

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**HİBRİT NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KAYMA ALTINDA
KATILAŞAN SIVILARIN BALİSTİK UYGULAMALARINDA
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Cenk YANEN

Doktora Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik Bilim Dalı

MAYIS 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

HİBRİT NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KAYMA ALTINDA
KATILAŞAN SIVILARIN BALİSTİK UYGULAMALARINDA
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Cenk YANEN

Danışman
Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

MAYIS 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Hibrit Nanopartikül Takviyeli Kayma Altında Katılaştan Sıvıların Balistik Uygulamalarında Kullanımının Araştırılması
Yazarı:	Cenk YANEN
İlk Teslim Tarihi:	22.04.2021
Savunma Tarihi:	24.05.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mete Onur KAMAN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Erkut SAYIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Hibrit Nanopartikül Takviyeli Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların Balistik Uygulamalarında Kullanımının Araştırılması” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24.05.2021

Cenk YANEN



ÖNSÖZ

Kayma altında katılaşılan sıvılar (KAKS), sıvı ortamda dağıtılmış nano boyutlu katı partiküllerden oluşan Newtonyan olmayan özel bir akışkan çeşididir. KAKS'ların viskozitesinde artan kayma hızı ile birlikte ani bir artış görülür, sahip oldukları bu özellik tersinirdir ve viskoziteyi artıran gerilim ortadan kalktığında viskoziteleri ilk hallerine geri döner. Bu çalışmada çok katı fazlı kayma altında katılaşılan sıvılar üretilmiş ve savunma sanayinde kullanılan yüksek performanslı kumaşlara emdirilerek, kumaşların enerji sönmüleme kabiliyetleri iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Doktora eğitimim ve tez çalışmalarım da danışmanlık ederek beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışması süresince desteğini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri hocalarım Prof. Dr. Mete Onur KAMAN ve Doç. Dr. Erkut SAYIN'a, lisansüstü eğitimim boyunca ders aldığım hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜR'e, bölüm başkanımız Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN'e teşekkürü borç bilirim. Tez dönemi boyunca laboratuvar imkânlarından faydalanmamı sağlayan hocalarım, Prof. Dr. Fethi KAMIŞLI'ya, Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e, Dr. Öğr. Üyesi Mutlu ÇEVİK'e ve Dr. Öğr. Üyesi Ferit AK'a teşekkür ederim. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda çok büyük desteklerini gördüğüm çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Ercan AYDOĞMUŞ ve Arş. Gör. Celal KISTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip bugünlere gelebilmem için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan babam Hasan YANEN, annem Sultan YANEN ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kardeşim Ceren YANEN'e çok teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında iyi ve kötü günlerimde varlığıyla bana her zaman destek olan eşim Ruhan YANEN'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.19.44. protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. Ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211/C Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Bu tez çalışması kızlarım Ece Arya ve Defne'ye ithaf edilmiştir.

Cenk YANEN
ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Sivri Uçlu Cisimler ile Gerçekleşen Tehditler.....	3
2.2. Balistik Tehditler	4
2.3. Vücut Zırhlarının Sınıflandırılması	7
2.4. Vücut Zırh Malzemelerinin Gelişimi.....	8
2.5. Darbelerde Enerji Sönümlemesine Etki Eden Faktörler	10
2.5.1. Kumaş Yapısı	11
2.5.2. İplik Parametreleri	14
2.5.3. Kumaş Parametreleri	15
2.5.4. Polimer ve Fiber Yapılar	16
2.6. Enerji Sönümleme Mekanizmaları	20
2.6.1. İplik Çekme Kuvveti	21
2.6.2. İplik İncelmesi ve Kopması.....	21
2.6.3. Yüzey Sürtünme ve Piramit Formasyonu.....	22
2.7. Kayma Altında Katılan Sıvılar	23
2.7.1. Kayma Altına Katılan Sıvı Teorileri	25
2.7.2. KAKS Yapısına Etki Eden Parametreler	27
2.7.3. KAKS Uygulamaları	37
3. MATERYAL VE METOT	53
3.1. KAKS Tasarımı ve Üretimi	53
3.1.1. Malzeme.....	53
3.1.2. KAKS Üretim Planı	55
3.1.3. KAKS Üretim Aşamaları	57
3.2. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi	57
3.3. KAKS Emdirilmiş Kumaşların Hazırlanması.....	58
3.4. Yüzey Sürtünme Testi	60
3.5. İplikler Arası Sürtünme Testi	61
3.6. Düşük Hızlı Darbe Testi	62
3.7. Balistik Atış Testi	64
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	68
4.1. Tek Katı Fazlı KAKS'ların Reolojik Sonuçları	68
4.1.1. Silika Nanopartikül Oranının Etkisi	68
4.1.2. Silika Nanopartikül Boyutunun Etkisi.....	69
4.1.3. Sıvı Ortamın Etkisi	71

4.1.4. Tek Katı Fazlı KAKS'ların Reolojik Bulguları Üzerine Tartışma	73
4.2. Hibrit Nanopartikül Takviyeli KAKS'ların Reolojik Sonuçları	75
4.2.1. Nanopartikül Takviye Oranının Etkisi	75
4.2.2. Nanopartikül Türünün Etkisi.....	76
4.2.3. Hibrit Nanopartikül Takviyesinin Etkisi	79
4.2.4. Hibrit Nanopartikül Takviyeli KAKS'ların Reolojik Bulguları Üzerine Tartışma	84
4.3. KAKS emdirilmiş Twaron kumaşların SEM görüntüleri	85
4.4. Yüzey Sürtünme Test Sonuçları	87
4.5. İplikler Arası Sürtünme Test Sonuçları	89
4.6. Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları.....	94
4.6.1. KAKS Uygulamasının Enerji Sönümleme Performansına Etkileri	94
4.6.2. Kumaş Yapısının Enerji Sönümleme Performansına Etkileri	99
4.6.3. Düşük Hızlı Darbe Testleri Üzerine Tartışma.....	104
4.7. Balistik Test Sonuçları.....	105
4.7.1. KAKS Uygulamasının Balistik Test Sonuçlarına Etkileri.....	106
4.7.2. Kumaş Yapısının Balistik Test Sonuçlarına Etkileri	115
4.7.3. Balistik Testler Üzerine Tartışma.....	120
5. SONUÇLAR.....	122
KAYNAKLAR.....	128
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Hibrit Nanopartikül Takviyeli Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların Balistik Uygulamalarında Kullanımının Araştırılması

Cenk YANEN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2021, Sayfa: xiii + 138

Bireysel silahlanmanın arttığı günümüzde vücut zırh malzemelerinin günlük kullanıma uygun olacak şekilde hafifletilmesi ve tehdidin türüne bağlı olarak geniş bir alanda koruma sağlamaları oldukça önem kazanmıştır. Kişisel koruyucu zırh üretiminde yüksek performanslı kumaşlar yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu kumaşların enerji sönümleme performansının artırılması için kayma altında katılaşılan sıvı (KAKS) kullanımı oldukça yaygındır. Kayma altında katılaşılan sıvılar artan kayma oranı ile birlikte viskozitesinde ani bir sıçrama meydana gelen özel bir akışkan çeşididir. KAKS'lar yüksek performanslı kumaşlara emdirilerek enerji sönümleme performansları iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada literatürde genellikle tek katı fazlı üretilerek kullanılan KAKS'lara hibrit nanopartikül takviyesi yapılarak reolojik özellikleri incelenmiştir. Nanopartikül takviyesi için karbon nanotüp, grafen nanoplate ve silisyum karbür partikül kullanılmıştır. KAKS'lar Twaron para-aramid kumaşlara emdirilerek enerji sönümleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. KAKS emdirilmiş kumaşların koruma performanslarının araştırılması ve koruma mekanizmalarının incelenmesi için yüzey sürtünme testi, iplik çekme testi, düşük hızlı darbe testi ve balistik testler uygulanmıştır. Testlerde kumaş yapısının etkisini inceleyebilmek için iki farklı para-aramid kumaş kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre nanopartikül takviyesinin, tek katı fazlı KAKS'ların viskozite profillerini düşürdüğü gözlenmiştir. Hibrit Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin yüzey sürtünme ve iplik çekme kuvvetini artırdığı ve bunun yanı sıra NIJ 0115.00 standardına göre yapılan çivi ve bıçak düşürme testlerinde ve NIJ 0101.06 standardına göre yapılan balistik testlerde enerji sönümleme performansını pozitif etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan testlerde meydana gelen tehdit türüne göre kumaş seçiminin önemli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma altında katılaşılan sıvı, Balistik, Silika, Nanopartikül, Aramid

ABSTRACT

Investigation the Use of Hybrid Nanoparticle Reinforced Shear Thickening Fluid in Ballistic Applications

Cenk YANEN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

May 2021, Pages: xiii + 138

Nowadays, as individual armament has increased, it has become very important to lighten body armor materials to be suitable for daily use and to provide protection in a wide area depending on the type of threat. In order to increase the energy absorption performance of high-performance fabrics used extensively in the production of personal body armor, it is quite common to use shear-thickening fluids (STF). STFs are a special type of fluid that causes a sudden increase in viscosity with an increasing shear rate. In this study, the rheological properties of STF have been investigated by adding hybrid nanoparticles. Carbon nanotubes, graphene nanoplates and silicon carbide particles are used for nanoparticle reinforcement. STFs effects on energy absorption performance were investigated by impregnating two different Twaron para-aramid fabrics. Surface friction test, inter-yarn pull-out test, a drop tower against spike and knife threats and ballistic tests were applied to investigate the protection performance of STF impregnated fabrics and to examine the protection mechanisms. It has been observed that nanoparticle additives reduce the viscosity profiles of single-phase STF. It has been determined that hybrid reinforced STF impregnated samples increase the surface friction and pull-out force, as well as positively affect the energy absorption performance in the knife and spike drop tower tests performed according to the NIJ 0115.00 standard and in the ballistic tests performed according to the NIJ 0101.06 standard. In addition, it has been determined in the tests that the selection of the fabric is important according to the type of threat that occurs.

Keywords: Shear thickening fluid, Ballistic, Silica, Nanoparticles, Aramid

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	a) Yüksek ve b) Düşük hızlı darbelerde hasar mekanizmaları	5
Şekil 2.2.	Standart darbe hızı sınıflandırmaları	5
Şekil 2.3.	Darbe anında kumaştaki enerji dağılımları	6
Şekil 2.4.	Kompozit vücut zırhı bileşenleri	8
Şekil 2.5.	Vücut zırhı malzemelerinin gelişim süreci	10
Şekil 2.6.	Merminin kumaş hedeflere çarpması sonrası şekil değişimi	11
Şekil 2.7.	Kumaş yapısı gösterimi	12
Şekil 2.8.	Kumaş örgü tipleri	13
Şekil 2.9.	İki ve çok eksenli kumaşlar	13
Şekil 2.10.	3B dokuma kumaş yapısı	14
Şekil 2.11.	Farklı sürtünme katsayılarına sahip kumaşların enerji sönümleme miktarının darbe hızı ile değişimi	15
Şekil 2.12.	Yapısal ve balistik fiberlerin spesifik gerilme mukavemeti ile spesifik gerilme modülü arasındaki ilişki	17
Şekil 2.13.	a) Kevlar ve b) Nomex para-aramidlerinin kimyasal yapısı	18
Şekil 2.14.	Vectran'ın kimyasal yapısı	19
Şekil 2.15.	Zylon PBO'nun kimyasal yapısı	20
Şekil 2.16.	Fibrilasyon SEM görüntüsü	22
Şekil 2.17.	Mermi çarpması sonucu kumaşın 3 boyutlu gösterimi	23
Şekil 2.18.	Akışkan malzeme türleri	24
Şekil 2.19.	Kayma altında incelme ve katılma davranışının şematik gösterimi	25
Şekil 2.20.	Farklı katı partikül oranlarına sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi	28
Şekil 2.21.	Farklı katı partikül şekillerine sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi	29
Şekil 2.22.	Farklı katı partikül boyutlarına sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi	30
Şekil 2.23.	Partiküller arası bağlantının viskozite üzerine etkisi	31
Şekil 2.24.	Farklı sıcaklıklar yapılan reolojik testlerin viskozite üzerine etkisi	32
Şekil 2.25.	Süspansiyon viskozitesinin ilave nanopartikül takviyesi ile değişimi	33
Şekil 2.26.	Süspansiyon viskozitesinin GO takviyesi ile değişimi	34
Şekil 2.27.	Halloysite nanotüp takviyesinin süspansiyon viskozitesine etkisi	34
Şekil 2.28.	Farklı seramik nanopartikül takviyelerinin süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi	35
Şekil 2.29.	KNT takviyesinin süspansiyonun viskozitesine etkisi	36
Şekil 2.30.	Farklı oranlarda grafen takviyesinin süspansiyonların viskozitesine etkisi	36
Şekil 2.31.	Grafen takviyesinin süspansiyonları viskozitesine etkisi	37
Şekil 3.1.	KAKS üretim yöntemi	57
Şekil 3.2.	Anton Paar MCR 102 Reometre	58
Şekil 3.3.	Twaron para-aramid kumaşların şematik gösterimi a)Twaron 460 b)Twaron 200	59
Şekil 3.4.	Yüzey sürtünme test cihazı	60
Şekil 3.5.	İplik çekme test numunesinin şematik gösterimi, test düzeneği ve örnek test görseli	62
Şekil 3.6.	Düşük hızlı darbe testi şematik gösterimi ve testlerde kullanılan uç geometrileri	63
Şekil 3.7.	Tabanca sabitleme aparatı	65
Şekil 3.8.	Balistik atış test düzeneği	65

Şekil 3.9.	Balistik atışlarda kullanılan kumaşlarda atış yerinin işaretlenmesi.....	66
Şekil 3.10.	NIJ 0101.06 standardına göre arka yüz izi ölçüm örneği.....	67
Şekil 4.1.	Silika nanopartikül oranının değişiminin KAKS'ların reolojik özelliklerine etkisi.....	68
Şekil 4.2.	Farklı oranlarda silika nanopartikül ile üretilmiş KAKS'ların bölgesel viskozite değerleri	69
Şekil 4.3.	Farklı boyutlarda silika nanopartikül kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozite-kayma oranı grafiği	70
Şekil 4.4.	Farklı boyutları silika nanopartiküller ile üretilmiş KAKS'lardaki bölgesel viskozite değerleri	71
Şekil 4.5.	Farklı yoğunluklarda PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozite-kayma oranı grafiği	72
Şekil 4.6.	Farklı yoğunluklarda PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'ların bölgesel viskozite değerleri ...	72
Şekil 4.7.	Tek katı fazlı KAKS'ların karşılaştırılması	73
Şekil 4.8.	Tek katı fazlı KAKS'ların karşılaştırılması	74
Şekil 4.9.	Çok katı fazlı KAKS'larda nanopartikül takviye oranının reolojik özelliklere etkisi	76
Şekil 4.10.	Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı KNT takviyelerinin reolojik özelliklere olan etkisi	77
Şekil 4.11.	Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı SiC takviyelerinin reolojik özelliklere etkisi	77
Şekil 4.12.	Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı GNP takviyelerinin reolojik özelliklere olan etkisi	78
Şekil 4.13.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi	79
Şekil 4.14.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması...	80
Şekil 4.15.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi	81
Şekil 4.16.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması...	82
Şekil 4.17.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi	83
Şekil 4.18.	Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması...	84
Şekil 4.19.	a-b) Temiz Twaron 200-460 c-d) KAKS Twaron 200-460 e-f) KAKS/SiC-B Twaron 200-460 g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A Twaron 200-460 numunelerine ait SEM görüntüleri	86
Şekil 4.20.	Tüm numunelere ait yüzey sürtünme test sonuçlarının karşılaştırılması	87
Şekil 4.21.	Twaron 200 ile üretilen numunelerde ortalama sürtünme katsayısına nanopartikül takviyesinin etkisi	88
Şekil 4.22.	Twaron 460 ile üretilen numunelerde ortalama sürtünme katsayısına nanopartikül takviyesinin etkisi	89
Şekil 4.23.	Kumaşlara tek ve çok katı fazlı KAKS emdirilmesinin iplikler arası sürtünme değerleri üzerindeki etkisi.....	90
Şekil 4.24.	Kumaşlara hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmesinin iplikler arası sürtünmeye etkisi	91
Şekil 4.25.	Maksimum iplik çekme kuvvetleri	93
Şekil 4.26.	Temiz ve KAKS emdirilmiş a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçları	95
Şekil 4.27.	KNT-A ve GNP-A nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi ..	96
Şekil 4.28.	KNT-A ve SiC-B nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi ..	98
Şekil 4.29.	GNP-A ve SiC-B nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi ..	99
Şekil 4.30.	a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelere bıçak ve çivi uç ile yapılan düşük hızlı darbe testlerinde kumaş yapısının etkisi	101
Şekil 4.31.	Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin hasar şekilleri incelemesi	102

Şekil 4.32.	Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin hasar şekilleri incelemesi	103
Şekil 4.33.	Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) KAKS c-d) KAKS/SiC-B e-f) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri.....	107
Şekil 4.34.	Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) KAKS c-d) KAKS/SiC-B e-f) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri.....	108
Şekil 4.35.	a-b) %5 c-d)%10 e-f) %20 KAKS emdirilmiş numunelerin balistik test sonrası resimleri ...	110
Şekil 4.36.	Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri.....	113
Şekil 4.37.	Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri.....	114
Şekil 4.38.	Temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 600 kumaşların balistik test sonrası travma derinliği karşılaştırması.....	116
Şekil 4.39.	Temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 600 kumaşların balistik test sonrası travma çapı karşılaştırması	116
Şekil 4.40.	Balistik testlerde merminin durdurulma mekanizması.....	118
Şekil 4.41.	Twaron 200 kumaş ile üretilen numunelerin balistik testlerinde kullanılan 9 mm FMJ merminin ilk ve balistik testlerden sonraki resimleri ve ölçüleri	119
Şekil 4.42.	Twaron 460 kumaş ile üretilen numunelerin balistik testlerinde durdurulan mermi resimleri.....	120

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Tekstil terimleri	11
Tablo 2.2. Aramid esaslı ticari ürünlerin mekanik özellikleri	18
Tablo 2.3. UHMWPE mekanik özellikleri	19
Tablo 3.1. Silika nanopartiküllerin özellikleri	53
Tablo 3.2. Polietilen glikolün özellikleri.....	54
Tablo 3.3. Karbon nanotüp özellikleri	54
Tablo 3.4. Silisyum karbür nanopartikül özellikleri.....	54
Tablo 3.5. Grafen nanoplate özellikleri.....	55
Tablo 3.6. KAKS üretim planı	55
Tablo 3.7. Nanopartikül seçim planı	56
Tablo 3.8. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretim planı.....	56
Tablo 3.9. Twaron kumaşların özellikleri	60
Tablo 3.10. Testlerde kullanılan numuneler.....	61
Tablo 3.11. Düşük hızlı darbe testinde kullanılan koşullar	64
Tablo 3.12. Balistik atış testi uygulanan numune detayları.....	64
Tablo 3.13. 9 mm FMJ mermi özellikleri	65
Tablo 4.1. KAKS oranı %50 olan numunelerin balistik test sonuçları	109
Tablo 4.2. KAKS oranı %5, %10 ve %20 olan numunelerin balistik test sonuçları	111
Tablo 4.3. KAKS oranı %5 olan numunelerin balistik test sonuçları	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔE	: Merminin kaybettiği enerji
m_m	: Merminin kütlesi
v_g	: Merminin giriş hızı
v_a	: Merminin çıkış hızı
C	: Dikey dalga hızı
E	: Malzeme modülü
ρ	: Yoğunluk
E_d	: Düşürme gövdesinin darbe enerjisi
v_d	: Düşürme gövdesinin hızı
m_d	: Düşürme gövdesinin kütlesi
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Yükseklik

Kısaltmalar

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
B_4C	: Bor karbür
EG	: Etilen glikol
GNP	: Grafen nanoplate
KAKS	: Kayma altında katılaştıran sıvı
KNT	: Karbon nanotüp
NIJ	: National institute of justice
PEG	: Polietilen glikol
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiC	: Silisyum karbür partikül

1. GİRİŞ

Tarihsel süreç boyunca sürekli gelişen silah teknolojisi barutun ve ateşli silahların icat edilmesiyle yeni bir evreye geçmiştir. Silahların etki ve menzilleri artarken ağırlıkları azalmış ve boyutları küçülmüştür. Buna paralel olarak da savunma için daha hafif ve esnek malzemeler araştırılarak koruma sağlamanın yanı sıra mobilitayı artırmak hedeflenmiştir. Ateşli silahların pek çok ülkede yasak olması ve sıkı denetimlerin uygulanmasından dolayı silah kullanımının nispeten azalmasının yanı sıra keskin aletlerle (bıçak, şiş, çivi vb.) yapılan saldırılar hızla büyüyen muhtemel bir tehdit olmaya devam etmektedir. Bu sebeple modern zırh malzemeleri hem keskin nesnelere karşı koruma sağlarken hem de balistik tehditlere karşı etkili olmalı ve bunları yaparken personel hareketini kısıtlamamalıdır. Personel hareketini kısıtlamadan koruma sağlayabilmek için yüksek performanslı kumaşlar yoğun olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu sistemlerin enerji sönümleme kapasitesini artırmak için kayma altında katılaştıran sıvılar (KAKS) araştırılmıştır. Kayma altında katılaştıran sıvılar, artan kayma hızı ile birlikte viskozite de ani bir artış sergileyen Newtonyan olmayan süspansiyonlardır. KAKS'ların sahip olduğu bu özellik tersinirdir. Böylece viskoziteyi artıran gerilim ortadan kaldırıldığında sıvılar ilk hallerine geri dönerler. Bu sıvıların reolojik özelliklerini anlamak ve mühendislik uygulamalarında kullanabilmek için pek çok çalışma yapılmıştır. KAKS'ların katılma mekanizmalarını anlamak için Hoffman tarafından gerçekleştirilen çalışmada kritik kayma gerilmesinden önce süspansiyon içerisindeki katı partiküllerin altıgen biçimli kümeler halinde olduğu belirtilmiş ve bu gerilmenin aşılmasıyla partikül düzeninin bozularak düzensiz partikül kümelenmelerinin olduğu bildirilmiştir [1,2]. Bir diğer çalışmada ise katılma mekanizmasının hidrokümeler arasında meydana gelen hidrodinamik kuvvetler sonucu olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmaya göre yüksek gerilmeler altında süspansiyonda güçlü hidrodinamik kuvvetler oluşur ve dolayısıyla partiküller birbiriyle temas haline geçer. Sonuç olarak süspansiyonda çok sayıda partikülün kümelenmesi sonucu meydana gelen hidrokümeler oluşur. Hidrokümeler yoğun halde bulunurlar ve sıvı akışını zorlaştırırlar. Akışkan üzerindeki gerilim ortadan kalktığında ise partiküller tekrar dağınık düzene geçerler ve böylece sıvının viskozitesi düşer. Hidrokürlenme Teorisi olarak adlandırılan bu teori birçok çalışmayla doğrulanmış ve KAKS'ların katılma mekanizmasının açıklanmasında genel kabul görmektedir [3,4].

Kayma altında katılaştıran sıvılarda katı ortam olan silikanın süspansiyon içindeki oranı arttıkça viskozitenin ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığı bilinmektedir. Ancak silika miktarı arttıkça süspansiyonun ağırlığı da artmakta ve savunma amaçlı kullanımlarda KAKS emdirilmiş numunelerin enerji sönümleme kapasiteleri artmasına rağmen özgül enerji sönümleme kapasiteleri düşmektedir [5]. Literatürdeki ilk çalışmalarda tek katı fazlı KAKS'lar ile çalışmalar yapılmış ve sonraki çalışmalarda KAKS'ların enerji sönümleme mekanizmalarını iyileştirebilmek

için süspansiyona ikinci katı faz eklenerek çok katı fazlı KAKS'lar oluşturulmuştur. Çok katı fazlı KAKS oluşturmak için nano partikül (karbon, grafen, seramik) ilavesi yapılan sınırlı sayıda çalışma vardır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde nano partikül ilave edilmiş KAKS kullanılarak yapılan çalışmalarda KAKS ilavesinin enerji sönümleme değerlerini emdirilerek kullanıldığı Kevlar ve Twaron kumaşlar için arttırdığı görülmüştür [5,6]. Bu iyileşmenin ise iplikler arasındaki sürtünmenin, yüzey sürtünmesinin veya viskozitenin artması ile ilişkili olduğuna yönelik açıklamalar bulunmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan hibrit nano partikül takviyesinin de benzer mekanizma ile enerji sönümleme üzerinde etkili olabileceği hipotezinden yola çıkılarak farklı nano partikül takviyeleriyle üretilmiş çok katı fazlı KAKS'lar kullanılmıştır.

Darbelere dayanıklı olmasının yanı sıra esnekliği artırmak için yüksek performanslı kumaşlar kullanılarak üretilen kurşun geçirmez yeleklerin ağırlığını azaltmak için bu kumaşların enerji sönümleme kapasitelerinin yükseltilmesi gerekmektedir. Kayma altında katılan sıvıların bu kumaşlara emdirilmesiyle üretilen zırhlarda kumaş adedinin azaltılarak ağırlık ve kalınlığın düşürülmesi ve böylece personelin daha rahat hareket edebilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında ilk olarak tek katı fazlı KAKS üretimi ve en iyileme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla KAKS'ın viskozitesine etki eden temel üç faktör olan sıvı ortamın yoğunluğu, katı ortamın türü ve oranı değiştirilerek süspansiyonlar üretilmiştir. Üretilen süspansiyonların reolojik özellikleri belirlenmiş ve tek katı fazlı KAKS üretimi için en uygun oran tespit edilmiştir. Bu oran sabit tutularak süspansiyona değişen oranlarda farklı tür ve boyutlarda nanopartikül takviyesi yapılmış ve reolojik özellikleri incelenerek çok katı fazlı KAKS için en uygun kombinasyon belirlenmiştir. Çok katı fazlı KAKS'lar etanol ile inceltirilerek batırma yoluyla yüksek performanslı kumaşlara emdirilmiştir. KAKS'ların iplikler arasındaki dağılımını incelemek için SEM görüntüleri çekilmiş ve incelenmiştir. İplikler arası sürtünmedeki değişimin incelenebilmesi için çekme cihazı kullanılarak iplik çekme testi (pull-out) yapılmıştır. Yüzey sürtünme test cihazı kullanılarak kumaşların yüzey sürtünmeleri belirlenmiştir. Çok katı fazlı KAKS'ların kumaşların enerji sönümleme kapasiteleri üzerindeki etkilerin belirlenebilmesi için düşen ağırlık darbe test cihazı kullanılarak farklı uçlarla ağırlık düşürme testleri ve uluslararası standartlara uygun olarak balistik testler gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kumaş vücut zırhlarında en çok karşılaşılan hasarlar balistik ve sivri uçlu cisimler (bıçak, çivi vb.) ile gerçekleştirilen saldırılarda meydana gelmektedir. Bu nedenle kumaş hedeflerin enerji sönümleme mekanizmalarını anlamak ve geliştirmek için deneysel ve teorik pek çok çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında hibrit nanopartikül takviyeli kayma altında katılaştıran sıvıların reolojik özellikleri incelenmiş ve yüksek performanslı kumaşlara emdirilerek enerji sönümle üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Bu bölümde bahsedilen konular hakkında kapsamlı bir literatür taraması sunulması amaçlanmıştır.

2.1. Sivri Uçlu Cisimler ile Gerçekleşen Tehditler

Günümüzde pek çok ülkede bireysel silahlanmanın önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Özellikle Avrupa’da vatandaşların silah sahibi olmasının önüne getirilen engellerin de sonucu olarak ulaşılabilirliği daha kolay ve ucuz olduğundan saldırılarda bıçak vb. sivri uçlu aletlerin kullanımı artmıştır. Hem sivilde hem de sahada askerler tarafından karşılaşılan tehditlerde bıçak, sivriltilmiş aletler ve kırık cam kullanımı oldukça geniş yer tutmaktadır. Bahsedilen tehditlere karşı özelleştirilmiş koruyucu ve esnek zırh sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir [7].

Bıçak ile gerçekleştirilen saldırılarda özellikle ölümcül yaraların tipini ve yerini araştırmak için bir dizi çalışma yapılmıştır. Rouse, bıçak yaralanmalarının yerini incelediği çalışmada toplam 69 ölümcül yaranın 50’sinin göğüs bölgesinde, 12’sinin baş ve boyunda ve 7’sinde karın ve alt uzuvlarda olduğunu bildirmiştir [8]. Murray ve Green’de inceledikleri vakalarda 27 ölümcül yaralanmanın 18’inin göğüs bölgesinde meydana geldiğini tespit etmiştir [9]. Bu çalışmalar incelendiğinde bıçak vb. sivri uçlar ile yapılan saldırılarda can kaybını önlemek için korumada en yüksek önceliğe sahip bölgenin göğüs olduğu açıktır.

Bıçak saldırıları, tanımlamaların rahat yapılabilmesi için iki aşamada incelenmiştir. Bunlarda ilki bıçağın hedef ile ilk temas ettiği ana kadar olan yaklaşma aşaması ve ikincisi de bıçağın hedef tarafından durduruluncaya kadar geçen çarpma aşamasıdır [10].

Sivri uçlu cisimler ile meydana gelen tehditlerde en çok karşılaşılan hasarlar; bıçak ile kesilme hasarı ve çivi uç ile meydana gelen delinme hasarlarıdır. Bu nedenle kişisel koruyucu zırhların bıçak ve çivi uçlara karşı koruyuculuk performansını incelemek için Amerika Ulusal Adalet Enstitüsü’nün NIJ 0115.00 standardına göre düşük hızlı darbe testleri yapılmaktadır. Bu testlerde S1 ve P1 olmak üzere iki farklı bıçak uç (engineered knife blade) ve çivi uç (engineered spike) kullanılmaktadır. Belirli bir ağırlığa bağlanan bıçak ve çivi uçlar düşürme kulesinden serbest düşme ile malzemelerin üzerine düşürülmektedir. Koruyuculuk performansı incelemeleri

genel olarak bu iki tehdit tipi kullanılarak yapılmaktadır. Çünkü her iki çarpma tertibatında gerçekleştirilen testlerde koruyucu malzemede meydana gelen hasar tipleri farklılık göstermektedir. Bıçak uç ile yapılan deneylerde bıçak saplama direnci ve delinme direnci oluşur. Düşürme kulesi kullanılarak yapılan deneylerde bıçak uç için kumaştan iplik kesilmesi, çivi uç için ise delinme en baskın hasar türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle kumaş koruyucu malzemelerin kesme ve delinme direnci performansını etkileyen faktörler birbirinden farklıdır. Delme, keskin uca sahip ancak kesici kenarı olmayan aletlerin saldırısı sonucu oluşan hasarı ifade eder. Kısıtlı koşullarda ucu sivriltilmiş herhangi bir kişisel eşya ile dahi yapılabildiğinden, infaz koruma memurlarının en çok karşılaştığı yaralanma bu şekilde meydana gelmektedir. Kesme ise kesici kenarı olan bıçaklarla temas ederek gerçekleştirilen hasarı ifade eder. Bıçak tehditlerinin durdurulması daha zordur çünkü uzun kesme kenarı, bıçaklanma olayı sırasında sürekli olarak hasar meydana getirmeye devam eder.

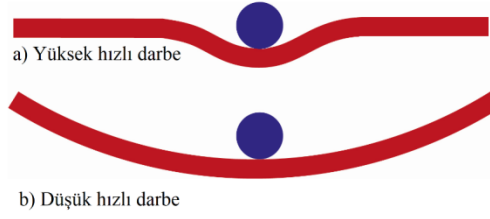
Sivri uçlu cisimlerin çeşitli hedeflere saplanma durumları, düşme kulesi kullanılarak gerçekleştirilen bir düşük hızlı darbe testi ile incelenmiştir [10]. Tehdidin hedefi delme işleminin üç aşamada gerçekleştiği öne sürülmüştür: batma (indentation), delme (penetration) ve nüfuz etme (perforation). Bu durumda hasarın şiddeti; bıçağın kütlesi, hızı ve koruyucu mekanik zırhın özellikleri arasındaki karmaşık bir oluşumdur.

2.2. Balistik Tehditler

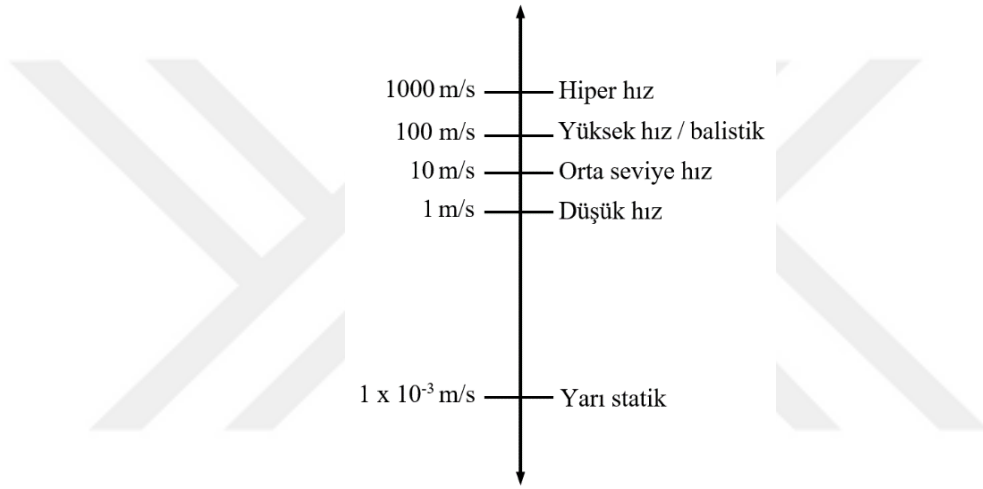
Bir mermi tehdidinin etkisinde kalan koruyucu malzemelerde enerji sönümleme olgusu oldukça karmaşıktır ve mermi çarptığı anda devreye giren çok sayıda parametre vardır. Mermi hareketlerini inceleyen bilim dalına balistik denir. İncelenen aşamalar açısından üç başlığa ayrılmaktadır [11–13]

- İç balistik: Mermi çekirdeğinin namluyu terk etmeden önceki durumu ve silah incelenmektedir.
- Dış balistik: Mermi çekirdeğinin namluyu terk ettiği andan hedefe varana kadar meydana gelen olayları incelemektedir.
- Terminal balistik: Mermi çekirdeğinin hedefe vardıktan sonraki etkilerini incelemektedir.

Mermi, hedefe çarptığı anda oluşan tepkinin genel ve bölgesel etkilerin bir kombinasyonu olduğu düşünülmektedir [14]. Bölgesel tepki mermi ile doğrudan temas eden malzeme davranışını, genel tepkide çarpma noktasında uzaktaki bölgelerin davranışını ifade eder. Mermi hedefe çarptığı anda oluşan hasar mekanizmalarına birçok faktör etki etmesine rağmen en önemli faktörlerden biri mermi hızıdır. Kompozit koruyucu malzeme ile yapılan deneylerde Şekil 2.1’de gösterildiği gibi düşük çarpma hızında genel etkilerin, yüksek çarpma hızında ise bölgesel etkilerin rol oynadığı bildirilmiştir [15,16]. Yüksek ve düşük hız aralığı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. a) Yüksek ve b) Düşük hızlı darbelerde hasar mekanizmaları



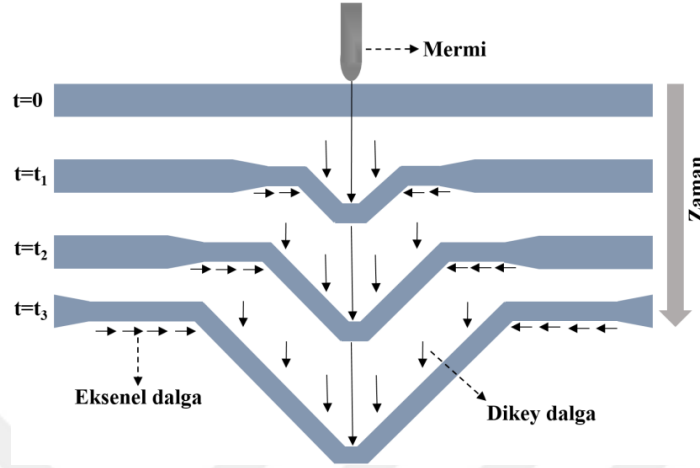
Şekil 2.2. Standart darbe hızı sınıflandırmaları [14]

Kumaşların balistik uygulamalardaki etkinliğini anlayabilmek için ilk çalışmalardan biri Smith vd. tarafından yapılmıştır [17]. Bu çalışmaya göre kurşun geçirmez bir yelek maruz kaldığı yüksek hızlı merminin enerjisi darbe noktasından dışarıya doğru eksenel ve dikey dalga olmak üzere iki şok dalgası oluşturarak yayılmaktadır (Şekil 2.3). Eksenel dalga iplik ekseninde yayılır ve merminin temas bölgesinden uzak bölgelerde yer alan ipliklerin çarpma noktasına doğru akmasına neden olur. Dikey dalga ise hedef kalınlığı boyunca yayılarak sıkıştırma kuvveti yaratan dalgadır ve iplikleri darbe merkezine doğru harekete geçirerek konik bir şekil oluşmasına neden olur ve denklem 2.1 ile ifade edilir.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

Bu denklemde C dikey dalganın hızı, E fiber malzemenin modülünü ve ρ fiber malzemenin yoğunluğunu tanımlamaktadır. Buna göre yayılma hızının artması, modülün yüksek ve

yoğunluğun düşük olmasına bağlıdır. Bu nedenle balistik uygulamalar için gereken fiberlerin yüksek modüle ve düşük yoğunluğa sahip olması gerekmektedir.



Şekil 2.3. Darbe anında kumaştaki enerji dağılımları [18,19]

Düşük çarpma hızında, mermi kinetik enerjisinin koruyucu zırh kumaşında geniş alanlara yayılması, yüksek hızlı mermilere göre daha kolaydır. Bu nedenle düşük hızlı mermilerde daha fazla iplik enerji sönmleme işlemine dâhil olur. İplik geçişleri de enerji dalgalarının yayılmasını etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle dokuma kumaşlardaki enerji yayılımının geçiş yoğunluğundan etkilendiği bildirilmiştir. Aynı zamanda dalga yayılımının fiber modülü ve sürtünme katsayısı ile ilgili olduğu öne sürülmüştür [20].

Yüksek çarpma hızında, merminin hedefe nüfuz etme süresi kıaldıkça kumaşın genel tepkisinin enerji sönmleme üzerindeki etkisi azalır. Temas bölgesinin bölgesel tepkisi balistik performans açısından büyük önem göstermeye başlar. Yüksek hızlı çarpma durumlarında meydana gelen başlıca hasar tipleri; fiber ve iplik kopmasıdır [21].

Balistik bir temasa maruz kalan kumaş zırh sistemlerinin enerji sönmleme kapasitelerinin; fiber özellikleri, katman sayısı, alan yoğunluğu, mermi parametreleri ve çarpma parametreleri gibi faktörlerden etkilendiği bildirilmiştir [22]. Mermi çarpması sonucu oluşan hasarlar incelendiğinde koruyucu zırh sistemleri delinmese dahi giyen kişide hayati yaralanmalara neden olabilir. Bu nedenle kişisel koruyucu zırhların delinmeyi önlemenin yanı sıra arka yüzey izini de düşürmesi beklenmektedir. Vücut zırhlarının balistik performansını değerlendirmek için sıklıkla kullanılan üç test yöntemi: delinme (perforation) testi, delinmeme (non-perforation) testi ve balistik limit testidir.

Delinme testi, merminin hedef malzemesini delip geçmesi durumunda uygulanır. Test sırasında merminin hedefe çarpma hızı ve artık hız ölçülür. Bu verilerden hareketle hedefin enerji sönmleme miktarı Denklem 2.2’de gösterildiği gibi hesaplanır [23,24].

$$\Delta E = \frac{1}{2}m(v_g^2 - v_a^2) \quad (2.2)$$

Bu denklemde ΔE merminin kaybettiği enerjiyi ifade eder, m merminin kütlesi, v_g , merminin giriş hızını ve v_a merminin çıkış yani artık hızı ifade eder. Başka herhangi bir dış kuvvet etkisi olmadan merminin kaybettiği enerjinin tamamının hedef malzeme tarafından sönmüldüğü kabul edilir.

Delinmeme testi ise yumuşak vücut zırhlarının balistik direncini ölçmek için kullanılmaktadır. İnsan vücudunu simüle etmek için hedef malzemesinin arkasına destek çamuru yerleştirilir. Çarpma neticesinde destek çamurunda meydana gelen derinlik ölçülerek arka yüzey iz miktarı hesaplanmış olur. Yumuşak vücut zırh malzemelerinin başarı durumu arka yüzey iz miktarının derinliği ile ölçülmüş olur. ABD Ulusal Adalet Enstitüsünün yayınladığı NIJ 0101.06 standardına göre, balistik zırhlar yedi seviyede sınıflandırılmıştır. Tip I, IIA, II ve IIIA, tabanca tehditlerine karşı artan koruma seviyelerini ifade etmektedir. Tip III ve IV, yüksek güçlü tüfek mermilerine karşı koruma sağlamak için tasarlanmıştır [25]. Yumuşak vücut zırh malzemesinin delinmeden maruz kalabileceği maksimum arka yüz iz miktarı, tüm balistik tehdit seviyeleri için 44 mm'dir.

Vücut zırhının balistik sınırını belirlemek için balistik limit testi uygulanır. Balistik sınır, merminin belirli bir açıyla atıldığı zaman zırhı tamamen deldiği hızı belirtir. Bu hız balistik sınır hızı olarak adlandırılır.

2.3. Vücut Zırhlarının Sınıflandırılması

Vücut zırhları, kullanım alanlarına göre yumuşak ve sert vücut zırhı olarak temel iki kategoriye ayrılmaktadır. Yumuşak vücut zırhları esnek ve hafif malzemelerden yapılmaktadır. Tehdit seviyesine göre tek başlarına veya sert vücut zırhları ile birlikte güvenlik güçleri tarafından kullanılabilirler. Bu zırh panelleri genellikle naylon ve polyester fiberlerden yapılan bir kumaş kaplamanın içine yerleştirilirler. Bu zırhlara Şekil 2.4'de görüldüğü gibi yaşamsal vücut organlarına ek koruma sağlamak için ön, arka ve yanlara sert plakalar yerleştirilebilir. Genellikle metal, seramik veya kompozitlerden yapılan bu sert zırh panelleri ağır ve serttir [26]. Sert vücut zırhları savaş alanları ve rehine kurtarma operasyonları gibi tehdit seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde tercih edilir. Tehdit seviyeleri arasında anlaşılabilirliğin sağlanması için bazı kuruluşlar tarafından standartlar hazırlanmıştır. Bunlardan en çok kabul göreni Amerika Ulusal Adalet Enstitüsü (National Institute of Justice) tarafından hazırlanan NIJ 0101.06'dır. Bu standarda göre, yumuşak vücut zırhları, koruma seviyesi I, II, II-A ve III-A ile temsil edilirken, sert vücut zırhları ise seviye III ve IV'e karşılık gelir. Bu, yumuşak vücut zırhlarının daha düşük

mermi hızlarına (yaklaşık 450 m/sn'ye kadar), sert vücut zırhlarının ise daha yüksek mermi hızlarına (850 m/sn veya daha yüksek) karşı koruma sağlayabileceği anlamına gelir [25].



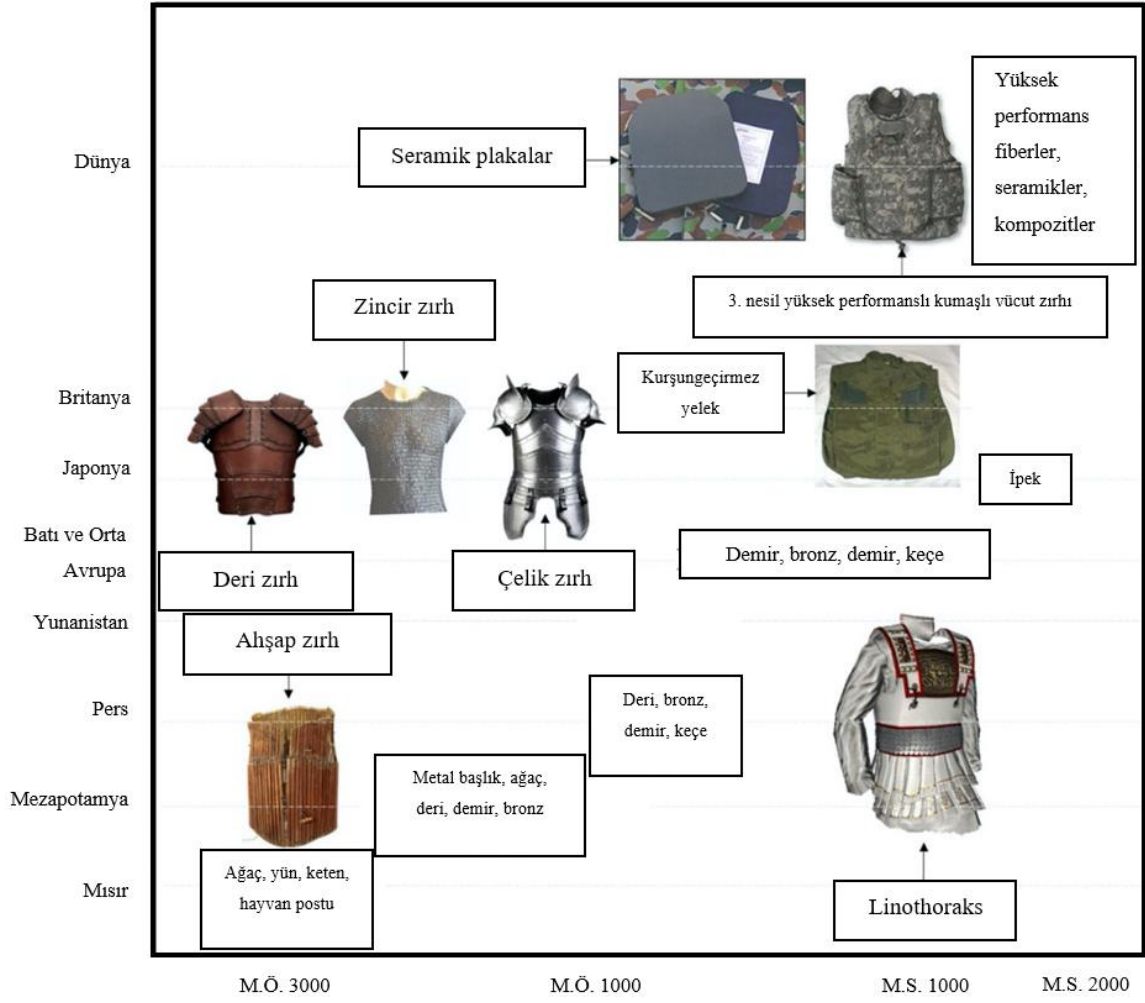
Şekil 2.4. Kompozit vücut zırhı bileşenleri [27]

2.4. Vücut Zırh Malzemelerinin Gelişimi

Tarih boyunca sürekli gelişen silah teknolojisi karşısında savunma ihtiyacından doğan zırh teknolojisi de muazzam bir ilerleme kaydetmiştir. Vücut zırhlarının gelişimindeki belirleyici öğe zırh üretimi için kullanılan malzemelerde olmuştur. Bu malzemeler tehdit türüne ve bölgelere bağlı olarak değişmektedir. Mısırlılar, zırh malzemesi olarak M.Ö. 3000 yılına kadar çok katmanlı keten ve katılaştırılmış kumaşlar kullanılmıştır. Bu malzeme seçiminde Mısır'ın sıcak iklim koşullarının da etkili olduğuna inanılmıştır. Çağdaş olan Sümerler'de ise deri kullanılarak üretilen pelerin ve miğferler tercih edilmiştir. Metal malzemeler ilk defa M.Ö. 2500 yıllarında Akad'lar tarafından zırh malzemesi olarak miğfer yapımında kullanılmıştır. Daha sonra metal plakaların deri bir taban üzerine yapıştırılarak kullanıldığı vücut zırhları üreilmeye başlanmıştır. Asurlu'lar ile birlikte zırh malzemesi olarak keçe, demir ve bronz kullanılmıştır. Miken döneminden (M.Ö. 1600–1100) Helenistik döneme (M.Ö. 323–31) kadar, "linothoraks" zırhı antik Yunanistan'da ve diğer Helen krallıklarında en çok kullanılan zırh olmuştur [28]. Bu zırhın üretildiği malzeme kompozisyonu hala tartışmalı bir konudur [29]. Yunanlılar, Persler ve Romalılar vb. uygarlıklar zırh malzemesi olarak çok uzun süreler metal ve deri kullandılar. Bu dönemlerde kullanılan göğüs zırhları ve tam vücut zırhlarında metal malzeme olarak demir, çelik veya bronz kullanılmıştır. On birinci yüzyılda ipek, bireysel küçük zırh pullarını destek kumaşına veya deriye tutturmak için genellikle ölçekli zırhlarda kordonlar şeklinde kullanıldı. 1905 yılında ise Japon-Rus savaşı sırasında yelek malzemesi olarak kullanılmıştır. Barutun icat edilmesi

silahların etki ve menzillerinin günden güne artmasıyla yüksek performanslı kumaşlar kullanılmaya başlanmıştır. 1935 yılında Carothers tarafından icat edilmesinden kısa süre sonra ortaya çıkan II. Dünya savaşı sırasında kullanılan DuPont naylonu yüksek özgül mukavemeti (0,6-0,7 N) ile ünlü olmuştur. ABD donanması askerleri tarafından savaşta giyilen ceketlerin yapımında kullanılmıştır. Araştırmaların devam etmesi ile birlikte 1965 yılında Stephanie Kwolek tarafından icat edilen DuPont Kevlar kumaşı, günümüz yumuşak vücut zırhı kavramında öncü olmuştur. Bu gelişmenin ardından Twaron, Technora, Spectra ve Dyneema gibi yüksek performanslı kumaşlar ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte özellikle yumuşak vücut zırhı malzemesinin ana seçimi, nispeten hafif olmaları ve esneklikleri nedeniyle bu malzemeler olmuştur. Ağırlık avantajları nedeniyle zırh malzemesi olarak iyi bir seçim olan kompozitlerde takviye malzemesi olarak yüksek performanslı kumaşlar kullanılmıştır. Daha sert yapıda olan kompozit malzemelerde sert vücut zırhı olarak tercih edilmiştir.

