunelerinin temas kuvveti diğer numunelere kıyasla daha yüksek bulunmuş olup, darbe sonrası deformasyon ise düşüktür. İstatistiksel olarak önemli bulunan bir diğer sonuç ise dar kanallı kumaş numunelerinin geniş kanallı kumaşlara nazaran daha fazla darbe enerjisini absorbe edebildiğidir.

Üç boyutlu dokuma kumaşların mekanik özelliklerinin tespiti için gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlar nitinol tel içeren kumaşların çelik tel içerenlere kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun sebebi nitinol tellere kumaş formunda uygulanan ısıl işlemlerin kumaşın mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilemesidir. Nitinol tellere kumaş formunda şekil hafıza kazandırılması için yapılan ısıl işlemler karbon elyafın mukavemetinde düşüşe sebebiyet vermiştir. Bu sonuç, hem tez kapsamında tel içermeyen referans numunelere uygulanan ısıl işlem denemesi hem de literatür verileri ile desteklenmiş ve bulgular kısmında paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kompozit ön şekli olarak kullanılmak istenen üç boyutlu dokuma kumaşlara yapılacak nitinol tel takviyesinin ısıl işlem görmüş nitinol tel seçilerek yapılması sonraki çalışmalar için verilebilecek bir diğer öneridir. Bu sayede nitinol tel içeren kumaşlara ayrıca ısıl işlem uygulanmasına gerek kalmayacaktır. Ancak bu durumda hafızasında hali hazırda bir şekil bulunduran nitinol telin dokuma işlemleri sırasında işlenmesi daha zor olacaktır. Bu nedenle ısıl işlem görmüş nitinol telin ya atkı ipliği olarak kumaş yapısına dahil edilmesi ya da kumaş yapısına dahil edilmeksizin kompozit üretimi öncesinde düz yatırma ile kullanılması önerilebilecek diğer çözümlerdir.

Bununla birlikte tez kapsamında gerçekleştirilen dokuma kumaş üretimi sırasında aynı leventten beslenen hibrit iplikler ile bükümlü karbon elyaf ipliklerin farklı gerilimler göstermeleri sonucu birtakım problemlerle karşılaşılmıştır. Edinilen deneyim doğrultusunda yapılacak sonraki çalışmalar için, gerilim farklarının kumaş üretiminde problem yaratmasının önüne geçilebilmesi için her iki tel cinsi için de tel özlü hibrit ipliklerin ayrı bir leventten farklı bir gerilimle

salınması ve kumaş yapısına dahil edilmesi önerilmektedir. Bu sayede kumaş üretimi sırasında yaşanan problemlerin azaltılacağı ve giderileceği öngörülmektedir.

Nitinol ve çelik tel özlü hibrit iplikler kullanılarak mekanik özellikleri geliştirilmiş üç boyutlu dokuma kumaş üretimlerinin amaçlandığı ve gerçekleştirildiği bu tez kapsamında, istatistik analizlerle de desteklenilen deneysel sonuçlara göre darbeye dayanıklı kompozit ön şekli için en uygun kumaş parametreleri belirlenmiştir. Kumaşın mekanik özelliklerini geliştirmek için çelik tel kullanılabileceği, ince tellerin dokuma işlemleri sırasında daha az hasar gördüğü ve yapıyla daha iyi bütünleşebildiği, dar kanallı kumaşların daha sıkı bir kumaş yapısına sahip olmalarından ötürü iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Nitinol tel içeren kumaşların maruz kaldığı ısıl işlemlerin kumaşın mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilediği ve düşürdüğü belirlendiğinden, nitinol telin farklı şekillerde kullanılması için öneriler verilmiştir.

Belirlenen optimum parametreler kullanılarak üretilecek ideal kumaşın kompozit haline dönüştürülerek darbe dayanımının araştırılacağı sonraki çalışma için kapsamlı bir altyapı oluşturan bu özgün çalışmanın konu ile ilgili çalışmak isteyecek araştırmacılar için faydalı bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Acar, E., 2016, TiNi akıllı alaşımlarında faz dönüşümleri ve aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part: C, Tasarım ve Teknoloji*, 4(3):165-171s.

Altaş, S., ve Yılmaz, E., 2017, Karbon Elyafların Kompozitlerde Takviye Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması, International Advance Researches in Engineering Congress, 16 - 18 Kasım 2017, Osmaniye, 1603-1609s.

Altaş, S., ve Yılmaz, E., 2016, Akıllı Tekstiller, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), 26-28 Ekim 2016, Adana, 2489-2497s.

Altaş, S., and Yılmaz, E., 2016, Prediction of the fabric's crease recovery property with Taguchi design of experiment, *Fibers and Polymers*, 17(4):644- 650p.

Altaş, S., ve Kadoğlu, H., 2009, Bazı eğirme parametrelerinin filament özlü Dref-3 ipliklerinin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2(2009):93-96p.

Altınok, A.S., 2016, Volfram Tel Özlü İplik Geliştirilerek Isıtma Amaçlı Kumaş Tasarımı, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 170s.

Andrianesis, K., Koveos, Y., Nikolapoulos, G. and Tzes, A., 2010, Experimental Study of a Shape Memory Alloy Actuation System for a Novel Prosthetic Hand, 81-105, Shape Memory Alloys, Cismasiu, C. (Ed.), Sciyo, Rijeka, Croatia, 218p.

Araujo, C.J., Rodrigues, L.F.A., Coutinho Neto, J.F. and Reis, R.P.B., 2008, Fabrication and static characterization of carbon-fiber-reinforced polymers with embedded NiTi shape memory wire actuators, *Smart Materials and Structures*, 17(2008):1-8p.

Asghar, A., Ahmad, M.R. and Yahya, M.F., 2016, Effects of metal filament's alignment on tensile and electrical properties of conductive hybrid cover yarns, *Fashion and Textiles*, 3(3):1-12p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ashir M., Hahn, L., Kluge, A., Nocke, A. and Cherif, C., 2016, Development of innovative adaptive 3D Fiber Reinforced Plastics based on Shape Memory Alloys, *Composites Science and Technology*, 126(2016):43-51p.

Ashir, M., Nocke, A. and Cherif, C., 2019, Development of shape memory alloy hybrid yarns for adaptive fiber-reinforced plastics, *Textile Research Journal*, 89(8):1371-1380.

Ashir, M., Sennewald, C., Hoffmann, G. and Cherif, C., 2017, Development of woven spacer fabrics based on steel wires and carbon rovings, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 25(1):49-55p.

Aurrekoetxea, J., Zurbitu, J., Mendibil, I.O. and A. Agirregomezkorta, 2011, Effect of superelastic shape memory alloy wires on the ımpact behavior of carbon fiber reinforced in situ polymerized poly(butylene terephthalate) composites, *Materials Letters*, 65(2011):863-865p.

Ay, İ., "Kırılma Mekaniği, Malzeme Kusurları", http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/km/lecture2.pdf (Erişim Tarihi: Ekim 2019)

Badawi, S.S., 2007, Development of the Weaving Machine and 3D Woven Spacer Fabric Structures for Lightweight Composites Materials, PhD Thesis, Technical University of Dresden, Dresden, Germany, 186p.

Baiardo, M., and Loubens, J., "DMA characterization of Ni-Ti Shape-Memory Alloys (SMA)", http://www.tainstruments.com/pdf/literature/RS044_V1%20DMA%20characterization%20Ni-Ti%20shaped%20Alloys.pdf (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

Baltacı, A., Sarıkanat, M. ve Turan, M., 2011, Aramid ve karbon lif takviyeli termoplastik kompozit kirişlerin impuls girdi altındaki titreşim davranışları, *Tekstil ve Mühendis*, 18(84):1-7s.

Başal Bayraktar, G., Kianoosh, A. and Bilen, D., 2018, Fabrication of woven honeycomb structures for advanced composites, *Textile & Leather Review*, 1(3-4):114-119p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bedeloğlu, A., 2011, Şekil hafızalı alaşımlar ve tekstil malzemelerindeki uygulamaları, *Tekstil ve Mühendis*, 18(83):27-37s.

Bedeloğlu, A., Sunter, N., Yıldırım, B. and Y. Bozkurt, 2012, Bending and tensile properties of cotton/metal wire complex yarns produced for electromagnetic shielding and conductivity applications, *Journal of The Textile Institute*, 103(12):1304-1311p.