Dünyada geçmişte geleneksel tekstiller (keten ve ipek), ahşap, deri, metaller (demir) ve alaşımlardan (bronz ve çelik) kullanımı ile başlayan vücut zırhlarında günümüzde yüksek performanslı kumaşlara kadar çok çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Malzeme seçimi evriminin resimli bir temsili Şekil 2.5’de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Vücut zırhı malzemelerinin gelişim süreci [30]

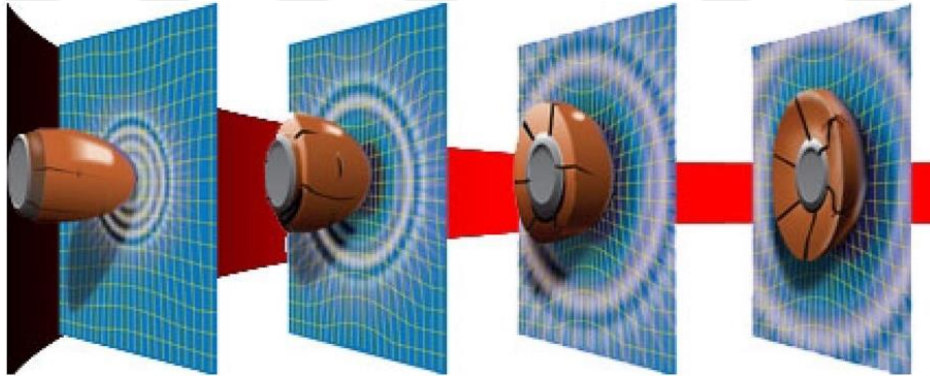
2.5. Darbelerde Enerji Sönümlemesine Etki Eden Faktörler

Vücut zırhları savunma mekanizmasındaki temel unsur olduğu için malzeme seçimi koruyuculuk performansındaki en önemli parametredir. Yumuşak ve sert vücut zırhlarında kullanılan malzemelerin birbirlerinden farklı olduğundan bahsedilmişti. Yumuşak vücut zırhı üretiminde kullanılan iplik malzemelerin seçimi enerji sönümleme fenomenindeki en hayati olgudur. Ayrıca aynı tür iplik kullanıldığında bile ipliğin doğrusal yoğunluğundaki değişim, iplikler arası ve yüzey sürtünme parametreleri zırhın koruyuculuk performansını değiştirebilir. Kumaş yapılarında enerji sönümleme performansını ve dolayısıyla darbe direncini etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bunlar: kumaş yerleşimi (birim uzunluktaki iplik sayısı), dokuma türü, kıvrım ve kat yönü, katman sayısı, dikiş tipi ve tabaka oryantasyonudur. Aynı zamanda kumaşlar tek yönlü (UD), iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) gibi farklı formlara sahip olabilir. Bunun yanında mermi kütlesi, boyutu, hızı ve şekli gibi mermi parametreleri ve hedefi vurduğu açı

hedefin enerji sönümleme davranışını etkiler [31]. Mermi hedefe çarptığı anda çok sayıda parametrenin önemli rol oynadığı görülmektedir.

2.5.1. Kumaş Yapısı

Kumaş yapısı, merminin enerjisini dağıtmak ve sönümlemek için belirleyici bir rol oynamaktadır. Balistik darbe sırasında, merminin hedefe nüfuz etmesi sırasında konik ucu ezilir ve mantar şeklini alır. Kumaş yapısının büyük rol oynadığı bu durum Şekil 2.6’da görülmektedir. Literatürde incelenmiş her biri farklı mekanizmalar yoluyla enerji sönümleyen çok sayıda yapı vardır. Kumaş yapısı kumaştaki ipliklerin doğrultusuna bağlı olarak UD, 2B ve 3B olarak sınıflandırılabilir. Genel olarak, balistik korumada kullanılan tekstil yapıları; dokuma kumaşlar, tek yönlü (UD) yapılar ve dokunmamış kumaşlardır [32]. Özellikle iki eksenli (2B) dokuma kumaşlar (düz, sepet vb.), üç eksenli kumaşlar ve tek yönlü laminatlar, kurşun geçirmez yelek ve kompozit endüstrisi dâhil olmak üzere farklı teknik uygulamalarda en yaygın olarak kullanılanlardır [33]. Balistik vücut zırhı yapımında her biri teker teker veya hibrit olarak kullanılabilir. Fiberler kumaşı oluşturan ana elementlerdir ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde büyük rol oynarlar. Fiberlerin mekanik özelliklerinin açıklanmasında kullanılan tekstil terimleri Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.6. Merminin kumaş hedeflere çarpması sonrası şekil değişimi [30]

Tablo 2.1. Tekstil terimleri

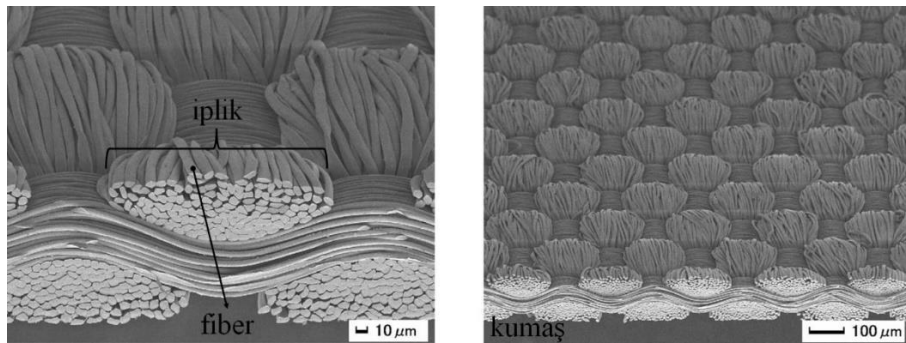
Terim	Açıklama	Birim
Denye (den)	9000 metre fiberin ağırlığı	gr
Desiteks (dtex)	10000 metre fiberin ağırlığı	gr
Doğrusal yoğunluk	Birim uzunluktaki fiber kütlesi	gr/m
Modül	Fiberin uzamaya karşı direnci	GPa veya g/den
Kopma dayanımı	Fiberin kopma anındaki dayanımı	GPa veya g/den

Tek Yönlü (Uni Directional, UD) Kumaşlar

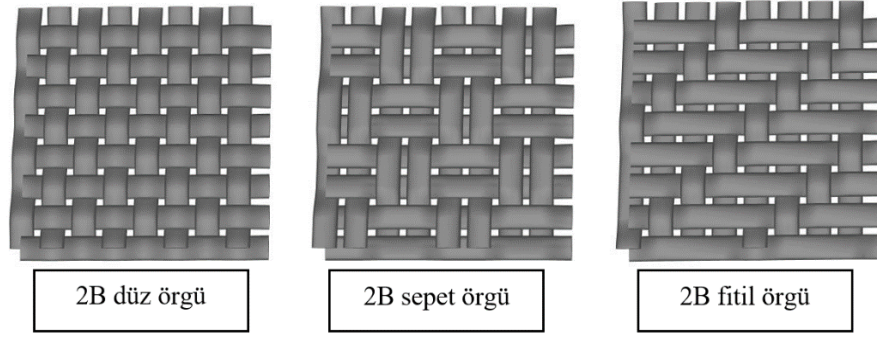
Tek yönlü kumaşlar, yüksek performanslı ipliklerin belirli bir yönde dizildiği ve başka bir iplik ile dikilerek bir arada tutulduğu yapılardır. Bazı uygulamalarda dikişle birleştirmek yerine laminasyon filmleri tercih edilebilir. Tek yönlü kumaşların dokuma kumaşlardan farklı olarak kıvrım bölgelerinin olmaması avantajdır. Ancak fiziksel yapısından dolayı asimetrik, yani tek yönlü kumaşlar sadece ipliklere paralel doğrultuda yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Balistik uygulamalarda tabaka diziliminin 0° ve 90° şekilde üst üste dizilmesiyle kullanılmaktadır.

İki Boyutlu Kumaşlar

İki boyutlu (2B) dokuma kumaşlar, iki veya daha fazla yön boyunca tek bir düzlemde birbirine geçmiş atkı ve çözgü ipliklerinden oluşurlar. Düz örgü (plain) tipi balistik uygulamalarda en yaygın kullanılan dokuma tipidir. Şekil 2.7 kumaş yapısını ve Şekil 2.8 kumaş örgü tiplerini göstermektedir. 2B kumaşlarda örgü tipi enerji emilimini büyük ölçüde etkileyen bir parametredir. Özellikle balistik koruma açısından bu alanda pek çok çalışma bulunmaktadır [13,34,35]. Çeşitli kalınlıklara sahip yapıları tasarlamak için birden çok 2B dokuma kumaş çok katlı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda bu çok katmanlı yapılar, özellikle arka yüz deformasyonunu azaltarak balistik darbelere ve bıçaklanma tehdidine karşı direnci artırmak için bir veya daha fazla yönde dikilebilir [36,37]. Yapının kırılma tokluğunu iyileştirmek için 2B dokuma kumaşlar elastomerlerle kaplanabilir. Öte yandan, para-aramid kumaşa etilen glikol içinde dağılmış silika nano partiküllerinden yapılan kayma altında katılaştıran sıvı emdirildiğinde daha esnek olduğu, balistik tehditlere ve bıçak vb. cisimlerle yapılan saldırılara karşı dirençli hale geldiği iddia edilmiştir [38].

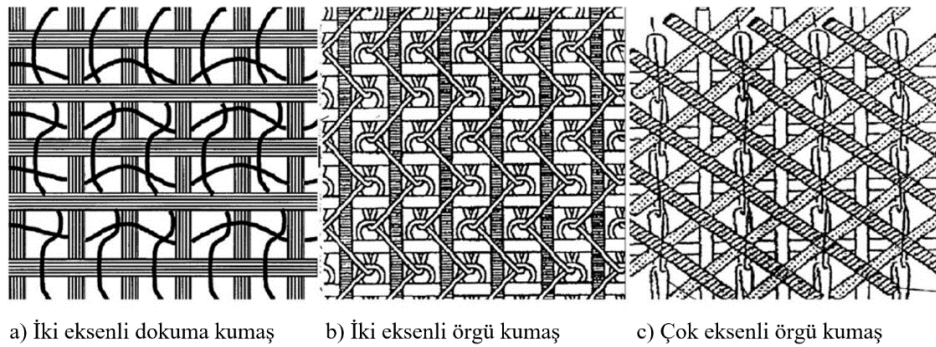


Şekil 2.7. Kumaş yapısı gösterimi



Şekil 2.8. Kumaş örgü tipleri [13]

Şekil 2.8’de verilen temel 2B dokuma kumaşların dışında, farklı araştırmacılar tarafından keşfedilen başka 2B yapılar da vardır. Kompozitler için çift yönlü ve çok eksenli kumaşların balistik dirençli tertibatları Bhatnagar ve Parrish tarafından patentlenmiştir [39]. Dokuma kumaşların balistik performanslarının iyileştirilmesi, kesilmeye karşı dirençlerinin artırılması için tasarlanan kumaşlar Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Tasarımcılar 3 farklı kumaş tasarımı yapmışlardır. Şekil 2.9a’da görülen ilk tasarımda atkı ve çözgü iplikleri birbirleri içinden geçirilmeden sadece üst üste serilmiş ve birleştirme için üçüncü ve dördüncü iplikler kullanılarak dokunmuştur. Bu sayede kıvrımların enerji sönmüleme üzerindeki etkisi önlenmeye çalışılmıştır. Şekil 2.9b’de görülen tasarımda da atkı ve çözgü iplikleri birbiri üzerine serilerek kullanılmış ve bu iplikleri bir arada tutmak için üçüncü bir iplik tarafından özel bir düğüm atılmıştır. Şekil 2.9c’de görülen üçüncü tip, yani çok eksenli dokuma kumaşlar, birbirine kenetlenen ilmek içinde ipliklerle iç içe geçmiş başka bir iplik grubu tarafından bir arada tutulan üç farklı düzlemde tek yönlü iplikten oluşmaktadır. Bu yapılar, ultra yüksek mukavemetli / yüksek modüllü polietilen elyaf / polietilen matris sert zırh (Spectra kalkan) yapmak için kullanılmaktadır.

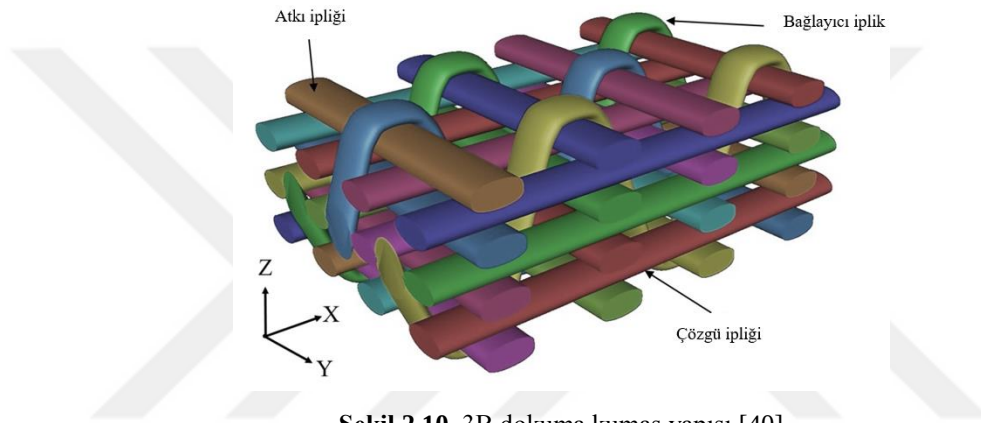


Şekil 2.9. İki ve çok eksenli kumaşlar [39]

Üç Boyutlu (3B) Kumaşlar

Üç boyutlu dokuma kumaşlar, Şekil 2.10’da gösterildiği gibi üç farklı yönde ilerleyen üç set iplikten oluşur. Gerçek anlamda bir 3B kumaş, kumaşın uzunluğu boyunca uzanan bir iplik

seti (çözgü), genişlik boyunca uzanan (atkı) ve üçüncü dikey olarak (dikey atkı veya Z-yönü iplik) uzanan ipliklerden oluşur [40]. Yumuşak vücut zırhları yapmak için genellikle birden fazla dikişli 2B düz dokuma kumaş tabakası kullanılır. Bu üretimin en büyük dezavantajı, ipliklerin geçiş noktalarında lokalize stres konsantrasyonunun olumsuz etkileri ve tabakalar arası zayıf gerilim transferidir. Bu sorunların üstesinden gelmek için, alternatif olarak 3B dokuma kumaşlar kullanılabilir [41]. 3B dokuma kumaşlar, kalınlık yönünde geliştirilmiş mekanik özellikler, daha iyi yapısal bütünlük ve tabakalar arası gerilim transferinin iyileştirilmesi gibi 2B kumaşlara göre çeşitli avantajlara sahiptir [42]. 3B dokuma kumaşlarda Z-yönünde ipliklerin varlığının yapının ve kompozitin sertliğini, mukavemetini ve kompaktlığını artırdığına inanılmaktadır [43].



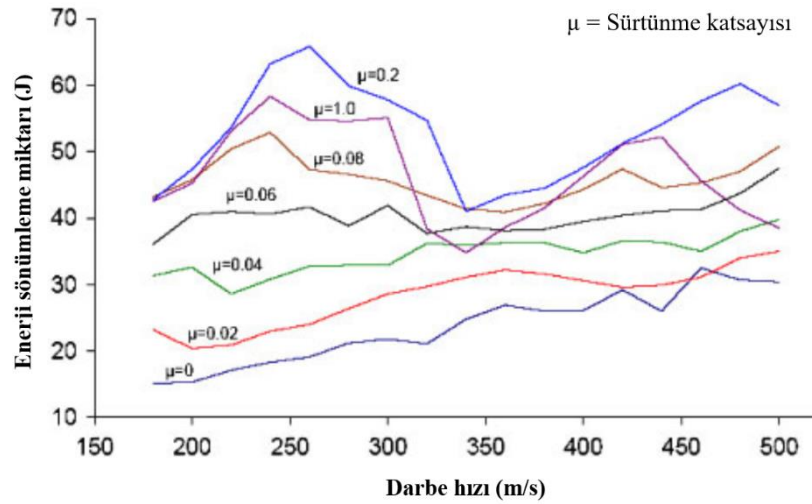
Şekil 2.10. 3B dokuma kumaş yapısı [40]

2.5.2. İplik Parametreleri

Sürtünme

Sürtünme, kumaşların en etkili enerji sönmleme mekanizmalarından biridir. Sürtünme olgusu, atkı ve çözgü iplikleri arasında oluşan iplikler arası denilen sürtünme ve hedef ile kumaş arasında meydana gelen yüzey sürtünme kuvvetlerini içerir [44]. Balistik testlerde merminin kinetik enerjisinin sönmlemesi, eksenel ve dikey dalga yayılımı ve büyük ölçüde sürtünme enerjisi dağılımına bağlı olan penetrasyon gerilimi / birim uzama profili ile ilgilidir [45]. Darbe sırasında sürtünme, artan iplik çekme kuvvetleri yoluyla enerjinin emilmesine yardımcı olur. Sürtünmenin artmasının doğrudan bir sonucu olarak ikincil ipliklerin (doğrudan merminin etkisi altında olmayan iplikler) enerji sönmlemeye katılması ile artan kubbe boyutlarıyla birlikte enerji emilimi de artar [46]. Duan vd. tarafından yapılan çalışmada, darbe sırasında enerji sönmlemesini üç olgu ile açıklanmıştır. Bunlar iplikler arası sürtünme, iplik gerginliği ve ipliğin kinetik enerjisidir. İplikler arası sürtünmenin artmasının doğrudan enerji sönmlemeye katkısının olmasının yanı sıra diğer olguları da arttırdığı ve bu sayede de kumaş koruyuculuk performansını arttırdığı bildirilmiştir [44]. Bununla birlikte artan sürtünme katsayısının belirli bir sınırlayıcı

değere kadar faydalı olduğu unutulmamalıdır. Zeng ve diğerleri tarafından yapılan hesaplamalı bir çalışma sürtünme katsayısı orta ($0,06 > \mu > 0,2$) olduğunda enerji emiliminin maksimum olduğunu göstermiştir. Daha düşük sürtünme katsayısı ($0 < \mu < 0,06$) daha düşük yapısal bütünlüğe yol açar ve dolayısıyla kumaşın gelen mermiye direnme yeteneği en azdır. Öte yandan, Şekil 2.11’de görüldüğü gibi sürtünme katsayısı yüksek olduğunda ($\mu > 0,2$), enerji emme kapasitesi muhtemelen yerel gerilim konsantrasyonundan dolayı düşer ve ipliğin hareketsizliği nedeniyle ipliklerin kopmasına neden olur [47]. Buna ek olarak, yazarlar ayrıca numunelerin balistik limit (V50) değerlerini sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak değerlendirmiş ve aralarında bir ilişki olduğu tespit etmişlerdir. Balistik limitin, yapıyı sağlam tutmak için gerekli olan yaklaşık 0,1 katsayı değerine kadar artan sürtünme ile arttığını ve bu değer üzerindeki değerlerde azalmaya başladığı bildirilmiştir. Darbe hızı ve iplikler arası sürtünmesi düşük olduğunda veya kumaş hedefi gevşek bir şekilde kavrandığında, ana iplikler hasara uğramak yerine çekilerek çıkarılmaya maruz kalacaktır. Bazhenov, iplik sıyrılmasının balistik bir kumaşın enerji absorpsiyonuyla ilişkili olduğunu bulmuştur [46]. Starrat bir dizi fotografik ve hız ölçüm teknolojisi kullandı ve iplik sıyrılmasının penetrasyon olmayan durumlarda önemli miktarda enerji emilimine katkıda bulunduğu sonucuna varmıştır [48].



Şekil 2.11. Farklı sürtünme katsayılarına sahip kumaşların enerji sönümleme miktarının darbe hızı ile değişimi [47]

2.5.3. Kumaş Parametreleri

Örgü Tipi

Atkı ve çözgü iplikleri arasındaki geçiş modeline örgü denir. Enerji sönümleme performansının yüksek olması gereken vücut zırhı uygulamalarında en çok araştırılan düz (plain)

örgü tipinde kumaşlardır. Plain örgü tipinde, atkı ve çözgü yönlerinde aynı yapısal parametrelere sahip dengeli bir yapı oluşturulur. Bu sayede iki ana eksen boyunca gerilme dayanımı ve birim uzama miktarı eşit olmaktadır. Aynı zamanda atkı ve çözgü iplikleri maksimum sayıda çapraz temas sayısına sahiptir. Bu, gerilme dalgalarının iplikler boyunca kat ettiği mesafenin, hem çözgü hem de atkı yönlerinde birbiriyle eşleşeceği, etki altındaki alanı maksimize edeceği ve dolayısıyla enerji emilimini artıracığı anlamına gelir. Majumdar ve Laha tarafından yapılan çalışmada düz, sepet, saten ve mat örgü tipleri ile üretilen Technora kumaşların düşük hızlı darbe direncine karşı performansları karşılaştırılmıştır. En iyi koruyuculuk performansını düz dokuma kumaş sergilerken en kötü performans mat örgü tipinde meydana gelmiştir [49]. Benzer şekilde Kevlar para-aramid ve UHMWPE kumaşlar ile yapılan çalışmalarda da düz dokuma türünün koruyuculuk performansının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [50,51].

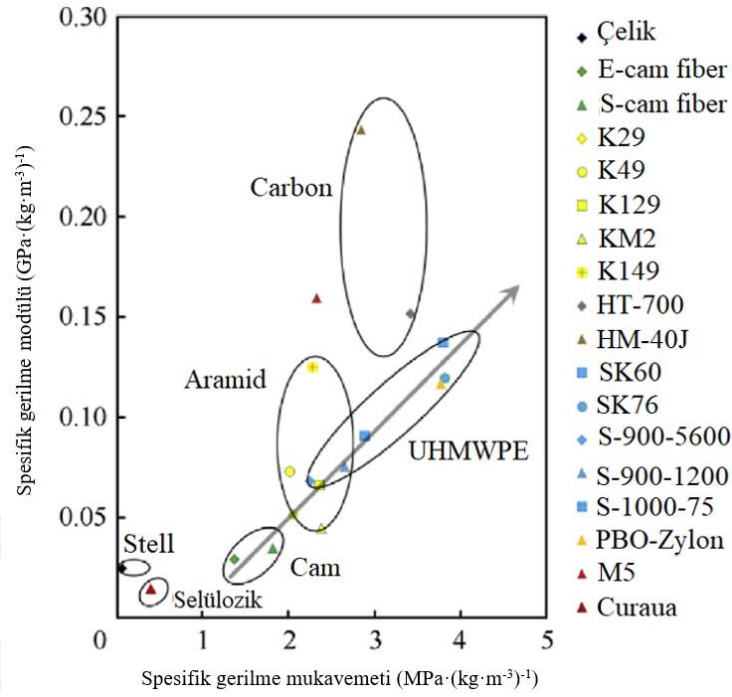
Kaplama Faktörü

Kaplama faktörü, iplik yoğunluğunun bir sonucudur. Temel olarak, bir kumaşın kurucu iplikler tarafından kaplanma ölçüsünü ifade eder. Birim alandaki atkı ve çözgü ipliği sayısı gerekenden daha düşük olduğunda, yapı oldukça gözenekli hale gelir ve gelen mermiye direnemez. İplikler, çarpma anında yanlara doğru kayarak mermiye önemli bir enerji emilimi olmadan geçmesi için serbest geçiş sağlar. Öte yandan, yapı optimumdan daha sıkı ise, dokuma sırasında iplikler arasındaki aşırı aşınma bozulmaya ve nihai kırılmaya neden olabilir. Majumdar ve Laha tarafından yapılan çalışmada, kumaş yapısının p-aramid kumaşların balistik darbe performansı üzerindeki etkisini incelemek için, Technora iplikleri kullanılarak üç farklı iplik yoğunluğunda (25x25, 30x30, 35x35 / inç) düz dokuma kumaşlar üretilmiştir. İplik çekme kuvvetinin artan iplik yoğunluğuna bağlı olarak yükseldiği ve en yüksek iplik çekme kuvvetinin 35x35 / inç yoğunluğa sahip numunede meydana geldiği bildirilmiştir [49].

2.5.4. Polimer ve Fiber Yapılar

Balistik uygulamalarda kullanılan polimer ve fiber yapılardan beklenen özellikler; hafiflik, yüksek kopma dayanımı, tokluk ve düşük uzama katsayısıdır. Bu faktörler zırhın ağırlığı, enerji sönümleme kapasitesi ve çarpma sonrasında oluşacak arka yüzey iz miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Bu şartları sağlayan yapılar arasında Aramid (Kevlar, Twaron, Technora), UHMWPE (Spectra, Dyneema), polyester (Vectran) ve PBO (Zylon) sayılabilir. Bu yapıların her biri kendine özgü bileşimi nedeniyle farklı özellikler sergilerler.

Daha önce bahsedildiği gibi, üstün gerilme özelliklerine sahip olan naylonun icadından bu yana yüksek performanslı lifler de uzun bir yol kat etmiştir. Şekil 2.12, farklı elyafları özgül gerilme mukavemeti ve özgül gerilme modülü açısından karşılaştırmakta ve modern yüksek performanslı elyafların üstünlüğünü açıkça göstermektedir.

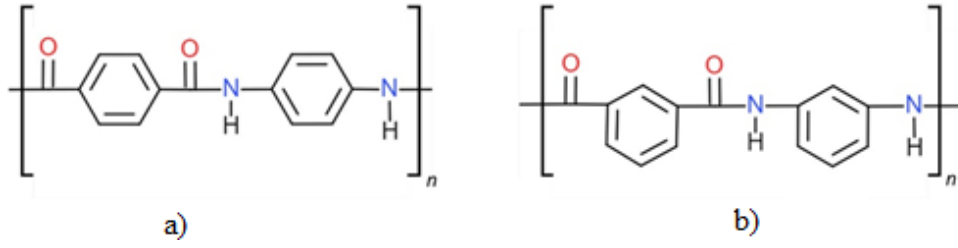


Şekil 2.12. Yapısal ve balistik fiberlerin spesifik gerilme mukavemeti ile spesifik gerilme modülü arasındaki ilişki [27]

Balistik darbelerde sadece tek bir fiber için inceleme yapıldığında mekanizma bu şekilde olsa da uygulamalarda birçok parametre olduğundan çok daha karmaşık ve kontrol edilmesi zor bir durum ortaya çıkmaktadır [52]. Balistik uygulamalarda kullanılan bazı yüksek performanslı malzemeleri inceleyecek olursak.

Aramid

Aramid, aromatik ve polyamid kelimelerinin birleşiminden oluşan yüksek mukavemet ve modül değerlerine sahip ve ısıya dayanıklı yapay bir elyaf türüdür. 1960'larda, bir meta-aramid olan ve alev geciktirmenin yanı sıra termal ve elektriksel yalıtım için piyasaya sürülen ilk ürün olan DuPont'un Nomex ürünü ile ticarileştirildi [53]. 1971 yılında DuPont firması bir para-aramid olan ve günümüzde en çok bilinen aramid esaslı ürün olan Kevlar'ı geliştirdi. Nomex ile Kevlar arasındaki yani meta-aramid ve para-aramid arasındaki temel fark, Şekil 2.13'de de görüldüğü gibi amid gruplarının aromatik halkaya bağlandığı konumdur. Amid grupları Nomex (meta-aramid)'de aromatik halkaya 1 ve 3 konumunda bağlanırken bu durum Kevlar (para-aramid)'da 1 ve 4'de meydana gelmektedir.



Şekil 2.13. a) Kevlar ve b) Nomex para-aramidlerinin kimyasal yapısı [29]

Meta-Aramid mükemmel ısı stabilite, elektrik yalıtımı, kimyasal stabilite ve radyasyon direncine sahiptir. Bu lifler alev geciktiricidir ve alev aldıktan sonra yanmasını durdururlar. Meta-aramidler birçok çözücüye, asitlere ve cilde dirençlidir. Statik yüklenmeyi önlemek için anti-statik bileşenler (karbon veya çelik fiber) Meta-Aramid'e eklenir. Meta Aramidler için temel kullanım alanlarından bazıları; koruyucu giysiler, sıcak gaz filtrasyonu ve elektrik yalıtımıdır.

Twaron, Technora ve Taperan gibi farklı ticari isimlerle de temin edilebilen para-aramidler, çelikle kıyaslandığında yaklaşık beş kat daha dayanıklıdır. Bu lif sadece olağanüstü yoğunluğu ve yüksek modülü değil aynı zamanda ısıya ve darbeye karşı üstün direnç seviyesi sunar. Bu nitelikler, malzemenin, lastikler, kauçuk veya lateks ürünler, fiber optik kablo, sürtünme malzemesi, koruyucu giysi, inşaat ve bina takviyesi, kompozit malzemeler ve diğer birçok alanı içeren çeşitli kullanımların sunulmasını mümkün kılmaktadır. Para-aramidler, fren ve debriyaj balatalarında asbest yerine, lastik takviyesinin yanı sıra uçak, tekne ve üst sınıf otomobiller ve spor malzemeleri gibi kompozitlerin yerine kullanılır. Polis ve askeri personel para-aramid malzemelerinden yapılan vücut zırhları giymektedir. Aramid esaslı bazı ticari ürünlerin mekanik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Aramid esaslı ticari ürünlerin mekanik özellikleri [54]

Ticari ürün adı	Kopma dayanımı (g/den)	Modül (g/den)	Kopma uzaması (%)
Kevlar 29	23,00	555	3,6
Kevlar 49	23,57	884	2,4
Kevlar 149	19,03	1303	1,3
Nomex	5,50	85	35
Twaron	23,79	849	2,5
Technora	24,93	567	4,4

Ultra Yüksek Moleküler Ağırlığa Sahip Polietilen (UHMWPE)

Ultra yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen lifler jel formundaki liflerin jel eğirme (gel spinning) tekniği kullanılarak üretilmesiyle elde edilir. Çok yüksek mukavemet ve modül değerlerine sahip bir tür yüksek performans malzemesidir. Dyneema (DSM, Hollanda) ve Spectra

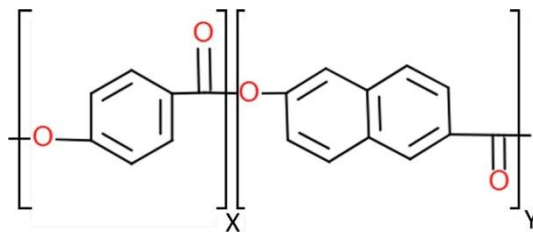
(Honeywell, ABD) ticari isimleri ile satılan ürünler piyasada en çok bilinen UHMWPE'lerdir. UHMWPE malzemelerin yoğunluğu (0,97 gr/cc) aramid'e (1,44 gr/cc) göre oldukça düşüktür. Bu nedenle ağırlığın önem arz ettiği durumlarda UHMWPE malzemeler tercih edilmektedir. UHMWPE malzemelerin ultraviyole (UV) direnci aramid'e göre daha yüksektir. Yapılan çalışmalarda 2 gün boyunca UV ışınlarına maruz bırakılan UHMWPE malzemelerin mukavemeti %5 oranında azalırken Kevlar kumaşın mukavemeti %25 oranında azalmıştır [55]. UHMWPE malzemeler genellikle yumuşak vücut zırhlarında diğer dokuma yapılarla bir arada kullanılırlar. Aynı zamanda UHMWPE elyafları çelik, cam veya iplikler gibi diğer elyaflarla kompozit formda kesilme ve delinme koruması için kullanılır. Amaç, yüksek modül ve sağlamlığın avantajlarını konfor ve nefes alabilirlikle birleştirmektir. UHMWPE esaslı bazı ürünlerin mekanik özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. UHMWPE mekanik özellikleri [54,56]

Ticari ürün adı	Kopma Dayanımı (GPa)	Modül (GPa)	Kopma Uzunluğu (%)
Dyneema SK60	2,5	65	3,8
Dyneema SK75	3,3	109	3,7
Spectra 900	2,6	75	3,6
Spectra 1000	3,2	110	3,3
Spectra 2000	3,4	120	2,9

Yüksek Performanslı Polyesterler

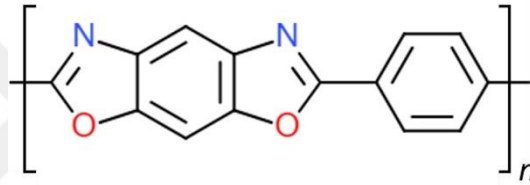
Vectran ticari ismiyle satılan yüksek performanslı polyester yüksek mukavemet ve modül değerlerine sahip, sıvı kristalden eğirilerek üretilmiş tamamen aromatik bir polyesterdir. Vectran yaklaşık 3-3,4 GPa gerilme mukavemeti ve 74-104 GPa modüle sahiptir. Düşük nem emme özelliği sayesinde ıslak ortamlarda mekanik özelliklerini kaybetmez. Bozunma sıcaklığı 400 °C civarındadır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklara ve ısıya dayanıklıdır. Aynı zamanda moleküler yapısı sayesinde düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korur. Fiber takviyeli plastiklerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal yapısı Şekil 2.14'de verilmiştir [57].



Şekil 2.14. Vectran'ın kimyasal yapısı [29]

Polibenzoksazol

Polibenzoksazol (PBO) sıvı kristal polimeridir. PBO elyafın gerilme mukavemeti 5,8 Gpa ve modülü 270 GPa'dır. Bu özellikleri PBO'yu aramid ve UHMWPE'den ayırmaktadır. Yoğunluğu yaklaşık 1,56 gr/cc'dir. Kimyasal yapısı Şekil 2.15'de verilmiştir. Zylon, Toyobo firması tarafından Japonyada 1980'lerde icat edilen PBO esaslı bir üründür. Zylon ürünleri 2003 yılına kadar iyi bir balistik malzeme alternatifi olarak kullanılmıştır. Kuru kullanımlarda aşırı sıcaklara dayanabildiği ve mukavemetini büyük oranda koruyabildiği ancak nemli ortamlarda sıcaklığa toleransının azaldığı ve mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca UV ışınlarına karşı da hassasiyeti yüksektir ve uzun süre UV ışınına maruz kaldığında mekanik özellikleri zayıflamaktadır. Bu kullanım kısıtlarından ötürü kullanım alanları sınırlıdır. Bu dezavantajlarının yanında kimyasal saldırılara ve aşınmaya karşı oldukça dayanıklıdır [55,57].



Şekil 2.15. Zylon PBO'nun kimyasal yapısı [29]

2.6. Enerji Sönümleme Mekanizmaları

Vücut zırh malzemelerinin enerji sönümlmeleri kullanılan malzeme ve mermi özelliklerine, çarpma anında meydana gelen etkileşime bağlı olarak değişim gösterebilir. Hedef malzemesi tarafından enerjinin sönümlenip dağıtılmasının farklı yolları vardır. Literatürde yapılan çalışmalarda araştırmacılar farklı enerji sönümlleme mekanizmaları bildirmişlerdir. Düşük hızlı dinamik darbede, kumaş esas olarak enerjiyi iplik çekilmesi, iplik uzaması ve kopması yoluyla emer [49]. Daha yüksek hızda balistik çarpışmada mekanizmalar farklıdır. Prosser vd. merminin kinetik enerjisinin dört ana mekanizma tarafından emildiğini gözlemlemiştir; (a) iplikleri piramit veya koni oluşumu için uzatmak için gereken enerji, (b) iplikleri keserken emilen enerji, (c) katmanlar piramit oluştururken, kumaş hareketi tarafından emilen enerji ve (d) ardından üretilen ısı ile emilen enerji [58]. Tan vd., Prosser vd., tarafından gözlemlenen mekanizmalara ek olarak, enerji emiliminin iplik fibrilasyonu ve sürtünme mekanizmaları aracılığıyla da gerçekleştiğini gözlemlemiştir [58,59]. Benzer şekilde Hwang vd., yerel iplik kopması, bükülme, uzak iplik kopması, fibrilasyon ve iplik çekilmesi gibi benzer mekanizmalardan bahsetmiştir [60]. Ek olarak, fiberdeki birincil bağların kopmasını ana mekanizmalardan biri olarak belirtmişlerdir. Nilakantan vd., iplik çekme ve pencerelemenin baskın enerji dağıtma mekanizmaları olduğuna dikkat çekmişlerdir [61]. Araştırmacılar yüksek

darbe hızında, iplik gerilmesinin ana enerji soğurma mekanizmaları olarak işlev gördüğünü bildirmişlerdir. Bu nedenle, enerji sönümleme mekanizmasının çarpma hızına ve türüne bağlı olarak farklı olduğu sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, düzlem dışı deformasyon, iplik çekilmesi, iplik kopması, fibrilasyon, sürtünme ve bükülme, tekstil bazlı bir yapının enerjiyi sönümlediği ana mekanizmalardır. Termoplastik UHMWPE bazlı yapılarda filamanların erimesi sırasında da enerji emilir. Vücut zırhlarının enerji sönümleme mekanizmalardan bazıları aşağıda kısaca tartışılmaktadır.

2.6.1. İplik Çekme Kuvveti

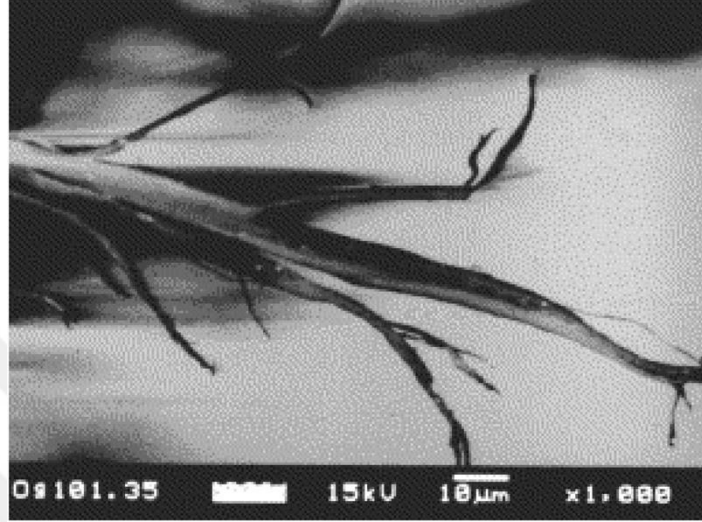
Kumaştan ipliklerin kolay çekilmesi, iplikler arası sürtünmenin düşük olmasının sonucudur [60–62]. İpliğin çekilmesi sırasında, çekilen dikey iplikler yatay ipliklerle her geçiş noktasında sürtünme direncini aşarak çekilir ve enerji sönümleme meydana gelir. Kevlar kumaşlara su veya PEG emdirildiğinde ipliğin çekilmesinin kolaylaştığı ve iplikler arasındaki sürtünmeye bağlı olarak enerji sönümleme kapasitesinin azaldığı bildirilmiştir. Dokuma sıklığının da iplik çekme kuvvetini değiştirdiği ve dolayısıyla enerji sönümleme kapasitesini etkilediği bilinmektedir. Gevşek bir şekilde dokunmuş bir kumaşta iplik çekmesi çok düşük olduğundan, kumaş darbeye maruz kaldığında iplikler çok fazla zorlanmadan yapıdan kolayca çekilir. Bu durumlarda ikincil iplikler neredeyse hiç etkilenmez ve enerji sönümleme mekanizması çok dar bir alanda gerçekleşir. İplikler arası sürtünmenin, darbe direnci konusunda önemli bir parametre olduğu Bölüm 2.5.2’de bahsedilmişti. Bu nedenle araştırmacılar iplik çekme testi adı verilen bir test ile iplikler arasındaki sürtünmeyi ve yapının çekilen ipliklere karşı direnç gücünü ölçmektedir. İplik çekme testlerinde önceden belirlenen ölçülerde kesilmiş bir kumaş çekme test cihazının alt çenesine bağlanır. Bu kumaştan test için kullanılacak serbest bir iplikte cihazın hareketli üst çenesine bağlanarak kumaştan tamamen çıkarılıncaya kadar çekilir. Bu test sırasında ipliğin kumaştan çekilmesi için gereken kuvvete karşılık yer değiştirme miktarı kaydedilir. İplik çekme testlerinde numunenin fiziksel durumu, çekme hızı, iplik yoğunluğu, yüzey dokusu ve ipliğin yüzey işlemi gibi iplik çekme kuvvetini etkileyen bir dizi faktör vardır.

2.6.2. İplik İncelmesi ve Kopması

Mermi geometrisi konik olduğunda ipliğin sıyrılma ihtimali daha düşüktür. Bu mermilerin kumaş hedeflere çarpması durumunda konik yapısı nedeniyle iplikler uzar ve en sonunda koparlar. Düz uçlu bir mermi ile darbe durumunda da iplikler kopmaya zorlanır. Her iki mermi türünde de ana enerji sönümleme mekanizması ipliklerin kopmasıdır.

İplik fibrilasyonu, fiberlerin uzunluk boyunca incelmesidir. Yüksek performanslı bir fiber, aşındırıcı kesme yüküne maruz kaldığında, makromoleküllerin bir arada tutulduğu daha zayıf

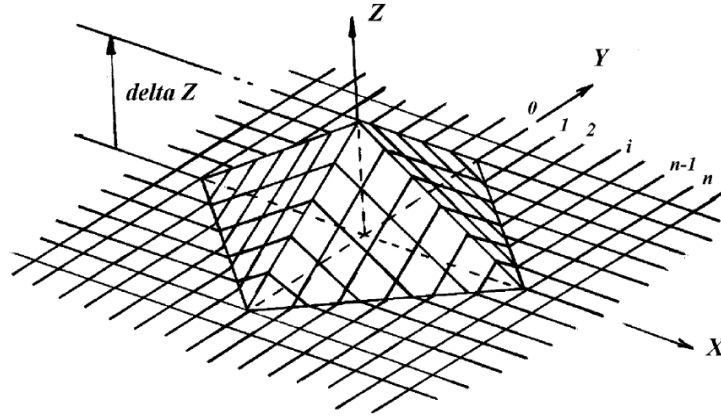
ikincil veya hidrojen bağları kırılarak fiberin ucu oluşturan fibriller ile başarısız olmasına neden olur. Şekil 2.16, fibrilasyonun büyütülmüş bir görüntüsünü gösterir. Bu enerji soğurma modu, mermi ucunun daha fazla açılı profili olduğu durumlarda daha belirgindir [59].



Şekil 2.16. Fibrilasyon SEM görüntüsü [59]

2.6.3. Yüzey Sürtünme ve Piramit Formasyonu

Mermi ve zırh arasındaki sürtünme, enerjinin emildiği başka bir mekanizmadır. Bir kumaş, sıklığı (ipliğin iplik aralığına göre belirlenir) ve sertliği (birim alandaki dokuma iplik sayısı ile tanımlanır) yeterince yüksekse, gelen bir mermiye karşı yeterli direnç sunabilir. Bu gibi durumlarda, kumaşın darbe yönünde dışa doğru sapması olan bir koni veya piramit oluşumu yoluyla da enerji emilir. Bu, ikincil iplikler, yani doğrudan merminin teması altında olmayan iplikler de dâhil edildiğinde ve birincil ipliklerle birlikte yer değiştirdiğinde gerçekleşir (Şekil 2.17). Aynı darbe kuvveti için, koni veya piramidin genişliği ve derinliği, kumaş sıklığı, iplik uzayabilirliği ve kumaşa emdirilen malzemelerin özellikleri ile değişiklik gösterir.