Bedeloğlu, A., 2013, Investigation of electrical, electromagnetic shielding, and usage properties of woven fabrics made from different hybrid yarns containing stainless steel wires, *The Journal of The Textile Institute*, 104(12):1359-1373p.

Behera, B.K. and Dash, B.P., 2015, Mechanical behavior of 3D woven composites, *Materials & Design*, 67:261-271p.

Behera, B.K. and R.Mishra, 2008, 3-Dimensional weaving, *Indian Journal of Fibre&Textile Research*, 33:274-287p.

Bilişik, K., Sahbaz Karaduman, N. and Bilişik, N.E., 2016, 3D Fabrics for Technical Textile Applications, Intechopen, Open Access Peer-Reviewed Chapter, Non-woven Fabrics, Chapter 4, 81-141p.

Bilişik, K., 2013, Three-dimensional braiding for composites: A review, *Textile Research Journal*, 83(13):1414-1436p.

Birçelik, "304L Paslanmaz Çelik Özellikleri", https://bircelik.com/tr/kategori/304l-1-4307-

(Erişim tarihi: Ocak 2019)

Boussu, F. and Bailleul, G., 2002, Development of shape memory alloy fabrics for composite structures, *Autex Research Journal*, 2(1):1-7p.

Buytoz, S. ve Harputlugil, F.N., 2018, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ şekil hatırlamalı alaşımda soğutma hızının faz dönüşüm sıcaklıklarına etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3):175-180s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Cai, Z. and Qui, Y., 2006, The mechanism of air/oxygen/helium atmospheric plasma action on PVA, *Journal of Applied Polymer Science*, 99(5):2233-2237p.

Casati, R., Passaretti, F. and Tuissi, A., 2011, Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators, *Procedia Engineering*, 10(2011):3423-3428p.

Celeb, G. ve Dayik M., 2009, İçi bos iplikler ve üretim yöntemleri, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(2):50-57s.

Chan Vili, Y.Y.F., 2007, Investigating smart textiles based on shape memory materials, *Textile Research Journal*, 77:290–300p.

Chang, S-H. and Lee, C-Y., 2011, Damping characteristics of TiNi shape memory alloy wires reinforced epoxy resin, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(23):1931-1938p.

Chen, X. and Wang, H., 2006, Modelling and computer-aided design of 3D hollow woven reinforcement for composites, *Journal of the Textile Institute*, 97(1):79-87p.

Chen, X., Sun, Y. and Gong, X., 2008a, Design, manufacture, and experimental analysis of 3D honeycomb textile composites, Part I: Design and manufacture, *Textile Research Journal*, 78(9):771-781p.

Chen, X., Sun, Y. and Gong, X., 2008b, Design, manufacture, and experimental analysis of 3D honeycomb textile composites, Part II: Experimental Analysis, *Textile Research Journal*, 78(11):1011-1021p.

Chen, X., Waterton Taylor, L. and Tsai, L-J., 2011, An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites, *Textile Research Journal*, 81(9):932-944p.

Cheng, K.B., Cheng, T.W., Lee, K.C., Ueng, T.H. and Hsing, W.H., 2003, Effects of yarn constitutions and fabric specifications on electrical properties of hybrid woven fabrics, *Composites: Part A*, 34(2003):971-978p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Chung, D.D.L., 1994, Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, 215p.

Coats, "Aquamelt Product Information", https://www.coats.com/-/media/Coats/Files/Aquamelt/Aquamelt_Product_Information.pdf, (Erişim tarihi: 27.03.2019).

Conway, C.A., 2011, 3D Reinforcement of Composite Materials, BSc Thesis, Polytechnic University, Materials Engineering Department, Milano, 79p.

Coşkun, E. ve Oğulata, T, 2008, Akıllı tekstiller ve genel özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 18(3):100-109s.

Cox, B.N. and Flanagan, G., 1997, Handbook of Analytical Methods for Textile Composites, National Aeronautics and Space Administration, NASA Contractor Report 4750.

Çelik, P., Bedez Üte, T., Özden, D., Çömlekçi, H. ve Akkale, E.C., 2009, Öz/Manto oranı ve büküm sayısının filament özlü ipliklerin iplik özelliklerine etkileri, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(2):29-37s.

Çelikkanat, B., 2002, Teknik Tekstiller, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 162s.