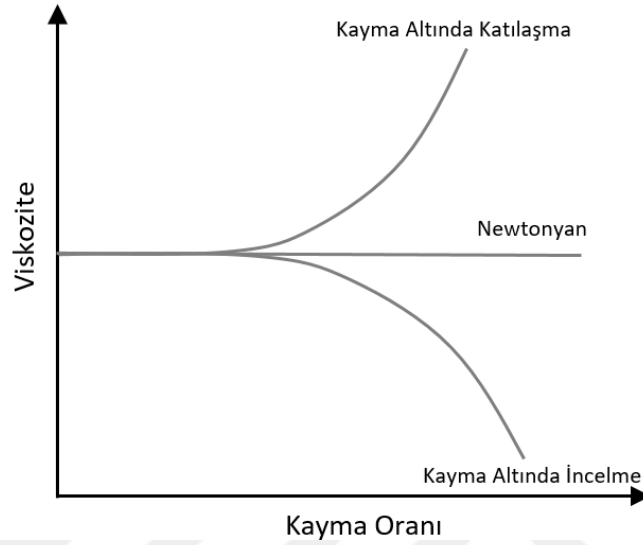


Şekil 2.17. Mermi çarpması sonucu kumaşın 3 boyutlu gösterimi [63]

2.7. Kayma Altında Katılaştan Sıvılar

Akışkan; sıvıları, gazları, plazmaları ve bazı durumlarda eriyik haldeki plastikleri kapsayan maddenin halinin bir alt kümesidir. Akışkanlar, doğası gereği kayma gerilmesi altında sürekli biçim değiştirirler yani akarlar. Kayma gerilmesi altında verdikleri tepki reoloji biliminin temelini oluşturur. Reoloji terimi ilk olarak 1920 yılında Prof. Eugene Bingham tarafından bulunmuştur. Yüksek viskoziteli sıvılardan, visko-elastik ve visko-plastik özelliklere sahip katılara kadar pek çok alan reoloji bilimi tarafından incelenmektedir [64]. Saf maddeler, karışımlar, dispersiyonlar ve çözeltiler gibi pek çok akışkan malzeme türü vardır. Akma özelliklerine göre akışkanlar Newtonyan ve Newtonyan olmayan olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Kayma gerilmelerine maruz kaldığında, sıvıların çoğu, sabit viskozite ile Newton yasasına uyar. Bu doğrusal ilişkiye uyan bir sıvıya Newtonyan denir. Bu da viskozitesinin uygulanan kayma oranlarından bağımsız olduğu anlamına gelir. Gliserin, su ve mineral yağlar Newtonyan sıvılarının tipik örnekleridir. Newtonyan sıvılarda viskozite, kayma oranının değişiminden etkilenmezken Newtonyan olmayan sıvılarda kayma oranının artmasıyla akışkan viskozitesi artar veya azalır. Bir sıvı içinde dağılmış katı parçacıklar, köpük içindeki gaz parçacıkları veya karışmayan sıvıların emülsiyonu gibi birden fazla faz içeren malzemeler, reolojik davranışları genel olarak bileşenlerin etkileşimleri tarafından baskın olduğu için yapılandırılmış sıvılar olarak kabul edilir. Kullandığımız malzemelerin çoğu yapılandırılmış akışkanlardır. Çoğu gıda, kozmetik, ilaç ve boya, bir taşıyıcı sıvı içinde süspanse edilmiş karışmayan bir sıvının partiküllerini veya damlacıklarını içerir. Çok fazlı bir yapıya sahip oldukları ve karmaşık akış davranışı sergiledikleri için bir dizi yumuşak yarı katı malzeme de yapılandırılmış akışkanlar kategorisine girer. Bazı örnekler peynir, ruj, kalafat ve ekmek hamuru olabilir. Neredeyse tüm bu malzemeler, daha yüksek kayma gerilmesi oranlarında düşen bir viskoziteye sahiptir. Bununla birlikte, bazı akışkanlar gerilim altında yoğunlaşabilir ve sonuç olarak, alışılmadık bir viskozite artışına sahip olabilirler. Bu maddeler kayma altına katılaştan sıvı (KAKS) olarak bilinir, viskoziteleri değişken kayma oranı ile artar. KAKS'ların

sahip oldukları bu özellik tersinirdir ve üzerlerine uygulanan gerilim ortadan kalktığından sıvılar ilk hallerine geri dönerler. Şekil 2.18, kayma oranının bir fonksiyonu olarak viskozite değişimini temsil eden eğrilerin genel şeklini göstermektedir.



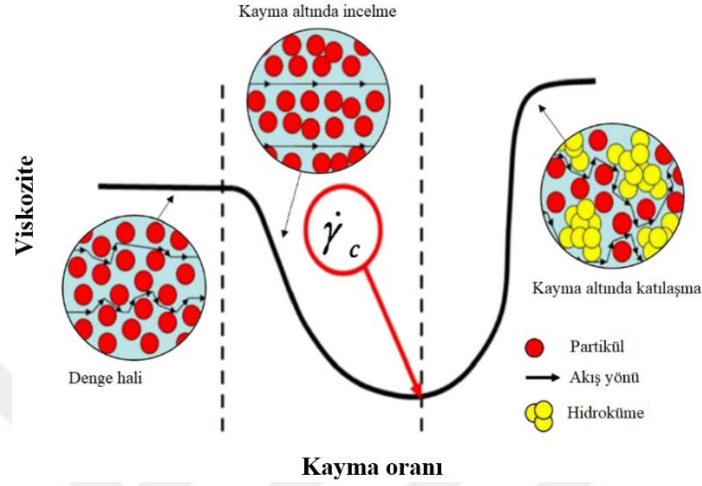
Şekil 2.18. Akışkan malzeme türleri

KAKS'ların davranışını görebileceğimiz en basit malzemelerden biri mısır nişastası ve su karışımıdır. Mısır nişastası ve su karışımını yavaşça karıştırırsak yapışkan sıvı çubuğun etrafından akmakta ve karışımın içerisinde bıraktığı boşluk yavaşça dolmaktadır. Ancak çubuğu karışımın içerisinde hızlıca hareket ettirsek, karışım aniden katılaşmakta ve sert bir malzeme gibi davranmaktadır. Çubuk ile karışıma uygulanan kuvvet onu sıvıdan katı hale dönüştürmektedir. Kuvveti ortadan kaldırdığımızda ise karışım yeniden sıvı hale dönmektedir.

Yoğun koloidal süspansiyonlardaki kayma altında katılaşma, genellikle kritik bir kayma oranından sonra viskozitede ani bir artış olarak ortaya çıkar [65,66]. Başka bir deyişle, yüksek hızlı kayma oranlarında, KAKS'ların viskozitesi çarpıcı biçimde artar ve bir katı gibi davranır. Bununla birlikte, darbe geriliminin giderilmesinden sonra KAKS, eski haline geri döner.

Şekil 2.19, artan kayma oranıyla, kayma altında incelme ve kayma altında katılaşma olayı sırasında KAKS'daki partikülleri göstermektedir. Denge halinde partiküllerin sıvı ortamda düzenli bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Kayma oranı arttıkça partiküller, tabakalar oluşturmaya başlar. Düşük kayma oranlarında katı partiküllerden oluşan bu katmanlar sıvı akışına paralel olarak yönlenmiştir ve her bir tabaka birbiri arasında yağlayıcı bir etki ile akışı kolaylaştırır. Yani düşük kayma oranlarında karışımın viskozitesi düşer. Kayma oranı kritik bir seviyeye gelene kadar karışımın viskozitesi düşmeye devam eder ve kritik viskozitenin ötesinde tabakalar halinde bir arada bulunun partiküller dağılır ve daha az sayıda partikülün bir arada

bulunduğu partikül kümeleri oluşturur. Bu küme biçimindeki yapılara hidroküme denilir. Hidrokümler yoğun haldedir ve akış içerisinde engel olarak sıvı akışını zorlaştırır. Süspansiyon üzerindeki gerilim ortadan kalktığında partiküller ilk andaki hallerine geri döner [67,68].



Şekil 2.19. Kayma altında incelme ve katılaşma davranışının şematik gösterimi [69]

2.7.1. Kayma Altına Katılan Sıvı Teorileri

Reoloji alanında çalışan araştırmacılar tarafından kayma altında katılaşma mekanizmasını açıklamak için pek çok teori önerilmiştir. Önerilenler arasında, "düzen-düzensizlik geçişi teorisi", "hidro-kümelenme teorisi" ve "temas reoloji modeli" yaygın olarak kabul gören teorilerdir.

Düzen-Düzensizlik Geçiş Teorisi

Hoffman, Newtonyan olmayan süspansiyonların düşük kayma oranlarında partiküllerinin düzenli altıgen şekilde kümelendiklerini bildirmiştir. Kayma oranı kritik bir değeri geçtiğinde ise kayma kuvvetlerinin partiküller arası çekim kuvvetlerini yendiği ve düzenli haldeki altıgen partikül kümelerini bozduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak viskozitede ani bir artış meydana gelir [1–3]. Bu olay düzen-düzensizlik geçiş teorisi (order-disorder theory, ODT) olarak isimlendirilir.

Hoffman ayrıca, kesme kalınlaştırma sırasında altıgen olarak paketlenmiş tabakaların düzensiz bir duruma dönüştüğünü ışık saçılımıyla da göstermiştir [1]. Bu geçiş, kritik kesme hızında viskozitede büyük bir artışla ortaya çıkmaktadır. Bazhenov vd. partiküller arası ve hidrodinamik kuvvetler arasındaki dengede bozulma nedeniyle partiküllerin genişleme davranışı gösterdiğini bildirmiştir [70]. Kayma kalınlaşmasının ODT'nin bir sonucu olduğunu varsayarsak, Boersma ve ark., katılaşma için kritik kayma oranının, bir çift parçacığa etki eden elektrostatik ve kesme kuvvetleri arasındaki bir dengeden belirlenebileceğini öne sürmüştür [3]. Woodcock,

kayma altında katılaşma tek bir bileşenin moleküler sıvıları tarafından sergilenmediğini, ancak ortama bağlı etkili koloidal potansiyellerin bir sonucu olabileceğini tespit etmiştir [71]. Moleküler dinamik hesaplamalarıyla, viskoz bir sıvı için basit bir moleküler modelin, çok sınırlı modelleme koşulları altında ince bir kayma altında katılaşma tepkisini öngördüğünü bildirmiştir.

Hoffman kayma altında monodispers parçacıkların yüksek konsantrasyonlu süspansiyonlar ile aynı olduğunu deneysel olarak doğrulamıştır. Hoffman konsantre polimer reçinelerdeki dilatant ve kesintili viskozite davranışlarından sorumlu olan stabil olmayan akışı modellemek için kayma altındaki koloidal süspansiyonlarda gelişen güçleri analiz etmiştir. Bu istikrarlı olmayan akışın nedeni bir grup parçacık üzerindeki van der Waals-London, elektriksel çift kat ve kayma gerilmeleri gibi güçlerin hareketi olduğunu ileri sürülmüştür. Hoffman, hareketli katmanlar içindeki parçacıkların böyle düzenli akışı bozan ve onları katmanlarından dışarı çekmek için sorumlu olan azalan güçlere hidrodinamik olarak maruz kaldığını savunmuştur. Kayma gerilmesi kritik bir değeri geçtiğinde, parçacıkların düzenli katmanlarından dağılarak birbirlerine takıldıkları ve bu durum viskozite artışına sebep olduğu bildirmiştir [72].

Hidro kümelenme Teorisi

Kayma altında katılaşma davranışını açıklamak için kullanılan bir diğer teoride Hidro kümelenme Teorisi'dir. Bu teoriye göre parçacık kümelerinin oluşumu güçlü hidrodinamik kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Yüksek gerilme altındaki süspansiyonlardaki katı partiküller, kendi kendilerine organize olarak "hidro-kümeler" terimi ile ifade edilen bir duruma benzersiz bir geçiş sergilemektedir. Hidro-kümeler kavramı ilk olarak Bossis ve Brady tarafından ortaya atılmıştır [4]. Yüksek kayma oranlarında, parçacıklar arasındaki mesafe, yalnızca çok ince bir sıvı tabakası ile ayrılacak kadar azalır. Bu durum parçacık öbeklerin oluşumundan sorumlu olan büyük hidrodinamik kuvvetleri oluşturur. Bu hidrodinamik kuvvetlerin yokluğunda, parçacıklar kendilerini akış yönü boyunca diziler halinde düzenlerler ve böylece gerçekte kaymanın incelenmesine neden olur. Oysa Düzen-Düzensizlik Geçiş Teorisi'nin temelinde viskozitenin artışı için partiküllerin ilk anda düzenli halde olması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu nedenle hidro kümelenme teorisi, düzen düzensizlik teorisinden farklıdır. Bu fenomenin hidrodinamik temeli için ispat çalışmaları, reo-optik deneyler [73,74], akış ultra-küçük açılı nötron saçılımı (akış-USANS) [75] ve gerilim atlama reolojik ölçümleri [76] ile sağlanır. Bossis ve Brady [4] tarafından Stokesyen dinamik yöntemini kullanan ve daha sonra Boersma vd., [3] ve Farr vd.,[77] tarafından yapılan simülasyon tahminleri, mekanizmanın hesaplamalı kanıtını sağlarken, istatistiksel olarak Brady'nin [4,78,79] mekanik teorisi, hidrodinamiğin tekil doğasından kaynaklanan mikro yapının anlaşılmasını sağlar.

Temas Reoloji Modeli

Temas reolojisi modelinde düşük kayma oranlarında hidro-kümelenme baskındır [8,37,39,40]. Katılma noktasında, temas kuvvetleri önemli ölçüde artmakta ve koloidal parçacıklar yüksek kayma oranlarında birbirleriyle temas etmektedir. [41,42]. Temas eden parçacıklar, süspansiyon içinde genişleyen temas ağlarını oluşturmaktadır. Bu nedenle, temas kuvvetleri, yoğun koloid süspansiyonların kayma altında katılma mekanizmasında ana faktörlerdir. Düşük kayma oranlarında, parçacıklar ve hidrodinamik yağlama kuvvetleri arasında önemli bir temas olmadığı ve Newtonyan davranışı veya kayma altında incelleme ile sonuçlandığı görülmektedir. Kritik kayma oranında sonra, partiküller arasındaki sürtünme kuvvetleri kayma altında katılma oluşturan kuvvet zincirleri üretmektedir [38,39].

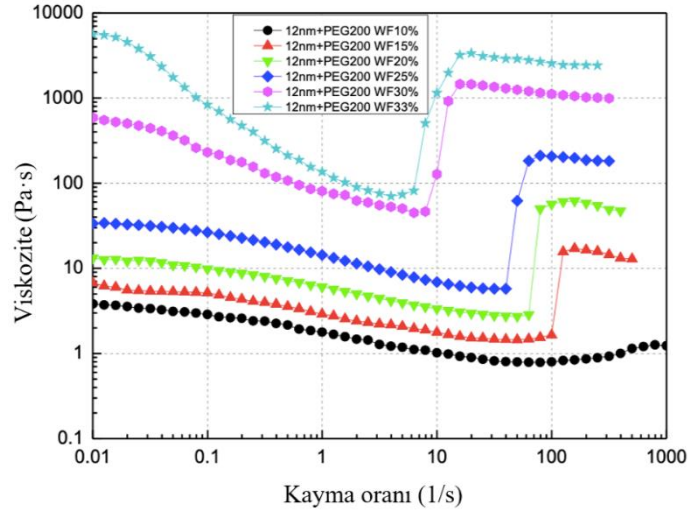
2.7.2. KAKS Yapısına Etki Eden Parametreler

Genellikle KAKS'ların viskoziteleri artan kayma oranı ile birlikte ilk olarak azalır. Kayma oranı kritik bir değere ulaştığında ise viskozite aniden artar ve bu durum kayma altında katılma davranışına işaret eder. Kayma altında katılma olayını tetikleyen ana etken olarak görülen kritik kayma oranı deneysel ve teorik yöntemlerle belirlenebilir [80]. Kritik kayma oranının değişiklik göstermesine sebep olan ve KAKS'ların reolojik özelliklerini etkileyen pek çok parametre vardır.

KAKS'ların reolojik özellikleri temel olarak, katı ortam (şekil, boyut, oran, sertlik, ilave partikül), sıvı ortam (türü, yoğunluğu) ve süspansiyonun bulunduğu fiziksel ortam şartları gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

Partikül Oranının Etkisi

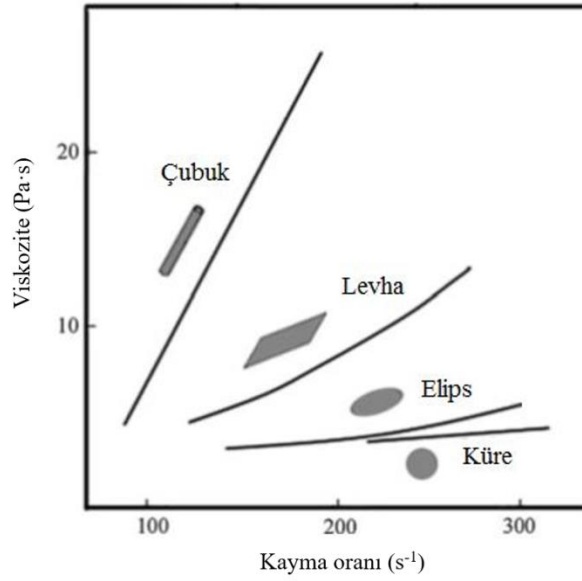
Süspansiyondaki katı partikül oranı, KAKS'ların davranışına karar veren ana parametrelerden biridir. Bu oran belirli bir değerin altında ise katılma davranışı görülmez. Barnes hacimce %0,5 katı partikül oranının üzerinde akışkan davranışının kayma oranındaki değişim ile büyük ölçüde değiştiğini bildirmiştir [81]. Katı partikül oranının değişimi katılmanın başladığı kritik kayma oranı üzerinde de ciddi bir etkiye sahiptir. Katı partikül oranı arttıkça kritik kayma oranı düşer [38,82]. Şekil 2.20'de çeşitli ağırlık oranlarında KAKS'lar için kayma oranı-viskozite grafiği verilmiştir. Katı partikül oranı arttıkça kritik kayma oranının düştüğü ve katılmanın daha erken başladığı görülmüştür. Grafikten de anlaşılabileceği üzere katı partikül oranı belirli bir seviyenin üzerine çıkmadan katılma davranışı gerçekleşmemiştir. Katı partikül oranı arttıkça süspansiyonların viskozite profillerinin yükseldiği belirlenmiştir [83].



Şekil 2.20. Farklı katı partikül oranlarına sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi [83]

Partikül Şeklinin ve En-Boy Oranının Etkisi

Partikül şekli, KAKS'ların reolojik özellikleri üzerinde önemli etkisi olan bir diğer parametredir. Şekil 2.21'de katı partikül hacim oranı %0,2 olan süspansiyonlarda partikül şeklinin viskoziteye etkisi görülmektedir. Barnes tarafından yapılan çalışmada dört farklı numune hazırlanarak inceleme yapılmıştır. Buna göre, reolojik özellikler üzerindeki en büyük etkinin çubuk şekilli partiküllerde olduğu tespit edilmiştir. Çubuk şekilli partikülleri sırasıyla levha, elips ve küre şekilli partiküllerin izlediği görülmüştür. Katı partikül şekillerinin kritik kayma oranına da etki ettiği görülmüştür [81]. Partiküllerin en-boy (çap-uzunluk) oranı, süspansiyonların katılaşma mekanizmaları üzerine etkisi olan bir diğer etmendir. Beazley tarafından yapılan çalışmada akış sırasında partiküllerin kendi eksenleri etrafında dönme hareketi yaptığı ve bu hareket sırasında düzensiz kümeleşmeler meydana geldiği bildirilmiştir. Düzensiz kümeleşme oluşumunda partiküllerin yüksek en-boy oranına sahip olmasının önemli olduğu ifade edilmiş, çubuk şekilli partiküllerin katılaşma için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Süspansiyondaki katı partiküllerin en-boy oranı arttıkça kritik kayma oranları azalmış ve minimum katı partikül oranı düşmüştür [84]. Wetzel vd. 1:2, 1:4 ve 1:7 en-boy oranlarındaki kalsiyum karbonat partiküllerini kullanarak yaptığı analizlerde partikül en-boy oranı arttıkça katılaşma için daha gereken minimum partikül oranının azaldığını bildirmiştir [38,85].

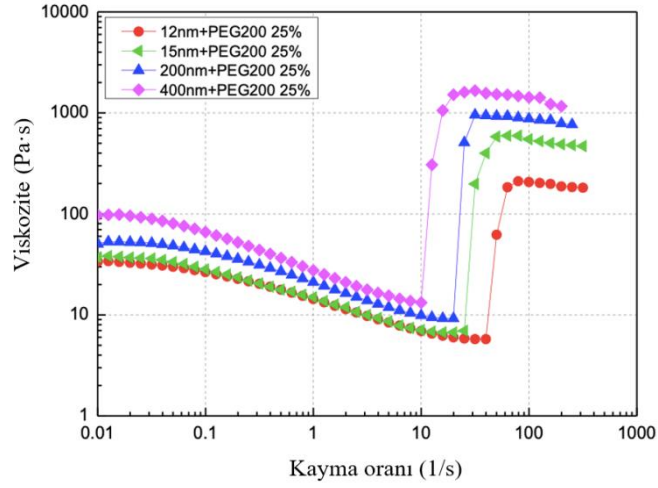


Şekil 2.21. Farklı katı partikül şekillerine sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi [84]

Partikül boyutunun etkisi

Süspansiyondaki partikül boyutunun kritik kayma oranı ve viskozite profili üzerine önemli etkileri vardır. Barnes artan partikül boyutu ile kritik kayma oranının azaldığını ve tepe viskozitenin arttığını tespit etmiştir. Bu durum, belirli bir hacim fraksiyonu için azalan partikül boyutu ile partikül-partikül etkileşimi arttığı için partikül boyutu daha düşük olduğunda artan Brownian hareketinin etkisi ile olabilir. Lee vd. ortalama partikül boyutu 100 nm, 300 nm ve 500 nm olan silika partikülleri ile hazırladığı KAKS’larda partikül boyutunun etkisini incelemiştir. Buna göre partikül boyutu arttıkça kritik kayma oranı ciddi bir şekilde düşmektedir. Şekil 2.22’de Yue tarafından yapılan çalışmada 4 farklı partikül boyutunda silika kullanılarak üretilmiş KAKS’ların viskozite-kayma oranı grafikleri verilmiştir. Süspansiyonlardaki katı partikül oranı ağırlıkça %25 olarak sabit tutulmuştur. Grafikten de görüldüğü üzere silika partikül boyutu büyüdükçe kritik kayma oranı azalmış ve viskozite profili yükselmiştir [83].

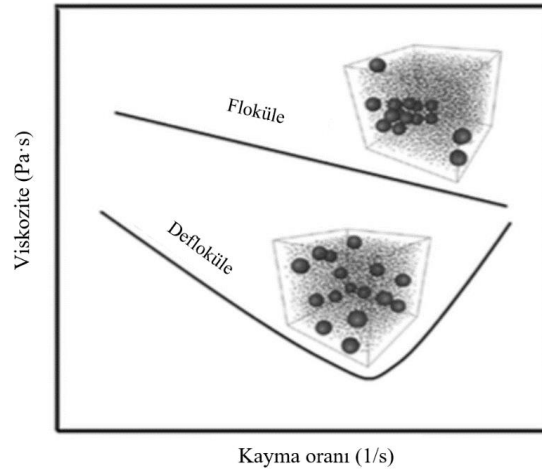
Partikül boyutu dağılımının aralığı da KAKS’ların reolojik özellikleri üzerinde dikkat çekici bir etki göstermiştir. Partikül boyutları arasında büyük farklar olmasının yani süspansiyonun geniş partikül dağılımına sahip olması durumunda KAKS’ların kritik kayma oranının arttığı bildirilmiştir [81]. Partikül boyutu (çap) dağılımının aralığının çok geniş olduğu süspansiyonlarda, küçük partiküller daha büyük partiküllerin arasındaki boşluğu doldurur ve partikül konsantrasyonunun azalmasının etkisi ile katılaşma davranışını zayıflatırlar. Partikül boyutu dağılımının aralığı ne kadar dar olursa, katılaşma etkisi o kadar iyi olmaktadır.



Şekil 2.22. Farklı katı partikül boyutlarına sahip süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi [83]

Partiküller Arası Bağlantıların Etkisi

Kayma altında katılaşma davranışı partiküller arası etkileşimin durumundan da etkilenir. Süspansiyonu oluşturan partiküller entropik ve sterik etkileşim nedeniyle nötr yada elektrostatik etkileşim sebebiyle birbirlerini itici halde bulunabilirler. Barnes tarafından yapılan kapsamlı bir araştırma, floküle edilmiş süspansiyonların kayma altında incelme davranışı gösterdiğini ortaya koymuştur [81]. Bu, topaklanmış süspansiyon için, hiçbir kayma oranında katılaşmanın meydana gelmediği anlamına gelir. Bunun nedeni, flokülatların içinde ve çevresinde sıkışmış süspansiyon ortamının hareketsizleştirilmiş kısmı olabilir [86]. Diğer yandan, defloküle edilmiş süspansiyonlar başlangıçta kayma incelmesi göstermiş, ancak kayma oranı belirli bir değerin üzerine çıktıkça, kayma altında katılaşma devreye girmiştir. Barnes'ın çalışmasından elde edilen Şekil 2.23, floküle edilmiş ve defloküle edilmiş süspansiyonun artan kayma oranı ile viskozite değişim davranışını göstermektedir [81].



Şekil 2.23. Partiküller arası bağlantının viskozite üzerine etkisi [81]

Partikül Sertliğinin Etkisi

Partikül sertliğinin süspansiyonun reolojik davranışı üzerindeki etkisi Kalman ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [75]. Bu çalışmada, daha yumuşak PMMA partiküllerini ve nispeten daha sert silika partiküllerini karşılaştırılmış ve daha sert partiküllerin katılma bakımından incelendiğinde daha iyi performans verdiği belirtilmiştir. Bunun nedeni, daha sert partiküllerin, deformasyon olmaksızın daha yüksek gerilim seviyelerine dayanabilmesi olduğu düşünülmüştür. Petel ve ark. parçacık kuvvetinin etkisi üzerine daha sert parçacıkların daha yüksek gerilimlere dayanabileceğini bildirmişlerdir [87,88]. Hidroküme oluşumunun ışığında, KAKS'daki sıvı akışına direnme gücünün, katı partiküllerin gücüne bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bu etki, daha düşük hız etkisi altında daha belirgindir çünkü partikül deformasyonu ve kırılma olasılığı daha azdır.

Sıvı Ortamın Etkisi

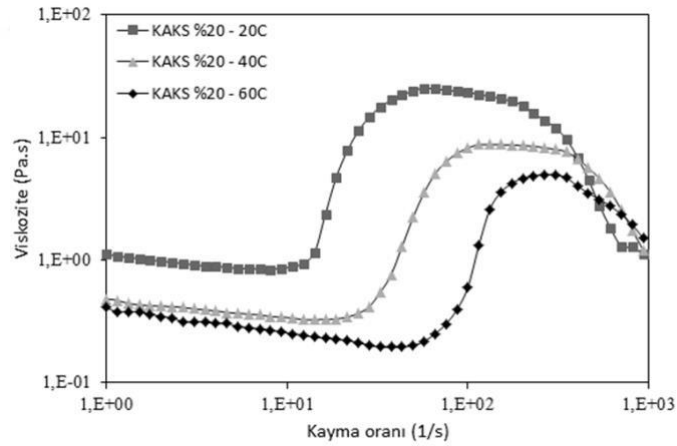
Süspansiyondaki sıvı ortamın reolojik özelliklere etkisi pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Sıvı ortam olarak kullanılan polietilen glikol (PEG)'in molekül ağırlığının artması ile süspansiyonun viskozitesinin arttığı görülmüştür [89,90]. Qin vd. tarafından yapılan çalışmada PS mikroküre ve PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'lara %45 oranında 200, 400 ve 600 mol ağırlığına sahip üç farklı PEG eklemiştir. PEG 600 eklenen numunenin katılma davranışında daha etkili olduğu bildirilmiştir [89].

PEG dışında, başka dispersiyon ortamları da araştırılmıştır. Örneğin PTM, PPG, n-hekzan, vb. konsantre koloidal dispersiyonların kayma altında katılma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş ve ortam (PTM) viskozitesini daha yüksek moleküler ağırlıklı (20, 200 ve 1000), süspansiyon (PTM-silika) viskozitesinin arttığı bildirilmiştir [91,92]. PPG bazlı KAKS ayrıca PEG bazlı KAKS'a benzer reolojik tepki vermiştir. Yani süspansiyonun viskozitesi moleküler

ağırlık artması ile beraber olarak yükselmiştir [93–95]. PPG'yi PEG ile karşılaştırırken, Moriana ve ark., üç farklı taşıyıcı ortam, PEG 400, PPG 400 ve PPG 725 ile aynı füme silika (çap 20 nm,%25 hacim fraksiyonu) için tamamen farklı sonuçların ortaya çıktığını bulmuştur. PPG bazlı KAKS için kritik kayma oranının daha düşük olduğu ve kayma altında katılaşma etkinliğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur [96]. Gürgen vd., bu fenomeni, partiküllerin etrafındaki solvasyon tabakasının kalınlığını etkileyen polimerizasyon derecesi açısından açıklamıştır [97].

Sıcaklık Etkisi

Süspansiyonu oluşturan malzemeler dışında sıcaklık gibi çevresel faktörlerinde reolojik özellikler üzerinde etkisi olduğu bildirilmiştir. Gürgen tarafından yapılan çalışmada ağırlıkla %20 silika miktarına sahip KAKS'ların reolojik özellikleri Şekil 2.24'de sıcaklığa bağlı olarak verilmiştir [13]. Buna göre, sıcaklığın artması süspansiyon viskozite profilini düşürdüğü görülmüştür. Bu etkinin sıcaklık nedeniyle silika ve PEG arasındaki hidrojen bağlarının zayıflamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Aynı zamanda sıcaklık arttıkça katı partiküllerin Brownian hareketinin artması sonucunda partiküller arası çekimin bozulması süspansiyonun viskozitesinde düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Xu tarafından yapılan çalışmada bu durumu doğrulamaktadır [83].

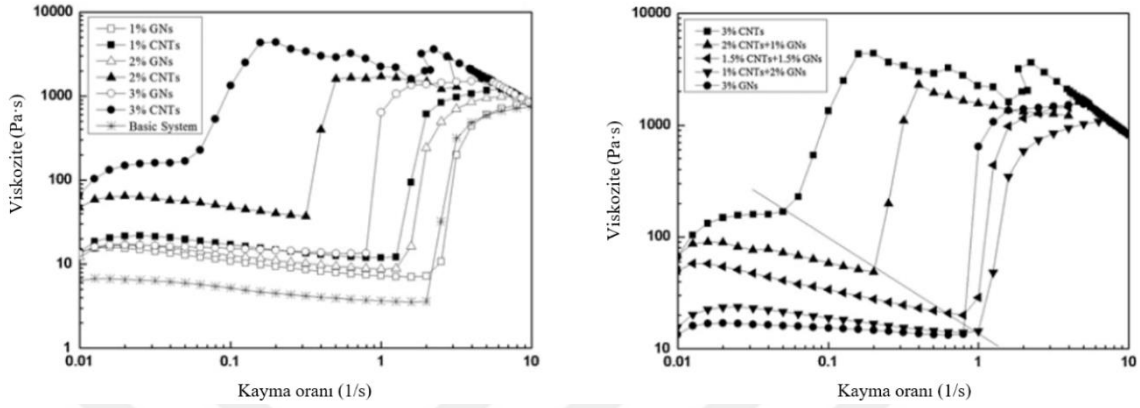


Şekil 2.24. Farklı sıcaklıklar yapılan reolojik testlerin viskozite üzerine etkisi [13]

İlave Partiküllerin Etkisi

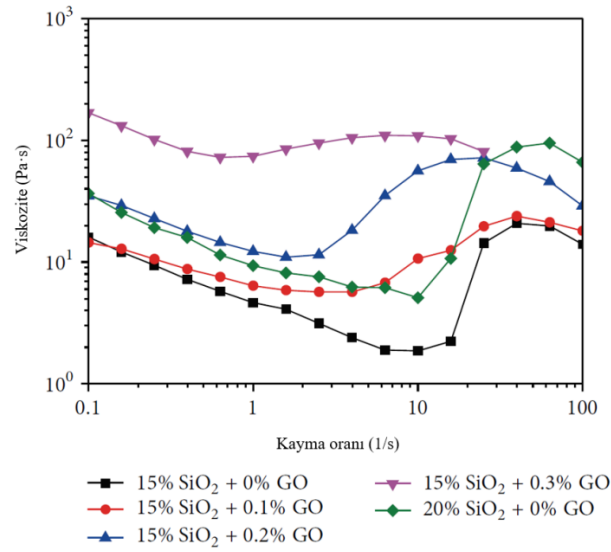
KAKS üretiminde süspansiyona ilave partiküllerin eklenmesi reolojik özellikleri önemli ölçüde değiştirmektedir. Sha vd. tarafından yapılan çalışmada 650 nm çapında küresel silika ve PEG 200 kullanılarak üretilmiş KAKS'lara ilave partikül olarak KNT ve GNP eklenmiştir. İlave partiküllerin toplam oranı ağırlıkça %3 olacak şekilde ayrı ayrı ve beraber takviye edilmiştir. Süspansiyonların reolojik özellikleri incelendiğinde Şekil 2.25'te görüldüğü üzere KAKS'lara

KNT ve GNP takviye edilmesi viskoziteyi arttırmaktadır. Aynı zamanda kritik kayma oranı da azalmıştır. İki malzeme arasında kıyaslama yapıldığında KNT'nin viskozite profilini arttırmada daha başarılı olduğu görülmüştür [98].



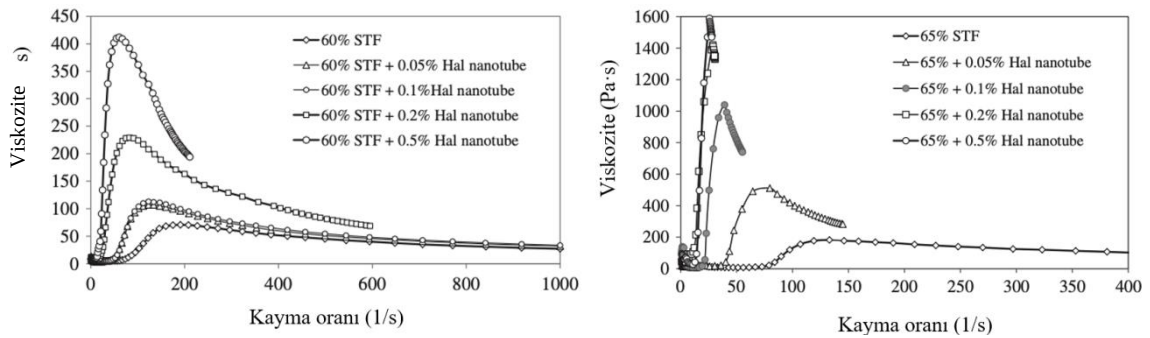
Şekil 2.25. Süspansiyon viskozitesinin ilave nanopartikül takviyesi ile değişimi [98]

Huang vd. KAKS numunelerinin içerisinde grafen oksit (GO) takviyesinin reolojik özelliklere etkisini incelemiştir. KAKS üretimi için 14 nm çapında ve 200 m²/gr yüzey alanına sahip füme silika ve PEG 200 kullanılmıştır. Süspansiyondaki katı partikül oranı ağırlıkça %15 ve %20 olarak kullanılmıştır. Grafen oksit takviyesi ağırlıkça %0,1, %0,2 ve %0,3 olarak %15 oranında silika kullanılarak üretilmiş KAKS'lara yapılmıştır. Şekil 2.26'da görüldüğü üzere %15 silika içeren süspansiyolarda GO takviyesi %0,2'ye kadar maksimum viskoziteyi yükseltmiş ve kritik kayma oranını düşürmüştür. %15 SiO₂ ve %0,3 GO ile üretilen süspansiyon en yüksek başlangıç ve maksimum viskozite değerlerine sahip olmasına rağmen kayma altında katılaşma özelliğinin bozulduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra %15 SiO₂ ve %0,2 GO içeren numune takviyesiz %20 SiO₂ numunesinden daha düşük kritik kayma oranına sahip olmasına rağmen maksimum viskozite değeri daha düşüktür. Çalışmada KAKS'lara GO takviyesinin viskozitede kayda değer bir artış meydana getirdiği ancak belirli bir oranın üzerinde katılaşma davranışını bozduğu tespit edilmiştir. GO takviyesinin KAKS'ı modifiye etmek için çok verimli bir takviye malzemesi olduğunu, hafif ve yüksek mukavemet özellikleri istenen durumlarda kullanımının uygun olacağı bildirilmiştir [99].



Şekil 2.26. Süspansiyon viskozitesinin GO takviyesi ile değişimi [99]

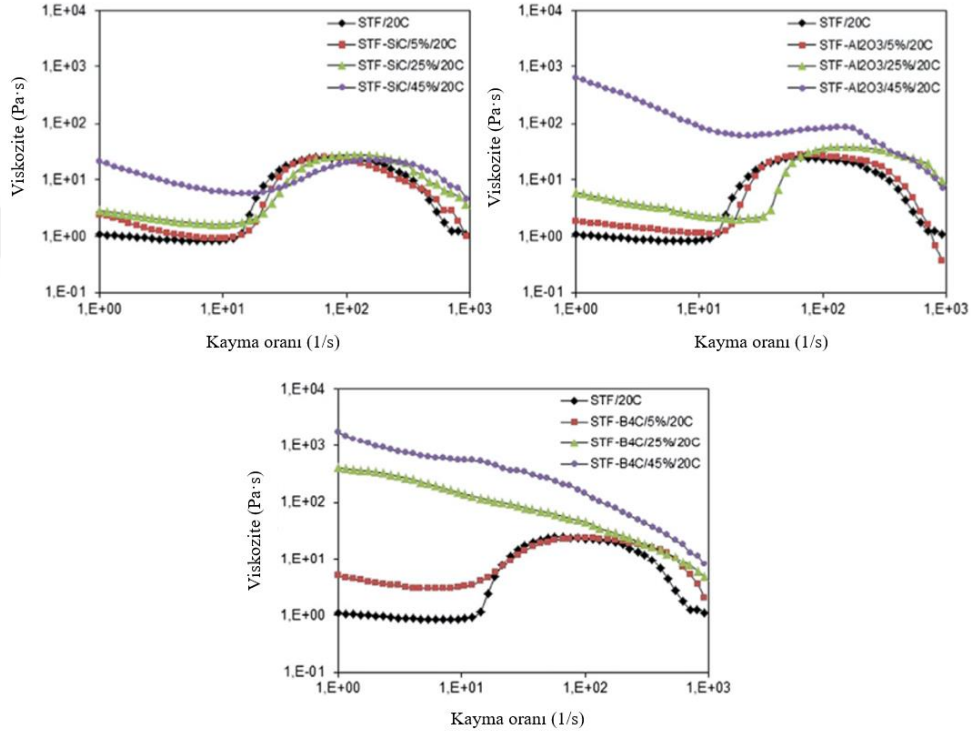
Laha ve Majumdar tarafından yapılan çalışmada 100 nm partikül büyüklüğüne sahip küresel silikanın %60-65 oranında kullanılarak PEG 200 ile KAKS üretilmiş ve daha sonra süspansiyona %0,05, %0,1, %0,2 ve %0,5 olmak üzere değişen oranlarda halloysite nanotüp (çapı 50-200 nm ve uzunluğu 200 nm - 1,3 μ m) eklenmiştir. Reolojik özellikler incelendiğinde Şekil 2.27’de görüldüğü üzere hem %60 hem de %65 silika oranına sahip KAKS’larda halloysite nanotüp ilavesinin kritik kayma oranını düşürdüğü ve viskozite profilini yükselttiği görülmüştür [100].



Şekil 2.27. Halloysite nanotüp takviyesinin süspansiyon viskozitesine etkisi [100]

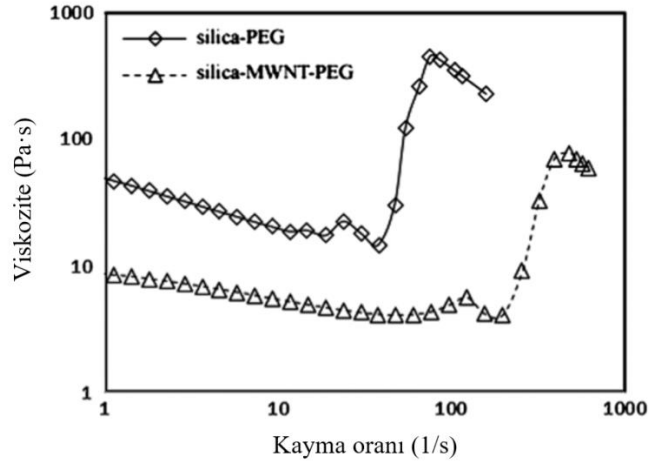
Gürgen vd. tarafından yapılan çalışmada kayma altında katılaştıran sıvılara silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bor karbür (B_4C) gibi üç farklı tipte katı partikül takviye edilerek üretilmiş çok katı fazlı KAKS’ların reolojik özellikleri araştırılmıştır. KAKS’lar Aerosil 90 silika partiküllerinin PEG 400 sıvı ortamında dağıtılmasıyla üretilmiştir. Tek katı fazlı KAKS üretiminde silika partikül oranı ağırlık %20 olarak seçilmiştir. Çok katı fazlı KAKS üretiminde

nanopartiküller ağırlıkla %5, %25 ve %45 oranlarında takviye edilmiştir. Şekil 2.28’de görüldüğü gibi nanopartikül takviyesi süspansiyonların viskozite profillerini yükseltmiştir. Viskozite profilini en çok yükselten takviye malzemesi B_4C olmuştur. SiC takviyesinin ise viskozite profiline en az yükselten malzeme olduğu tespit edilmiştir. Katılaşma mekanizmasını incelediğimizde ise SiC ve Al_2O_3 takviyelerinin süspansiyonlara eklendiği her oranda katılaşma davranışı görülürken B_4C takviyesinin sadece %5 eklendiği KAKS’larda katılaşma davranışı olduğu görülmüştür [101].



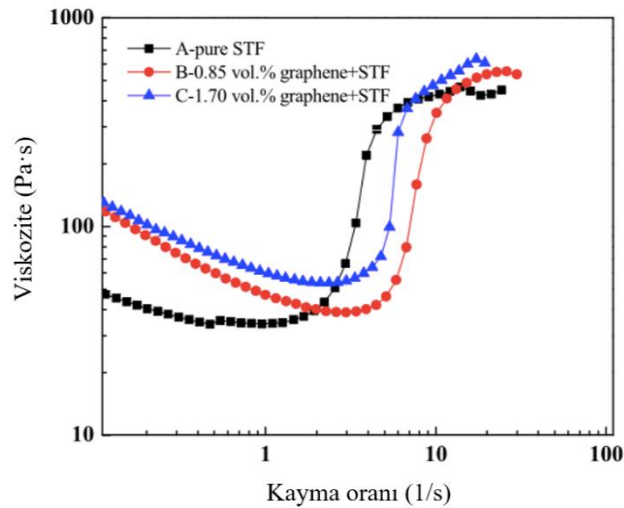
Şekil 2.28. Farklı seramik nanopartikül takviyelerinin süspansiyonların viskozitesinin kayma oranına göre değişimi [101]

Hasanzadeh vd. KAKS süspansiyonlarına çok duvarlı karbon nanotüp (KNT) takviyesinin reolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada ağırlıkça %44 oranında Aerosil 200 füm silika ve PEG 200 karıştırılarak KAKS üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak 10-20 nm çapında ve 30µm uzunluğunda KNT kullanılmıştır. KNT takviye oranı ağırlıkça %0,8 olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, silika-PEG süspansiyonunun viskozitesinin KNT’lerin eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Ayrıca KNT takviyesi kritik kayma oranını yükseltmiş katılaşmanın daha geç evrede meydana gelmesine neden olmuştur. Takviyeli ve takviyesiz KAKS’ların viskozite-kayma oranı grafiği Şekil 2.29’da verilmiştir [102].



Şekil 2.29. KNT takviyesinin süspansiyonun viskozitesine etkisi [102]

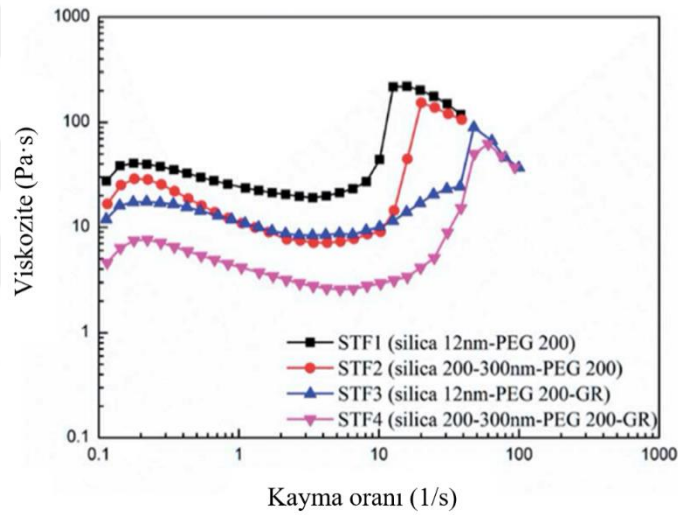
Tan vd. tarafından yapılan çalışmada grafen nanoplate (GNP) takviyesinin KAKS'ların reolojik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada tek katı fazlı KAKS üretimi için katı ortam olarak ağırlıkça %56 oranında 300 nm çapında küresel silika kullanılmıştır. Sıvı ortam olarak ise PEG 400 tercih edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan GNP hacim oranı %0,85 ve %1,7 olarak ayarlanmıştır. Anton-Paar MCR 301 gerilim kontrollü reometre kullanılarak 25 °C'de yapılmıştır. Şekil 2.30'da gösterilen sonuçlara göre GNP takviyesi tek katı fazlı KAKS'ın viskozite profilini yükseltmiş ancak kritik kayma oranını arttırmıştır. Buna göre GNP takviyesi KAKS'ların katılaşma mekanizmasını geciktirmiştir [103].



Şekil 2.30. Farklı oranlarda grafen takviyesinin süspansiyonların viskozitesine etkisi [103]

Wang vd. grafen nanoplate takviyesinin KAKS'ların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini iki farklı silika kullanarak ürettikleri süspansiyonlarda gözlemlemiştir. KAKS

üretiminde 12 nm ve 200-300 nm boyutlarında 2 farklı silika partikülü ayrı ayrı olarak PEG 200 ile mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Süspansiyondaki füme silika oranı ağırlıkça %20 olarak sabit tutulmuştur. Takviye malzemesi olarak 6-8 nm kalınlığında ve 5 µm genişliğinde GNP ağırlıkça %0,8 oranında KAKS'a eklenmiş ve mekanik olarak karıştırılarak homojenizasyon sağlanmıştır. Reolojik özellikler AR 2000 reometre kullanılarak yapılmıştır. Testler 40 mm çapında bir paralel plaka kullanılarak yapılmıştır. Plakalar arası boşluk 28 µm'de sabit tutulmuş ve testler 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.31'de verilen viskozite-kayma oranı grafiği incelendiğinde, GNP'lerin eklenmesiyle KAKS'ın katılma derecesinin azaldığı görülmüştür. GNP'lerin eklenmesinin PEG 200'deki füme silika nanopartiküllerin düzenini bozduğu ve böylece süspansiyonun viskozitesini azalttığı bildirilmiştir [104].



Şekil 2.31. Grafen takviyesinin süspansiyonları viskozitesine etkisi [104]

2.7.3. KAKS Uygulamaları

Sun vd. tarafından yapılan çalışmada ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kumaşlara KAKS uygulanmasının düşük hızlı darbe testlerine karşı koruyuculuğa olan etkisi araştırılmıştır. KAKS üretiminde silika partiküller etilen glikol (EG) içerisine yavaş yavaş eklenmiş ve süspansiyon homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Üretimden sonra kabarcıkların uzaklaştırılması için 24 saat beklenmiştir. Süspansiyondaki silika oranı %34, %36 ve %38 olarak ayarlanmıştır. Reolojik özellikler incelendiğinde kritik kayma oranına kadar kayma altında incelme ve kritik kayma oranı ötesinde de viskozitede ani bir artış gözlenmiştir. Silika içeriğinin artması kritik kayma oranını düşürmüştür ve viskozite profilini yükselmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinde üç karışım oranına sahip süspansiyon karşılaştırılmıştır. KAKS'lar yoğun yapısı sebebiyle ilk olarak etil alkol ile seyreltilmiş ve ardından ıslatma metodu kullanılarak

UHMWPE kumaşlara emdirilmiştir. 8 kat temiz, KAKS emdirilmiş ve EG emdirilmiş kumaş ve 16 kat temiz kumaş 150x150 mm boyutlarında kesilerek NIJ standartlarına göre düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde düşme yüksekliği 0,6 m olarak ayarlanmış ve vurucu uç olarak bıçak ve çivi uç tercih edilmiştir. Hem bıçak hem de çivi uç kullanılarak yapılan testlerde KAKS uygulaması UHMWPE kumaşların enerji sönümleme kapasitesini arttırmıştır. Süspansiyondaki katı partikül oranının artması enerji sönümlemesini arttıran bir etki yapmıştır. Çivi uç ile yapılan deneylerde KAKS emdirilmiş kumaşlarda süspansiyonu oluşturan parçacıkların darbe anında hızla bir araya gelerek fiberlerin hareketini kısıtladığı bildirilmiştir. Bıçak tehdidi altında ise ana hasar mekanizmasının kesilme olduğu ve KAKS emdirilmesinin UHMWPE kumaşların enerji sönümlemesine daha kısıtlı katkı yaptıkları tespit edilmiştir. EG emdirilmiş kumaşlar ise temiz kumaşlardan daha kötü performans sergilemiştir. Bunun nedeninin EG'nin yağlayıcı gibi davranarak iplikler arasındaki sürtünmeyi azaltarak vurucu ucun hareketini kolaylaştırdığı bildirilmiştir. Çivi uç için yapılan testlerde 16 kat kumaş kullanılarak üretilen numuneler, 8 tabakalı numunelere göre daha iyi performans sergilemiş ama bıçak uçlarda %36 ve %38 silika konsantrasyonuna sahip numuneler 16 kat temiz kumaştan daha başarılı olmuştur. 8 ve 16 kat temiz kumaş ve 8 kat KAKS / UHMWPE kompozit için esneklik ve kalınlık testleri yapılmış ve KAKS eklenmesinin UHMWPE kumaşların kalınlığında ve esnekliğinde hiçbir değişikliğe neden olmadığı bildirilmiştir [105].

Baharvandi vd. Twaron para-aramid kumaşa KAKS emdirilmesinin yarı statik delinme direncine olan etkisini araştırmıştır. KAKS üretimi için 12 ve 60 nm boyutlarındaki silika partiküller PEG 200 içerisine eklenerek 5700 d/dk'da süspansiyon homojen hale gelene kadar mekanik olarak karıştırılmıştır. Süspansiyondaki katı partikül oranı ağırlıkça %15, %25 ve %35 olarak tercih edilmiştir. KAKS'ların reolojik özellikleri Anton Paar MCR 300 reometre kullanılarak tespit edilmiştir. Reolojik test sonuçlarına göre, partikül boyutundaki azalmanın, süspansiyon viskozite profilinin ve kritik kayma oranının artmasına neden olduğu görülmüştür. Buna göre daha küçük silika partikülleri kullanılarak üretilen KAKS'ların başlangıç ve maksimum viskoziteleri artmış ancak katılaşma davranışı daha geç meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra her iki silika partikül türü ile üretilen KAKS'lar için partikül konsantrasyonun artması viskozite profilini yükseltmiş ve kritik kayma oranını düşürmüştür. Üretilen KAKS'ların kumaşa emdirilmesi için 152x152 mm boyutlarında kesilen kumaşlar 1'e 3 oranında etil alkol ile seyreltilmiş karışıma 2 dk boyunca daldırılmıştır. Kumaşlardaki etil alkolün uçurulması için 25 dk boyunca 60 °C sıcaklıktaki fırında kurutulmuştur. Temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşlara ASTM D6264'e göre yarı statik delinme testleri uygulanmıştır. 12 nm silikanın %15, %25 ve %35 ağırlık oranında kullanılarak üretildiği KAKS emdirilmiş kumaşlarda enerji sönümleme oranları sırasıyla 34,1, 37,2 ve 40,1 Joule olarak ölçülmüştür. 60 nm silikanın kullanıldığı numunelerde ise 32,4, 34,3 ve 35,2 Joule enerji sönümlenmiştir. Temiz kumaşın enerji

sönümlemesinin ise 14,3 Joule olduğu tespit edilmiştir. Twaron kumaşlara KAKS emdirilmesi partikül boyutlarında ve konsantrasyonlarda temiz kumaşa göre enerji sönümlemesi açısından faydalı olmuştur [106].

Xu vd. yumuşak vücut zırhlarında bıçaklanma direncini artırmak için KAKS kullanımını araştırmışlardır. KAKS üretimi sırasında silika partikül olarak Sigma-Aldrich firmasından tedarik edilen 12 nm ve 650 nm boyutlarında iki farklı silika kullanarak, silika partikül boyutunun KAKS'ların reolojik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. KAKS üretiminde silika partikül oranı ağırlıkça %20, %25 ve %30 olarak seçilmiştir. Sıvı ortam olarak PEG 200 kullanılmıştır. KAKS üretimi sırasında PEG 200 ve silika karışımı, yüksek hızlı mekanik karıştırıcı kullanılarak 6000 d/dk'da homojen hale gelene kadar karıştırılmış ve oluşan kabarcıkların giderilmesi için 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Reolojik ölçümler TA AR-G2 gerilim kontrollü reometre kullanılarak yapılmıştır. Kayma oranı 0,01 ile 1000 1/s aralığında gerçekleştirilmiştir. Reolojik ölçümler sonucunda her iki nanopartikül türü içinde silika konsantrasyonunun artmasının süspansiyonun viskozite profilini yükselttiği ve kritik kayma oranını düşürdüğü tespit edilmiştir. Silika partikül boyutu incelendiğinde ise daha büyük partiküllerin kullanıldığı KAKS'ların daha yüksek viskozite değerlerine sahip oldukları ve kritik kayma oranlarının daha düşük olduğu bildirilmiştir. KAKS'lar etil alkol ile seyreltilerek Twaron kumaşlara emdirilmiş ve 12 kat üst üste koyularak ağırlık düşürme test numuneleri hazırlanmıştır. Bıçaklama testi için Instron Dynatup 8200 ağırlık düşürme test cihazı kullanılmıştır. NIJ 0115.00 standardına göre yapılan testlerde vurucu uç olarak "S1" bıçak uç kullanılmıştır. Daha büyük silika partikül boyutuna ve daha yüksek ağırlık konsantrasyonuna sahip KAKS emdirilmiş panellerin, maksimum yük ve toplam enerji absorpsiyonu açısından daha iyi bıçak direnci performansı ile sonuçlandığı tespit edilmiştir. Çalışmada, 12 katmanlı kumaş paneller için temiz kumaşlarda darbe enerjisinin %20'sinin sönümlendiği, KAKS emdirilmiş kumaşların ise darbe enerjisinin en az %58'inin absorbe edildiği bildirilmiştir. Aynı alan yoğunluğu temelinde, KAKS emdirilmiş 12 katmanlı panellerin, 24 katmanlı işlenmemiş panelden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Panellerde KAKS kullanılması, bıçak darbesinin neden olduğu arka yüz deformasyonunu da önemli ölçüde azaltmıştır. Bu bulgular, bıçak darbesine karşı KAKS emdirilmiş paneller kullanıldığında, daha düşük ağırlık ve daha az hacimle daha koruyucu bıçaklı paneller elde etmenin uygulanabilirliğini göstermiştir [82].

Hasanzadeh vd. çok duvarlı karbon nanotüp (KNT) takviye edilmiş KAKS'ların yüksek modüllü polipropilen (HMPP) kumaşların delinme direnci performansına karşı etkisini incelemiştir. KAKS süspansiyonu hazırlamak için sıvı ortam olarak PEG seçilmiş ve 200 gr/mol moleküler ağırlığa sahip PEG 200 kullanılmıştır. Katı faz için ise 12 nm partikül büyüklüğüne ve 200 m²/gr yüzey alanına sahip füme silika tercih edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan KNT'lerin yaklaşık uzunluğu 30 µm ve çapı 10-20 nm'dir. Çalışmada silika partikül oranı

ağırlıkça %44 ve KNT oranı %0,8 olarak belirlenmiştir. Reolojik ölçümler Anton Paar MCR 300 gerilim kontrollü reometre kullanılarak 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Testlerde 25 mm çapında paralel plaka kullanılmış ve plakalar arası boşluk 1 mm olarak seçilmiştir. Yapılan reolojik ölçümler sonucunda her iki süspansiyonunda kayma altında katılma davranışı gösterdiği bildirilmiştir. KNT takviyesinin KAKS'ın viskozite profilini düşürdüğü ve kritik kayma oranını arttırdığı tespit edilmiştir. Takviyeli ve takviyesiz KAKS 150 gr/m² alansal yoğunluğa sahip düz dokuma HMPP kumaşlara emdirilmiş, iplik çekme ve yarı statik delinme testleri uygulanmıştır. İplik çekme testleri için 50 x 90 mm ölçülerinde kesilen kumaşlar iki uçlarından tutulmuş ve tek iplik çekme cihazının hareketli üst çenesine bağlanarak çekilmiştir. Çekme hızı 100 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Yarı statik delinme testleri ASTM F1342'ye göre yapılmıştır. Buna göre 100 x 100 mm olarak kesilen numunelere 9 mm çapında çelik küresel vurucu uç kullanılarak 50 mm/dk ile darbe uygulanmıştır. Sonuçlar hem iplik çekme hem de delinme testleri için, KAKS emdirilmiş kumaşların temiz kumaşlara göre daha başarılı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte KNT takviyesi reolojik ölçümlerde olduğu gibi KAKS'ların iplik çekme kuvvetini ve darbe sönümlene kabiliyetini azaltmıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde baskın hasar mekanizmasının vurucu ucun etkisiyle fiberlerin aralanması olduğu tespit edilmiştir. KAKS emdirilmiş kumaşların yarı statik delinme testlerindeki başarısının geliştirilmiş iplikler arası sürtünmeden kaynaklandığı bildirilmiştir [107].

Li vd. temiz ve KAKS emdirilmiş UHMWPE kumaşların bıçak ve çivi uç ile yapılan dinamik çarpma testlerinde enerji sönümlene mekanizmalarını incelemiştir. Çalışmada KAKS üretimi için 500 nm çapında küresel silika tozları ağırlıkça %38 oranında kullanılmıştır. KAKS'larda sıvı ortamın etkisini incelemek için PEG 200, PEG 400 ve EG kullanılmıştır. EG kullanılarak üretilen KAKS'lara dinamik darbe testlerinde kullanılmak üzere hacimce %2 ve %4 PEG 6000 ve PEG 10000 ilave katkı maddesi olarak eklenmiştir. Çalışmada bahsedilen özelliklerde toplam 7 farklı içeriğe sahip KAKS üretilmiştir. Reolojik ölçümler Physica MCR301 reometre kullanılarak yapılmıştır. Testler oda sıcaklığında 25 mm çapında plaka kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kayma oranı 1-100 1/s arasında seçilmiştir. Reolojik ölçümler incelendiğinde süspansiyonların düşük kayma oranlarında kayma incelenmesi ve yüksek kayma oranlarında katılma davranışı sergilediği görülmüştür. Ancak PEG 400 ile üretilen numunede hiçbir kayma oranında kayma altında incelenme davranışı görülmemiştir. Dispersiyon ortamının kimyasal bileşiminin değiştirilmesinin, viskoziteye karşı kayma hızı eğrisi üzerinde üç etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. İlk olarak, moleküler ağırlığın artması genellikle daha yüksek başlangıç viskozitesine yol açmıştır. İkincisi, dispersiyon ortamının moleküler ağırlığı arttıkça kayma altında katılma etkisi oluştuğunda KAKS'ın viskozitesi daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Dahası, KAKS'ın kritik kayma oranı, dispersiyon ortamının moleküler ağırlığı arttıkça önemli ölçüde azalmıştır. Bunun nedeni, dispersiyon ortamının daha yüksek moleküler ağırlığının daha

zayıf Brownian hareketine yol açması, dolayısıyla KAKS'daki denge mikroyapısının daha düşük kayma oranlarında kırılabilmesi olabileceği bildirilmiştir. Ayrıca, moleküler ağırlık arttıkça, dispersiyon halindeki silika partikülleri ile dispersiyon ortamı arasındaki hidrojen bağı miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Parçacıkların hareketi daha az sınırlıdır, bu nedenle hidrokümelerin daha kolay oluşturulabildiği ve daha düşük kayma oranlarında kayma altında katılma davranışı meydana geldiği bildirilmiştir. KAKS'lar 120 gr/m² alansal yoğunluğa sahip düz dokuma UHMWPE kumaşlara emdirilmiştir. Kumaş ölçüleri 150 x 150 mm olarak seçilmiştir. Testler NIJ 0115.00 standardına göre bıçak ve çivi uç ile yapılmıştır. Test yüksekliği 0,2 m, 0,4 m ve 0,6 m olarak seçilmiş vurucu uç arkasına asılan ağırlık 2,38 kg olarak ayarlanmıştır. Bıçak ve çivi uçların hasar mekanizmaların farklı olduğu bildirilmiştir. KAKS ile muamele edilmiş tüm numuneler, her iki düşme yüksekliğinde (0,4 m ve 0,6 m) temiz numuneye kıyasla enerji emiliminde bir miktar iyileşme sergilemiştir. EG bazlı numuneler tarafından sivri uç tehdidine karşı emilen darbe enerjisi, sırasıyla 0,4 m ve 0,6 m düşme yüksekliğinde temiz numuneye göre %28,1 ve %66,7 daha fazladır. Enerji absorpsiyonunun iyileştirilmesi, KAKS'daki partiküllerin hareketinden ve aralarındaki sürtünmeden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Bu şekilde, yerçekiminin potansiyel enerjisinin çoğunlukla iç enerjiye çevrildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, dispersiyon ortamının moleküler ağırlığı azaldıkça, çivi uç testi sırasında enerji absorpsiyonu artmıştır. PEG 200 bazlı numune ile karşılaştırıldığında, EG bazlı numunenin sivri uç tehdidine karşı soğurduğu darbe enerjisi 0,4 m düşme yüksekliğinde %10,4 ve 0,6 m düşme yüksekliğinde %25,2 daha fazla olduğu görülmüştür. Katkı maddeleri kullanılarak üretilen KAKS'ların emdirildiği numuneler incelendiğinde ise; PEG 6000 konsantrasyonu %4'e ulaştığında, bıçak çarpma tertibatına karşı bıçak testi sırasında emilen enerjinin, her iki düşme yüksekliğinde hiçbir katkı maddesi içermeyen numune tarafından sönmölen enerjiye kıyasla iyileştiği görülmüştür. PEG 10000 içeren örnekler, her iki konsantrasyonda da enerji emiliminde bir miktar gelişme sergilemiştir. %2 konsantrasyonda PEG 10000 içeren numunenin harcanan enerjisi, %4 konsantrasyonda PEG6000 içeren numuneden daha fazla olduğu için katkı maddesinin moleküler zincir uzunluğu, bıçağa dayanıklılık performansını artırmada önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bıçağa dayanıklılık performansının katkı maddeleri ile güçlendirildiği görülmüştür. KAKS / UHMWPE kompozitlerinin bıçak direncini iyileştirmede katkı maddelerinin rolünü açıklamak için iki yöntem tespit edilmiştir. Bir yandan katkı maddelerinin varlığının kumaşların alan yoğunluğunu arttırdığı, öte yandan moleküler zincir uzunluğu dispersiyon ortamından (EG) önemli ölçüde daha uzun olan katkı maddesi, silika partiküllerinin hareketini sınırlayabildiği, böylece sert partiküllerin daha kısıtlanabildiği ve bıçağın filamentleri kesmesini önlemeye yardımcı olabildiği bildirilmiştir [108].

Gürgen ve Kuşhan tarafından yapılan çalışmada silika ve polietilen glikol (PEG) bazlı süspansiyonlara farklı miktarda silisyum karbür (SiC) katkı maddeleri eklenerek çok katı fazlı

KAKS'lar üretilmiştir. Çok katı fazlı KAKS'ların reolojik özellikleri reolojik ölçümlerle araştırılmıştır. Çok katı fazlı KAKS ile muamele edilmiş Twaron kumaşlar üzerindeki balistik etkiler, 330 m / s çarpma hızına sahip bir tabanca ile kurşun çekirdekli mermiler kullanılarak incelenmiştir. KAKS emdirilmesinin sürtünme özellikleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için iplikler arası sürtünme ve yüzey sürtünme testleri yapılmıştır. KAKS üretimi 20 nm partikül büyüklüğüne ve 90 m²/gr yüzey alanına sahip silika partiküller ve 400 gr/mol moleküler ağırlığa sahip PEG 400 kullanılarak yapılmıştır. Süspansiyonlar %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere 4 farklı partikül oranı ile hazırlanmıştır. Çok katı fazlı KAKS'larda ise silika oranı %20 olarak sabit tutulmuş ve SiC takviye oranı %5, %25 ve %45 olarak seçilmiştir. KAKS üretiminden önce silika partiküller 150 °C'de 9 saat boyunca kurutulmuştur. Topaklanmanın önüne geçilmesi için PEG içerisinde silika partikülleri yavaş yavaş eklenmiş ve yüksek hızlı mekanik bir karıştırıcıyla homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Reolojik ölçüm test sonuçlarına göre tek katı fazlı KAKS'ların silika konsantrasyonunun süspansiyonların katılaşma davranışında önemli bir rol oynadığı görülmüştür. KAKS'ların katılaşmasının, taşıyıcı sıvıdaki partikül etkileşimlerinden kaynaklandığı ve karışımlarda daha yüksek miktarda silika partikülü kullanılırsa katılaşma davranışının artacağı bildirilmiştir. Öte yandan çok katı fazlı KAKS'larda ise SiC parçacıklarının, katılaşma mekanizması için bozucu etkiler sergilediği görülmüştür. Tek fazlı KAKS'ın katılaşma oranı, süspansiyonlar arasında en yüksek değere sahiptir. Çünkü karbür partikülleri, hidro-kümelerin içine yerleşerek ve süspansiyonlar boyunca genişlemelerini durdurmuştur. Buna ek olarak, karbürlerin eklenmesi, katılaşmanın tamamlanmasını daha yüksek kesme hızlarına kadar geciktirmiş ve böylece KAKS'ların katılaşma periyodunu uzatmıştır. Bu, hidro-kümelerin oluşumunu bloke eden ilave parçacıkların bozucu etkisine atfedilmiş ve bunun bir sonucu olarak, hidrodinamik kuvvetleri arttırmak ve katılaşmayı tamamlamak için daha yüksek kayma oranlarının gerektiği bildirilmiştir. Çalışma, KAKS'ın kumaşlar üzerindeki ana etkisinin iplikler arası sürtünmesini arttırmak olduğunu göstermiştir. Bu etki, balistik etkiler altında kumaşların sürtünme testi sonuçları ve arıza modları ile uyumludur. Buna ek olarak, alt fazların malzeme özellikleri, KAKS / kumaş yapılarının balistik performansında önemli bir rol oynar çünkü yüksek hız etkisi altında kuvvet aktarımı parçacık etkileşimleri yoluyla gerçekleştirilir. Ayrıca, katı parçacıkların konsantrasyonundaki artış süspansiyon boyunca kuvvet aktarımının ağlarını genişlettiği için kuvvet aktarımında süspansiyon yoğunluğunun önemli olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, KAKS işlemleri, özellikle çok katı fazlı olanlar, hedeflerin alan yoğunluğunu önemli ölçüde arttırdığı ve bu nedenle kumaş sistemlerinin kütle verimliliğinin balistik koşullar için performans kaybı sergilediği bildirilmiştir [109].

Majumdar vd. temiz ve KAKS emdirilmiş 3 boyutlu Technora kumaşların balistik atışlara karşı performansını incelemişlerdir. Çalışmada 720 denye Technora iplik kullanılarak 5 farklı 3B ortogonal kumaş dokunmuştur. KAKS üretimi için sıvı ortam olarak moleküler ağırlığı 200

gr/mol olan PEG 200 ve katı ortam olarak 100 nm çapında silika partikül kullanılmıştır. Süspansiyondaki katı partikül oranı %65 olarak seçilmiştir. Reolojik lmler Anton Paar MCR51 gerilim kontrollü reometre kullanılarak yapılmıştır. 25 mm paralel plaka kullanılmış ve plakalar arası boşluk 0,5 mm olarak ayarlanmıştır. Reolojik ölçümlerde sıcaklığın etkisini gözlemleyebilmek için testler 0  C, 10  C, 20  C ve 30  C'de yapılmıştır. 3B dokuma ortogonal yapılar normal 2B kumaşlardan daha kalın olduğundan, kumaşlar KAKS emdirmek için 15 dakika boyunca etanol (hacimce 1:4) içinde seyreltilmiş KAKS'a batırılmıştır. Daha sonra Mathis Lab Padder kullanılarak 2 bar basınçta ve 3 m/dk hızında numunelerin doldurulması gerçekleştirilmiştir. KAKS emdirildikten sonra 3 boyutlu kumaşlardan etanolü buharlaştırmak için sıcak hava fırınında 40 dakika kurutulmuştur. Deney numuneleri 8 kat Kevlar kumaş ve 1 kat 3B Technora olacak şekilde tasarlanmıştır. Kontrol grubu olması açısından 1 adet de 9 katlı Kevlar kumaş test edilmiştir. Balistik atış testleri NIJ 0101.06 ya göre 9 mm FMJ mermi kullanılarak 5 m mesafeden gerçekleştirilmiştir. Mermi hızının ölçülmesi için silah ve hedef arasına kronograf yerleştirilmiş ve arka yüzey izinin ölçülmesi içinde hedef arkasına içinde destek macunu bulunan kutu konulmuştur. Reolojik lmler incelendiğinde 0  C, 10  C, 20  C ve 30  C sıcaklıklarda kritik kesme hızı sırasıyla 15 s^{-1} , $39,5 \text{ s}^{-1}$, $66,8 \text{ s}^{-1}$ ve $94,8 \text{ s}^{-1}$ olduğu grlmştir. Bu durum silika partiküllerin sıkışmasının daha yüksek sıcaklıkta zorlaştığını ve dolayısıyla partiküllerin sıkışmasının daha yüksek kayma oranlarında mümkün olduğunu göstermiştir. En yüksek viskoziteye ulaşmak için kayma oranı artarken, sıcaklıktaki artışla maksimum viskozite azalmıştır. 0  C sıcaklıkta 52 s^{-1} kayma oranında 762 Pa.s'lik maksimum viskozite oluşurken 30  C sıcaklıkta 227 s^{-1} kayma oranında 126 Pa.s'lik maksimum viskozitesiye ulaşılmıştır. Yüksek sıcaklıkta partiküller arasındaki itme kuvvetleri arttıa kritik kayma oranının arttığını ve katılaşma oranının azaldığı bildirilmiştir. Dinamik sıcaklık taraması yardımıyla, silika konsantrasyonu kritik bir seviyeyi aştığında, sıcaklığın yükseltilmesinin, silika-PEG sisteminde bir jelleşme geçişini başlattığı tespit edilmiştir. KAKS ile muamale edilmesinden sonra, tek ve çift katmanlı 3B kumaşlar için darbe enerjisi absorpsiyonu artmıştır. Doldurma-bağlayıcı iplik oranı 4:1 olan KAKS emdirilmiş çift katmanlı 3 boyutlu dokuma kumaşlar tüm mermileri durdurmuştur. Yumuşak vücut zırhının başarılı tasarımı için kumaş yapısının ve KAKS'ın birçok rolünün olduğu bildirilmiştir. Bağlayıcı ipliklerin düzenlenmesi, 3B kumaşların balistik performansını etkilememiştir. Yumuşak zırh panellerinin geliştirilmesi için 3B dokuma kumaşlarla birden fazla Kevlar katmanı kullanılmıştır. Doldurma-bağlayıcı oranı 3:1 veya 4:1 olan saf ve KAKS emdirilmiş 3B kumaşlardan oluşan kumaş paneller, 430 m/sn hızda ateşlenen tüm mermileri durdurabilmiştir. Ayrıca, bu kumaşlar için arka yüz imzasının derinliği, kabul edilebilir sınır (44 mm) dâhilinde 31 ila 39 mm arasında değişmekte olduğu tespit edilmiştir. KAKS emdirilmiş 3B kumaş içeren panel, temiz 3B kumaşlar içeren kumaş panellerdekilere kıyasla daha az lif kırılması göstermiştir. Bu nedenle, 3 boyutlu kumaş yapısının KAKS ile

güçlendirilmesinin yumuşak vücut zırhı için yeni bir malzeme geliştirme olanağı sağlayabileceği bildirilmiştir [110].

Gürgen ve Kuşhan tarafından yapılan çalışmada yüksek performans kumaşlarının enerji sönmüleme performansını arttırmak için kullanılan kayma altında katılaştan sıvılara (KAKS) alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bor karbür (B_4C) tozları eklenerek kumaşların balistik koruma performansları incelenmiştir. KAKS üretiminde katı ortam olarak 20 nm boyutlu silika partiküller ve sıvı ortam olarak PEG 400 kullanılmıştır. Tek katı fazlı KAKS'larda silika partikül oranı %20 olarak sabit tutulmuştur. Çok katı fazlı KAKS üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 ve B_4C tozlarının ağırlık oranı %25 olarak seçilmiştir. Tek ve çok katı fazlı KAKS'lar etanol ile seyreltilerek kumaşlara emdirilmiştir. Emdirme işlemi sonraki etanolü buharlaştırmak için numuneler 79 °C fırında kurutulmuşlardır. Balistik testler için 200 x 200 mm boyutlarında kesilen 16 kat kumaşın üst üste koyulmasıyla test numuneleri oluşturulmuştur. Reolojik ölçümler 0-1000 1/s kayma oranında Anton Paar MCR301 gerilim kontrollü reometre kullanılarak yapılmıştır. Balistik testler NIJ 0101.06 standardında belirtilen destek çamuru dolu bir kasa önüne yerleştirilmiş ve her test numunesine üçer atış yapılmıştır. Hedef ve silah arasına yerleştirilen kronograf ile mermi çarpma hızları kaydedilerek çarpma enerjileri hesaplanmıştır. Reolojik sonuçlar incelendiğinde; KAKS ve KAKS+ Al_2O_3 süspansiyonlarının kayma altında katılma davranışı gösterirken KAKS+ B_4C süspansiyonu sadece incelleme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. KAKS+ B_4C karışımının katılma gösterememesi seramik tanelerinin katılmayı sağlayan hidrokümler arasına yerleşerek hidrokümlerin süspansiyon içinde yayılmasını engellemesinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Seramik tozlarının bu bozucu etkisi KAKS+ Al_2O_3 karışımında da görülmüştür. Buna göre Al_2O_3 tanecikleri yapıda hidroküme faaliyetlerini kısıtlayan şekilde görev aldığı belirlenmiştir. KAKS'ın katılması için gereken kayma oranı 30,04 1/s iken bu oran KAKS+ Al_2O_3 karışımında 18,88 1/s'e düşmüştür. Her iki seramik tozunun da karışımın viskozite profilini önemli ölçüde yükselttiği bildirilmiştir. Bu durum süspansiyondaki katı partikül oranındaki artıştan dolayı yükselen yoğunlukla açıklanmıştır. Balistik test sonuçlarına göre tek katı fazlı KAKS uygulamasının temiz kumaşa göre sönmülenen enerji miktarını arttırdığı, KAKS yapısına eklenen Al_2O_3 ve B_4C tozlarının ise enerji sönmülemede ilave bir mekanizma oluşturarak balistik performansı iyileştirdiği tespit edilmiştir. Kumaşlara yapılan KAKS uygulamalarında hem tek katı fazlı hem de çok katı fazlı KAKS ilave edilen numunelerde, temel koruma mekanizmasının kumaş yüzeyi ve iplikler arasındaki sürtünmenin artmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Takviye edilen seramik tanecikleri fiberler ve iplikler arasına yerleşerek fiber ve ipliklerin birbirleri arasındaki tribolojik sistemde üçüncü madde olarak görev aldığı tespit edilmiştir. İplik veya fiberlerin birbiri üzerinde hareketleri sırasında bu taneciklerin fiberleri birbirine bağlayıp ilave bir enerji sönmüleme mekanizması oluşturduğu bildirilmiştir. Reolojik özellikler açısından incelendiğinde ise kayma

altında katılma davranışının balistik testlerdeki enerji sönümleme performansına doğrudan bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir [111].

Chatterjee vd. tarafından yapılan çalışmada Kevlar katmanları arasına sıkıştırılmış birbirine bağlı kanallara sahip 3B cam fiber kullanan yeni tip sandviç kompozit panellerin balistik darbe karşısındaki enerji sönümleme performansları incelenmiştir. Cam fiber kumaşlar kullanılarak hazırlanan 3B kumaşlar 10 x 10 cm boyutunda 3 tip olacak şekilde hazırlanmıştır: Bunlardan biri içi boş tutulmuş, ikincisi PEG 200 ile doldurulmuş ve üçüncüsü 600 nm silika / PEG KAKS ile doldurulmuştur. Sandviç kompozit panellerin üretimi sırasında 3B cam fiberlerin alt ve üst katmanına 185 gr/m² alansal yoğunluğa sahip 4 kat Kevlar kumaş yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi Araldite epoksi yapıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Panellerin çekirdeği, malzemenin enerji dağılımını iyileştirmedeki etkisini incelemek için moleküler ağırlığı 200 gr/mol (PEG 200) olan polietilen glikol içinde dağılmış yüksek performanslı 600 nm küresel silika bazlı KAKS ile doldurulmuştur. Süspansiyondaki katı partikül oranı %65 olarak seçilmiştir. Paneller 9 mm çapında bir mermi kullanılarak NIJ 0101.06 standardına göre balistik darbeye tabi tutulmuştur. KAKS dolgulu 3B-Kevlar sandviç panellerin darbe enerjisinin %96,3'ünü sönümlediği tespit edilmiştir. PEG ile doldurulmuş çekirdek için, %81,3'lük bir enerjiyi sönümleyebilirken, içi boş sandviç panel, enerjinin yalnızca %56,3'ünü sönümleyebilmiştir. 3B cam fiber ve 4 katmanlı Kevlar tarafından sönümlenen enerji miktarının, sandviç kompozit panellerden çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. KAKS içeren sandviç kompozit panellerin, içi boş sandviç kompozit panellere göre %61,26 daha fazla enerji sönümlediği bildirilmiştir [112].

Arora vd. tarafından KAKS işleminin etkisi, emdirilen dokuma kumaşların yapısal özellikleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla 400 denye ve 1350 denye doğrusal yoğunluklu ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) iplikler kullanılarak farklı kumaş yerleşimli düz dokuma kumaşlar üretilmiştir. 400 denye iplikten 25 x 25, 30 x 30, 35 x 35, 40 x 40, 45 x 45, 50 x 50 ve 55 x 55 1/inç olmak üzere 7 farklı lineer yoğunluğuna sahip kumaş dokunmuş ve alan yoğunlukları sırasıyla 100, 120, 135, 150, 170, 195, 220 gr/m² olmuştur. 1350 denye iplikten 22,5 x 22,5, 25 x 25, ve 27,5 x 27,5 1/inç ölçülerinde 3 farklı lineer yoğunlukta kumaş dokunmuş ve alan yoğunluklarının 300, 340 ve 375 gr/m² olduğu tespit edilmiştir. KAKS üretimi için su içerisinde çözülmüş halde 100 nm çapında silika partikül (ağırlıkça %40) kullanılmıştır. Silika-su karışımı süspansiyon oranı ağırlıkça %65 (silika:PEG, 65:35) olacak şekilde PEG 200 ile 60 °C su banyosunda suyu tamamen buharlaştırıp ve karışım homojen hale gelinceye kadar ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. KAKS'ların reolojik karakterizasyonu için Anton Paar Physica MCR 51 stres kontrollü reometre kullanılmıştır. Süspansiyon, 25 mm (üst plaka) ve 50 mm (alt plaka) çaplarına sahip iki paralel plaka arasına, 0,5 mm'lik bir boşlukla ayrılmış olarak yerleştirilmiş ve ölçümler 5 °C, 15 °C ve 25 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 1 ile 1000 s⁻¹ kayma oranı aralığında yapılmıştır. KAKS süspansiyonları 1'e 4 oranında etil alkol ile

seyreltilerek kumaşlara emdirilmiştir. Daha sonra etil alkolün buharlaştırılması için 90 °C sıcaklıkta 30 dk boyunca fırında kurutulmuştur. KAKS emdirilmiş kumaşlara iplik çekme ve dinamik darbe testi uygulanmıştır. İplik çekme testi, 16x12 cm boyutların kesilen kumaşlara Tinius Olsen H5KS çekme test makinesinde 500 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Dinamik darbe testi, herhangi bir kumaş numunesi tarafından emilen darbe enerjisinin kapsamını ölçmek için ASTM D3763'e göre gerçekleştirilmiştir. Her türden hem temiz hem de KAKS ile muamele edilmiş kumaşlar için her biri 16 x 16 cm boyutunda kesilmiş ve CEAST Fractovis Plus darbe test cihazının iki lastik kavrayıcı dairesel çenesi arasına yerleştirilmiştir. Toplam darbe enerjisi 201 J olacak şekilde test hızı 4,5 m/sn olarak ayarlanmıştır. Testler 19,97 kg ağırlıkla bağlanmış 13 mm çapında yarı küresel başlıklı bir çarpma tertibatı ile yapılmıştır. Reolojik test sonuçları incelendiğinde düşük kayma oranlarında kayma oranının artmasıyla viskozite azalmış, yani kayma incilmesi davranışı gözlenmiştir. Bununla birlikte, kritik kayma oranına ulaşıldığında, viskozite keskin bir şekilde artmış ve kayma altında katılaşma davranışı meydana gelmiştir. Tüm sıcaklıklarda aynı eğilim oluşmuştur. Bununla birlikte sıcaklığın, kritik kayma oranının yanı sıra tepe viskozitesini de etkilediği bildirilmiştir. Sıcaklık yükseldikçe kritik kayma oranı artarken tepe viskozite azalmıştır. Kritik kayma oranı ve tepe viskozitesi 5 °C sıcaklıkta sırasıyla 20,8 s⁻¹ ve 104 Pa.s, 15 °C sıcaklıkta sırasıyla 35.5 s⁻¹ ve 66 Pa.s ve 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 60.6 s⁻¹ ve 49.4 Pa.s olduğu bildirilmiştir. 1350 denye iplik ile dokunan kumaşlar için iplik çekme kuvvetinin, kumaşın lineer yoğunluğundaki artışla artan bir eğilim izlediği (20,29 N, 40,15 N ve 89,91 N) bildirilmiştir. Her bir kumaş yerleşim seviyesi için, KAKS ile muamele edilmiş muadili, KAKS emdirme nedeniyle iplikler sürtünmesine olan artışını doğrulayan, muazzam derecede daha yüksek iplik çekme kuvveti (152,55 N, 211,75 N ve 278,73 N) sergilediği görülmüştür. 400 denye iplik ile dokunan kumaşlar için de kumaş yerleşiminin artmasıyla iplik çekme kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. İplikler bu durumda çok ince olduğundan, iplikler arasındaki temas alanı 1350 denye ipliğe kıyasla çok daha düşüktür ve bu nedenle çekme kuvvetinin, aynı kumaş yerleşimi olan (25 × 25) 1350 denye ipliğe (40,15 N) kıyasla çok düşük (1,88 N) olduğu bildirilmiştir. 400 denye kumaşlar için KAKS emdirilmesi sonucu iplik çekme kuvvetindeki artış oranı da 1350 denye iplikten dokunan kumaşlardakine benzer bir model izlemiştir. KAKS işleminden sonra iplik çekme kuvveti 25 × 25, 30 × 30, 35 × 35, 40 × 40, 45 × 45, 50 × 50 ve 55 × 55 kumaş yerleşimi için sırasıyla %227, %458, %408, %347, %173, %103 ve %28 oranında artmıştır. Kumaşın lineer yoğunluğu düşük olduğunda, çözgü ve atkı iplikleri arasındaki geçiş noktaları sayısının da düşük olduğu ve bu nedenle daha düşük lineer yoğunluğa sahip kumaştan bir ipliği çekmek için daha az kuvvet gerektiği bildirilmiştir. Böyle bir kumaşın KAKS ile işlenmesinde, iplikler arası sürtünmedeki ve dolayısıyla iplik çekme kuvvetindeki artışın önemli ölçüde yükseleceği belirtilmiştir. Öte yandan, kumaş lineer yoğunluğu yüksek olduğunda, geçiş noktalarının sayısı da yüksektir ve bu da kumaşı sağlamlaştırır. KAKS ile muamele edilmesi

iplikler arası sürtünmeyi, kumaş yapısının kendine has sertliğinden dolayı kısıtlı oranda arttırabildiği tespit edilmiştir. Dinamik darbe test sonuçları incelendiğinde 1350 denye iplikten dokunan kumaşlar için temiz kumaşlar tarafından darbe enerjisi emiliminin, çarpma tertibatıyla temas halinde olan birincil iplikler ve enerji emilimine katılan ikincil iplikler tarafından gerçekleştirildiği ve kumaşın lineer yoğunluğundaki artışla arttığı tespit edilmiştir. Bu kumaşların KAKS ile işlenmesi: $22,5 \times 22,5$, 25×25 ve $27,5 \times 27,5$ lineer yoğunluğa sahip kumaşlar için darbe enerjisi sönümle miktarlarını sırasıyla %27, %55 ve %59 oranında arttırmıştır. 400 denye iplikten dokunan kumaşların dinamik darbe test sonuçlarında ise en seyrek kumaş yapısı olan 25×25 1/inç hariç diğer tüm dokumalarda KAKS ile muamele edilmesinin darbe enerjisi sönümleme miktarını azalttığı bildirilmiştir. Bu durumun temiz kumaşların zaten bir inç² alanda en az 800 çapraz nokta ile çok sıkı yapılara sahip olmasına ve içlerindeki iplikler arası sürtünmenin yeterince yüksek olmasına bağlanabileceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, KAKS'ın olumlu etkisinin kumaş yerleşimi ve iplik doğrusal yoğunluğu gibi kumaşın yapısal parametrelerine bağlı olduğu bildirilmiştir [113].

Lu vd. tarafından yapılan çalışmada KAKS emdirilmiş aramid kumaşların tüfek ile gerçekleştirilen balistik testlerdeki performansı incelenmiştir. KAKS üretimi için partikül büyüklüğü 40 nm ve spesifik yüzey alanı $50 \text{ m}^2/\text{g}$ olan Aerosil OX50 füme silika ve PEG 200 kullanılmıştır. Süspansiyondaki katı partikül oranı ağırlıkça %20, %25 ve %30 olarak seçilmiştir. KAKS'ların reolojik özellikleri AR-G2 gerilim kontrollü reometre kullanılarak tespit edilmiştir. Ölçümler sırasında 20 mm çapında paralel plaka kullanılmış ve plakalar arası boşluk 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Tüm testler 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Kayma oranı $1-120 \text{ s}^{-1}$ olarak seçilmiştir. Reolojik test sonuçları incelendiğinde tüm süspansiyonlar için düşük kayma oranlarında kayma incelmeleri ve kritik kayma oranının ötesinde viskozitede ani bir yükseliş görülmüştür. Süspansiyondaki katı partikül oranının artması viskozite profilini arttırmış ve kritik kayma oranını düşürmüştür. Reolojik test sonuçlarına göre en yüksek viskozite profili %30 silika oranına sahip süspansiyonda görülmüş ve bu süspansiyon Twaron kumaşlara emdirilmiştir. Emdirme işlemi sırasında KAKS'ın viskozitesini azaltmak için 1:1 oranında etil alkol ile seyreltilmiştir. Ardından $120 \times 120 \text{ mm}$ ve $120 \times 200 \text{ mm}$ boyutlarında kesilen kumaşlar seyreltilmiş çözeltiye batırılarak emdirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Emdirme işleminden sonra etanolün buharlaştırılması için 80°C 'de 8 saat fırında kurutulmuştur. KAKS emdirme işleminin iplikler arası sürtünme kuvveti üzerindeki etkisini görmek için 100 mm/dk hız ile iplik çekme testi uygulanmıştır. KAKS emdirilmiş kumaşların iplik çekme kuvveti temiz kumaşa göre 1,61 kat daha yüksek çıkmıştır. Balistik testler 5,5 mm çapında ve 1 gr ağırlığında mermi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler 1 ve 10 tabakalı olarak hazırlanmıştır. Merminin hedefe çarpma hızı ve numuneden çıktıktan sonra hızı kayıt altına alınmıştır. Balistik test sonuçları incelendiğinde; tek katlı numunelerde KAKS emdirilmiş numunenin temiz kumaşa göre enerji

sönümlemesinin %10,3 oranında arttığı bildirilmiştir. 10 katlı kumaşlarda ise KAKS emdirilmiş numunenin enerji sönümleme oranı temiz kumaşa göre %28,4 daha kötü çıkmıştır. Balistik test sonuçları; merminin enerjisini sönümlemek için kumaşlara KAKS emdirilmesinin tek katlı numunelerde fayda sağlayabilse de çok katlı yapılarda panelin artan yapısal karmaşıklığından dolayı 10 katlı numunelerin başarısız olduğunu göstermiştir. Kumaşlara KAKS emdirmiş işleminin, bu çalışmada kullanılan darbe hızı aralığı içinde enerji emilimi açısından balistik performansı iyileştirmediği bildirilmiştir. Çalışmada KAKS'ın katılma özelliği nedeniyle iplikler arası sürtünmeyi önemli ölçüde arttırdığı ve böylece ipliklerin hareketi büyük oranda kısıtlanmış olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun birincil ipliklerin daha erken hasar görmesine ve kırılma olasılığının arttırmasına neden olacağı bildirilmiştir [114].

Wang vd. tarafından yapılan çalışmada farklı iklim şartlarındaki özelliklerini inceleyebilmek için -15 °C ile 35 °C arasındaki sıcaklıklarda KAKS'ların reolojik özellikleri ve iplikler arası sürtünme özellikleri araştırılmıştır. KAKS üretiminde katı ortam olarak monodispers polistiren (PS) mikroküreleri ve sıvı ortam olarak ise PEG 200 kullanılmıştır. Süspansiyon hazırlama işleminde ilk olarak PS mikroküreleri etanol ile seyreltilmiş ardından karışıma PEG 200 eklenmiştir. Karıştırma işlemi ultrasonik bir karıştırıcı kullanılarak yaklaşık 48 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. KAKS'lardaki katı partikül oranı %40, %45, %50 ve %55 olarak seçilmiştir. Reolojik ölçümler Anton Paar MCR 301 gerilim kontrollü reometre kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde 25 mm çapında paralel plaka kullanılmış ve plakalar arası boşluk 0,1 mm olarak sabit tutulmuştur. Reolojik ölçümler sıcaklığın etkisini gözlemleyebilmek için -15 °C ila 35 °C arasında yapılmıştır. Reolojik ölçüm sonuçlarına göre tüm süspansiyonlarda düşük kayma oranlarında incelleme davranışı görülmüştür. Ağırlıkça %40 ve %45 süspansiyonlar için viskoziteler nispeten karardır ve kritik kayma oranları belirlenememiştir. Süspansiyondaki PS mikrokürelerinin artmasıyla %50 ve %55 katı partikül oranına sahip KAKS'larda ise kritik kayma oranının aşılmasıyla viskozite ani bir şekilde yükselir. Daha sonra viskozite tekrar düşer. Buna göre viskozite-kayma oranı grafiği düşük kayma oranlarında incelleme, kritik kayma oranının ardından katılma ve son olarak tekrar incelleme olmak üzere 3 bölgeden oluşur. Süspansiyondaki katı partikül oranı arttıkça kritik kayma oranında belirgin bir azalış görülmüştür. Sıcaklığın reolojik özelliklere etkisini incelemek için yapılan deneylerde %55 katı partikül oranına sahip numune tercih edilmiştir. Reolojik ölçümler -15 °C, -5 °C, 5 °C, 15 °C, 25 °C ve 35 °C'de yapılmıştır. Tüm süspansiyonlar kayma altında katılma davranışı göstermiştir. Sıcaklığın azalmasıyla viskozite profili ciddi oranda yükselmiştir. -15 °C'deki maksimum viskozite değeri 25 °C oda sıcaklığında yapılan deneydeki değerden yaklaşık 20 kat yüksek çıkarak 2200 Pa.s'ye ulaşmıştır. Kritik kayma oranı da sıcaklığın azalmasıyla önemli ölçüde düşmüştür. Mikroküreler arasındaki Brownian hareketlerin sıcaklıktan etkilendiği, buna bağlı olarak düşük sıcaklıklarda kümelenmenin daha kolay gerçekleştiği bildirilmiştir. KAKS'ların farklı sıcaklıklarda iplikler

arası sürtünme kuvvetine olan etkisini inceleyebilmek için iplik çekme testleri yapılmıştır. Düz dokuma Kevlar kumaşlara ağırlıkça %31,55 oranında KAKS emdirilmiştir. İplik çekme testleri Instron çekme test cihazında tek bir ipliğin hareketli üst çeneye bağlanarak yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cihazın alt çenesi sabit tutulmuş ve testlerde tek iplik kumaş içinden tamamen çıkarılıncaya kadar ölçüm yapılmıştır. İplik çekme testi, farklı sıcaklıklarda temiz Kevlar kumaşlara kıyasla KAKS'ların etkisini incelemek için 5 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Temiz Kevlar kumaşların maksimum çekme kuvveti 25 °C'de 2,10 N'dur ve diğer numunelerin farklı sıcaklıklardaki değerleri biraz daha düşüktür. İplikler arasındaki etkileşimin yüksek sıcaklıktan etkilendiği ve bu durumun iplikler arası sürtünmenin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir. Özellikle 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklık ipliklerin daha sert hale geldiği ve ipliklerin temas alanlarının zayıflayarak iplikler arası sürtünmenin azaldığı tespit edilmiştir. KAKS ile muamele edilmiş Kevlar kumaşların maksimum çekme kuvveti 15 °C'de 3,89 N'dur ve diğer sıcaklıklardaki numuneler ile arasındaki önemli bir fark görülmemiştir. KAKS emdirilmiş kumaşların ortalama çekme kuvveti temiz kumaşlara göre yaklaşık %95,97 daha yüksektir. KAKS'ların iplikler arası sürtünme için etkili bir artışa sebep olduğu ve çekme hızının kayma altında katılaşmayı sağlayamayacak kadar düşük olduğundan sıcaklığın etkisinin açık olmadığı bildirilmiştir. Kumaşlara KAKS emdirilerek iplik çekme kuvvetinin artmasındaki temel nedenin süspansiyondaki mikrokürelerin fiberler arasına girerek sürtünmeyi arttırmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [115].