Dağdelen, F., Buytoz, S., Kok, M. ve Ercan, E., 2015, Isıl işlemin NiTi şekil hatırlamalı alaşımın (şha) mikroyapısı, dönüşüm sıcaklığı ve termal çevrimi üzerine etkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31(3):115-120s.

Dash, B.P. and Behera, **B.K.,** 2015, A Study on Structure Property Relationship of 3D Woven Composites, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, *Materials Today: Proceedings*, 2(2015):2991-3007p.

DeBaie, A., Goncalo, A., Nelson, D. and Susienka, M., 2009, Design of an Improved Compression Garment System, BSc Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 77p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Dede, A., 2013, Şekil Hafızalı Teknik Tekstil Materyallerle Elde Edilen Hareketli Tekstil Yüzeylerinin (Aktüatörlerin) İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 104s.

Dikmen, N., 2018, Ekonometriye Giriş, Temel Kavramlar ve Uygulamalar, Seçkin Yayıncılık, 4. Baskı, 384s.

Dilibal, S., 2005, Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil Bellek Eğitimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 128 s.

Doğan, A., 2014, Farklı Çevresel Koşullara Maruz Kompozitlerin Mekanik Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 79s.

Dorin, I., Ramona, C., Luminita, C. and Costea, B., 2010, Developments of 3D knitted fabrics, *Structure and Structural Mechanics of Textiles*, 17th International Conference.

El-Dessouky, H.M. and Saleh, M.N., 2018. "3D Woven Composites: From Weaving to Manufacturing", https://www.intechopen.com/books/recent-developments-in-the-field-of-carbon-fibers/3d-woven-composites-from-weaving-to-manufacturing (Erişim tarihi: Nisan 2019).

Erez, E., 2011, Sert Özlü Pamuk-Polyester İpliklerin İplik Özelliklerini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 153s.

Ergen, S., 2018, Determination of phase transformation and activation energy in high temperature shape memory Ti-V-Al alloy, *Hittite Journal of Science and Engineering*, 5(1):63-68p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Feih, S., Boiocchi, E., Kandare, E., Mathys, Z., Gibson, A.G. and Mouritz, A.P. 2009. "Strength Degradation of Glass and Carbon Fibres at High Temperature", ICCM International Conferences on Composite Materials, http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Additional%20Papers/F4.6%20Feih.pdf (Erişim Tarihi: Temmuz 2019).

Foreman, A.D., Nensi, T., Meeks, C.B., Curtis, P.T., QinetiQ and DSTL, 2007, An Integrated System for Improved Damage Resistance and Lightning Strike Protection in Composite Structures, 16th International Conference on Composite Materials, 1-7p.

Gokarneshan, N. and Alagirusamy, R., 2009, Weaving of 3D fabrics: A critical appreciation of the developments, *Textile Progress*, 41(1):1-58p.

Guide, A.T. 2004. "Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial, A Teacher's Guide To Teaching SMA Shape Training", http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf (Erişim tarihi: Mart 2017)

Gupta, A.K., Velmurugan, R. and Joshi, M., 2017, Mechanical characterization of pseudoelastic shape memory alloy hybrid composites, *Journal of Micro and Smart Systems*, 6:149-160p.

Gupta, S. 2008. "All Weather Clothing", http://www.techexchange.com/library/All%20Weather%20Clothing.pdf (Erişim tarihi: Mayıs 2017)

Gündoğan, S., Eren, R. ve Karahan, M., 2009, Üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozit yapıların çekme mukavemetinin analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 161-168s.

Gündoğan, S., 2010, Üç Boyutlu Dokuma Kompozit Yapıların Mekanik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 68s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Güney, S., 2009, Peristaltik Hareket Sağlayan Tıbbi Tekstil Materyalinin Geliştirilmesi ve Bilgisayarlı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 82s.

Gürkan Ünal, P. 2012. "3D Woven Fabrics", https://www.intechopen.com/books/woven-fabrics/3-d-woven-fabrics (Erişim tarihi: 5 Haziran 2019).

Hamada, K., Kawana, F. and Asaoka, K., 2003, Shape recovery of shape memory alloy fiber embedded resin matrix smart composite after crack repair, *Dental Materials Journal*, 22(2):160-167p.

Hearle, J.W.S. and Chen, X., 2009, 3D Woven Preforms and Properties for Textile Composites, ICCM International Conferences on Composite Materials, 1-10p.

Heller, L., Kujawa, A., Sittner, P., Landa, M., Sedlak, P. and Pilch, J., 2008, Quasistatic and dynamic functional properties of thin superelastic niti wires, *The European Physical Journal Special Topics*, 158: 7–14p.

Heller, L., Vokoun, D., Sittner, P. and Finckh, H., 2012, 3D Flexible NiTi-braided elastomer composites for smart structure applications, *Smart Materials and Structure*, 21(4):1-13p.

Honeycutt, T.W., 1993, US5207837: Method of Disposal of Hot Water Soluble Garments and Like Fabrics.

Hong, H., Filho, A.A., Fangueiro, R. and Araujo, M.D., 1994, The development of 3D shaped knitted fabrics for technical purposes on a flat knitting machine, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 19:189-194p.

Hu, H. and Liu, Y., 2010, Technical textile yarns, Edited by Alagirusamy, R. and A. Das, 1st ed., The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2010.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

İmak, A., Solmaz, M.Y. ve Topkaya, T., 2016, Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının analizi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3):448-458s.

Jang, B-K. and Kishi, T., 2006, Influence of stacking angle of carbon fibers on fracture behavior of TiNi fiber impregnated CFRP composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 419(2006):208-212p.

Justusson, B., Yu, J., Chen, A. and Yen, C-F., 2012, Mechanical Testing of 3D Fabric Composites and Their Matrix Material SC-15, Final Report, Army Research Laboratory, 32p.

Kandaş, H., 2018, Farklı Ön Gerilme Yüklerinde Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 88s.

Kaplan, M., 2016, Termoplastik kompozitler için hibrit iplik üretimi, *Tekstil ve Mühendis*, 23(101):61-79s.

Karacan, A., 2018, Darbe Sonrası Farklı Ortam Koşullarına Maruz Bırakılan Kompozit Plakaların Basma Dayanımlarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 100s.

Khokar, N., 2001, 3D-weaving: Theory and practice, *Journal of the Textile Institute*, 92(2):193-207p.

Khokar, N., 2002, Noobing: A nonwoven 3D fabric-forming process explained, *Journal of the Textile Institute*, 93(1):52-74p.

Khokar, N., 2013, Making the Uniaxial Noobing Process Industrially Relevant, Proceedings of the Fifth World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, December 2013, New Delhi, India.

Kim, J-K., Baillie, C. and Mai, Y-W., 1991, Interfacial debonding and fibre pull-out stresses, Part I Critical comparison of existing theories with experiments, *Journal of Materials Science*, 27(1991):3143-3154p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Korkmaz, M., 2014, Üç Boyutlu Orthogonal Dokuma Kumaşların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 68s.

Lah, A.S., Fajfar, P., Lavric, Z., Bukosek, V. and Rijavec, T., 2016, Preparation of shape memory nitinol filaments for smart textiles, *Tekstilec*, 59(2):168-174p.

Lou, C-W., 2005, Process of complex core spun yarn containing a metal wire, *Textile Research Journal*, 75(6):466-473p.

Malard, B., Pilch, J., Sittner, P., Gartnerova, V., Delville, R., Schryvers, D. and Curfs, C., 2009, Microstructure and Functional Superelasticity Property Changes in Thin Niti Wires Heat Treated by Electric Current, ESOMAT 2009-8th European Symposium on Martensitic Transformations, September 7-11, Prague, Czech Republic.

Matthey, J., "Nitinol Specification Guidelines", https://matthey.com/en/markets/pharmaceutical-and-medical/medical-device-components/resource-library/nitinol-specification-guidelines (Erişim Tarihi: Şubat 2019).

Memry Co., "Nitinol", http://www.memry.com/nitinol-iq/nitinol-fundamentals/physical-properties (Erişim tarihi: Nisan 2017).

Merlin, M., Scoponi, M., Soffritti, C., Fortini, A., Rizzoni, R. and Garagani, G.L., 2015, On the improved adhesion of NiTi wires embedded in polyester and vinylester resins, *Fracture and Structural Integrity*, 31 (2015):127-137p.

Misra, S.K., 2013, Shape Memory Alloy Reinforced Self-Healing Metal Matrix Composites, MSc Thesis, University of Wisconsin Milwaukee, 109p.