Liu vd. KAKS'ların reolojik davranışları ile darbe direncini arttırmadaki etkileri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu amaçla KAKS emdirilmiş ve temiz kumaşlara iplik çekme ve balistik testler uygulanmıştır. Çalışmada balistik kumaş olarak 227,5 g/m² alansal yoğunluğa sahip Kevlar kumaş kullanılmıştır. Darbe direncinde kayma altında katılaşma davranışlarının etkisini görebilmek için KAKS üretiminde 2 farklı silika ve 2 farklı PEG kullanılmıştır. Katı ortam olarak 100 nm ve 650 nm partikül büyüklüğüne sahip silika partikül ve sıvı ortam olarak ise 200 ve 400 gr/mol moleküler yoğunluğa sahip polietilen glikol kullanılmıştır. KAKS üretimleri iki gruba ayrılmıştır. A grubu olarak adlandırılan grupta 100 nm silika partikül ile PEG 200 kullanılarak katı partikül oranı %15, %20 ve %25 olacak şekilde üretilmiştir. B grubunda ise katı ortam olarak 650 nm silika partikül sıvı ortam olarak PEG 200 ve PEG 400 karışımı (ağırlıkça 1:2 olacak şekilde) kullanılmıştır. B grubundaki KAKS'larda katı partikül oranı %70, %72 ve %75 olarak seçilmiştir. Reolojik özellikler Anton Paar MCR 302 reometre kullanılarak belirlenmiştir. Testler sırasında kayma oranı 0,1 ile 5000 s⁻¹ arasında tutulmuştur. Reolojik test sonuçları incelendiğinde PEG'lerin tek başlarına Newtonyan davranış sergiledikleri ve silika takviyesiyle Newtonyan olmayan özellik gösterdikleri bildirilmiştir. Silika-PEG süspansiyonlarının hepsi kayma altında katılaşma davranışı göstermiştir. Düşük kayma oranlarında ilk olarak kayma altında inceleme ve kritik kayma oranından sonra viskozitede ani bir artış görülmüştür. Kayma oranının artmaya

devam etmesiyle beraber son olarak viskozite önemli ölçüde düşmüştür. Her iki grup KAKS içinde katı partikül oranı arttıkça viskozite profilinin arttığı ve kritik kayma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Öyle ki 650 nm partikül kullanılarak üretilen KAKS'ların kritik kayma oranları $0,6 \text{ s}^{-1}$ - $3,2 \text{ s}^{-1}$ arasında değişirken 100 nm silika partikül kullanılarak üretilen KAKS'larda bu oran 169 s^{-1} - 627 s^{-1} arasında meydana gelmiştir. Bu durum partikül boyutuyla ters orantılı olarak değişen Brownian kuvvetinin etkisine atfedilmiştir. Daha büyük partiküllere sahip süspansiyonlar için, süspansiyonlardaki Brownian gerilimleri çok daha küçüktür ve bu da daha küçük kayma gerilmeleri ile bunların üstesinden gelinmesini kolaylaştırdığı bildirilmiştir. Balistik testlerde 65 mm kalibreli bir gaz tabancası (gas gun) kullanılmıştır. Titanyum alaşımlı mermi çekirdeği alüminyum bir sabot yardımıyla hedefe doğru itilmiştir. Sistemde kullanılan gazın sıkıştırılması ile basınçlandırılan hava itici güç olarak kullanılmıştır. Mermi hızı hava basıncı ile ayarlanmıştır. Tabanca ile hedef arasına kurulan hız ölçer ile mermi hızı belirlenmiştir. Test sırasında yüksek hızlı kamera ile kayıt yapılmıştır. Test sırasında kumaş hareketini engellemek için kumaş, metal bir fikstüre sabitlenmiştir. Balistik test sonuçları incelendiğinde A grubu KAKS emdirilen kumaşlarda, en başarılı numunenin %20 katı partikül oranına sahip KAKS emdirilmiş numune olduğu ve temiz Kevlar kumaşa (209 Joule) göre %56,6 oranında daha fazla enerji sönümlediği tespit edilmiştir. %25 katı partikül oranına sahip KAKS ile muamele edilen kumaş ise temiz kumaşa göre yaklaşık %51,1 daha çok enerji sönümlediği bildirilmiştir. Bunun aksine, B grubundaki KAKS emdirilen edilen tüm kumaşlar temiz kumaşlardan daha kötü performans göstermiştir. Buna göre KAKS emdirilmesinin Kevlar kumaşın darbe direncini arttırmadığı bildirilmiştir. Reolojik özelliklerdeki önemli farklılıklar, özellikle kritik kayma oranı ve katılma süresi göz önüne alındığında, KAKS'ın kullanacağı sistemin potansiyel darbe yüküne uygun olması gerektiği ve reolojik özellikteki bir uyumsuzluğun etki sürecini olumsuz etkileyebileceği bildirilmiştir. Çalışmada hava basıncı değiştirilerek farklı hızlardaki mermi atışlarında KAKS emdirilmiş kumaşlar incelenmiştir. B grubu KAKS'ların Kevlar kumaşa emdirildiği numunelerde mermi hızı 40-55 m/sn aralığında olduğu durumlarda enerji sönümleme seviyesinin temiz kumaş ile benzer olduğu bildirilmiştir. Mermi hız aralığı 55-85 m/sn aralığında ise KAKS emdirilmesinin, temiz Kevlar kumaşların enerji sönümleme seviyesini düşürdüğü tespit edilmiştir. B grubu KAKS ile muamele edilmesi Kevlar ipliklerinin sert ve kırılğan hale gelmesine neden olduğu ve iplikler arasındaki sürtünmenin aşırı derecede artmasıyla fiberlerin, merminin enerjisini sönümlemeye katkı sağlayamadan kırıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı enerji tüketimine karışan iplik sayısının azaldığı ve fiber kopmasıyla ipliklerin uzunluğu kısaldığı, buna bağlı olarak da KAKS-Kevlar numunelerinin balistik sınırlarının ve enerji sönümleme kapasitelerinin düştüğü bildirilmiştir [116].

Arora vd. KAKS emdirilmiş UHMWPE kumaşlardan oluşturulan vücut zırh sistemlerinde oryantasyon açısının enerji sönümlemeye etkisini incelemiştir. Çalışmada Spectra, Kevlar 802F

ve Kevlar 363 2S olmak üzere 3 farklı kumaş kullanılmıştır. KAKS üretimi için 100 nm silika partikül ve 200 gr/mol moleküler ağırlığa sahip polietilen glikol tercih edilmiştir. Süspansiyondaki katı partikül oranı ağırlıkça %65 olarak seçilmiştir. KAKS'ların reolojik özellikleri Anton Paar Physica MCR 51 stres kontrollü reometre kullanılarak belirlenmiştir. Test sırasında üst plaka (25 mm çap) ile alt plaka (50 mm çap) arasındaki boşluk 0,5 mm olarak ayarlanmıştır. KAKS'ın viskozitesinin sıcaklıkla değişimini görebilmek için deneylerin 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C olmak üzere farklı sıcaklıklarda 1 s^{-1} ile 1000 s^{-1} arasında geniş bir kayma oranında aralığında yapıldığı bildirilmiştir. KAKS'ların tüm sıcaklıklarda düşük kayma oranlarında viskozitenin azaldığı yani kayma incilmesi davranışı görüldüğü bildirilmiştir. Bu durum kritik kayma oranına kadar devam etmiş ve bu noktanın ardından viskozite aniden yükselmiştir. Süspansiyonun viskozitesi maksimum noktaya ulaştıktan sonra tekrar düşmeye başlamıştır. Bu durumun literatürde karşılaşılan KAKS'larda tipik hale gelen incelme-katılaşma-incelme fenomeni olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın artması ile beraber kritik kayma oranının azaldığı ve viskozite profilinin yükseldiği gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda kolloidal bir süspansiyondaki parçacıkların Brownian hareketinin arttığı ve bu nedenle hidroküme oluşumun zorlaştığı bildirilmiştir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla PEG'in viskozitesinin azaldığı ve buna bağlı olarak silika partikülleri etrafında oluşan solvasyon tabakasının kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun silika partikülleri arasındaki etkili mesafenin artmasına ve partiküllerin itme kuvvetini aşabilmeleri ve katılaşabilmeleri için gereken kümeleri oluşturmak için daha yüksek kayma oranlarına çıkılmasına neden olduğu bildirilmiştir. KAKS'lar 30 x 30 cm boyutlarında kesilen kumaşlara emdirilmiş ve balistik testler gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri 3, 4 ve 5 tabakalı ve farklı oryantasyon açıları olacak şekilde ayarlanmıştır. Balistik testlerde yaklaşık 165 m/sn ve 360 m/sn hızlarında atış yapılabilen 2 farklı mermi kullanılmıştır. Numuneler atış sırasında hareketin kısıtlanması için metal çerçeve içerisine monte edilmiştir. Mermi hızları panele çarpmadan ve çarptıktan sonra kaydedilmiştir. Açısal yönelimli panellerin, hizalanmış yönelimlere [0/0/0] göre daha iyi performans gösterdiği ve etkinin KAKS emprenye edilmiş panellerde daha belirgin olduğu bulunmuştur. KAKS emdirilmiş 3 katmanlı Spectra, 4 katmanlı Spectra ve 4 katmanlı Kevlar 363 2S kumaş panellerde balistik darbe enerjisi sönümleme miktarının, sırasıyla %19, %58, %27'ye kadar yükseldiği bildirilmiştir. 3 tabakalı ve 4 tabakalı kumaş tabakalı paneller için, sırasıyla [0/30/60] ve [0/22,5/45/67,5] 'lik açısal yönelimlerin en iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Temiz kumaş kullanılan numunelerde ise oryantasyon açısının değiştirilmesinin herhangi bir etki yaratmadığı görülmüştür. KAKS emdirilmiş numunelerin oryantasyon açısının değiştirilmesi darbe enerjisinin neden olduğu gerilim dalgalarının çoklu yönlerde birincil iplikler boyunca yayılmasını ve bu durumun ikincil ipliklerin enerji sönümlemedeki rolünün artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Buna göre KAKS emdirilmiş kumaşların başka bir işleme gerek kalmadan oryantasyon açısının değişiminin

enerji sönümleme kapasitesinin artırılmasının daha hafif ve yumuşak zırh yapımı için kullanılabilecek bir metot olduğu bildirilmiştir [117].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle tek katı fazlı KAKS'ların üretimi, reolojik özellikleri ve enerji sönümlemeye etkisinin belirlenmesi şeklindedir. Son zamanlarda çok katı fazlı KAKS kullanılarak yapılan çalışmalar yapılmış olsa da hibrit nanopartikül takviyeli KAKS ile yapılan sınırlı sayıda araştırma vardır. Çalışma kapsamında silika nanopartikül ve polietilen glikolün karıştırılmasıyla elde edilen KAKS'lara ikinci katı faz olarak karbon nanotüp, silisyum karbür partikül ve grafen nanoplate eklenmiştir. Nanopartiküller ayrı ayrı ve hibrit olarak takviyelendirilmiş ve nanopartikül takviyesinin KAKS'ların reolojik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'ların yüksek performanslı kumaşların enerji sönümleme kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Bunun için KAKS emdirilmiş kumaşlara yüzey sürtünme, iplik çekme, düşük hızlı darbe testi ve balistik test uygulanmıştır. KAKS/kumaş yapılarında enerji sönümleme olayının iki yönlü düşünülmesi gerekliliğinden yola çıkılarak çalışmada farklı fiziksel özelliklere sahip iki para-aramid kumaş kullanılmıştır. Böylece vücut zırh malzemesi seçiminde darbe türüne ve kullanım alanına göre kumaş seçiminin önemi incelenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. KAKS Tasarımı ve Üretimi

Kayma altında katılaşılan sıvıların üretimi aşamasındaki malzeme seçimi ve bunun etkisi literatürde de olduğu gibi araştırılması gereken bir konudur. Bu nedenle çalışmanın ilk aşamasında tek katı fazlı KAKS üretimi ve eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla partikül boyutu, partikül konsantrasyonları ve sıvı ortam gibi parametreleri incelemek üzere KAKS'lar üretilmiş ve reolojik özellikleri incelenmiştir.

Optimum tek katı fazlı KAKS numunesi belirlendikten sonra hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretimine geçilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde de ilk olarak nanopartikül türü, nanopartikül takviye oranı gibi parametreler incelenmiş ve enerji sönmeme deneylerinde kullanılmak üzere seçilen takviye oranlarına ve nanopartikül malzeme türlerine karar verilmiştir.

3.1.1. Malzeme

KAKS, silika nanopartiküllerin sıvı ortam olan polietilen glikol (PEG) içinde dağıtılmasıyla elde edilmiştir. KAKS'ların kritik kayma oranı ve katılaşma viskozitesini etkileyen faktörleri araştırmak için farklı partikül boyutu, partikül konsantrasyonu ve sıvı ortam dikkate alınmıştır. KAKS hazırlamak için üç farklı silika nanopartikül ve üç farklı özgül yoğunluğa sahip polietilen glikol seçilmiştir. Çalışmada kullanılan silika nanopartiküllerin üretici tarafından sağlanan özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Silika nanopartiküllerin özellikleri

Silika Özellikleri	Aerosil 150	Aerosil 200	Aerosil 300
Yüzey alanı (m ² /g)	150	200	300
Partikül çapı (nm)	14	12	7
Sıkıştırılmış yoğunluk (kg/m ³)	43	50	55
SiO ₂ içeriği (%)	99.8	99.8	99.8

KAKS üretiminde sıvı ortam olarak kullanılan PEG'lerin moleküler yoğunluklarındaki değişikliklerin süspansiyonun viskozitesi üzerinde de etkisinin olması beklenmektedir. Bu sebeple çalışmada üç farklı molekül yoğunluğuna sahip PEG seçilmiştir. Tablo 3.2'de çalışmada kullanılan PEG'lerin üretici tarafından sağlanan özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Polietilen glikolün özellikleri

Özellikler	PEG 200	PEG 300	PEG 400
Mol ağırlığı (g/mol)	200	300	400
Yoğunluk (kg/m ³)	1.1238	1.1250	1.1300
Parlama sıcaklığı (°C)	150	220	305

Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde takviye malzemesi olarak çok duvarlı karbon nanotüp (KNT), silisyum karbür (SiC) ve grafen nanoplate (GNP) seçilmiştir. Takviye malzemelerinde tane boyutunun ve üretim türünün etkilerini gözlemlemek için iki farklı KNT, SiC ve GNP seçilmiştir. Çalışmada kullanılan nanopartiküllerin üretici tarafından sağlanan özellikleri Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Karbon nanotüp özellikleri

Özellik	KNT-A	KNT-B
Safılık (%)	> 96	> 96
Renk	siyah	siyah
(-COOH) İçeriği (%)	-	2,2
Dış Çap (nm)	4-16	8-18
İç Çap (nm)	2-6	5-10
Uzunluk (µm)	15-35	10-35
Sıkıştırılmış Yoğunluk (g/cm ³)	0,3	0,3
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	2,4	2,4
SSA (m ² /g)	240	210
Kül (%)	1,5	1,5
Elektrik İletkenliği (S/cm)	98	98
Üretim Yöntemi	CVD	CVD

Tablo 3.4. Silisyum karbür nanopartikül özellikleri

Özellik	SiC-A			SiC-B	
Safılık (%)	99,5			99,5	
Renk	gri			gri	
Ortalama Partikül Boyutu (nm)	20			50-70	
Kütle Yoğunluğu (g/cm ³)	0,03			0,05	
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	3,32			3,32	
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	80-130			40-85	
Morfoloji	kübik			kübik	
Üretim Metodu	lazer sentezleme			CVD	
Elementel Analiz (%)	Free C	Free Si	Free SiO2	Free C	Free Si
	0,5	0,2	0,3	0,8	0.2

Tablo 3.5. Grafen nanoplate özellikleri

Özellik	GNP-A	GNP-B
Saflık (%)	99,9	99,9
Kalınlık (nm)	3	5
Çap (µm)	1,50	30
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	800	170
İletkenlik (s/m)	1500-1980	1100-1600
Renk	Siyah	Gri

3.1.2. KAKS Üretim Planı

Tek katı fazlı KAKS'ın kritik kayma oranı üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemek için, bu çalışmada partikül boyutuna, partikül ağırlık fraksiyonuna ve dispersiyon ortamına göre üç KAKS kategorisi hazırlanmış ve detayları Tablo 3.6'da listelenmiştir.

Tablo 3.6. KAKS üretim planı

Araştırılan Faktör	Karışım	Partikül Oranı
Partikül boyutu	Aerosil 150 + PEG200	%25
	Aerosil 200 + PEG200	%25
	Aerosil 300 + PEG200	%25
Partikül konsantrasyonu	Aerosil 150 + PEG300	%10
		%15
		%20
		%25
PEG etkisi	Aerosil 200 + PEG200	%25
	Aerosil 200 + PEG300	%25
	Aerosil 200 + PEG400	%25

Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde ise nanopartikül takviye oranının belirlenebilmesi ve malzeme özelliklerinin etkisini sistematik inceleyebilmek için iki hibrit nanopartikül takviyeli KAKS kategorisi hazırlanmış ve detayları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7'de verilen düzene göre yapılan deneyler sonucunda hibrit nanopartikül takviyesi için kullanılacak nanopartikül oranına ve takviye malzemelerine karar verilmiştir. Hibrit nanopartiküllerde kullanılacak malzemelerin etkinliğini detaylı inceleyebilmek için toplam nanopartikül takviye oranı değişmeyecek şekilde nanopartikül miktarları değiştirilerek Tablo 3.8'de verilen numune konfigürasyonu yapılmış ve çalışma bu numuneler üzerinden devam ettirilmiştir.

Tablo 3.7. Nanopartikül seçim planı

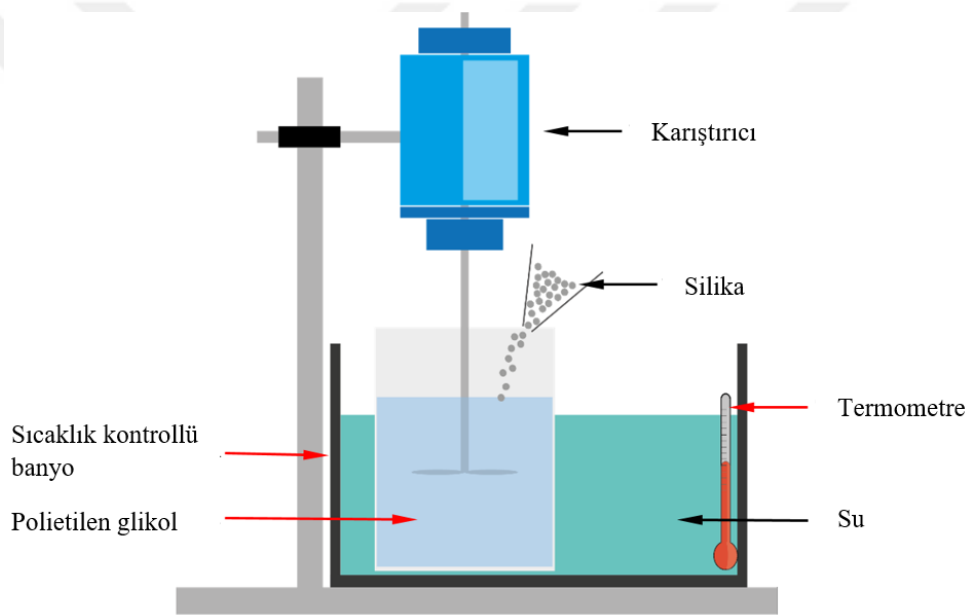
Araştırılan Faktör	Karışım	Nanopartikül Oranı
Nanopartikül oranı	KAKS + KNT-A	%0,30
		%0,60
		%0,90
Nanopartikül türü	KAKS + KNT-A	%0,60
	KAKS + KNT-B	%0,60
	KAKS + SiC-A	%0,60
	KAKS + SiC-B	%0,60
	KAKS + GNP-A	%0,60
	KAKS + GNP-B	%0,60

Tablo 3.8. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretim planı

Araştırılan Faktör	Karışım	Nanopartikül Türü	Nanopartikül Oranı
Nanopartikül türü	KAKS	KNT-A	%0,20
		GNP-A	%0,20
		SiC-B	%0,20
	KAKS	KNT-A	%0,40
		GNP-A	%0,20
		SiC-B	-
	KAKS	KNT-A	%0,20
		GNP-A	%0,40
		SiC-B	-
	KAKS	KNT-A	%0,20
		GNP-A	-
		SiC-B	%0,40
	KAKS	KNT-A	%0,40
		GNP-A	-
		SiC-B	%0,20
	KAKS	KNT-A	-
		GNP-A	%0,20
		SiC-B	%0,40
	KAKS	KNT-A	-
		GNP-A	%0,40
		SiC-B	%0,20

3.1.3. KAKS Üretim Aşamaları

Silika parçacıkları, yüzeyde emilen nemi kurutmak için 150 °C'de yaklaşık 12 saat fırında kurutulmuştur. KAKS numunelerini hazırlamak için polietilen glikol ve silika parçacıkları yüksek hızlı mekanik bir karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Karıştırma hızı 6000 rpm'de sabit tutulmuştur. Karıştırma işlemi sırasında, önceki çalışmalarda önerildiği gibi topaklaşmayı önlemek için silika partikülleri kademeli olarak ilave edilmiştir [83,118,119]. Karışım homojen hale gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Süspansiyon sıcaklığının sabit kalması için karıştırma işlemi sıcaklığı ayarlanabilir bir su banyosu içinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde de aynı yöntem kullanılarak üretim yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler, KAKS üretiminin ardından 1 hafta içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. KAKS üretim yöntemi

3.2. Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

KAKS'ların reolojik özellikleri Şekil 3.2'de gösterilen Anton Paar MCR 102 gerilim kontrollü reometre kullanılarak belirlenmiştir. Testler, 25 mm çapında bir paralel plaka aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test işlemi sırasında sıvılar, üst ve alt ölçüm plakaları arasındaki iç bölgeye yerleştirilmiştir. Plakalar arasındaki boşluk 0,3 mm'de sabit tutulmuş ve tüm testler 25 °C'de gerçekleştirilmiştir. Reolojik ölçümler 0-1000 s⁻¹ kayma oranı aralığında yapılmıştır.



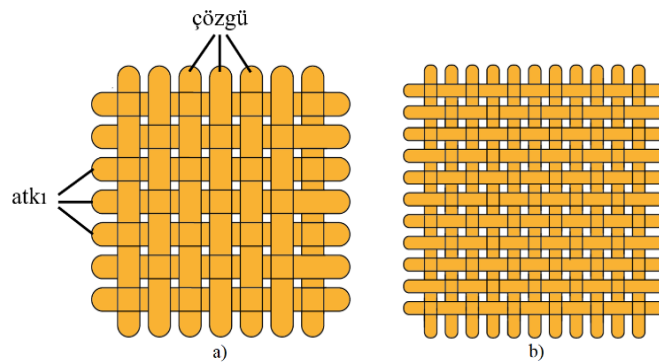
Şekil 3.2. Anton Paar MCR 102 Reometre

3.3. KAKS Emdirilmiş Kumaşların Hazırlanması

Yumuşak zırh yapımı ve koruyucu kıyafet yapımında genellikle; aramidler (Kevlar® ve Twaron®), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kumaşlar (Spectra, Dyneema), PBO lifleri (Zylon) ve cam lifler kullanılmaktadır [120]. Önemli ölçüde daha yüksek gerilme mukavemeti, modülü ve daha düşük elyaf uzaması aramidlerin, diğer sentetik elyaflara göre daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra aramid iplikler, cam elyafı, karbon elyafı veya seramik gibi kırılğan elyaflara göre tezgâhlarda daha kolay dokunmaktadır. Ayrıca aramidlerin erime noktası yoktur ve yalnızca 500 °C'de bozunmaya başlar. Düşük yanıcılık özellikleri sayesinde, ateşe dayanıklılıkları oldukça yüksektir. Bu avantajlar, aramidleri balistik vücut zırhı üretmek için oldukça uygun hale getirmiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılmak üzere Teijin firması tarafından üretilen Twaron para-aramid kumaşlar seçilmiştir. Çalışmada kumaş yapısının enerji sönümleme kapasitesi üzerine etkisini gözlemleyebilmek için şematik gösterimi Şekil

3.3’de verilen iki farklı Twaron para-aramid kumaş kullanılmıştır. Kumaşların özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir. KAKS’ların kumaşlara emdirilmesi için literatürde yer alan ıslatma metodu kullanılmıştır [13,83,121]. Katı partikül oranının artmasıyla KAKS’ların viskozitesi arttığından, yüksek KAKS konsantrasyonlarının akışkanlığı azalmış ve bu nedenle kumaşa doğrudan emdirilmesi çok zor olmuştur. Bu nedenle KAKS’ların kumaşa homojen bir şekilde emdirilmesini sağlamak için etil alkol ile seyreltme yöntemi kullanılmıştır. İşlem basamakları ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmıştır:

1. Kumaşlar ilgili testte kullanılacak ölçülere uygun olarak kesilmiş ve tartılmıştır.
2. Etil alkol ve KAKS 3:1 hacim oranına göre, belirli bir miktar etil alkol tartılmış ve KAKS’a ilave edilmiştir. Daha sonra tamamen seyreltilene kadar karıştırılmış ve daha düşük viskoziteli ve iyi akışkanlığa sahip bir çözelti elde edilmiştir.
3. Kumaş katmanlarının her biri, bir dakika boyunca seyreltilmiş KAKS çözeltisine tamamen daldırılmıştır.
4. Kumaş içerisindeki etil alkolü buharlaştırmak için kumaşlar 79 °C’de 30 dakika boyunca fırında bekletilmiştir.
5. KAKS emdirilmiş kumaş fırından çıkartılmış, kumaş yüzeyinde ve çevresindeki fazla miktardaki solüsyon rulo ile uzaklaştırılmıştır.
6. Kumaşlara emdirilen KAKS miktarını kontrol etmek için her aşamada ağırlıklar ölçülmüştür. KAKS ekleme yüzdesi yüzey sürtünme, iplik çekme ve düşük hızlı darbe testlerinde kumaş ağırlığının yaklaşık %50’si olarak sabit tutulmuştur. Balistik deneylerde KAKS ekleme yüzdesi %5, %10, %20 ve %50 olarak seçilmiştir.



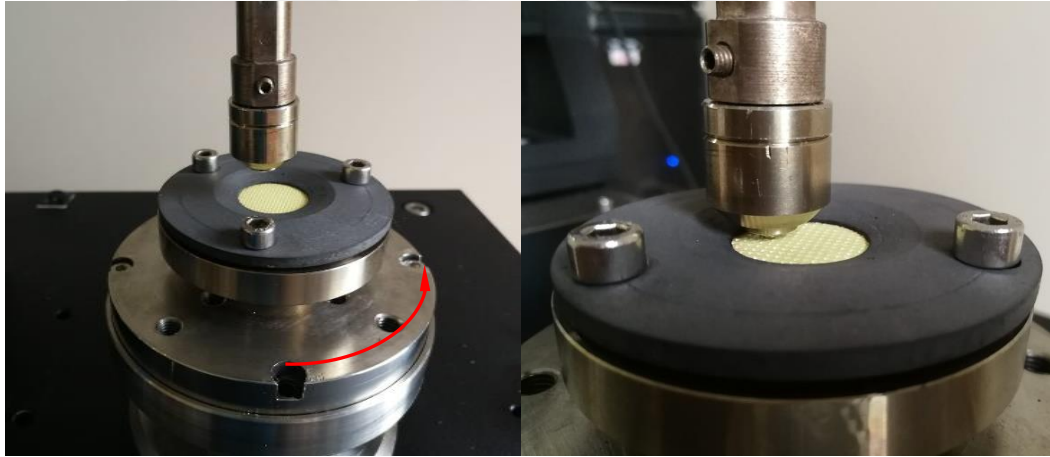
Şekil 3.3. Twaron para-aramid kumaşların şematik gösterimi a)Twaron 460 b)Twaron 200

Tablo 3.9. Twaron kumaşların özellikleri

Özellikler	Twaron 460	Twaron 200
Dokuma tipi	Düz (Plain)	Düz (Plain)
Alansal yoğunluk (g/m ²)	460	200
Lineer yoğunluk (Dtex)	3360	930
İplik sayısı (adet/10 cm ²)	67 x 67	105 x 105
Kalınlık (mm)	0,4	0,2

3.4. Yüzey Sürtünme Testi

Kumaş ve tehdit arasında oluşan yüzey sürtünme katsayısının ölçülmesi için yüzey sürtünme testi yapılmıştır. Yüzey sürtünme testlerinde 6 mm çaplı 100Cr6 malzemesinden üretilmiş küre, tek kat kumaş numuneleri üzerinde 10 cm/sn doğrusal hızla hareket ettirilerek kullanılmıştır. Testler Şekil 3.4’de gösterilen UTS Tribometre cihazında 1 N yük altında ve 10 mm yarıçaplı alanda 25 m mesafe boyunca sürdürülmüştür.



Şekil 3.4. Yüzey sürtünme test cihazı

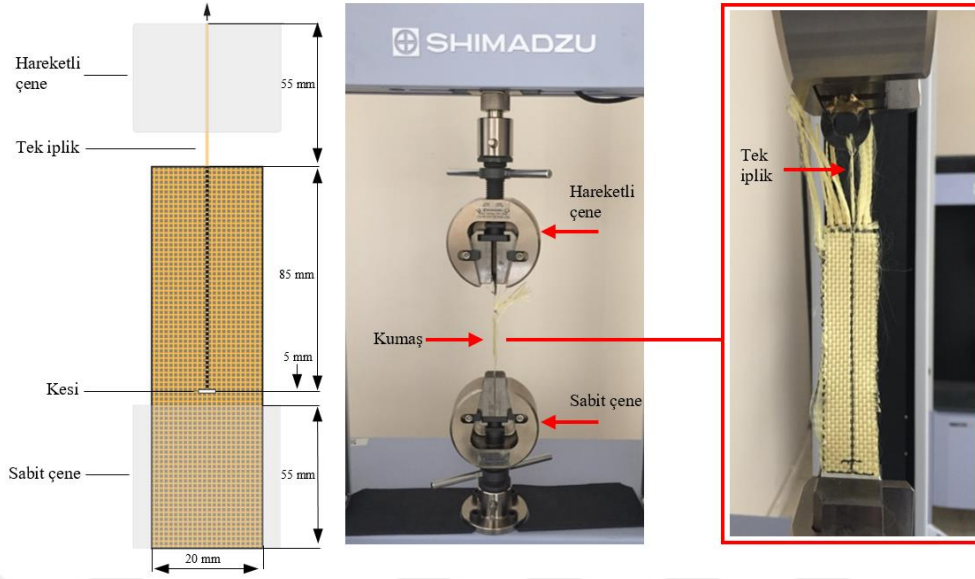
Yüzey sürtünme testleri takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmiş numunelere ve temiz numunelere uygulanmıştır. Numuneler 20 x 20 mm boyutlarında kesilmiş ve Bölüm 3.3.’te bahsedilen hazırlama yöntemiyle imal edilmiştir. Hazırlanan numunelerin detayları Tablo 3.10.’da verilmiştir.

Tablo 3.10. Testlerde kullanılan numuneler

Numune Kodu	İçeriği	Kumaş
NT	-	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS	KAKS	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/KNT-A	KAKS + %0,6 KNT-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/SiC-B	KAKS + %0,6 SiC-B	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/GNP-A	KAKS + %0,6 GNP-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/KNT-A+SiC-B+GNP-A	KAKS + %0,2 KNT-A + %0,2 SiC-B + %0,2 GNP-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/KNT-A+GNP-A	KAKS + %0,4 KNT-A + %0,2 GNP	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/GNP-A+KNT-A	KAKS + %0,4 GNP-A + %0,2 KNT-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/SiC-B+KNT-A	KAKS + %0,4 SiC-B + %0,2 KNT-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/KNT-A+SiC-B	KAKS + %0,4 KNT-A + %0,2 SiC-B	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/SiC-B+GNP-A	KAKS + %0,4 SiC-B + %0,2 GNP-A	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/GNP-A+SiC-B	KAKS + %0,4 GNP-A + %0,2 SiC-B	Twaron 200 ve Twaron 460

3.5. İplikler Arası Sürtünme Testi

Literatürde KAKS'ların enerji sönmüleme etkisi üzerine yapılan çalışmalarda bu etkiye sebep olan temel iki ana unsur öne çıkmaktadır. Bunlardan biri artan kayma hızlarında viskozitedeki ani artış diğer ise sürtünmenin artmasıdır. Bu nedenle çalışmada KAKS'ların iplikler arası sürtünme kuvvetine olan etkilerini inceleyebilmek için hem temiz hem de KAKS emdirilmiş kumaşlara iplik çekme testi uygulanmıştır. Çekme testleri, 10 kN kapasiteli Shimadzu çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler 20 x 200 mm boyutlarında kesilmiştir. Çekme test cihazının üst çenesine tek bir iplik bağlanmış ve önceki çalışmalarda önerildiği gibi alt çene sabit tutulurken kumaşın içinden çekilmiştir [115,122–124]. Test, iplik kumaşın içinden tamamen çıkana kadar devam ettirilmiştir. Deneylerde ön yük değeri 0,1 N ve çekme hızı 100 mm/dk olarak kullanılmıştır. İplik çekme testleri kumaş yapısının etkisini inceleyebilmek için testler Tablo 3.10'da gösterildiği gibi bütün numunelerde hem Twaron 200 hem de Twaron 460 kumaşlara uygulanmıştır. Şekil 3.5 iplik çekme testini, çekme testinde kullanılan numunelerin şematik temsilini ve örnek test görselini göstermektedir.

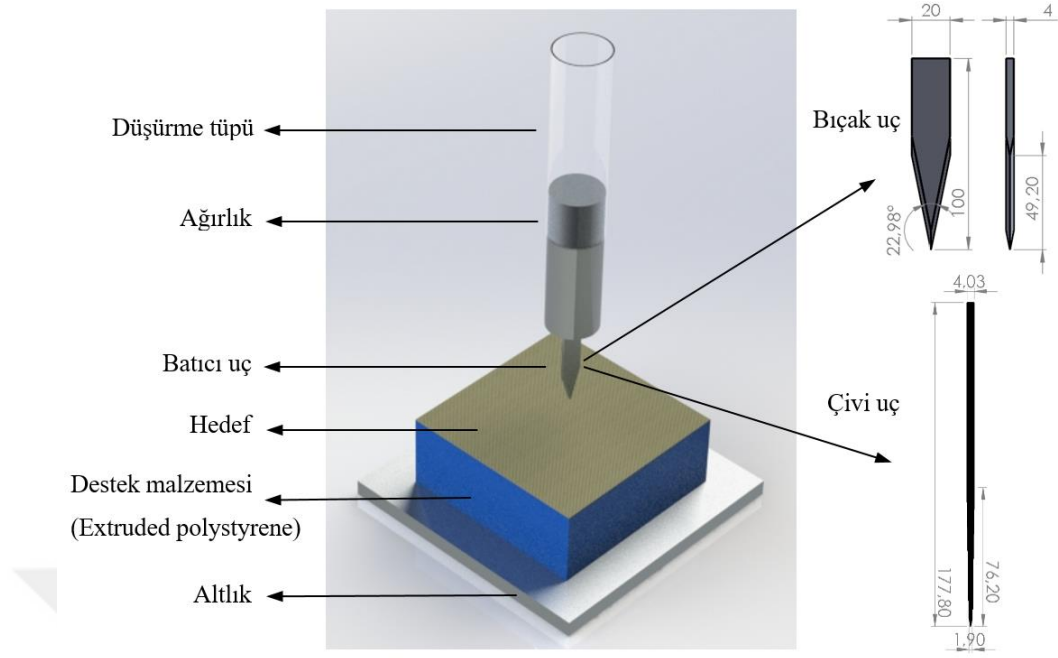


Şekil 3.5. İplik çekme test numunesinin şematik gösterimi, test düzeneği ve örnek test görseli

3.6. Düşük Hızlı Darbe Testi

Bıçak vb. sivri cisim saldırılarına bağlı olarak yaralanmaların önüne geçebilmek için giyilebilir zırh sistemleri oldukça önem kazanmıştır. Bu sebeple aramid bazlı kumaşlardan yapılan giysiler tercih edilmektedir. Bu kumaşların enerji sönümleme kapasitelerinin artırılması ve yaralanmaların önüne geçilebilmesi için çalışmada iki farklı Twaron para-aramid kumaşlara KAKS emdirilmiş ve düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Bu amaçla kumaşlar 200 x 200 mm boyutlarında kesilmiştir. Kumaşlara KAKS emdirilmesi Bölüm 3.3.’te anlatılan numune hazırlama yöntemiyle yapılmıştır. Her bir numune dört kat kumaştıan oluşmaktadır. Numuneler üst üste koyulmuş, başka bir işlem uygulanmamıştır. Kumaş yapısının etkisinin incelenebilmesi için tüm testler Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlara uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin detayları Tablo 3.8’de verilmiştir.

Düşük hızlı darbe testleri National Institute of Justice (NIJ) 0115.00 standardında yer alan bıçak ve çivi uç geometrileri kullanılarak yapılmıştır [125]. Test düzeneğinin şematik gösterimi ve testlerde kullanılan bıçak ve çivi ucun teknik resimleri Şekil 3.6’da verilmiştir. Destek malzemesi olarak batma mesafesi ölçümünün doğru yapılabilmesi için literatürde önerilen “Extruded Polystyrene” (XPS) seçilmiştir [13]. 250 x 250 mm boyutlarında kesilen 50 mm kalınlığındaki XPS köpük 3 tabaka olarak numunelerin altına destek malzemesi olarak koyulmuştur. Bıçak ve çivi uçların darbe sonrası hedef malzemesinin dışında kalan mesafesi dijital kumpas kullanılarak ölçülmüş ve toplam uzunluktan çıkarılarak batma derinliği hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Düşük hızlı darbe testi şematik gösterimi ve testlerde kullanılan uç geometrileri

Testlerde her bir hedef 1 kg ağırlık yüklü düşürme gövdesi kullanılarak incelenmiştir. Düşürme gövdesi çivi düşürme testleri için 0,30 - 1,10 m arasında dokuz farklı yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Bıçak testleri için ise Twaron 460 kumaşa 0,20 - 1,00 m arasında, Twaron 200 kumaşa 0,20 - 0,60 m arasında dokuz farklı yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Her yükseklik için hedeflere üç kez test yapılmış ve sonuçlarda ortalama batma mesafeleri kullanılmıştır. Hedeflerin maruz kaldığı darbe enerjileri ve darbe hızları Denklem 3.1 ve 3.2’de verilen formüllere göre hesaplanmıştır. Tablo 3.11. düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan koşulları göstermektedir.

$$E_d = m_d \cdot g \cdot h \quad (3.1)$$

$$v_d^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad (3.2)$$

Tablo 3.11. Düşük hızlı darbe testinde kullanılan koşullar

Düşürme Yüksekliği (cm)	Darbe Enerjisi (J)	Çarpma Hızı (m/sn)
20	1,96	1,98
25	2,45	2,21
30	2,94	2,43
35	3,43	2,62
40	3,92	2,8
45	4,41	2,97
50	4,9	3,13
55	5,39	3,28
60	5,88	3,43
70	6,86	3,71
80	7,84	3,96
90	8,82	4,2
100	9,8	4,43
110	10,78	4,64

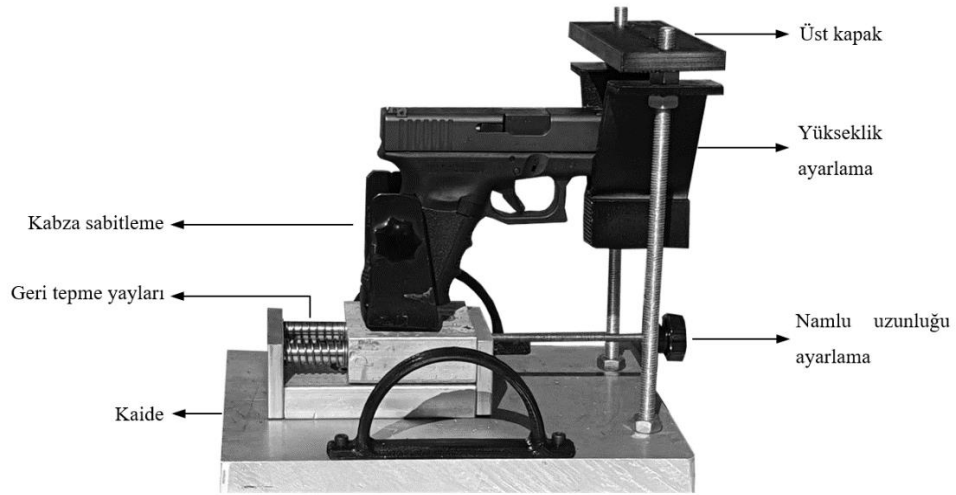
3.7. Balistik Atış Testi

Takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmiş kumaşların balistik tehditlere karşı enerji sönümleme mekanizmalarını incelemek için National Institute of Justice (NIJ) 0101.06 standardına göre atış testleri yapılmıştır. 250 x 250 mm boyutlarında kesilen numuneler 16 tabakalı olacak şekilde hazırlanmıştır. Yüzey sürtünme, iplik çekme ve düşük hızlı darbe testlerinden yapılan eniyileme çalışmaları sonucunda belirlenen numunelere balistik atış testleri uygulanmıştır. Bu numunelere ait detaylar Tablo 3.12’de verilmiştir.

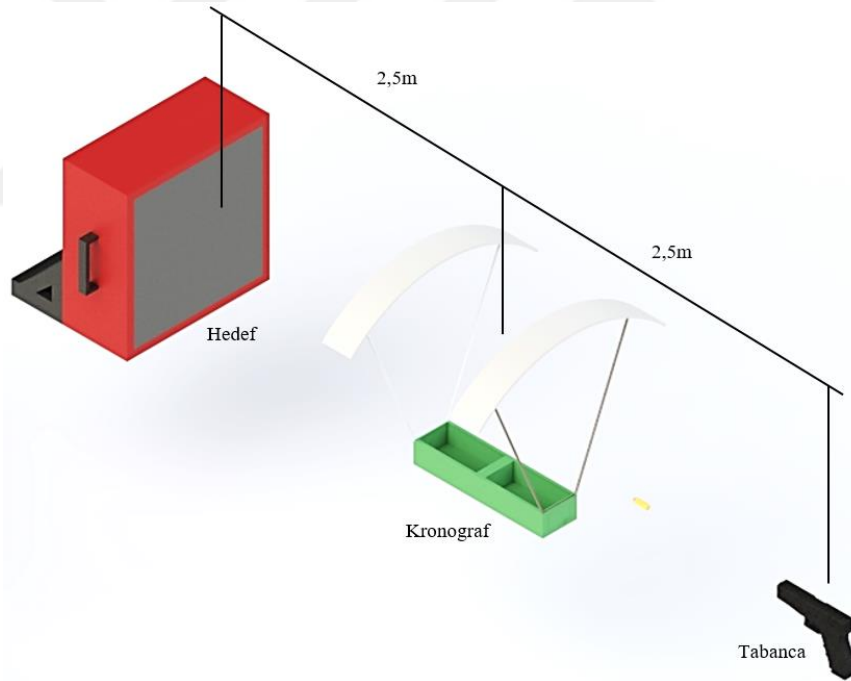
Tablo 3.12. Balistik atış testi uygulanan numune detayları

Numune Kodu	İçeriği	Kumaş
NT	-	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS	KAKS	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/SiC	KAKS + %0,6 SiC	Twaron 200 ve Twaron 460
KAKS/SiC+GNP	KAKS + %0,4 SiC + %0,2 GNP	Twaron 200 ve Twaron 460

Balistik testler NIJ 0101.06 standardında belirtildiği gibi 5 m mesafeden 9 mm FMJ (full metal jacket) mermi kullanılarak Glock marka tabanca ile yapılmıştır. Testler sırasında tabancanın konumunun ve atış açısının değişmemesi için Şekil 3.7’de gösterilen atış standı imal edilmiş ve kullanılmıştır. Atışlar sırasında mermi hızı, hedef ve silah arasında 2,5 metre mesafede konumlandırılan Chrony F1 master kronograf ile ölçülmüştür. Test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Balistik testlerde 9 mm pirinç gövdeli, bakır kaplamalı mermi kullanılmıştır. Kullanılan 9 mm merminin teknik özellikleri Tablo 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Tabanca sabitleme aparatı

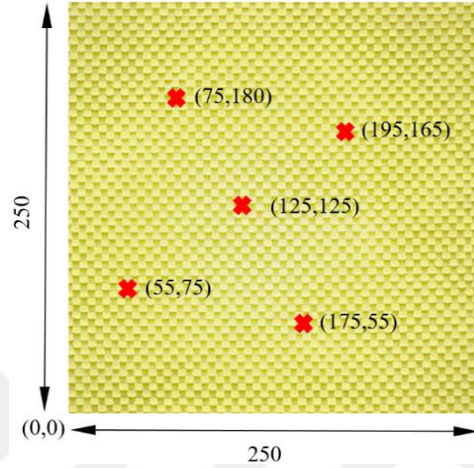


Şekil 3.8. Balistik atış test düzeneği

Tablo 3.13. 9 mm FMJ mermi özellikleri

Çekirdek çapı (mm)	9.08
Çekirdek ağırlığı (gr)	7.43
Kovan ağırlığı (gr)	3.80
Çekirdek uzunluğu (mm)	15.70
Standart barut miktarı (gr)	0.41 ± 0.005

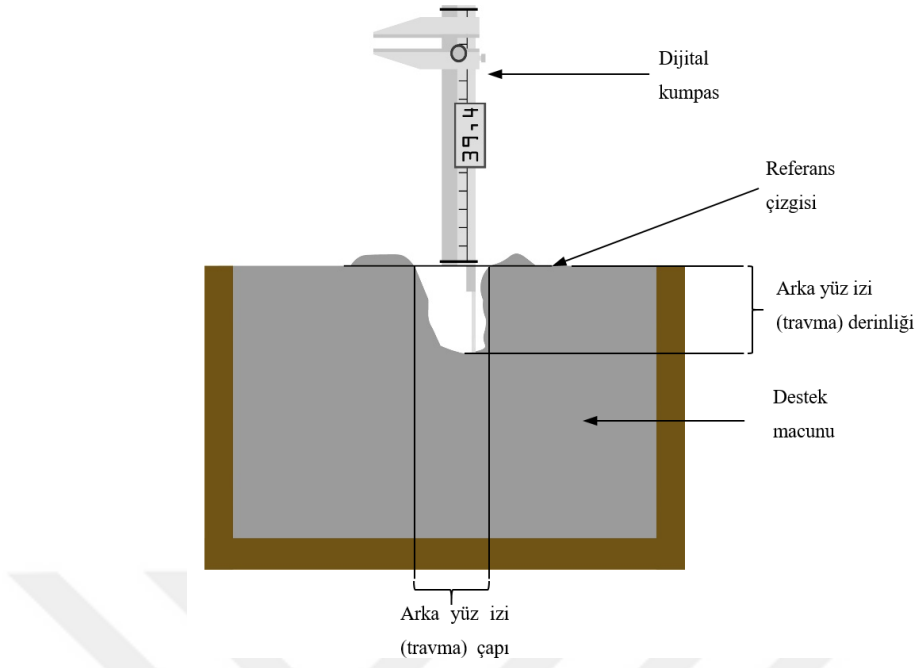
Her hedefe sıralı 5 atış gerçekleştirilmiştir. Atkı ya da çözgü yönündeki herhangi bir ipliğin birden fazla darbeye maruz kalmasını engellemek için atış yapılacak yerler literatürde önerildiği gibi önceden belirlenerek işaretlenmiştir [126]. Şekil 3.9’da balistik atışlarda kullanılan hedefler için hazırlanan işaretleme örneği görülmektedir. İki atış yeri ve bir atış yeri ile kenar arası mesafe en az 51 mm olacak şekilde belirlenmiştir [25].