Moein, H. and Menon, C, 2014, An active compression bandage based on shape memory alloys: A preliminary investigation, *BioMedical Engineering Online*, 13(135):1-13p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Molnar, P. and Humbeeck, J.V., 2011, Recovery stress and shape memory stability in Ni–Ti–Cu thin wires at high temperatures, *International Journal of Materials Research*, 102(11):1362-1368p.

Mountasir, A., Hoffmann, G. and Cherif. C., 2011, Development of weaving technology for manufacturing three-dimensional spacer fabrics with high-performance yarns for thermoplastic composite applications: An analysis of two-dimensional mechanical properties, *Textile Research Journal*, 81(13):1354-1366p.

Murray, G.T. 1997. "Handbook of Materials Selection for Engineering Applications", https://books.google.com.tr/books?id=NC-AXM9U6qsC&printsec=frontcover&hl=tr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Erişim tarihi: Mart 2019).

Ni, Q-Q, Zhang, R-X., Natsuki, T. and Iwamoto, M., 2007, Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers, *Composite Structures*, 79 (2007):501–507p.

Örtlek, H.G., Saraçoğlu, Ö.G., Sarıtaş, Ö. and Bilgin, S., 2012, Electromagnetic shielding characteristics of woven fabrics made of hybrid yarns containing metal wire, *Fibers and Polymers*, 13(1):63-67p.

Özdamar, K., 2013, Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi, Nisan Kitabevi, 9.Baskı, 250s.

Özdemir, O., 2012, Core Material Effect On Impact Behavior Of Glass Fiber Sandwich Composites, MSc Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Izmir, 98p.

Öztürk, Ö., 2015, Poliüre Matris Malzemesi ve Cam, Aramid, Karbon Elyaf Kumaş Takviyeleri Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 51s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pappada, S., Gren, P., Tatar, K., Gustafson, T., Rametta, R., Rossini, E. and Maffezoli, A., 2009a, Mechanical and vibration characteristics of laminated composite plates embedding shape memory alloy superelastic wires, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(5-6):531-537p.

Pappada, S., Rametta, R., Toia, L, Coda, A., Fumagalli, L. and Maffezoli, A., 2009b, Embedding of superelastic SMA wires into composite structures: Evaluation of impact properties, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(5-6): pp.522-530p.

Park, J-S., Kim, J-H. and Moon, S-H., 2004, Vibration of thermally post-buckled composite plates embedded with shape memory alloy fibers, *Composite Structures*, 63(2004):179-188p.

Perumalraj, R., Dasaradhan, B.S. and Nalankilli, G., 2010, Copper, stainless steel, glass core yarn, and ply yarn woven fabric composite materials properties, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(20):3074–3082p.

Pilch, J., Heller, L. and Sittner, P., 2009, Final Thermomechanical Treatment of Thin Niti Filaments for Textile Applications by Electric Current, ESOMAT 2009 - 8th European Symposium on Martensitic Transformations, September 7-11, Prague, Czech Republic.

Pinto, F. and Meo, M., 2014, Mechanical response of shape memory alloy–based hybrid composite subjected to low-velocity impacts, *Journal of Composite Materials*, 49(22):2713-2722p.

Poon, C., Lau, K. and Zhou, L., 2005, Design of pull-out stresses for prestrained SMA wire/polymer hybrid composites, *Composites: Part B*, 36(2005):25-31p.

Pürçek, G. 2014. "Metalik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler Ders Notları", https://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=12&USER=3799 (Erişim tarihi: Temmuz 2019).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Raghavan, J., Bartkiewicz, T., Boyko, S., Kupriyanov, M., Rajapakse, N. and Yu, B., 2010, Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites, *Composites: Part B*, 41(2010):214–222p.

Rahmani, H., Najafi, S.H.M. and Ashori, A., 2014, Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(8):733-740p.

Rebouillat, S., 2001, Aramids, High Performance Fibres, Hearle, J. W. S. (Ed), 1st ed., The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 23-58p.

Sadrnezhaad, S.K., Nemati, N.H. and Bagheri, R., 2009, Improved adhesion of NiTi wire to silicone matrix for smart composite medical applications, *Materials and Design*, 30(2009):3667-3672p.