Şekil 3.9. Balistik atışlarda kullanılan kumaşlarda atış yerinin işaretlenmesi

NIJ 0101.06 standardına göre numunenin başarılı sayılabilmesi için arka yüz iz miktarının 44 mm’den büyük olmaması gerekmektedir. Bu ölçümü yapabilmek için numunelerin arkasına insan vücudunu da simüle eden destek macunu yerleştirilmiştir. Destek macununun şartlandırılması için NIJ 0101.06 standardında da önerdiği gibi 1043 gr ağırlığında 63,5 mm çapında çelik küre 2 metre yükseklikten macun üzerine düşürülmüştür. Yapılan toplam 5 adet düşürme sonucu ortalama çöküntü derinliği 19,58 mm olarak ölçülmüştür. Buna göre NIJ 0101.06 standardında belirtilen ($19 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$) çöküntü miktarını sağlanmıştır.

Numuneye yapılan beş sıralı atışın ardından destek macunundaki hasar genişliği ve derinliğinin ölçülebilmesi için dijital kumpas yardımıyla standartta belirtildiği gibi ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. NIJ 0101.06 standardına göre arka yüz izi ölçüm örneği

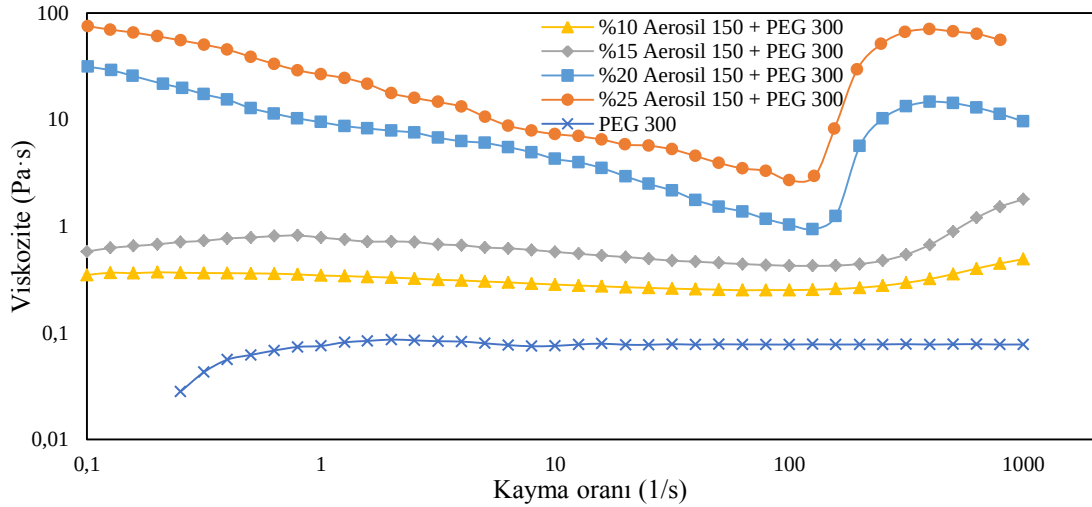
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tek Katı Fazlı KAKS'ların Reolojik Sonuçları

KAKS üretiminin ilk bölümünde silika nanopartikül oranının, nanopartikül boyutunun ve sıvı ortam olan PEG'in KAKS'ların reolojik özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Bütün numuneler aynı şartlarda üretilmiş ve aynı reolojik testlere tabi tutulmuştur. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde kullanılacak olan temel süspansiyon bu başlık altında yapılan eniyileme çalışmaları sonucu belirlenmiştir.

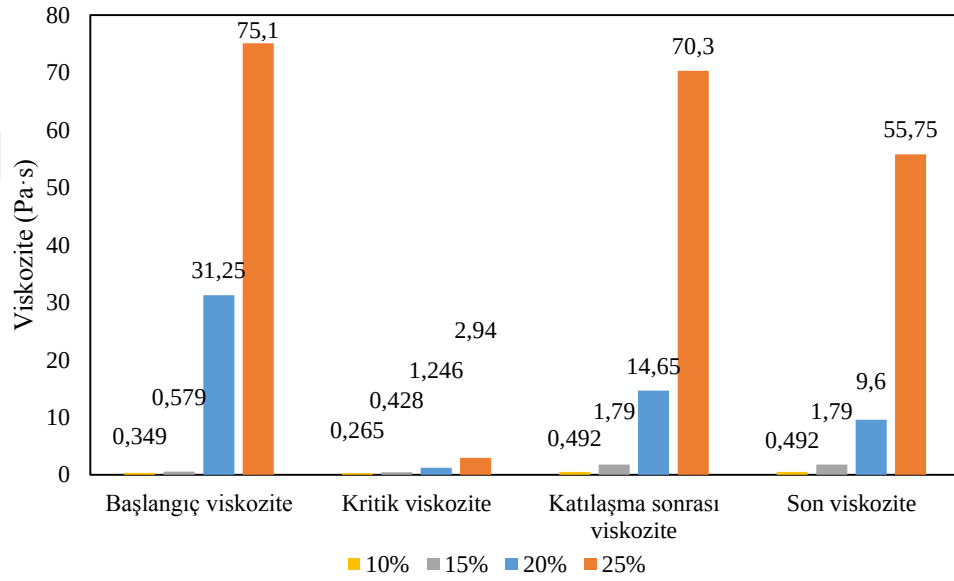
4.1.1. Silika Nanopartikül Oranının Etkisi

Silika nanopartikül oranının KAKS'ların reolojik özellikleri üzerine olan etkisi bu bölümde incelenmiştir. Bu amaçla Aerosil 150 silika nanopartikül ve PEG 300 kullanılarak üretilen süspansiyonlar kullanılmıştır. KAKS üretiminde kullanılan silika nanopartikül oranı %10, %15, %20 ve %25 olarak seçilmiştir. Süspansiyon çok yoğunlaştığı için %25 konsantrasyonun üzerine çıkılamamıştır.



Şekil 4.1. Silika nanopartikül oranının değişiminin KAKS'ların reolojik özelliklerine etkisi

belirtmektedir. KAKS numunelerinin partikül konsantrasyonlarının en yüksek seviyeleri olan %20 ve %25 katı partikül oranına sahip numunelerde düşük kayma oranlarında kayma altında incelme davranışı meydana gelmiştir. İncelme davranışından sonra, kayma altında katılaşma davranışı farklı kritik kayma oranlarında gerçekleşmiştir. Silika nanopartikül içeriğinin artması ile kritik kayma oranı azalmış ve kritik kayma oranı sonrasında viskozite artışı meydana gelmiştir. Bu artış katı partiküller arası mesafenin azalmasıyla artan çekim kuvvetiyle açıklanmaktadır [127].

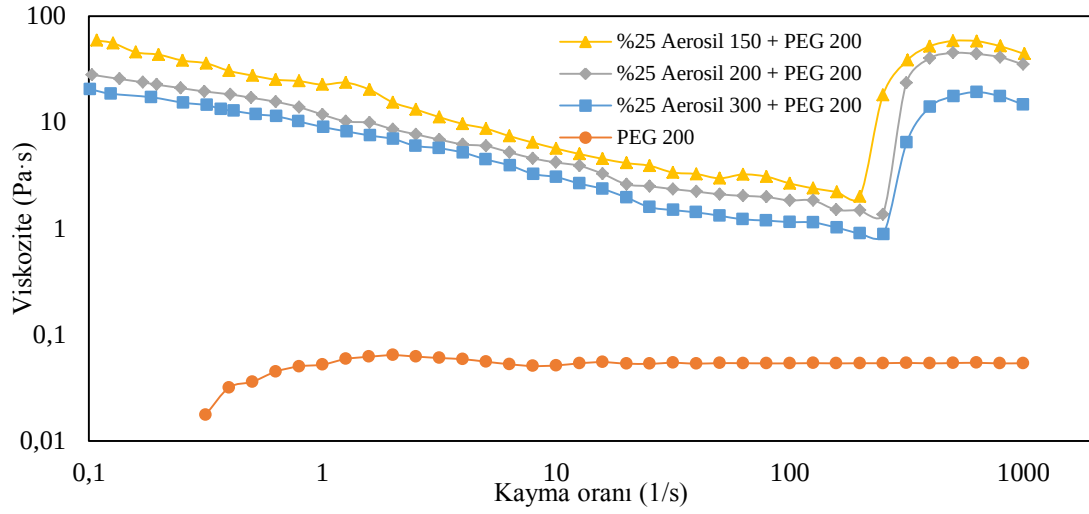


Şekil 4.2. Farklı oranlarda silika nanopartikül ile üretilmiş KAKS'ların bölgesel viskozite değerleri

Şekil 4.2, silika nanopartikül oranının değiştirildiği süspansiyonlardaki bölgesel viskozite değerlerini sunmaktadır. Silika nanopartikül oranının artmasıyla her durumda daha yüksek viskozite değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Kritik viskozite değeri silika nanopartikül oranından görece çok fazla etkilenmezken, başlangıç, katılaşma sonrası ve son viskozite değerleri önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Özellikle %25 silika nanopartikül oranında viskozite değerleri ciddi şekilde yükselmiştir.

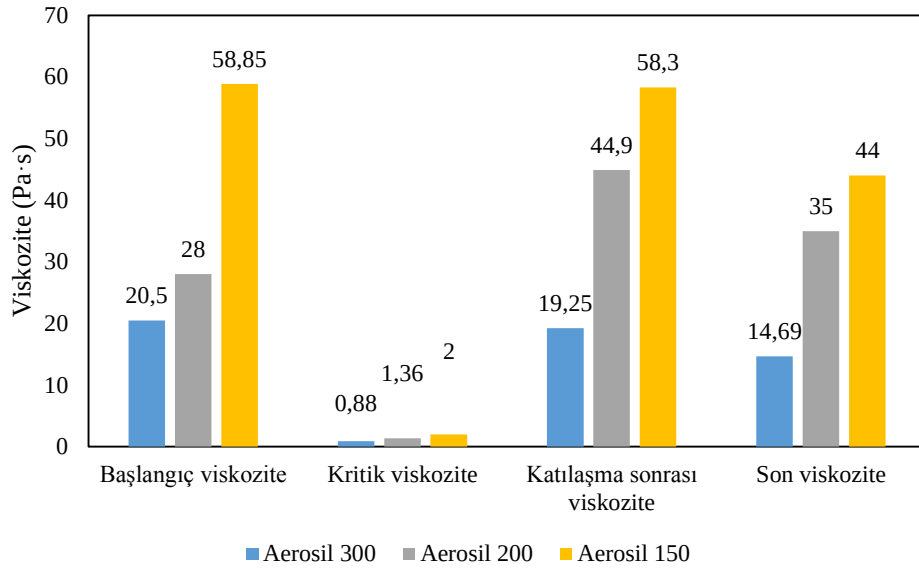
4.1.2. Silika Nanopartikül Boyutunun Etkisi

Üç farklı silika nanopartikül boyutuyla üretilen KAKS'ların viskozitesi, uygulanan kayma oranının bir fonksiyonu olarak aşağıda Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Silika nanopartikül hacim oranı, dispersiyon ortamı PEG 200 olan tüm KAKS numuneleri için %25 olarak sabit tutulmuş ve süspansiyonda sıvı ortam olarak kullanılan PEG 200'ün de reolojik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 4.3. Farklı boyutlarda silika nanopartikül kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozite-kayma oranı grafiği

Şekil 4.3'te görülebileceği gibi, sistemin üç farklı aşaması vardır ve üç aşama şu şekilde tanımlanabilir: Önce kayma incelmesi ve ardından kayma altında katılaşma ve son olarak yüksek kayma oranlarında kısıtlı bir plato oluşumu gözlemlenmektedir. İlk aşamada, sistemin başlangıç viskozitesi kayma oranı arttıkça kademeli olarak azalmıştır ve kayma altında incelleme davranışı sergilemiştir. Kritik kayma oranına ulaşıldığında, sistemin viskozitesi kritik viskozite olarak adlandırılan en düşük değere ulaşmış ve ardından viskozite keskin bir şekilde artmış ve maksimum değere ulaşmıştır. Bu işleme, sıvıdan katı hale dönüşümü gösteren kayma altında katılaşma aşaması denilmektedir. Son olarak, sistem bir viskozite platosuna gelmektedir. KAKS numunelerinin tamamında artan kayma oranına karşılık viskozitede ani artış meydana gelmiş ve kayma altında katılaşma davranışı görülmüştür. 14 nm partikül boyutuna sahip Aerosil 150 kullanılarak üretilmiş KAKS'ın en yüksek viskoziteye ulaştığı görülmüştür. Katılaşmanın başlangıcını gösteren kayma oranına kritik kayma oranı ve katılaşma aşamasından sonraki viskoziteye katılaşma sonrası viskozite adı verilmiştir. Silika nanopartikül boyutlarının büyümesiyle kritik kayma oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu da süspansiyonun daha erken katılaştığını göstermektedir.

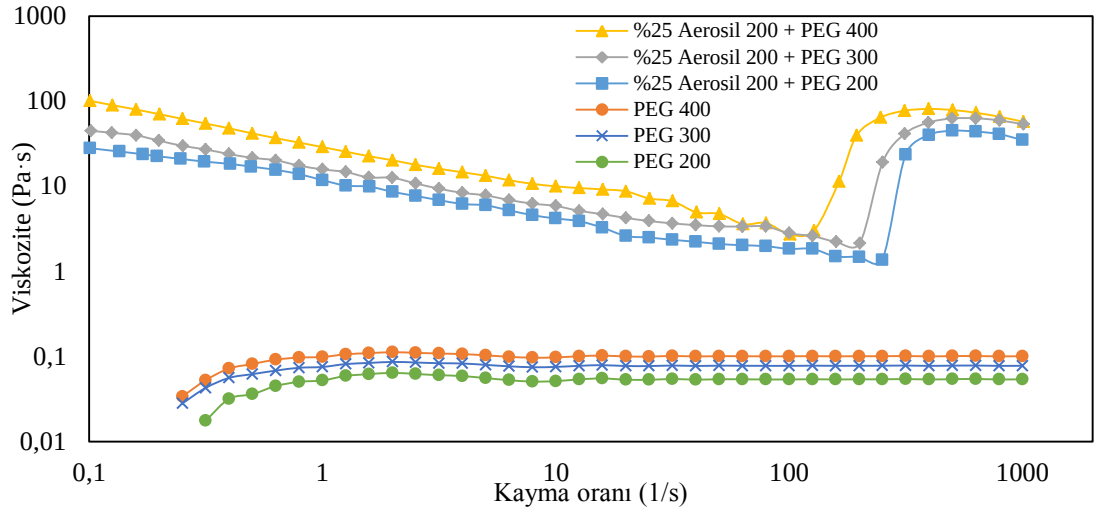


Şekil 4.4. Farklı boyutları silika nanopartiküller ile üretilmiş KAKS'lardaki bölgesel viskozite değerleri

Şekil 4.4'de farklı silika nanopartikül boyutlarında üretilmiş KAKS'lardaki dört bölgesel viskozite değerinin karşılaştırması verilmiştir. Genel olarak, daha önce tartışıldığı gibi, silika nanopartikül boyutu büyüdükçe süspansiyonların her aşamasındaki viskozitelerinde artış meydana gelmiştir. Tek katı fazlı KAKS'ların viskozitelerinin silika nanopartikül boyutuyla doğru orantılı olduğu görülmüştür. 14 nm partikül boyutuna sahip Aerosil 150 silikanın en başarılı katı partikül olduğu tespit edilmiştir.

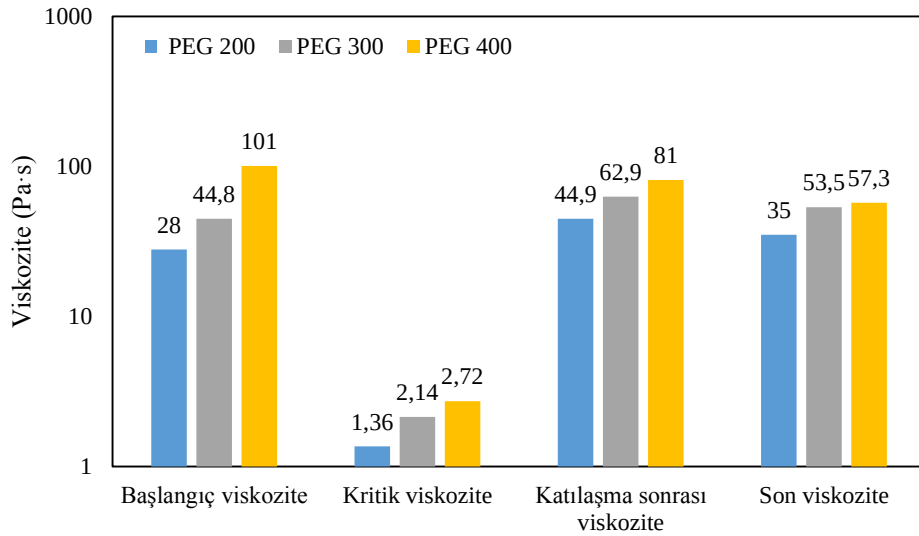
4.1.3. Sıvı Ortamın Etkisi

KAKS'ların reolojik özellikleri, 200, 300 ve 400'lük farklı moleküler yoğunluğa sahip üç farklı polietilen glikol (PEG) ortamına bağlı olarak araştırılmıştır. Numunelerde %25 oranında 12 nm boyutlu Aerosil 200 silika nanopartikül kullanılmıştır. Üç farklı PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'ların ve bu numunelerde kullanılan PEG'lerin kayma oranına karşı viskozite grafiği Şekil 4.5'de logaritmik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı yoğunluklarda PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozite-kayma oranı grafiği

Şekil 4.5'de görüldüğü üzere diğer KAKS gruplarında olduğu gibi kritik kayma oranına kadar kayma altında incelme davranışı görülmüş ve kritik kayma oranından sonra viskozitede ani bir artış meydana gelmiştir. Viskozite artışı sonrası son evre olarak plato oluşumu gözlenmiştir [128]. Saf PEG'lerin viskozitelerinde kayma oranı ile bağlantılı bir değişim gözlenmemiştir. Süspansiyonun moleküler yoğunluğu arttıkça kritik kayma oranının azaldığı görülmüştür. PEG mol yoğunluğunun 200'den 400'e artmasıyla kritik kayma oranı yaklaşık 2 kat azalmıştır. Bunun sonucu olarak yüksek yoğunluğa sahip PEG kullanımının süspansiyonların katılaşması için gereken süreyi kısalttığı söylenebilir.

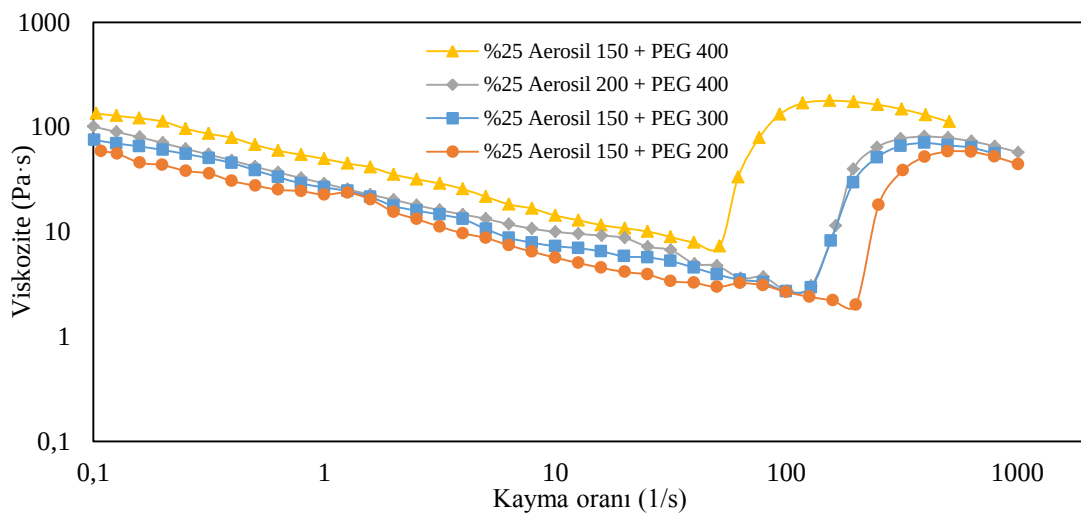


Şekil 4.6. Farklı yoğunluklarda PEG kullanılarak üretilmiş KAKS'ların bölgesel viskozite değerleri

Farklı mol yoğunluklarına sahip PEG kullanılmasıyla elde edilen KAKS'ların dört önemli viskozite değerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.6'da görülmektedir. PEG'in molekül yoğunluğu süspansiyon viskozitesi önemli ölçüde etkilemektedir. Süspansiyonlarda kullanılan PEG'in molekül yoğunluğunun arttıkça süspansiyonların viskozitesinin her aşamada daha yüksek olduğu ve molekül yoğunluğunun azalmasının viskoziteyi düşürdüğü görülmektedir. Tüm viskozite değerlerinde PEG 400 kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozitesinin diğer süspansiyonlara göre daha iyi olduğu görülmüş ve başlangıç viskozitesinde PEG 400 kullanılarak üretilmiş numune ile PEG 300 ve PEG 200 kullanılarak üretilmiş numuneler arasında sırasıyla yaklaşık %125 ve %260 fark olduğu belirlenmiştir.

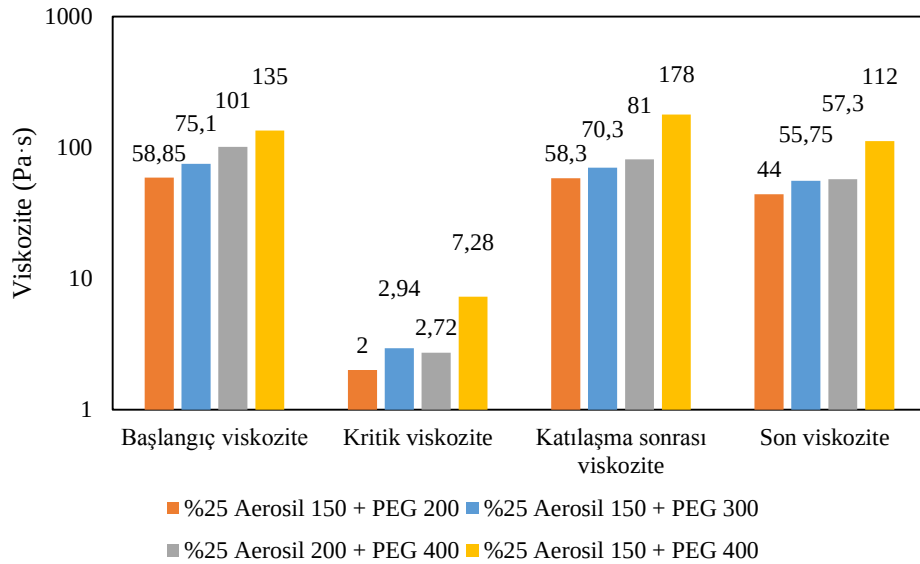
4.1.4. Tek Katı Fazlı KAKS'ların Reolojik Bulguları Üzerine Tartışma

Tek katı fazlı KAKS'ların reolojik bulgularının incelenmesinde üç temel çıktı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre süspansiyondaki katı partikül oranının ve miktarının artmasına ilave olarak süspansiyonda sıvı ortam olarak kullanılan PEG'in yoğunluğunun artması genel olarak süspansiyonun katılaşma davranışını olumlu yönde etkilemektedir. İncelenen üç durumda da söz konusu değişikliklerin kritik kayma oranını düşürüp daha erken aşamada katılaşmayı başlattığı görülmektedir. Ayrıca katılaşma davranışını en iyi ifade eden parametrelerden biri olan katılaşma oranı da PEG mol yoğunluğundaki, silika miktarı ve oranındaki artış ile artmaktadır. Bahsedilen üç durum incelenerek tek katı fazlı KAKS'lar üzerine yapılan eniyileme çalışmaları sonucunda hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde kullanılacak süspansiyon **%25 Aerosil 150 + PEG 400** olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Tek katı fazlı KAKS'ların karşılaştırılması

Çalışmanın şimdiye kadar olan kısmında bu oranlarla bir numune üretilmediği için söz konusu süspansiyon üretilerek diğer en iyi KAKS'lar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.7'de tek katı fazlı KAKS üretiminde üç aşamada yapılan eniyileme çalışmaları sırasında her aşamadaki en başarılı numuneler ile bu çalışmalar sonucu elde edilen bilgi ile tasarlanan Aerosil 150 + PEG 400 numunesinin viskozitesinin kayma oranı ile değişimi logaritmik grafikte gösterilmiştir. Tüm numunelerde silika nanopartikül oranı %25 olarak seçilmiştir. Aerosil 150 + PEG 400 numunesinin grafiği de diğer numunelere benzer şekilde sırasıyla kayma incelmesi, kayma altında katılma ve plato oluşumu olmak üzere üç kısımdan meydana gelmiştir. Aerosil 150 + PEG 400 numunesinde kritik kayma oranının diğer numunelere göre 2 katından daha fazla bir oranda azaldığı tespit edilmiştir. Böylece katılmanın kayma oranının çok erken safhalarında meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Tek katı fazlı KAKS'ların karşılaştırılması

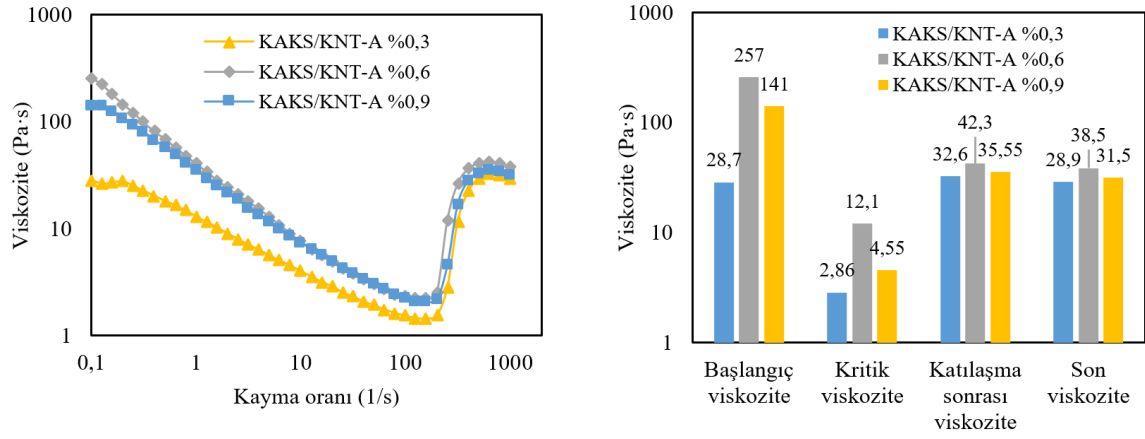
Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde kullanılmasına karar verilen Aerosil 150 + PEG 400 süspansiyonun ve tek katı fazlı KAKS'lar arasında eniyileme çalışmalarında elde edilen diğer KAKS numunelerin dört viskozite değeri Şekil 4.8'de verilmiştir. Aerosil 150 + PEG 400 numunesinin dört viskozite değerinde de diğer numunelerden yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Özellikle kritik ve katılma sonrası viskozite değerleri arasındaki fark oldukça belirgindir. Tek katı fazlı KAKS'lar üzerine yapılan bu araştırma, KAKS'ların daha düşük kritik kayma oranının ve daha yüksek kayma altında katılma viskozitesi değerinin; daha büyük partikül boyutu, daha yüksek partikül ağırlık fraksiyonu ve daha yüksek PEG moleküler ağırlığı kullanılarak elde edilebileceğini doğrulamaktadır.

4.2. Hibrit Nanopartikül Takviyeli KAKS'ların Reolojik Sonuçları

Bu bölümde hibrit nanopartikül takviyelerinin tek katı fazlı KAKS'lara ilave edilmesiyle elde edilen süspansiyonların reolojik özellikleri incelenmiştir. Bölüm 4.1'de anlatılan tek katı fazlı KAKS üretimi ve reolojik özelliklerinin incelenmesi sonucunda yapılan eniyileme çalışmaları neticesinde hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretimi için %25 Aerosil 150 + PEG 400 süspansiyonu kullanılmaya karar verilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde bu süspansiyona takviye malzemesi olarak çok duvarlı karbon nanotüp (KNT), silisyum karbür (SiC) ve grafen nanoplate (GNP) eklenmiştir. İlk olarak tek katı fazlı KAKS'lara eklenecek nanopartikül takviye oranı belirlenmiştir. Literatürde takviye malzemelerinin fiziksel özelliklerinin viskoziteyi etkilediği belirtilmiştir [118,129]. Bu durumu inceleyebilmek için Bölüm 3.1.2'de anlatıldığı gibi iki farklı KNT, SiC ve GNP seçilerek ayrı ayrı KAKS'lara eklenmiş ve viskozitedeki değişim belirlenmeye çalışılmıştır. Nanopartikül takviye oranına ve malzemesine karar verilmesi için hazırlanan üretim planı Tablo 3.7'de verilmiştir. Daha sonra bu nanopartiküller arasından eniyileme çalışmaları yapılarak belirlenen takviye malzemeleri kullanılmış ve Tablo 3.8'de gösterilen üretim planı dâhilinde hibrit nanopartiküller üretilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde %25 silika nanopartikül oranına sahip Aerosil 150 ve PEG 400 kullanılarak üretilmiş süspansiyondan KAKS olarak bahsedilmiştir.

4.2.1. Nanopartikül Takviye Oranının Etkisi

Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminin ilk aşamasında nanopartikül takviye oranının belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Petel vd. göre silika oranındaki artış katılaşma mekanizmasını iyileştirerek kritik kayma oranını düşürmektedir [87]. Tek katı fazlı KAKS üretiminde elde edilen sonuçların bu çalışma ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gürgen, silikanın aksine nanopartikül takviyesinin katılaşma mekanizmasını bozduğunu hatta aşırı miktarda eklenmesinin katılaşma davranışını tamamen yok ettiğini bildirmiştir [13]. Bu nedenle nanopartikül takviye oranının belirlenebilmesi için tek katı fazlı KAKS'lara KNT-A nanopartikülü üç farklı oranda takviye edilmiş ve reolojik özellikleri incelenmiştir.

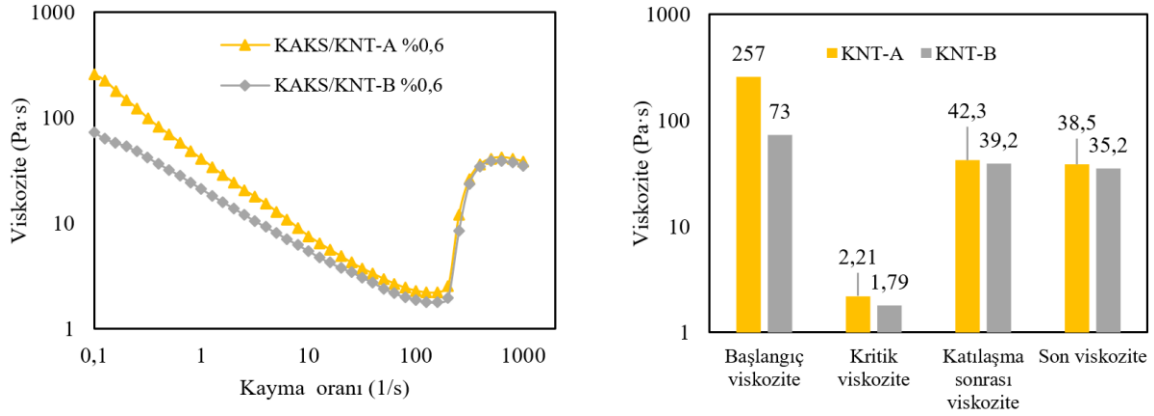


Şekil 4.9. Çok katı fazlı KAKS’larda nanopartikül takviye oranının reolojik özelliklere etkisi

Şekil 4.9, KNT-A’nın 3 farklı oranda takviye edilmesi ile elde edilmiş süspansiyonların reolojik test sonuçlarını göstermektedir. Numunelerin tamamında kayma altında katılma davranışı görülmüştür. Tek katı fazlı KAKS’larda olduğu gibi sistem kayma incelmeye, kayma altında katılma ve göreceli bir plato oluşumu olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Şekil 4.9b’de dört önemli viskozite değeri verilmiştir. Buna göre en düşük viskozite değerleri ağırlıkça %0,3 takviye oranına sahip süspansiyonda meydana gelmiştir. Takviye oranı arttıkça süspansiyonun viskozite profili yükselmekteyken %0,6 oranın üzerine çıkıldığında süspansiyonun viskozitesinin düştüğü görülmüştür. Bu durum literatürde bahsedilen durumla örtüşmektedir [130]. Bu bölümde yapılan inceleme sonucunda elde edilen bilgiler ile çalışmada hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretimindeki nanopartikül takviye oranının ağırlıkça %0,6 olmasına karar verilmiştir.

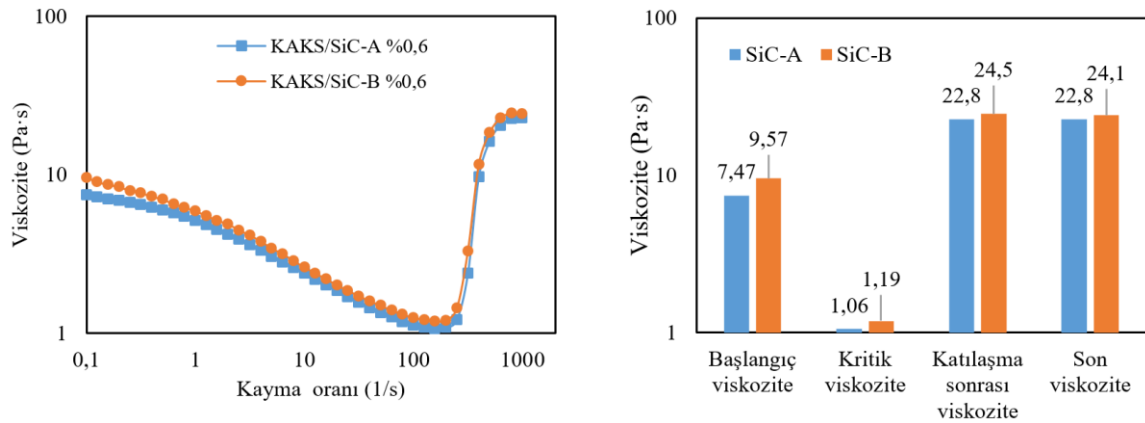
4.2.2. Nanopartikül Türünün Etkisi

Bu bölümde üç farklı türde toplam altı nanopartikül kullanılarak takviye edilmiş hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’ların reolojik özellikleri incelenmiştir. Üretim aşaması Bölüm 3.1.3’de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanopartiküllerin özellikleri Tablo 3.3, 3.4, ve 3.5’de verilmiştir. Nanopartikül türünün etkisi incelenirken her nanopartikül kendi arasında incelenmiş ve viskozite profili daha iyi olan partiküle karar verilmiştir.



Şekil 4.10. Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı KNT takviyelerinin reolojik özelliklere olan etkisi

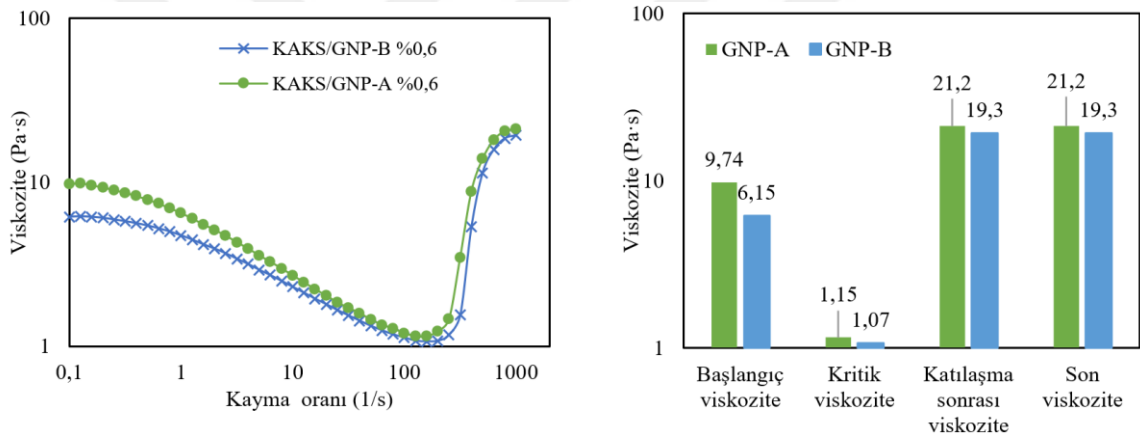
Şekil 4.10'da KNT takviyeli KAKS'ların viskozitesinin kayma oranı ile değişimi görülmektedir. KNT takviye oranı ağırlıkça %0,6 olarak sabit tutulmuştur. Her iki süspansiyonda kayma altında katılaşma davranışı göstermiştir. KNT-A takviyeli KAKS'ın viskozite profilinin daha yüksek başladığı ve tüm grafik boyunca böyle devam ettiği görülmektedir. KNT nanopartikülleri için takviye tane boyutunun küçülmesinin süspansiyon viskozite profilini artıran bir etki yaptığı tespit edilmiştir. Viskozite grafiğinde dört önemli değer incelenecek olursa; başlangıç viskozitesinin KNT-A'da çok yüksek olmasına rağmen kritik, katılaşma sonrası ve son viskozite değerleri birbirine oldukça yakındır. KNT nanopartikül takviyeleri arasında yapılan inceleme sonrası hibrit nanopartikül üretimi için KNT-A kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.11. Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı SiC takviyelerinin reolojik özelliklere etkisi

Şekil 4.11'de 2 farklı yöntemle üretilmiş SiC nanopartikül takviyesinin KAKS'ların reolojik özellikleri üzerine olan etkisi görülmektedir. Her iki nanopartikül takviyeli KAKS'da da kayma altında katılaşma davranışı görülmüştür. Grafiği incelediğimizde ilk olarak düşük kayma

oranlarında kayma incelmesi ve ardından kritik kayma oranının aşılmasıyla başlayan kayma altında katılma davranışı sergilemiştir. Önceki viskozite-kayma oranı grafiklerinden farklı olarak son aşamada çok kısıtlı bir plato oluşumu meydana gelmiştir. Katılma sonrası oluşan maksimum viskozite değeri son viskozite değerine eşit ya da çok yakın bir değerdedir. Her iki nanopartikül takviyesi içinde kritik kayma oranı sonrası oluşan viskozite, başlangıç viskozitesinden daha yüksektir. Tablo 3.4’den görüleceği üzere SiC-B daha büyük ortalama partikül büyüklüğüne sahiptir. Nanopartiküller arasındaki bir diğer fark üretim yöntemleridir. SiC-A lazer sentezleme yöntemi ile üretilmişken, SiC-B kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. İki nanopartikül kullanılarak üretilmiş süspansiyonun viskozite değerleri birbirine çok yakın olmakla beraber SiC-B nanopartikül takviyesi kullanılarak üretilmiş KAKS’ın viskozite profili daha yüksek olduğu için hibrit nanopartikül takviyesinde kullanılmak üzere SiC-B seçilmiştir.

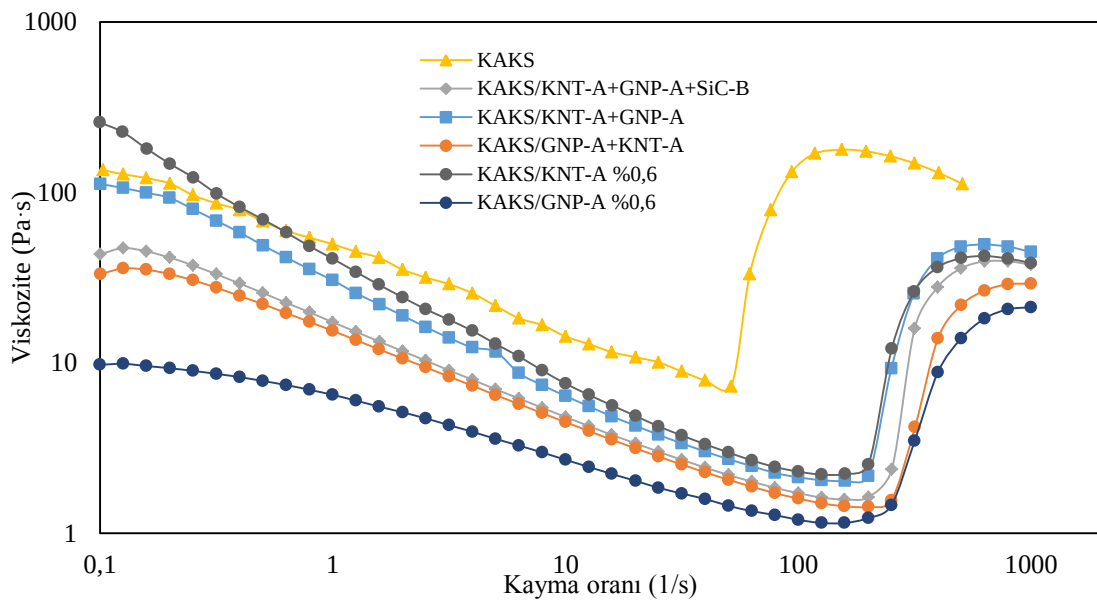


Şekil 4.12. Çok katı fazlı KAKS üretiminde kullanılan farklı GNP takviyelerinin reolojik özelliklere olan etkisi

Şekil 4.12’de iki farklı grafen nanoplate kullanılarak üretilmiş çok katı fazlı KAKS’ların kayma oranına karşı viskozite grafiği logaritmik olarak gösterilmiştir. Her iki numune de kayma altında katılma davranışı görülmüştür. SiC nanopartikül takviyeli KAKS’larda olduğu gibi grafik, kayma incelmesi ve kayma altında katılma olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. Plato oluşumu görülmemiştir. Kritik kayma oranından sonra ulaşılan maksimum viskozite süspansiyonun son viskozitesi olmuş ve başlangıç viskozitesinden GNP-A ve GNP-B takviyeleri için sırasıyla yaklaşık 2 ve 3 kat daha yüksek bir değere ulaşılmıştır. GNP takviyelerinin viskozite profilleri üzerindeki etkisi incelendiğinde takviye tane boyutunun küçülmesinin süspansiyon viskozite profilini artıran bir etki yarattığı görülmüştür. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretimi için GNP-A kullanılmasına karar verilmiştir.

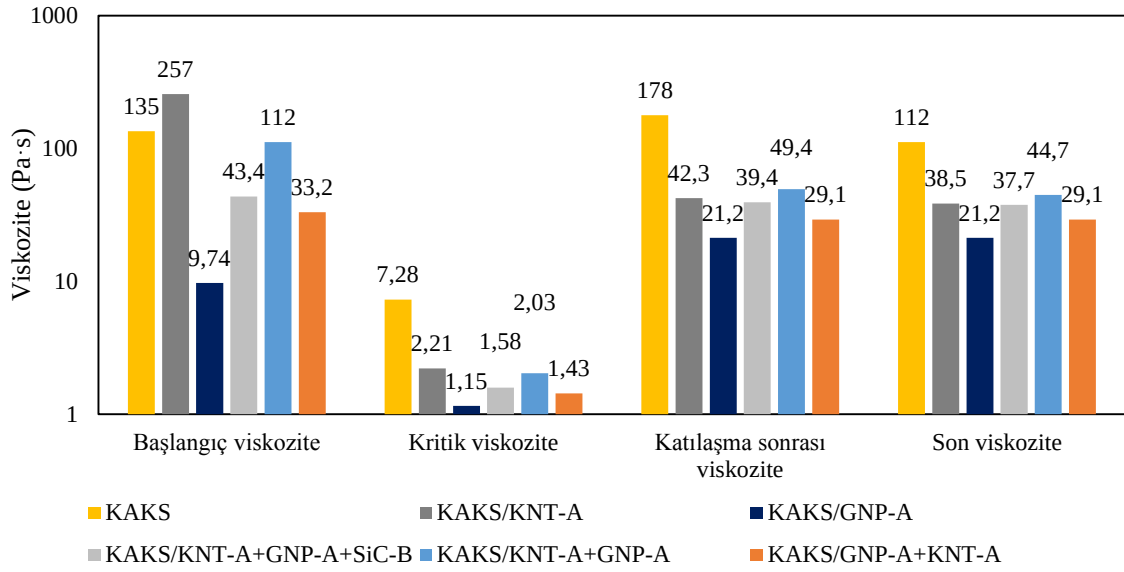
4.2.3. Hibrit Nanopartikül Takviyesinin Etkisi

Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretiminde kullanılacak nanopartikül türü ve oranına karar verildikten sonra Tablo 3.8’de verilen plana göre üretim yapılmıştır. İmalat aşamaları Bölüm 3.1.3’de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Toplamda 7 adet hibrit nanopartikül takviyeli KAKS üretilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyesinin süspansiyonun reolojik özelliklerine olan etkisini gözlemleyebilmek için hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’lar tek ve çok katı fazlı KAKS’lar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İnceleme işlemi sırasında karşılaştırmanın rahat yapılabilmesi için numuneler nanopartikül takviyelerine göre 3 gruba ayrılmıştır.