Saleh, M.N. and Soutis, C., 2017, Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites, *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 3(12):1-17p.

Sayer, M., 2009, Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 134s.

Sezgin, H., 2018, Investigation and Enhancement of the Mechanical Properties of the Fabric Reinforced Hybrid Composites, PhD Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, Department of Textile Engineering, Istanbul, 189p.

Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S.U., Akbari, M.K., Fakhrhoseini, S.M., Khayyam, H., Pakseresht, A.H., Ghasali, E., Zabet, M., Munir, K.S., Jia, S., Davim, J.P. and Naebe, M., 2017, Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties, *Composites: Part A*, 92(2017):70-96p.

Stig, F., 2012, 3D-Woven Reinforcement In Composites, Doctoral Thesis, KTH School of Engineering Sciences, Stockholm, Sweeden, 48p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Şen, S. 2019. "Regresyon", https://sedatsen.files.wordpress.com/2016/11/9-sunum.pdf (Erişim tarihi: Eylül 2019).

Takaku, A. and Arridge, R.G.C., 1973, The effect of interfacial radial and shear stress on fibre pull-out in composite materials, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 6:2038-2047p.

Tamilarasan, U., Karunamoorthy, L. and Palanikumar, K., 2015, Mechanical properties evaluation of the carbon fibre reinforced aluminium sandwich composites, *Materials Research*, 18(5):1029-1037p.

Telli, A., Daşan, Y., Babaarslan, O. and Karaduman, S., 2017, Usage of core and dual-core yarns containing tungsten for electromagnetic shielding, *Advance Research in Textile Engineering*, 2(1):1-7p.

Toptaş, E. ve Akkuş, N., 2007, Şekil hafızalı alaşımlar ve endüstriyel uygulamaları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2007(4):15-22s.

Ueda, F., Tanaka, H. and Hayashi, M., 1993, US5208104: High-Tenacity Water-Soluble Polyvinyl Alcohol Fiber and Process for Producing the Same.

Ueng, T.H. and Chen, K.B., 2001, Friction core-spun yarns for electrical properties of woven fabrics, *Composites: Part A*, 32(2001):1491-1496p.

Umer, R. and Zhou, J., 2016, The mechanical properties of 3D woven composites, *Journal of Composite Materials*, 0(0):1-14p.

Ünver, Ö., Gamgam, H. ve Altunkaynak, B., 2006, SPSS Uygulamalı Temel İstatistik Yöntemler, Seçkin Yayıncılık, 7. Baskı, 488s.

Vasile, S., Cıesıelska-Wróbel, I.L. and Langenhove, L.V., 2012, Wrinkle recovery of flax fabrics with embedded superelastic shape memory alloys wires, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, 20(4):56-61p.

Vasile, S., Githaiga, J. and Ciesielska-Wrobel, I.L., 2011, Comparative analysis of the mechanical properties of hybrid yarns with superelastic shape memory alloys (SMA) wires embedded, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 6(89):41-46p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Vasile, S., Grabowska, K.E., Ciesielska-Wróbel, I.L. and Githaiga, J., 2010, Analysis of hybrid woven fabrics with shape memory alloys wires embedded, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, 18(1):64-69p.

Villa, E., Arnaboldi, S., Tuissi, A., Giacomelli, M. and Turco, E., 2009, mechanical analysis of hybrid textile composites with NiTi wires, Journal *of Materials Engineering and Performance*, 18(5-6):517-521p.

Vuruşkan, D., 2010, Elastan İçerikli İplik Üretmek Üzere Modifiye Edilen Ring Makinasında Üretim Değişkenlerinin Optimizasyonu ve İplik Kalitesi Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 250s.

Vuruşkan, D., Babaarslan, O. ve İlhan, İ., 2013, Ring iplik eğirme makinesinin elastan içerikli özlü (kor) iplik üretmek üzere modifikasyonu, *Tekstil ve Mühendis*, 20(89):1-10s.

Wu, R., Han, M-W., Lee, G-Y. and Ahn, S-H., 2013, Woven type smart soft composite beam with in-plane shape retention, *Smart Materials Structure*, 22:1-7p.

Yaman, N., Öktem, T. ve Seventekin, N., 2007, Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2007(2):90-95s.

Yan, X. and Humbeeck, J.V., 2011, Effect of annealing on strain-temperature response under constant tensile stress in cold-worked niti thinwire, *Hindawi Publishing Corporation, SmartMaterials Research*, 2011:1-6p.

Yanen, C. ve Solmaz, M.Y., 2016, Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2):351-362s.

Yang, S.Y., Goo, B.Y. and Kim, H.J., 2005, Mechanical behavior of shape memory alloy composites, *Key Engineering Materials*, 297-300:1551-1558p.

Yıldızlı, K. 2011. "Çekme/Eğme Deney Föyü", http://mak.muhendislik.omu.edu.tr/tr/belgeler/deney-foyleri/cekme_egmedeneyi.pdf (Erişim tarihi: Ağustos 2019).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yıldız İşman, N., 2010, Polyester Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe ve Eğilme Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 102s.

Yılmaz, R., 2014, Elektromanyetik kalkanlama özelliği olan malzemeler, *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 4(1):136-150s.

Yöney, H., 2007, El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri , Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 194s.

Zanaboni, E., 2008, One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo–Mechanical Characterization of Ni–Ti wires, MSc Thesis, Pavia University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Italy, 92p.

Zhang, R-X., Ni, Q-Q, Masuda, A., Yamamura, T. and Iwamoto, M., 2006, Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded shape memory alloys, *Composite Structures*, 74(2006):389-398p.

Zhang, R-X., Ni, Q-Q, Natsuki, T. and Iwamoto, M., 2007, Mechanical properties of composites filled with sma particles and short fibers, *Composite Structures*, 79(1):90-96p.

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinden sonuçlandırılmasına kadar olan süreçte bilgi ve deneyimi ile bana yol gösteren, doktora eğitimim süresince kendisinden çok şey öğrendiğim danışman hocam Doç. Dr. Sayın Sevda ALTAŞ'a, tez çalışmalarım süresince görüşlerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Sayın Arzu MARMARALI ve Prof. Dr. Sayın Yıldırım AYDOĞDU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için karbon elyaf bobinlerini bedelsiz olarak temin eden DowAksa firmasına, dokuma hazırlık ve üretim süreçleri boyunca yardımlarını esirgemeyen Arif ER'e, dokuma kumaş desen planının oluşturulmasında destek veren Ali ODABAŞI'na, tez kapsamında hibrit iplik üretimlerimi gerçekleştiren Ağteks Firması'na ve Kerem ARITÜRK'e, tez kumaşlarımın üretimini gerçekleştirmeme olanak sağlayan ve üretimler sırasında destek veren Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nden Doç. Dr. Mustafa Sabri ÖZEN'e ve Doç. Dr. Erhan SANCAK'a, kumaş üretimlerimi gerçekleştirmemde büyük emeği olan Miren Tekstil firmasından Eyüp TOKLUOĞLU'na, tez kapsamında gerçekleştirdiğim analizler süresince tüm sorularımı içtenlikle cevaplayan Ege MATAL'dan Uzm. Fiz. Nurdan AKAKÇE'ye ve Dokuz Eylül Makine Mühendisliği'nden Makine Yük. Müh. Halis KANDAŞ'a, istatistiksel analizlerimin gerçekleştirmesinde yol gösteren Doç. Dr. Gonca ÖZÇELİK KAYSERİ'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Özge ELMASTAŞ GÜLTEKİN'e, bu süreçte manevi desteği ile yanımda olan arkadaşım Ar. Gör. Dr. Esra Zeynep YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim süresince 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında sağladığı bursla çalışmalarıma katkı sağlayan TUBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her anında olduğu gibi doktora öğrenimim sırasında da yanımda olarak bana güç veren, sonsuz sevgi ve sabır gösteren, desteklerini her koşulda hissettiren sevgili aileme, değerli eşim Tuna YILMAZ'a ve canım oğlum Efe Demir YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

25 / 12 / 2019
Elif YILMAZ

ÖZGEÇMİŞ

09.02.1985 yılında Silvan'da doğan Elif Yılmaz, 2003 yılında girdiği Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2011 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2014 yılında tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı.

2014 yılı Aralık ayından itibaren Ege Üniversitesi Emel Akın Meslek Yüksekokulu'nda Araştırma Görevlisi kadrosunda görev yapan Elif Yılmaz, evli ve bir çocuk annesidir.