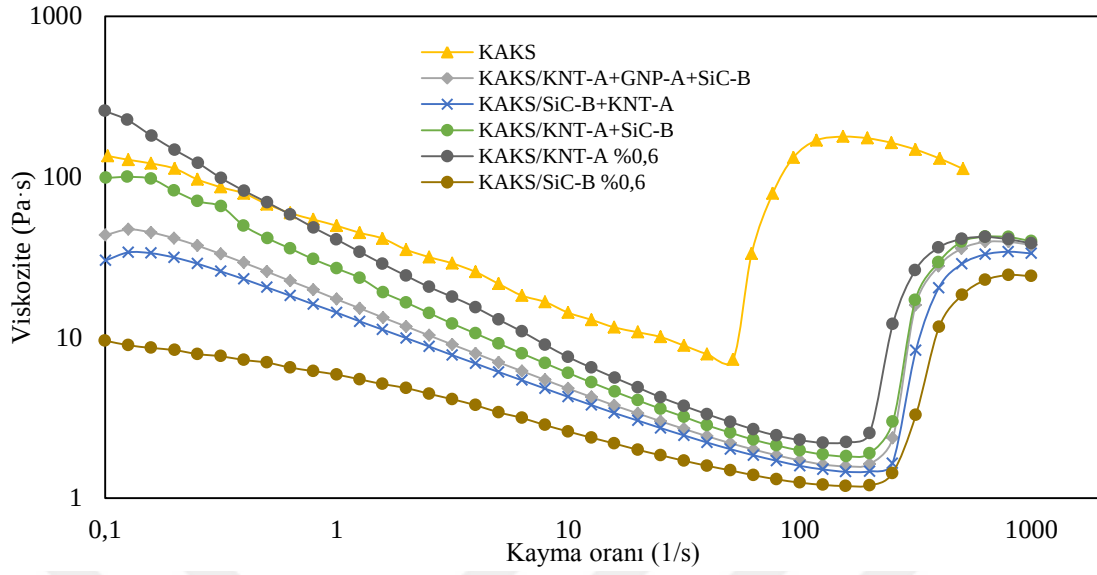
Şekil 4.13. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi

Şekil 4.13’te KNT-A ve GNP-A takviyeleri kullanılarak üretilmiş hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’ların diğer KAKS’lar ile birlikte verilen kayma oranına karşı viskozite grafiği görülmektedir. Çok katı fazlı KAKS’ların tamamında toplam nanopartikül oranı ağırlıkça %0,6 olarak sabit tutulmuştur. Tüm süspansiyonlar kayma altında katılaşma davranışı göstermiştir. Nanopartikül takviyesi tek katı fazlı KAKS’ın viskozite profilini bozmuştur [131]. Çok katı fazlı KAKS’larda kritik kayma oranı daha yüksek değerlere ulaşmış yani katılaşma süreci tek katı fazlı KAKS’lara göre daha geç meydana gelmiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS’ların kritik kayma oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Nanopartikül takviyelerinin silika partikülleri arasına girerek hidroküme yapıları oluşturmasını engellediği ve viskozite profilini bozduğu düşünülmektedir.



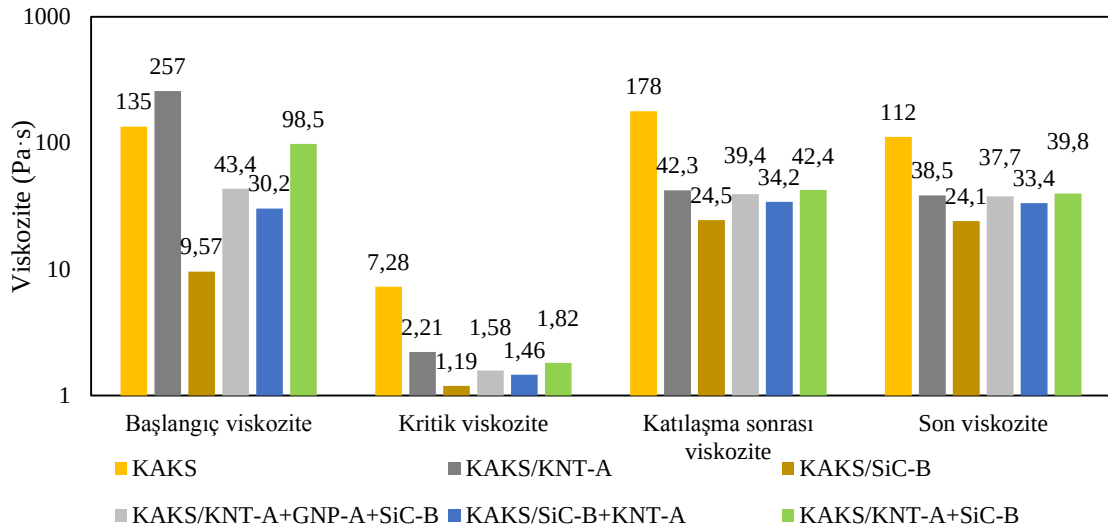
Şekil 4.14. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması

Nanopartikül takviyeli KAKS’lar incelenecek olursa en düşük viskozite profili GNP-A takviyeli KAKS’da meydana gelmiştir. KNT-A takviyeli KAKS numunesi ise başlangıç viskozitesinde tek katı fazlı KAKS’ın üzerinde bir değere ulaşmıştır. Şekil 4.14’de karşılaştırılan 6 numune içinde önemli olan dört önemli viskozite değeri sütun grafik şeklinde verilmiştir. KNT-A takviyesinin GNP-A takviyesine göre viskozite profilinde daha başarılı olduğu hibrit nanopartikül takviyelerinde de viskozite profilinin bu iki numune arasında konumlandığı görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken KAKS/KNT-A+GNP-A numunesinin katılma sonrası ve son viskozite değerlerinde KAKS/KNT-A numunesinden daha iyi performans göstermiş olmasıdır. KAKS/GNP-A’da olduğu gibi KAKS/GNP-A+KNT-A’da da grafik kayma incelleme ve kayma altında katılma olmak üzere iki bölgeden oluşmuştur. Diğer süspansiyonlarda ise katılma sonrası viskozitenin ardından üçüncü bölge olarak plato oluşumu gözlenmiştir. Son viskozite değerleri incelendiğinde sadece KAKS/GNP-A’da başlangıç viskozite değerinin üzerine çıkılabildiği diğer tüm numunelerin başlangıç viskozite değerlerinin altında kaldığı gözlenmiştir.



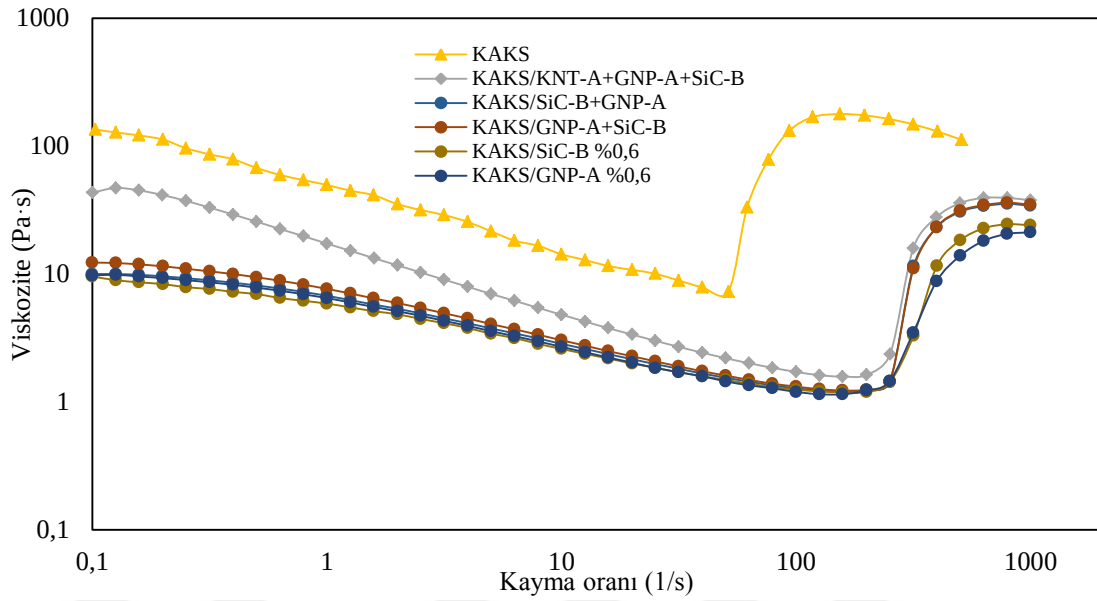
Şekil 4.15. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi

Şekil 4.15'de KNT-A ve SiC-B nanopartikülleri kullanılarak üretilmiş KAKS'ların viskozite profilleri tek katı fazlı KAKS ile beraber gösterilmiştir. Nanopartikül takviyeleri bu numuneler için de viskozite profilini bozucu etki yapmıştır. Tek katı fazlı KAKS için kritik kayma oranı 51,5 1/s iken nanopartikül takviyeli KAKS'larda 200 1/s üzerinde olmuştur. Nanopartikül takviyesi süspansiyonların katılaşma sürecinde gecikmeye neden olmuştur. Nanopartiküllerin silika partiküller arasında girerek hidrokümeler oluşturmasını geciktirdiği görülmüştür. Tüm süspansiyonlarda düşük kayma oranlarında viskozitelerinde incelme davranışı görülmüş, kritik bir kayma oranının ardından kayma altında katılaşma davranışı meydana gelmiştir. KAKS/SiC-B numunesinde diğer KAKS'lara göre çok daha kısıtlı olmakla birlikte tüm numunelerde üçüncü bölge olarak plato oluşumu meydana geldiği görülmüştür.



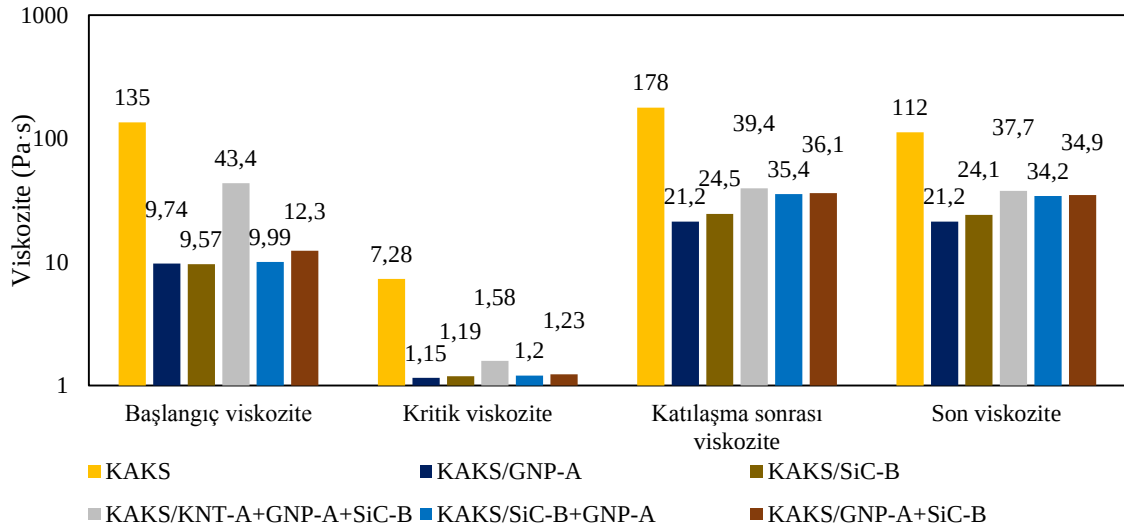
Şekil 4.16. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.16'da karşılaştırılan 6 numune için önemli olan viskozite değerleri sütun grafik olarak verilmiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar incelenecek olursa SiC-B takviyeli KAKS'ın en düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. KNT-A takviyeli KAKS numunesi ise başlangıç viskozitesinde tek katı fazlı KAKS'ın üzerinde bir değere ulaşmıştır. KNT-A takviyesinin kullanıldığı süspansiyonların SiC-B takviyesi kullanılanlara göre daha yüksek viskozite profiline sahip olduğu tespit edilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda KNT-A takviyesinin SiC-B takviyesine göre daha baskın olduğu ve hibrit nanopartikül takviyelerinin viskozite profilinin bu iki numune arasında konumlandığı görülmüştür. KAKS/KNT-A+SiC-B numunesinin katılma sonrası viskozitesi KAKS/KNT-A numunesine neredeyse eşit olmasına rağmen son viskozite değerinde KAKS/KNT-A numunesinden %3,22 daha iyi performans göstermiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS'ların numunelerinin katılma sonrası ve son viskozite değerleri incelendiğinde sadece KAKS/SiC-B ve KAKS/SiC-B+KNT-A numunelerinin başlangıç viskozite değerinin üzerine çıkılabildiği diğer tüm numunelerin başlangıç viskozite değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’larda viskozitenin kayma oranına göre değişimi

Şekil 4.17’de SiC-B ve GNP-A nanopartikülleri kullanılarak üretilmiş KAKS’ların kayma oranına karşı viskozite değerleri logaritmik olarak gösterilmiştir. Nanopartikül takviyelerinin bu numuneler içinde viskozite profilini bozucu etki yaptığı tespit edilmiştir. Tek katı fazlı KAKS için kritik kayma oranı 51,5 1/s iken nanopartikül takviyeli KAKS’larda 251 1/s ve üzerinde meydana gelmiştir. Nanopartikül takviyesi nanopartikül takviyeli KAKS’ların tamamında katılaşma sürecinde gecikmeye neden olmuştur. Nanopartiküllerin silika partiküllerin arasına girerek hidrokümeler oluşturmasını geciktirdiği görülmüştür. Tüm süspansiyonlarda düşük kayma oranlarında viskozitelerinde inceltme davranışı görülmüş kritik bir kayma oranının ardından kayma altında katılaşma davranışı meydana gelmiştir. KAKS/GNP-A numunesinde iki bölgeli bir grafik oluşurken, KAKS/SiC-B numunesinde kısıtlı olmakla birlikte üçüncü bölge olarak plato oluşumu meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.18. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’larda bölgesel viskozite değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.18’de karşılaştırılan 6 numune içinde önemli olan dört bölgesel viskozite değeri sütun grafik şeklinde verilmiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS’lar incelenecek olursa en düşük viskozite profili KAKS/SiC-B ve KAKS/GNP-A takviyeli KAKS’larda meydana gelmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli olan KAKS/SiC-B+GNP-A ve KAKS/GNP-A+SiC-B süspansiyonlarının viskozite profilinde KAKS/SiC-B ve KAKS/GNP-A’ye göre daha başarılı olduğu görülmüştür. SiC-B ve GNP-A nanopartiküllerinin hibrit olarak KAKS’lara takviye edilmesi pozitif etki yaratmıştır. Bu dört numunenin kritik viskozite değerleri de birbirine oldukça yakındır. Her üç nanopartikül takviyesini de barındıran KAKS/KNT-A+GNP-A+SiC-B numunesi diğer nanopartikül takviyeli KAKS’lardan daha iyi viskozite profiline sahiptir. Ancak katılma sonrası ve son viskozite değerlerinde başlangıç viskozitesinin gerisinde kalmıştır. Katılma sonrası ve son viskozite değerleri başlangıç viskozitelerine göre incelendiğinde KAKS/SiC-B, KAKS/GNP-A numunelerinin yaklaşık 2 kat KAKS/SiC-B+GNP-A ve KAKS/GNP-A+SiC-B numunelerinin ise yaklaşık 3 kat daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir.

4.2.4. Hibrit Nanopartikül Takviyeli KAKS’ların Reolojik Bulguları Üzerine Tartışma

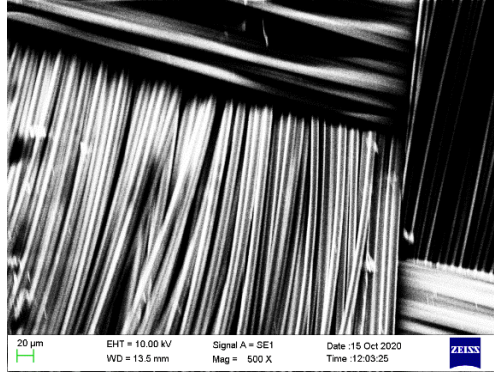
Çalışmanın bu bölümünde nanopartikül takviye malzemelerinin KAKS’ların reolojik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Literatür çalışmalarında da olduğu gibi [5,107] nanopartikül takviyelerinin tek katı fazlı KAKS’ın viskozite profilini bozduğu tespit edilmiştir. Nanopartikül takviyesi KAKS’ların kritik kayma oranlarını artırmış ve kayma altında katılma davranışının gecikmesine neden olmuştur. Bu bulgu, nanopartikül takviyelerinin kayma altında katılma evresinin başlangıcını ve silika süspansiyonlarının reolojik davranışını ayarlamak için etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Hidrokümelenme teorisine göre

süspansiyon üzerine gerilim uygulandığında silika partiküller bir araya gelerek hidroküme adı verilen yapılar oluşturmakta ve süspansiyonun viskozitesi kritik viskozite değerine ulaşılmasının ardından keskin bir yükselişe geçmektedir. Takviye olarak kullanılan nanopartiküllerin silika partiküller arasına girerek hidroküme oluşumunu engellediği ve hidrokümelere yıkan engeller olarak görev yaptığı önceki çalışmalarda bildirilmiştir [13]. Sadece KAKS/KNT-A numunesinin başlangıç viskozite değerinde KAKS numunesinden daha iyi performans sergilediği diğer tüm değerlerde KAKS numunesinin en başarılı numune olduğu görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar incelendiğinde özellikle iki numune dikkat çekmektedir. KAKS/SiC-B+GNP-A ve KAKS/GNP-A+SiC-B numuneleri takviye malzemeleri olan SiC-B ve GNP-A kullanılarak takviyelendirilen KAKS'lardan daha iyi bir viskozite profiline sahiptirler. Bu durum nanopartiküllerin hibrit olarak kullanılmasının avantajları olabileceğini göstermiştir.

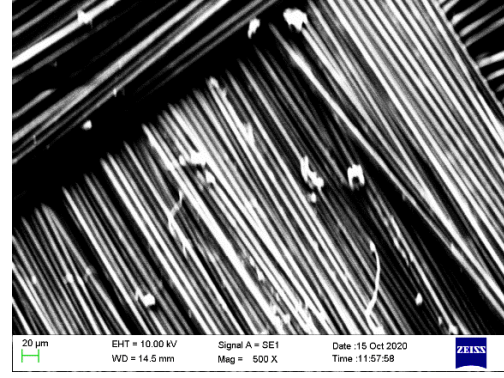
4.3. KAKS emdirilmiş Twaron kumaşların SEM görüntüleri

Temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron kumaşlarının yüzey morfolojisi, Zeiss Evo MA10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntülenmeden önce numuneler iletken olmaları için altınla kaplanmıştır. Kurutma işleminin uygun yapılmaması durumunda numunelerin kaplama işlemi çok uzun sürmektedir. Kaplama işlemi sırasında uygulanan vakuma uzun süre maruz kalan numunelerde KAKS'lar numune yüzeyine doğru hareket etmekte ve altın kaplama işlemi doğrudan KAKS üzerine yapılmaktadır. Bu durumlarda SEM ile görüntü alınabilmesi zorlaşmaktadır. Numuneler, literatürde önerildiği gibi testten önce kumaşlardan etanolü buharlaştırmak için bir fırında 12 saat boyunca 79 °C'de uygun şekilde kurutulmuştur [83].

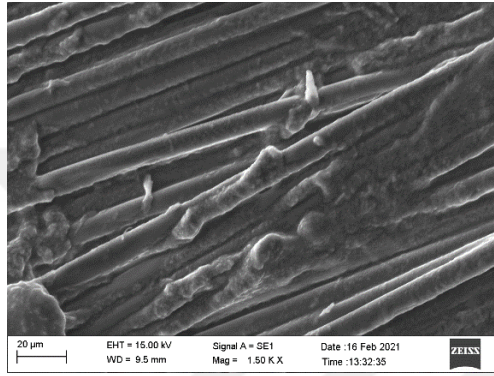
Şekil 4.19a ve Şekil 4.19b, herhangi bir işlem görmemiş temiz Twaron para-aramid kumaşlarını göstermektedir. Şekil 4.19c ve 4.19d'de KAKS emdirilmiş Twaron kumaşlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.19e ve Şekil 4.19f SiC-B nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin SEM görüntülerini içermektedir. Şekil 4.19g ve Şekil 4.19h'da Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlarına SiC-B+GNP-A nanopartikül takviyeli KAKS emdirilerek üretilmiş numunelerin SEM resimleri verilmiştir. Tüm numunelerde KAKS'ların kumaştaki fiberler arasına girdiği ve homojen dağılım olduğu görülmektedir. KAKS uygulanmış numunelerde fiberler arası boşlukların KAKS ile doldukları tespit edilmiştir.



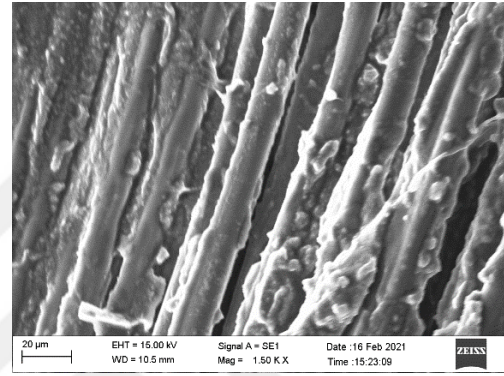
a)



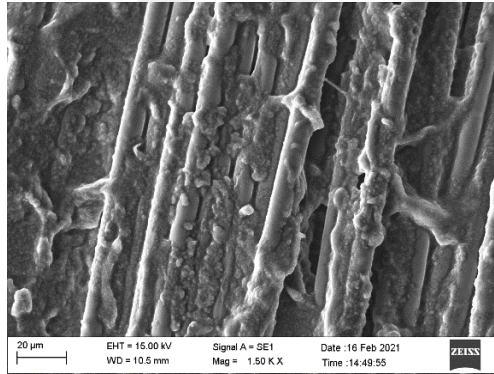
b)



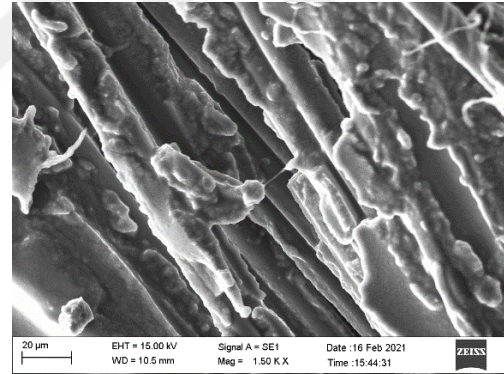
c)



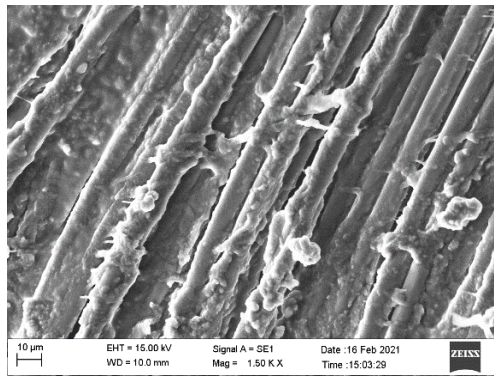
d)



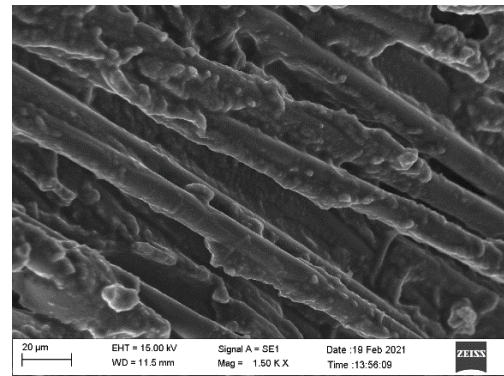
e)



f)



g)

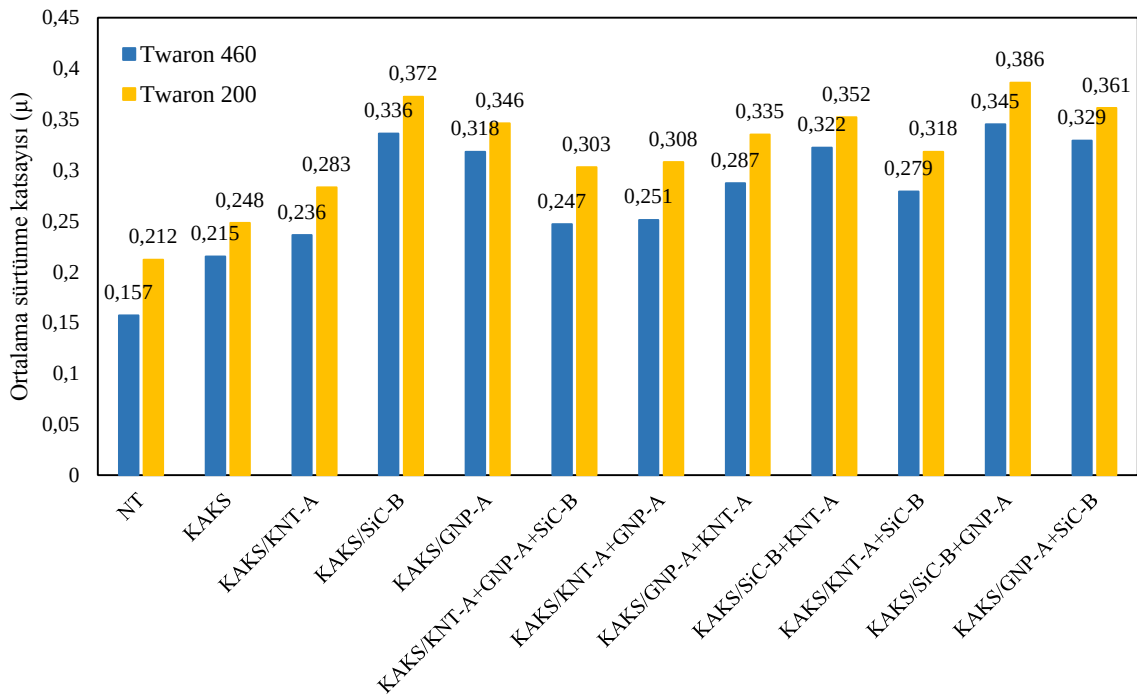


h)

Şekil 4.19. a-b) Temiz Twaron 200-460 c-d) KAKS Twaron 200-460 e-f) KAKS/SiC-B Twaron 200-460 g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A Twaron 200-460 numunelerine ait SEM görüntüleri

4.4. Yüzey Sürtünme Test Sonuçları

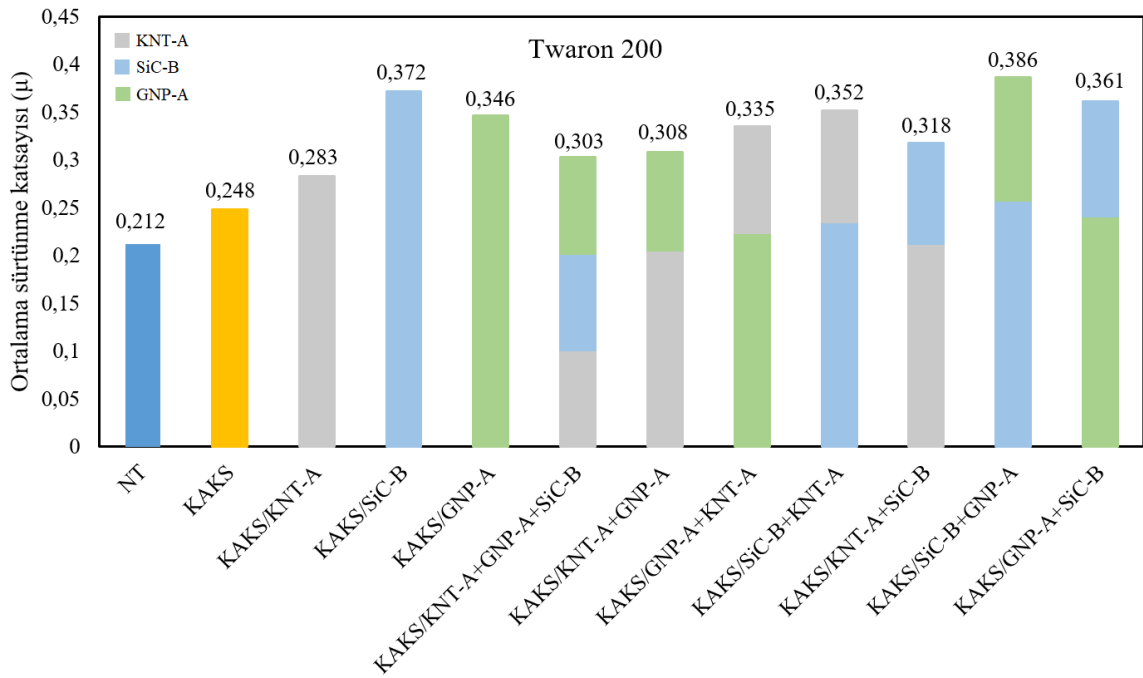
Bölüm 4.1 ve 4.2’de KAKS’ların reolojik özellikleri üzerine ayrıntılı bir araştırma yapılmıştır. Bu bölümde iki farklı Twaron para-aramid kumaşa emdirilen KAKS’ların kumaşların yüzey sürtünme özelliklerine olan etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Nanopartikül takviyesinin yüzey sürtünme özellikleri üzerindeki etkisinin detaylı incelenebilmesi için süspansiyon içerikleri Tablo 3.10’da verilen KAKS numuneleri hazırlanarak kumaşlara emdirilmiştir. KAKS’ların kumaşlara emdirme aşamaları Bölüm 3.3’de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir.



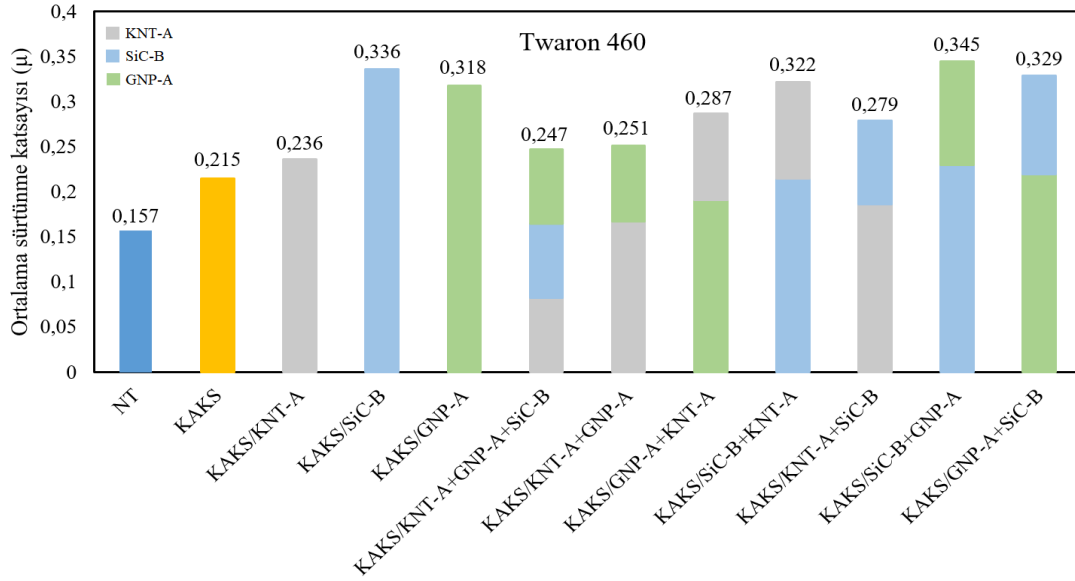
Şekil 4.20. Tüm numunelere ait yüzey sürtünme test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.20’de her iki kumaş türü içinde yüzey sürtünme test sonuçları gösterilmektedir. Twaron 200 kumaşının her numune türünde Twaron 460 kumaştan daha yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşların her ikisi de plain dokuma tipine sahip para-aramid kumaşlar olmasına rağmen metrekaşe başına düşen ağırlık, atkı çözgü iplik sayısı, iplik yoğunluğu gibi farkları bulunmaktadır. Burada yüzey sürtünmesine etki eden en önemli faktörün iplik sayısı olduğu düşünülmektedir. Tablo 3.9’da görüldüğü üzere Twaron 200 kumaşta her 10cm² de 105 x 105 atkı çözgü ipliği bulunurken bu sayı Twaron 460 kumaş için 67 x 67’dir. Twaron 200 daha sık dokunmuş olması nedeniyle NT kodlu temiz kumaşlarda da görüldüğü gibi ortalama yüzey sürtünme katsayısı Twaron 460’a göre yaklaşık %35 daha yüksektir. Takviyeli ve takviyesiz tüm KAKS emdirilmiş numunelerde de

Twaron 200 kumaş, Twaron 460 kumaşa göre daha yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahiptir. KAKS emdirilmesi işleminin etkisini inceleyecek olursak, tek katı fazlı KAKS emdirme işlemi Twaron 200 kumaş için yaklaşık %17'lik bir iyileşme sağlarken Twaron 460 kumaş için bu oran %37 olmuştur. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numuneler incelendiğinde de benzer bir durum olduğu ve KAKS emdirilmesinin ortalama yüzey sürtünme katsayısı için Twaron 460 kumaşta Twaron 200'e göre daha yüksek bir artışa sebep olduğu görülmüştür. En yüksek artış her iki kumaş türü içinde KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonunun emdirildiği kumaşlarda görülmüştür. KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonunun emdirilmesi temiz kumaşa göre Twaron 200'de yaklaşık %82 oranında bir iyileşme sağlarken Twaron 460'da bu oran %120 olarak bulunmuştur. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar arasında en düşük etkiye sebep olan KNT-A takviyesi ise Twaron 200 kumaşta %33'lük iyileşmeye sebep olurken Twaron 460 kumaşta %50 oranında iyileşme sağlamıştır. Twaron 200 kumaşı doğal yapısı sebebiyle zaten yüksek bir ortalama sürtünme katsayısını sahip olduğundan KAKS emdirilmesinin etkisi Twaron 460'a göre daha sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.21. Twaron 200 ile üretilen numunelerde ortalama sürtünme katsayısına nanopartikül takviyesinin etkisi



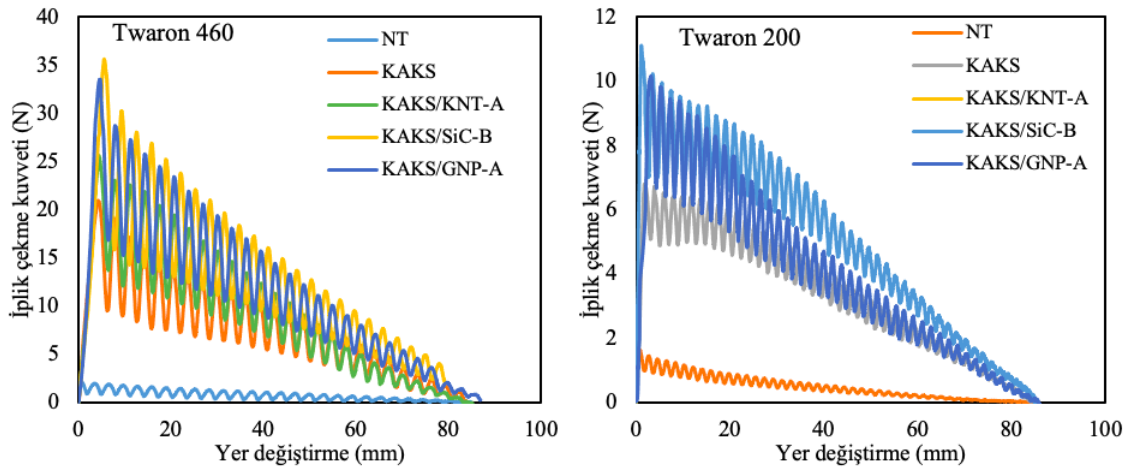
Şekil 4.22. Twaron 460 ile üretilen numunelerde ortalama sürtünme katsayısına nanopartikül takviyesinin etkisi

KAKS emdirilmesi tüm kumaşlarda yüzey sürtünme katsayısını arttırmıştır. Şekil 4.21 ve 4.22’de Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşları için nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numuneler incelendiğinde tek katı fazlı KAKS’a göre yüzey sürtünme değerinin çok daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Çok katı fazlı KAKS numuneleri arasında en yüksek sürtünme katsayısına sahip numunenin her iki kumaş türü içinde SiC-B takviyeli, en düşük sürtünme katsayısına sahip numunenin de KNT-A takviyeli numuneler olduğu görülmektedir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numuneler ise genel olarak içeriğindeki nanopartikül türünün yoğunluğuna bağlı olarak sistematik dağılım göstermişlerdir. Bunun anlaşılabilmesi için Şekil 4.21 ve 4.22’de her nanopartikül takviyesi farklı renkle tasvir edilmeye çalışılmıştır. Örneğin açık mavi ile gösterilen SiC-B nanopartikül oranı arttıkça numunenin sürtünme katsayısı yükselmektedir. Tersine durumda KNT-A oranı arttıkça da ortalama sürtünme katsayısı azalmaktadır. Bu duruma aksi hareket eden tek numune KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonun emdirildiği numunedir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS/SiC-B+GNP-A numuneleri her iki kumaş türünde de tüm numuneler arasında en yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip numuneler olmuştur.

4.5. İplikler Arası Sürtünme Test Sonuçları

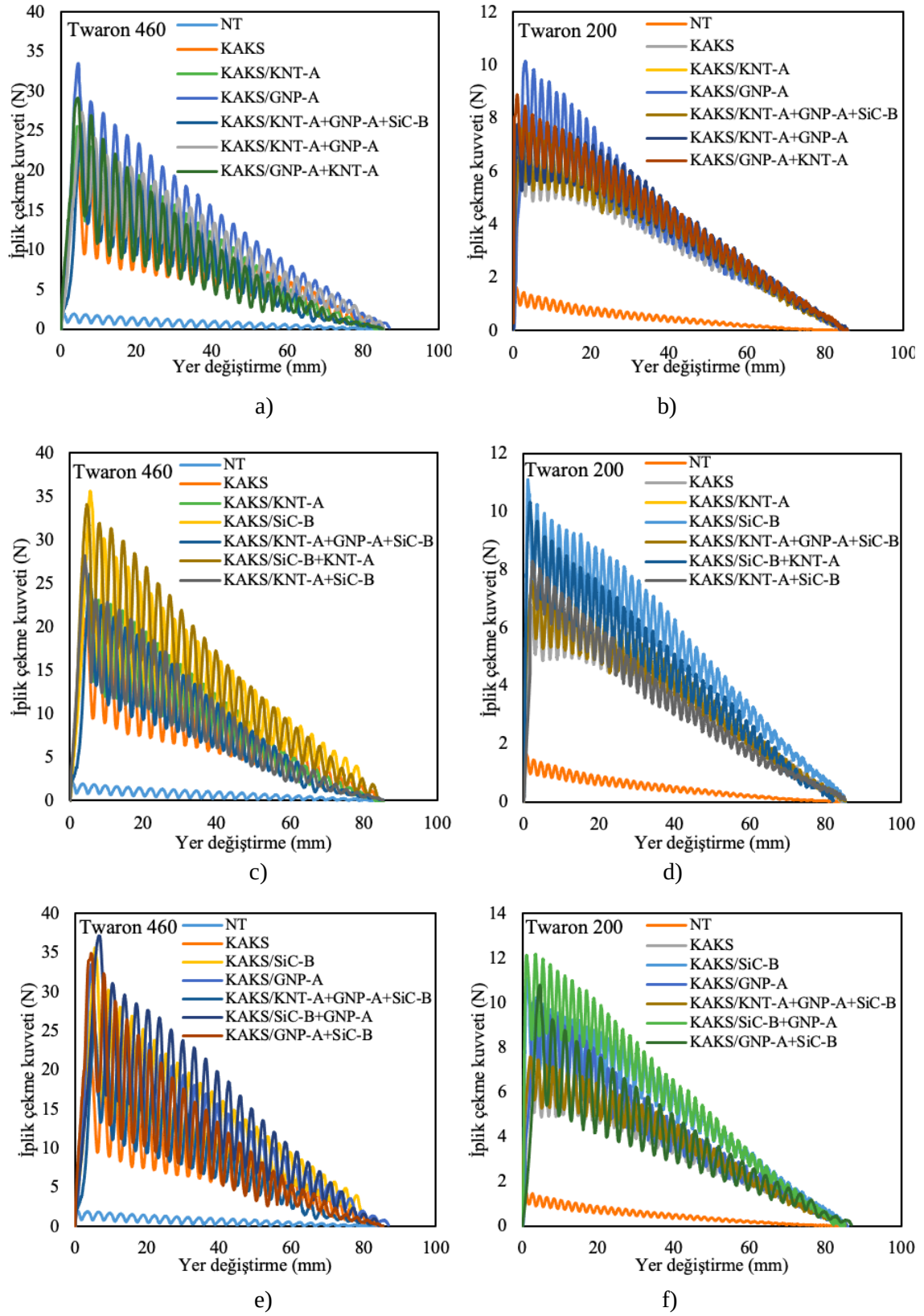
Bu bölümde temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşların iplikler arası sürtünme değerlerini inceleyebilmek için yapılan iplik çekme test sonuçları incelenmiştir. Hibrit nanopartikül takviyesinin iplikler arası sürtünme özelliklerine olan etkisini gözlemleyebilmek için hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’lar tek ve çok katı fazlı KAKS’lar ile karşılaştırmalı olarak

incelenmiştir. İnceleme işlemi sırasında karşılaştırmanın rahat yapılabilmesi için numuneler nanopartikül takviyelerine göre 4 gruba ayrılmıştır. Grafiklerde iplikler arası sürtünmede kumaş türünün etkisini inceleyebilmek için Twaron 200 ve Twaron 460 ayrı ayrı olarak gösterilmiştir. İplik çekme testlerinde tüm numunelerde grafiğin karakteristiği benzer eğilim göstermiştir. Testin başlangıcında tek bir ipliğin geçeceği çapraz iplik sayısı maksimum olduğundan, çekme kuvveti tepe noktasına ulaşıncaya kadar artar. Çekme kuvveti zirve noktasına ulaştığında, ilk geçiş ipliği geçilir ve tek iplik salınmaya başlar. Çekme kuvveti kademeli olarak azalır. Her çapraz iplikle kuvvet azalmaya devam eder ve salınım hareketi görülür. Bu hareket, tek iplik kumaş örgüsünden tamamen çıkıncaya kadar devam eder.



Şekil 4.23. Kumaşlara tek ve çok katı fazlı KAKS emdirilmesinin iplikler arası sürtünme değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.23’de tek ve çok katı fazlı KAKS emdirilmiş kumaşların iplik çekme test sonuçları temiz kumaşlarla beraber verilmiştir. Her iki kumaş türü içinde KAKS emdirilmiş kumaşların iplikler arası sürtünme değerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Gürgen’e göre KAKS uygulanan kumaşta fiberler arası boşluklar KAKS ile dolmaktadır [13]. Bu boşluklardaki KAKS, fiberler ve iplikler arasında ilave bir malzeme olarak sürtünmeyi arttırmaktadır. Şekil 4.23’de görülen sonuçlar bu durumu doğrulamaktadır. Takviyeli KAKS uygulanmış kumaşlarda her nanopartikül için iplikler arası sürtünme kuvveti daha da yükselmektedir. Takviye malzemeleri arasında SiC-B takviyesi sürtünme kuvvetini diğerlerine göre daha çok arttırmaktadır. En az etkili olan nanopartikül ise KNT-A olmuştur. KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşları temiz kumaşa göre sırasıyla 4 ve 10 kat daha yüksek bir sürtünme kuvvetine ulaşılmıştır. KAKS uygulanması işleminin Twaron 460 kumaşta sürtünmeyi daha çok arttırdığı gözlenmiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş kumaşlarda da tek katı fazlı KAKS emdirilmiş kumaşlara benzer bir oranla Twaron 460 kumaşın sürtünme kuvveti çok daha fazla artmıştır.



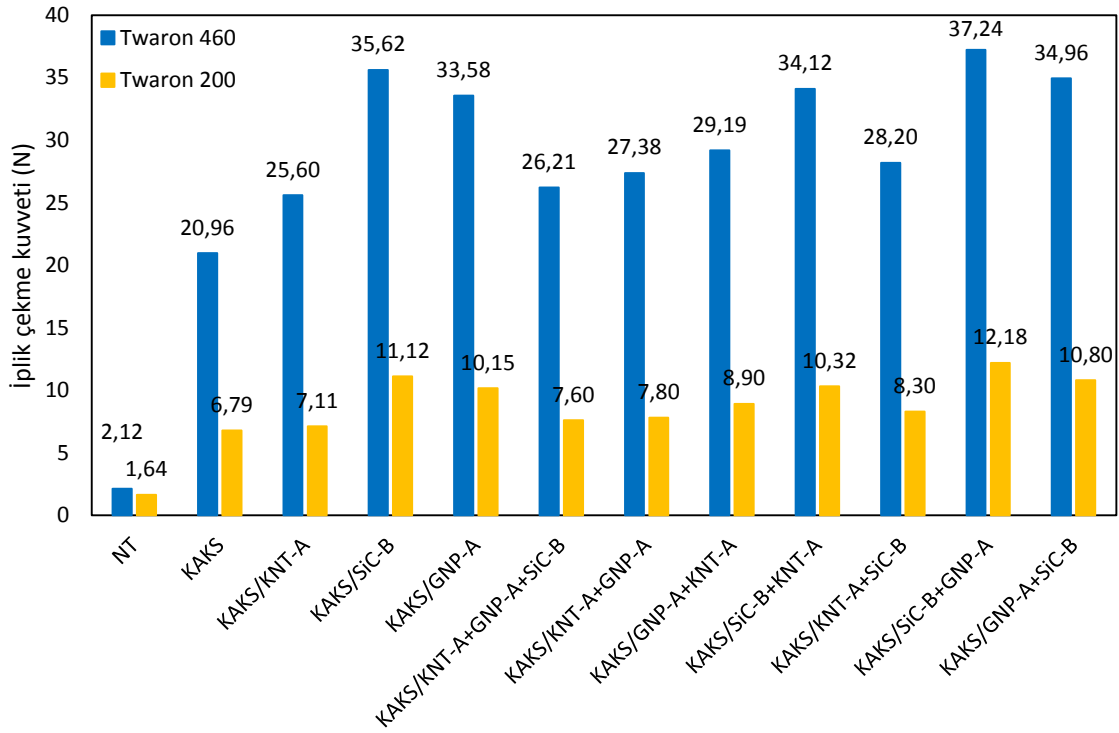
Şekil 4.24. Kumaşlara hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmesinin iplikler arası sürtünmeye etkisi

Şekil 4.24'de KNT-A, GNP-A ve SiC-B nanopartikülleri ile takviyelendirilerek üretilmiş KAKS'ların emdirildiği kumaşların iplik çekme test sonuçları görülmektedir. Takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmiş numunelerin tamamının iplik çekme kuvvetlerinin temiz kumaşa göre arttığı tespit edilmiştir. Her iki kumaş türü içinde takviyeli KAKS'lar temiz KAKS'lara göre daha yüksek iplik çekme kuvvetine neden olmuştur.

Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin sürtünme kuvvetleri incelendiğinde nanopartikül takviye türüne bağlı olarak sistematik değişim gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.24a ve b'de nanopartikül takviyeli KAKS'lar arasında yapılan incelemede KAKS/GNP-A numunesinin en yüksek, KAKS/KNT-A numunesinin ise en düşük iplik çekme kuvvetine neden olduğu görülmüştür. Hibrit nanopartikül takviyeli numunelerinde GNP-A oranı arttıkça sürtünme kuvveti artmakta, KNT-A oranı arttıkça ise sürtünme kuvveti azalmaktadır.

Şekil 4.24c ve d'de ise KNT-A ve SiC-B nanopartikülleri takviyelendirilmiş numuneler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin tamamı tek katı fazlı KAKS'a göre daha iyi performans göstermiştir. Her iki kumaş türü içinde en yüksek iplik çekme kuvveti KAKS/SiC-B emdirilmiş kumaşlarda meydana gelmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin iplik çekme kuvvetleri Şekil 4.22a ve b'de olduğu gibi nanopartikül türüne bağlı olarak sistematik değişim göstermiştir. SiC-B takviyesi iplikler arası sürtünmeyi daha çok artırmıştır.

Şekil 4.24e ve f'de SiC-B ve GNP-A nanopartiküllerinin kullanıldığı numunelerin iplik çekme kuvvetine karşılık yer değiştirme grafiği verilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için tek katı fazlı KAKS emdirilmiş ve temiz kumaşlarda aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmiş kumaşlar temiz kumaşa göre her iki kumaş türünde de daha yüksek sürtünme kuvvetine ulaşmışlardır. Nanopartikül takviyeli KAKS kullanılan numunelerin tamamı tek katı fazlı KAKS'a göre daha başarılı olmuştur. Bu iki grafikte dikkat edilmesi gereken durum hibrit nanopartikül takviyeli KAKS/SiC-B+GNP-A numunesinin sürtünme kuvveti değerinin KAKS/SiC-B numunesinin üstünde yer almasıdır. Şimdiye kadarki numunelerin hepsinde hibrit nanopartikül takviyeleri bileşiği oluşturan hibrit nanopartikül türüne göre sistematik hareket ederken bu numune SiC-B ve GNP-A takviyeli KAKS'larla oluşturulan numunelerden daha yüksek iplik çekme kuvvetine neden olmuştur. Nanopartiküllerin hibrit yapılar kullanılması iplikler arası sürtünme kuvvetini artırmıştır.



Şekil 4.25. Maksimum iplik çekme kuvvetleri

Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlarının iplik çekme testlerinde elde edilen maksimum kuvvete göre elde edilen karşılaştırmalı grafik Şekil 4.25’de verilmiştir. Hem temiz kumaşlarda hem de KAKS emdirilmiş kumaşların tamamında Twaron 460’ın maksimum iplik çekme kuvvetinin Twaron 200’e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmesi de Twaron 460’da daha etkili olmuştur. Temiz kumaşlar göz önüne alındığında Twaron 460’ın maksimum iplik çekme kuvveti Twaron 200’e göre yaklaşık 1,3 kat daha yüksek bir değere ulaşmışken KAKS emdirilmiş kumaşların ortalaması alındığında bu oran yaklaşık 2,6 kat olmuştur. Tablo 3.9’da verildiği gibi Twaron 200, 930 Dtex ve Twaron 460, 3360 Dtex kumaştan dokunmuştur. 930 Dtex iplikleri 3360 Dtex ipliklerinden daha ince olduğundan, iplikler arasındaki temas alanı 3360 Dtex ipliğe göre çok daha düşüktür. Bu nedenle Twaron 200, Twaron 460’a göre daha düşük bir maksimum iplik çekme kuvvetine sahiptir.

Kumaşlarda atkı ve çözgü sayısı az olduğunda, tek ipliğin çözgü ve atkı iplikleri arasındaki geçiş noktaları da daha azdır. Twaron 460 kumaşındaki yerel tepelerin sayısının Twaron 200’e göre daha az olmasının sebebi budur. İplik çekme kuvveti, atkı ve çözgü iplikleri arasındaki geçiş noktalarının sayısı ve dolayısıyla kumaş dokuma yoğunluğuyla da ilgilidir. Bu nedenle, bir ipliği daha az atkı ve çözgü içeren kumaştan çekmek için daha az kuvvet gerekir. Ancak burada Twaron 460 ve Twaron 200’ün farklı Dtex’lere sahip kumaşlarla dokunduğunu unutmamak gerekir. KAKS Twaron 460 kumaş üzerine daha az atkı ve çözgü ($67 \times 67 / 10 \text{ cm}^2$) ile dokunduğu için

KAKS'ların, ipliklerin arasına nüfuz etmesi nispeten kolay olur ve iplikler arası sürtünme önemli ölçüde artar. Maksimum iplik çekme kuvvetindeki artış Twaron 460 için KAKS emdirilmiş tüm numunelerde ortalama 14 kat olarak hesaplanmıştır. Twaron 200 kumaş üzerine daha yüksek atkı ve çözgü sayısına ($105 \times 105 / 10 \text{ cm}^2$) sahip olduğu için kumaşın yapısı gereği iplikler arası sürtünme de artar. Ancak geçiş noktalarının sayısı fazla olduğu için KAKS'ın iplikler arasına nüfuz etmesi ve zaten yüksek olan sürtünme kuvvetini arttırması daha zordur. Bu nedenle, Twaron 200 kumaşa KAKS emdirilmesi iplikler arasındaki sürtünme etkisini daha sınırlı ölçüde (temiz kumaşa oranla yaklaşık 5,6 kat) arttırmıştır.

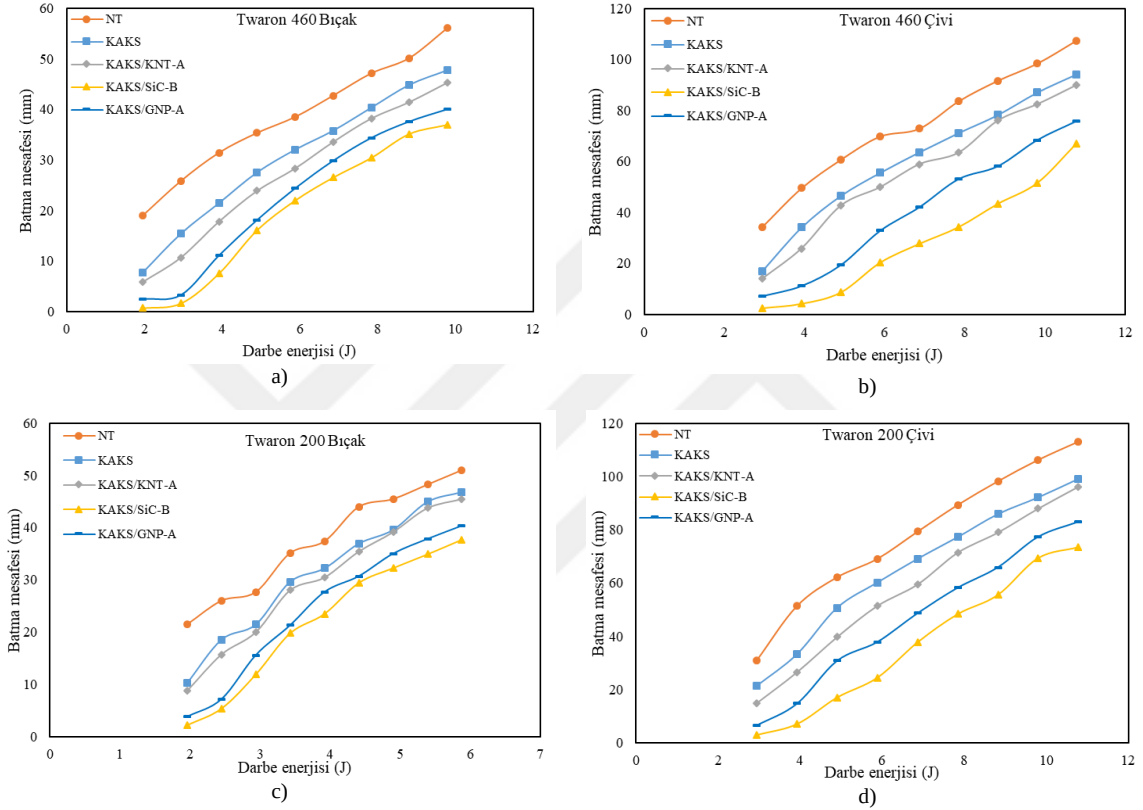
4.6. Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları

Bu bölümde KAKS emdirilmiş kumaşların düşük hızlı darbelere karşı etkinliğini inceleyebilmek için temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşlarla karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri için düşme kulesi kullanılarak serbest düşme deneyleri yapılmıştır. NIJ 0115.00 standardına göre yapılan bu deneyler genel olarak plastik, kompozit, kumaş, kauçuk vb. malzemelerin darbe direncini belirlemek için kullanılır. Düşük hızlı darbe testlerinde vurucu uç olarak standartta belirtilen "S1" bıçak (S1 knife) ve çivi (spike) uçlar kullanılmıştır [125]. Hibrit nanopartikül takviyesinin etkisini gözlemleyebilmek için hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'lar tek ve çok katı fazlı KAKS'lar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Numuneler arasındaki karşılaştırmanın rahat yapılabilmesi için nanopartikül takviyelerine göre dört gruba ayrılmıştır. Darbe testlerinde kumaş türünün etkisini inceleyebilmek için grafikler, Twaron 200 ve Twaron 460 olarak ayrı ayrı gösterilmektedir.

4.6.1. KAKS Uygulamasının Enerji Sönümleme Performansına Etkileri

Şekil 4.26'da temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlar için bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe test sonuçlarını görülmektedir. Buna göre, her iki vurucu uç türü için de KAKS emdirilmiş numuneler enerji sönümleme performansını yükseltmiştir. Nanopartikül takviyeli KAKS uygulanmış kumaşlar incelendiğinde her iki kumaş ve vurucu uç türü için de koruma performansının arttığı görülmüştür. Yüzey sürtünme ve iplikler arası sürtünme testleri incelendiğinde KAKS emdirilmiş tüm numunelerin temiz kumaşlara göre daha başarılı olduğu ve nanopartikül takviyesinin numunelerin sürtünme katsayılarını arttırdığı sunulmuştur. Reolojik özellikler göz önüne alındığında ise nanopartikül takviyesinin KAKS'ların viskozite profilini bozduğu görülmüştü. Bu durumda enerji sönümleme etkisinin arttırılması açısından kayma altında katılma mekanizmasının ötesinde fiberler arası etkileşimin ön plana çıktığı görülmektedir. Gürgen, KAKS'ın kumaşa emdirilmesi ile fiberler arası boşlukları doldurarak sürtünmeyi arttırdığını ve bu durumun KAKS'ların enerji sönümleme

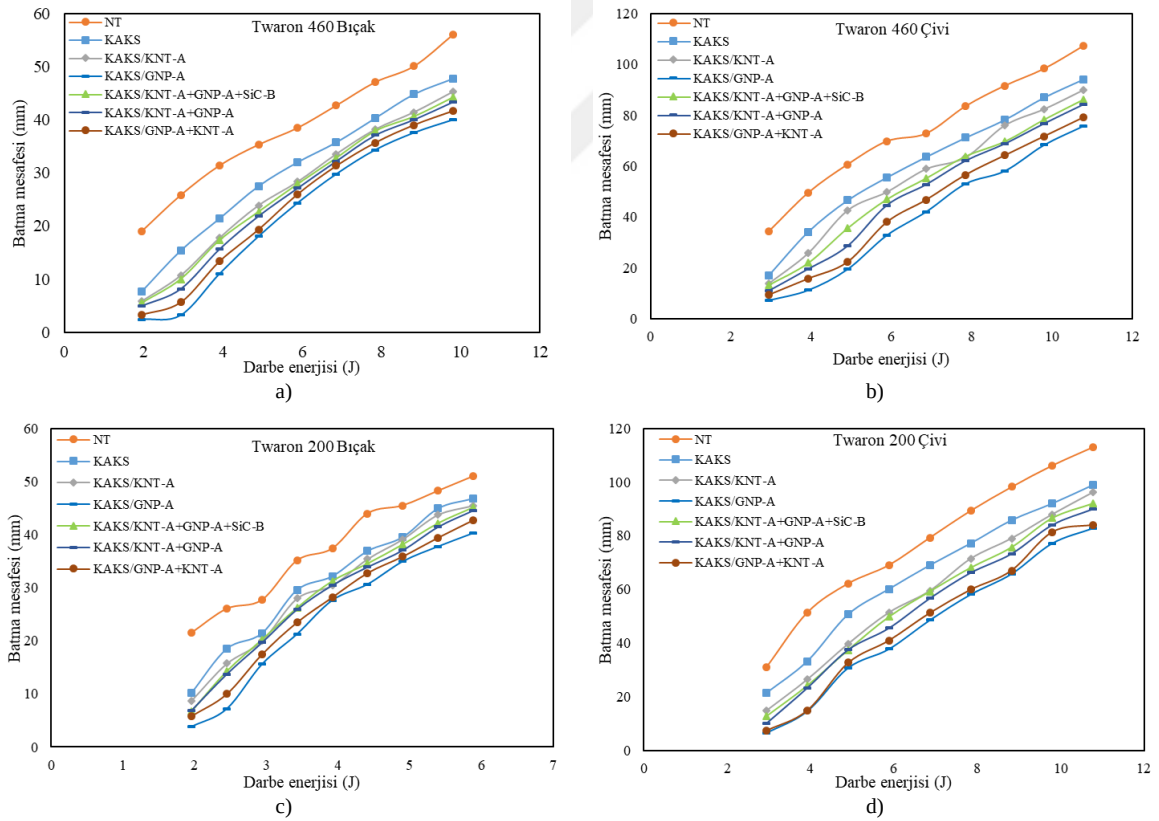
performanslarını etkileyen en önemli etken olduğunu öne sürmüştür [13]. Takviye malzemeleri arasında SiC-B takviyeli numuneler diğerlerine göre daha yüksek koruyuculuk performansı göstermiştir. SiC-B takviyesi iplikler arası ve yüzey sürtünme testlerinde sürtünmeyi en çok artıran nanopartikül olarak öne çıkmıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde de yüksek sertlik ve basma dayanımı gibi mekanik özellikleri sayesinde darbeyi durdurmaya yönelik çalışan yapılar olarak bulunmaktadır [13].



Şekil 4.26. Temiz ve KAKS emdirilmiş a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçları

Şekil 4.27’de KNT-A ve GNP-A takviyeleri kullanılarak üretilmiş hibrit nanopartikül takviyeli KAKS’ların tek katı fazlı KAKS ve temiz kumaş ile birlikte verilen darbe enerjisine karşı batma mesafesi grafikleri görülmektedir. Hem bıçak hem de çivi uç kullanılarak yapılan deneylerde tüm numuneler iki kumaş türü için de test edilmiştir. Her iki kumaş ve vurucu uç türünde de elde edilen grafikler uyum içerisindedir. KAKS emdirilmiş numunelerin tamamının temiz kumaşlara göre koruma performansını arttırdığı görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş kumaşların tek katı fazlı KAKS emdirilmiş numunelere göre enerji sönümleme performansını arttırdığı tespit edilmiştir. Nanopartikül takviyelerinin etkisine bakıldığında; en başarılı numunenin grafen nanoplate takviyeli KAKS/GNP-A, en az başarılı numunenin ise çok

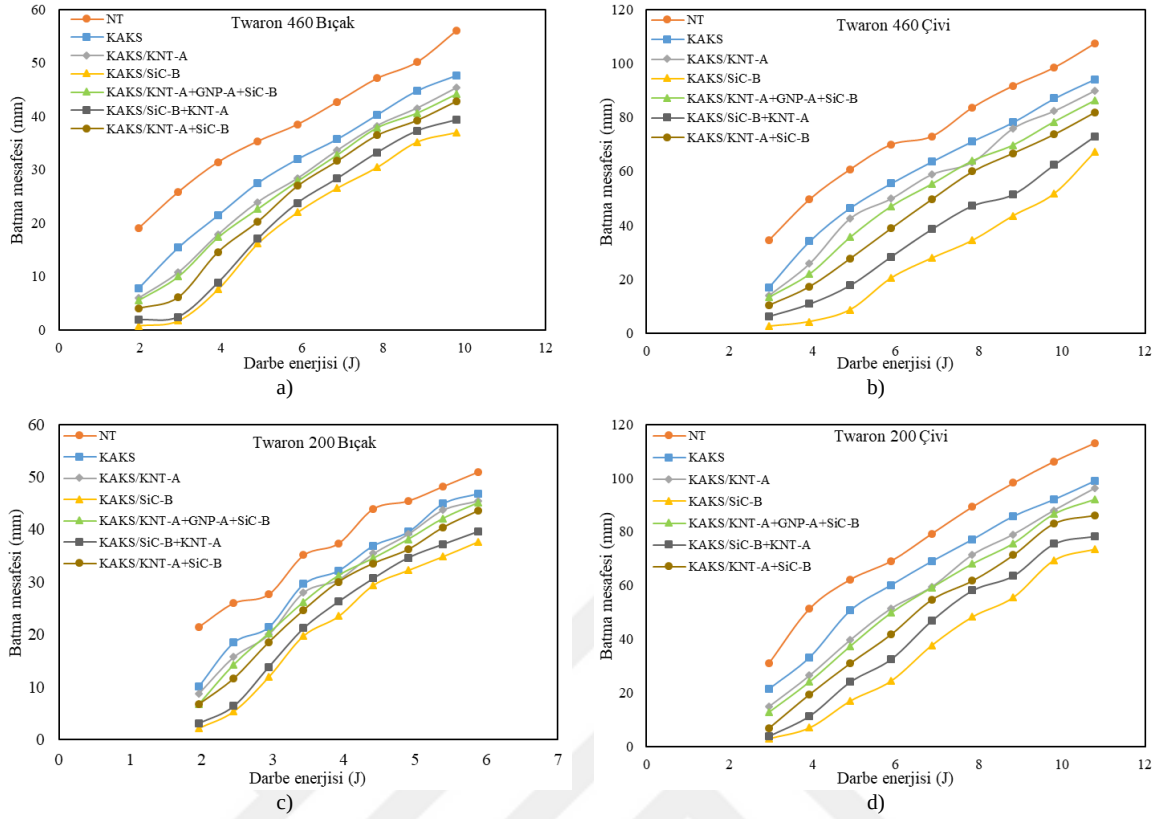
duvarlı karbon nanotüp ile takviyelendirilen KAKS/KNT-A olduğu tespit edilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin, içerisindeki nanopartikül türünün oranına bağlı olarak dağılım gösterdiği görülmüştür. Bölüm 4.2.3’de anlatılan reolojik bulgular göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığında çok duvarlı karbon nanotüp ve grafen nanoplate takviyesiyle oluşturulan hibrit nanopartikül takviyeli KAKS numunelerinin tek katı fazlı KAKS’ların viskozite profillerini bozduğu, kritik kayma oranlarını geciktirdiği görülmüştü. Nanopartikül takviyeli numunelerin başlangıç, kritik, katılaşma sonrası ve son viskozite değerleri genel olarak tek katı fazlı KAKS’a göre daha düşüktü. Buna istisna olan tek durum KAKS/KNT-A numunesinin başlangıç viskozitesinin tek katı fazlı KAKS’dan daha yüksek olmasıdır. Nanopartikül takviyeli KAKS’lar arasında en düşük viskozite profiline sahip numunenin KNT/GNP-A numunesi olduğu hatırlanmalıdır. Yüzey sürtünmesi ve iplikler arası sürtünme değerleri göz önüne alındığında ise nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş kumaşların tek katı fazlı KAKS emdirilmiş kumaşlara göre daha başarılı olduğu ve nanopartikül takviyeleri sayesinde sürtünmeyi arttırdıkları gözlenmiştir.



Şekil 4.27. KNT-A ve GNP-A nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi

KNT-A ve GNP-A nanopartikül takviyeleriyle yapılan hibrit nanopartikül takviyeli numunelerin düşük hızlı darbe testlerinde reolojik özelliklerinden daha çok sürtünme özelliklerinin etkili olduğu görülmüştür. Grafen nanoplate partikülleri geniş yüzey alanı sayesinde fiberler arasında daha çok yer kaplamakta ve fiberlerin daha gergin durmasına neden olmaktadır. Bu durum grafen nanoplateelerin çok duvarlı karbon nanotüplere göre daha iyi performans sunmasını açıklamaktadır.

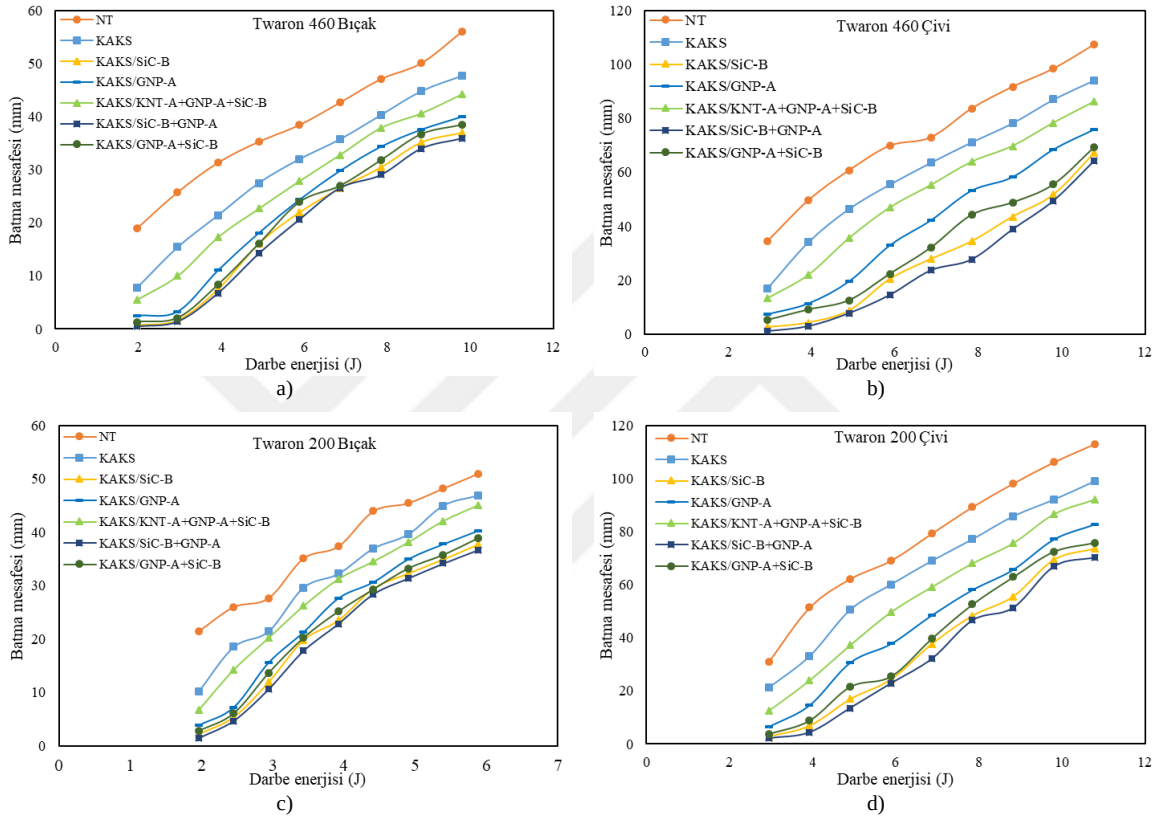
Şekil 4.28’de hibrit nanopartikül takviyeli ve tek katı fazlı KAKS’ların düşük hızlı darbe test sonuçları temiz kumaşlarla kıyaslanarak gösterilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyesi olarak KNT-A ve SiC-B nanopartikülleri kullanılmıştır. Hem Twaron 200 hem de Twaron 460 kumaşlarda bıçak uç ile yapılan düşük hızlı darbe test sonuçlarının birbirlerine daha yakın olduğu çivi uç ile yapılan sonuçlarda ise farkın daha belirgin olduğu görülmektedir. Burada bıçak uç kullanılarak yapılan yapılan deneylerde Twaron 200 kumaşı ile üretilen numunelerde maksimum darbe enerjisinin 5,88 Joule ile sınırlandırıldığını unutmamak gerekir. Twaron 460 kumaşlarda ise bıçak uç ile yapılan deneylerde maksimum enerji 9,8 Joule’dür. KAKS emdirilmiş numunelerin tamamının temiz kumaşlara göre enerji sönmleme performansını arttırdıkları görülmektedir. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerin hepsi tek katı fazlı KAKS emdirilmiş numunelere göre koruma performansını yükseltmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli numuneler incelendiğinde, bıçak uç ile yapılan testlerde KAKS/SiC-B+KNT-A numunesinin KAKS/SiC-B numunesine oldukça yakın değerlere ulaştığı görülmektedir. Özellikle düşük enerji seviyelerinde aralarındaki fark oldukça düşüktür. KAKS/KNT-A+GNP-A+SiC-B numunesi tüm deneylerde KAKS/KNT-A numunesine oldukça yakın değerlere sahip olmuş ancak içeriğinde bulunan GNP-A ve SiC-B nanopartikül takviyelerinin etkisiyle biraz daha iyi koruma performansı sergileyebilmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli numuneler genel olarak numune içeriğini oluşturan nanopartiküllerin performansına yakın performans sergilemiş bunun aksi bir durum meydana gelmemiştir. Reolojik olarak incelendiğinde SiC-B ve KNT-A nanopartikül takviyelerinin KAKS’ların viskozite profillerini bozduğu bilinmektedir. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS numuneleri de KAKS’ların viskozite değerlerini düşürmüş ve numune içeriğindeki nanopartikül oranında süspansiyonun incelmeye sebep olmuşlardır. Öte yandan yüzey sürtünme ve iplikler arası sürtünme özelliklerinde ise hibrit nanopartikül takviyeleri sürtünmeyi arttırmışlardır. Düşük hızlı darbe testlerinde de KNT-A ve SiC-B nanopartiküllerinin hem ilk temas anında sürtünmeyi artırarak enerjinin bir kısmını sönmledikleri hem de ipliklerin hareketini zorlaştırarak koruma performansını arttırdıkları düşünülmektedir. Bu nedenle düşük hızlı darbe testleri sonucu elde edilen iyileşmenin viskozite özelliklerinden ziyade yüzey ve iplikler arası sürtünmeye bağlı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28. KNT-A ve SiC-B nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi

SiC-B ve GNP-A nanopartikül takviyeli KAKS'ların Twaron para-aramid kumaşların bıçak ve çivi uç ile uygulanan düşük hızlı darbe testlerindeki enerji sönümleme performanslarını incelemek için temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.29 Twaron 460 ve Twaron 200 kodlu kumaşlar için çivi ve bıçak uç kullanılarak yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. KAKS uygulamasının tüm durumlarda temiz kumaşa göre koruyuculuk performansını arttırdığı görülmüştür. Hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'larda önceki karşılaştırmalarda en başarılı nanopartiküller olan SiC-B ve GNP-A kullanılmıştır. Şimdiye kadar yapılan karşılaştırmalarda hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş kumaşlar genellikle içeriğindeki nanopartikül türünün koruyuculuk performansına yakın bir performans göstermiş ve grafiklerde sistematik bir dağılım görülmüştü. Bu incelemede önceki düşük hızlı darbe testlerinden farklı olarak %0,4 SiC-B ve %0,2 GNP-A içeriğine sahip olan KNT/SiC-B+GNP-A numunesi tüm karşılaştırmalarda en başarılı numune olmuştur. KNT/SiC-B+GNP-A numunesi en başarılı numune olsa da özellikle bıçak uç ile yapılan deneylerde KNT/SiC-B ve KNT/GNP-A+SiC-B numuneleri de oldukça yakın enerji sönümleme kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür. Reolojik açıdan incelendiğinde SiC-B ve GNP-A nanopartikül takviyeli KAKS'ların takviyesiz KAKS'ın viskozite profilini bozduğu görülmüştü. Ancak SiC-B ve GNP-A kullanılarak oluşturulan KNT/SiC-B+GNP-A ve KNT/GNP-A+SiC-B hibrit nanopartikül

takviyeli numunelerin KAKS/SiC-B ve KAKS/GNP-A numunelerinden daha iyi viskozite profiline sahip oldukları unutulmamalıdır. İplikler arası ve yüzey sürtünme sonuçları incelendiğinde de KNT/SiC-B+GNP-A numunesinin en başarılı numune olduğu görülmüştü. KNT/SiC-B+GNP-A numunesindeki SiC partiküllerinin sert yapısı sayesinde darbe enerjisini sönümlediği ve GNP partiküllerinin ise geniş yüzey alanları sayesinde fiberler arası gerginliği arttırarak enerji sönümleme performansına katkı sağladığı görülmüştür.

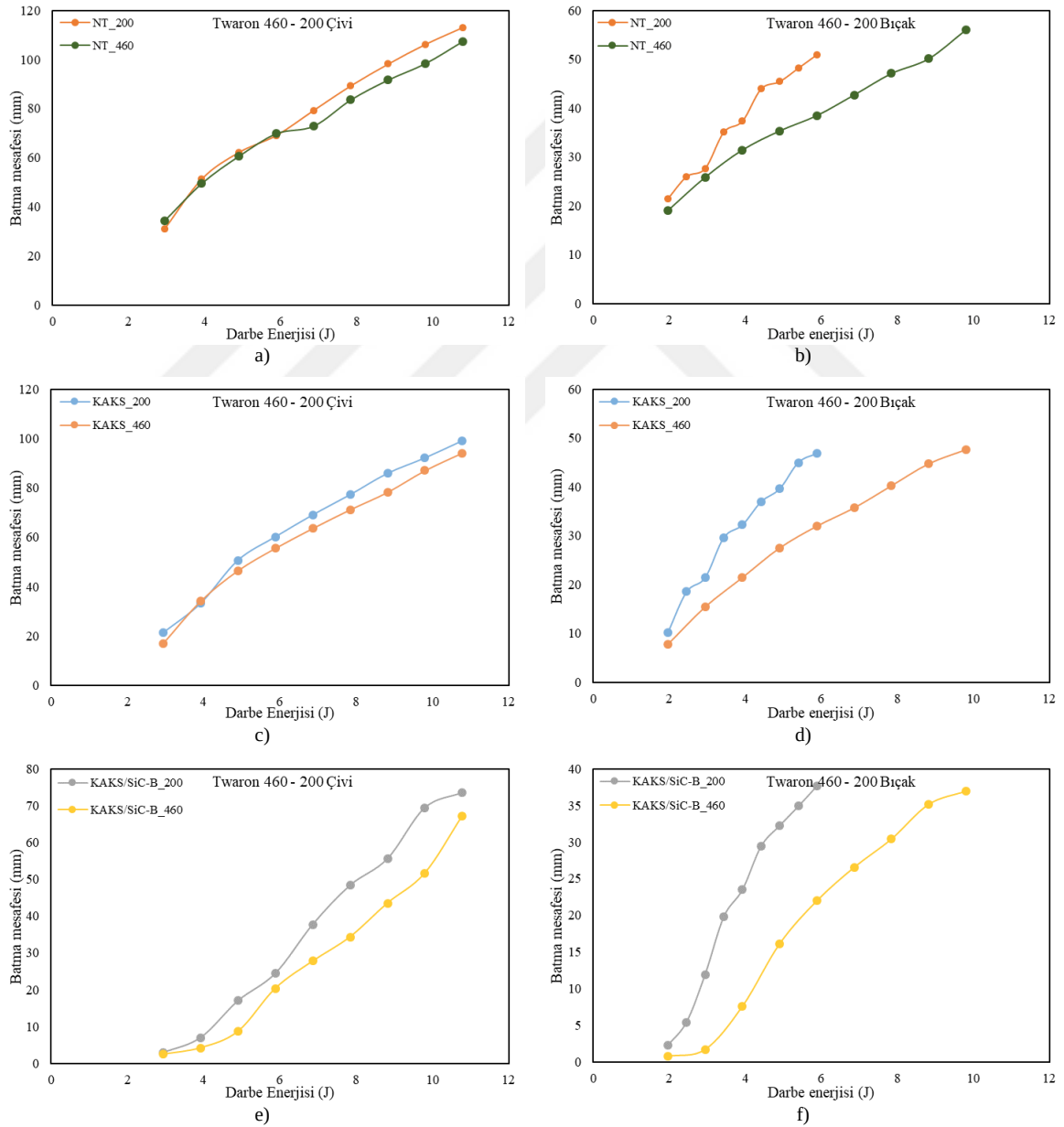


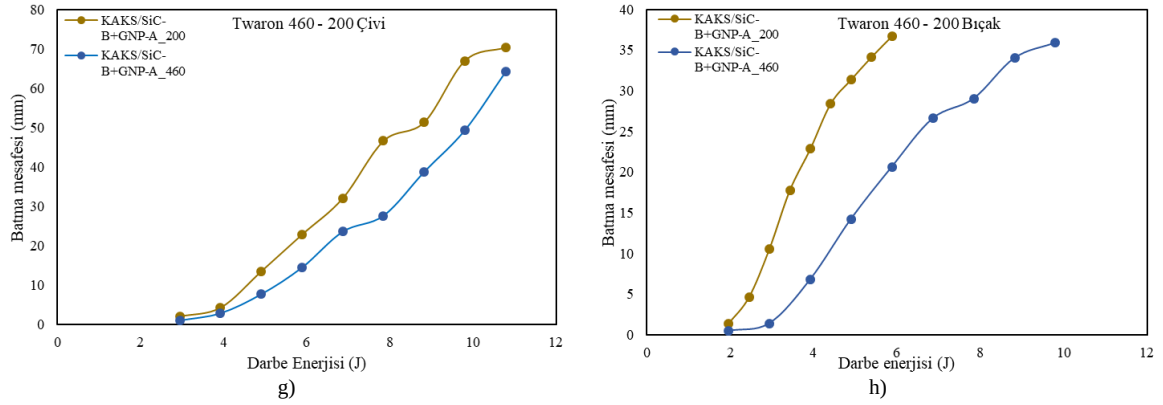
Şekil 4.29. GNP-A ve SiC-B nanopartikül takviyelerinin a-b) Twaron 460 c-d) Twaron 200 kumaşlarına bıçak ve çivi uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testi sonuçlarına etkisi

4.6.2. Kumaş Yapısının Enerji Sönümleme Performansına Etkileri

Düşük hızlı darbe testi için yapılan ön deneylerde düşürme yüksekliğinin belirlenebilmesi için temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşlarla bir dizi testler yapılmıştır. Bu ön deneyler sonucunda bıçak uç deneylerinde Twaron 200 kumaşı 0,60 m’de maksimum batma derinliğine ulaşırken Twaron 460 kumaşı 1,00 m’ye kadar ulaşabilmiştir. Bu nedenle bıçak uç ile yapılan düşürme testleri Twaron 460 kumaşı için 0,20-1,00 m ve Twaron 200 kumaşı için 0,20-0,60 m yükseklik aralığında gerçekleştirilmiştir. Çivi uç deneyleri ise her iki kumaş türü içinde 0,30-1,10 m arasındaki yüksekliklerden yapılmıştır. Şekil 4.30’da temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlar için düşük hızlı darbe test sonuçları kumaş yapısının etkisinin

incelenebilmesi için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hem temiz hem de KAKS emdirilmiş numunelerde Twaron 200 kumaşının çivi uç için Twaron 460 ile çok yakın enerji sönümleme performansı sergilediği görülmektedir. Bıçak uç kullanılarak yapılan deneylerde ise Twaron 460 kumaşının üstünlüğü açıkça görülmektedir. KAKS uygulaması her iki kumaş türü içinde koruyuculuk performansını arttırmıştır. Nanopartikül takviyeli KAKS uygulamasının Twaron 460 kumaşında Twaron 200'e göre enerji sönümleme performansını daha çok yükselttiği görülmüştür. Nanopartikül takviyelerinin Twaron 460 kumaşında fiberler arasındaki geniş boşluklara daha rahat nüfuz ederek sürtünmeyi arttırdığı için Twaron 200'e göre daha başarılı sonuçlar vermiştir.





Şekil 4.30. a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelere bıçak ve çivi uç ile yapılan düşük hızlı darbe testlerinde kumaş yapısının etkisi

Şekil 4.31 Twaron 200 ve Şekil 4.32 Twaron 460 kumaşları için çivi ve bıçak uç ile yapılan düşük hızlı darbe testi sonucu oluşan hasarları göstermektedir. Buna göre çivi ve bıçak uç ile oluşan hasar mekanizmaları birbirinden farklıdır. Çivi ucun kumaşa batması sonucu fiberler yatay yönde açılmakta ve darbenin etkisiyle çivi ucun batmasına olanak sağlayan bir pencere açılmaktadır. Bu hasar şekline “aralanma” veya “pencereleme” etkisi denilmektedir. Bıçak uç ile meydana gelen hasarlarda ise ilk olarak fiberlerin kesilmesi hasarı meydana gelmektedir. Twaron 200 kumaşında her 10 cm² de 105 x 105 atkı çözgü bulunurken Twaron 460 da bu sayı 67 x 67’dir. Çivi uç hasarında belirleyici faktör olan aralanma etkisi olduğu için Twaron 200 kumaşı Twaron 460’a göre daha hafif olmasına rağmen yüksek iplik sayısına sahip olması çivi uç ile yapılan darbelerde avantaj sağlamıştır. Bu durum hafifliğin ve hareket kabiliyetinin çok önemli olduğu giyilebilir zırh sistemlerinde darbe türüne göre kumaş seçimi yapılması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.31 ve 4.32’deki hasar şekilleri incelendiğinde KAKS emdirilmiş numunelerde de temiz kumaşlarda olduğu gibi çivi uç ile yapılan deneylerde baskın hasar tipinin “pencereleme” olduğu görülmüştür. KAKS emdirilmesi pencereleme etkisini önlemeye yönelik pozitif etkisi olmasına rağmen KAKS emdirilmesinin hasar şekli üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bıçak uç ile yapılan deneylerde de hem Twaron 200 hem de Twaron 460 kumaşlar ile yapılan deneylerde KAKS emdirilmesinin hasar şekline etkisi olmadığı görülmüştür.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Şekil 4.31. Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin hasar şekilleri incelemesi



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Şekil 4.32. Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin hasar şekilleri incelemesi

4.6.3. Düşük Hızlı Darbe Testleri Üzerine Tartışma

Kayma altında katılaştan sıvılar sahip oldukları eşsiz özellikleri sayesinde pek çok alanda kullanım imkânı bulmuştur. Bireysel savunma amaçlı kullanılan yüksek performanslı kumaşlarla kullanılmaya başlamasının temelinde kayma oranının artmasıyla viskozite değerinde yaşanan ani artış yatmaktadır. Yüksek performanslı kumaşlara KAKS uygulanması genel olarak enerji sönümleme performansını pozitif etkilemiştir. Literatürde yapılan çalışmaların bir kısmında bu durum katılma mekanizmasıyla açıklanırken bazı çalışmalarda da ana koruyuculuk mekanizmasının fiberler arası sürtünme olduğu bildirilmiştir [33,123,132]. Buna göre temiz kumaşlar KAKS uygulanmasıyla fiberler arası temas noktalarını arttırarak fiberlerin daha çok etkileşime geçmesine ve fiberler arası sürtünmenin artmasına neden olmaktadır. Bu sayede darbe enerjisi daha geniş alanlara yayılarak KAKS uygulanmış kumaşların enerji sönümleme performansları yükselmektedir. KAKS'lara nanopartikül takviye edilmesi koruyuculuk performansını artıran bir etken olarak öne çıkmaktadır. Nanopartikül takviyeleri KAKS'ların sürtünme özelliklerini yükseltmiş ve bu sayede enerji sönümleme olayında faydalı olmuşlardır. Nanopartikül türünün ve şeklinin burada önemli bir etken olduğu görülmüştür. SiC nanopartikül takviyesinin hem vurucu uçlar ile kumaş arasındaki sürtünmeyi arttırarak hem de iplikler arası sürtünmeyi yükselterek enerji sönümlemede pay almasının yanı sıra sert yapısı sayesinde darbe enerjisini düşüren bir etkiye neden olmaktadır. SiC nanopartiküllerin sertlik değerinin silika nanopartiküllere göre yaklaşık 4 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. [133]. Nanopartikül yapıların olumlu özelliklerini bir arada toplayarak daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmek için yapılan hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'lar da koruyuculuk performansını etkilemişlerdir. SiC ve GNP nanopartiküllerinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan KAKS/SiC-B+GNP-A numunesi düşük hızlı darbe testlerinin tamamında en başarılı numune olmuştur. GNP geniş yüzey özellikleri sayesinde fiberler arasına girerek ön gerilmeye sebep olmakta ve bu nedenle sürtünmeyi arttırmaktadır. Reolojik özellikler incelendiğinde nanopartikül takviyesi KAKS'ların viskozite profillerini bozmuş ve başlangıç, kritik, katılma sonrası ve son viskozite değerleri genel olarak tek katı fazlı KAKS'tan daha düşük çıkmıştır. Bunun aksi olan tek durum KAKS/KNT-A numunesinin başlangıç viskozitesinin tek katı fazlı KAKS'tan daha yüksek olmasıdır. Nanopartikülleri hibrit olarak kullandığımızda genellikle numune içeriğindeki nanopartiküle benzer özellikler sergilemişlerdir. SiC-B ve GN-A ile oluşturulan her iki hibrit takviyeli KAKS'da bu duruma aykırı olarak içeriğindeki nanopartiküllerden daha iyi bir viskozite profili sergilemişlerdir. Buradaki iki hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'tan biri olan KAKS/SiC-B+GNP-A numunesinin yüzey ve iplikler arası sürtünme ve düşük hızlı darbe deneylerindeki en başarılı numune olduğu görülmektedir. Bu bakımdan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde düşük hızlı darbe test sonuçlarındaki koruyuculuk performansının

yükseltilmesinin ana etmeni olarak sürtünme özellikleri ile ilişkilendirmekle beraber reolojik özelliklerden bağımsız olduğu söylenemez.

Çalışma kapsamında kumaş yapısının düşük hızlı darbe testlerindeki etkisini incelemek için deneyler, özellikleri Tablo 3.9’da verilen Teijin firması tarafından üretilen plain dokuma tipine sahip Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlar ile yapılmıştır. Her iki kumaş türü içinde KAKS uygulamasının kumaşların enerji sönümleme performansını arttırdığı görülmüştür. Çalışmada vurucu olarak NIJ 0115.00 standardında var olan bıçak (S1 knife) ve çivi (spike) uçlar kullanılmıştır. Bıçak uçlar ile yapılan test sonuçları incelendiğinde kumaşlarının ana hasar mekanizmasının kesilme hasarı olduğu görülmüştür. Çivi uç kullanıldığında ise fiberler kenarlara itilerek çivi ucun batmasına olanak sağlayan boşluklar oluşmaktadır. Bu deformasyon şekline “aralanma” veya “pencereleme” etkisi denilmektedir. Bıçak uç ile yapılan deneylerde Twaron 460 kumaşının Twaron 200’e göre bariz bir üstünlüğü vardır. Bunun yanı sıra Twaron 200 çivi uç ile yapılan düşük hızlı darbe testlerinde hem temiz hem de KAKS emdirilmiş kumaşlarda Twaron 460’a yakın performans göstermiştir. Twaron 200 ile Twaron 460 arasında 2 temel fark vardır. Bunlardan biri iplik sayısı diğeri de lineer yoğunluktur. Twaron 200 kumaşında her 10 cm²’de 105 x 105 atkı çözgü ipliği bulunurken bu sayı Twaron 460’da 67 x 67’dir. Yani Twaron 200 daha sık dokunmuş bir kumaştır. Öte yandan Twaron 200, 930 Dtex, Twaron 460 ise 3360 Dtex lineer yoğunluğuna sahip iplik kullanılarak örülmüştür. Twaron 460’ın daha yoğun iplik kullanılması sonucu 460 gr/m² alansal yoğunluğa ve 0,4 mm kalınlığa sahiptir. Twaron 200 ise 200 gr/m² alansal yoğunluğa ve 0,2 mm kalınlığa sahiptir. Bıçak uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testlerindeki ana hasar mekanizmasının kesilme hasarı olduğu göz önüne alındığında Twaron 460 kumaşının başarısının kullanılan ipliğin lineer yoğunluğundan kaynaklandığı görülmektedir. Çivi uç ise tamamen farklı bir mekanizma ile çalışmaktadır. Çivi uç ile yapılan testlerde ana hasar mekanizmasının aralanma etkisi olduğu düşünüldüğünde Twaron 200 kumaşının sık yapısı sayesinde fiber hareketini yatay yönde kısıtladığı ve enerji sönümleme performansını arttırdığı görülmüştür. Bu sebeple kişisel koruyucu zırh malzemesi seçiminde hareket kabiliyetini artırmak ve kullanım kolaylığı sağlamak açısından düşünüldüğünde kumaş seçimi yapılırken hasar tipine göre karar verilmesi gerekmektedir.

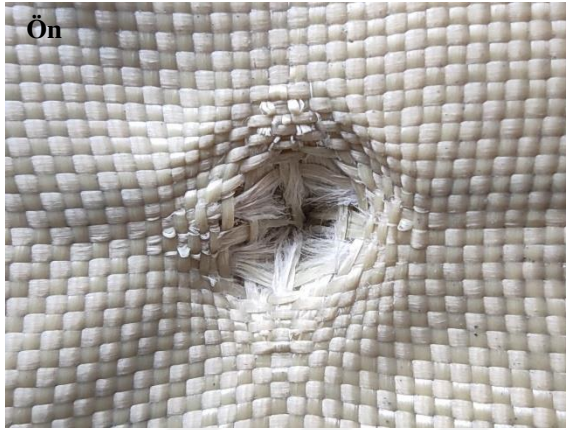
4.7. Balistik Test Sonuçları

Bu bölümde temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşların balistik test sonuçları incelenmiştir. Kumaş yapısının balistik özelliklere olan etkisini inceleyebilmek için Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlar kullanılmıştır. Balistik testler, önceki bölümlerde yapılan testlerin sonuçları göz önüne alınarak yapılan eniyileme çalışmaları sonucu özellikleri Tablo 3.12’de verilmiş olan 4’er numuneye uygulanmıştır. Bu numunelerde kumaşlara emdirilecek karışım için kendi grubundaki en başarılı süspansiyonlar olan KAKS/SiC-B, KAKS/SiC-B+GNP-A ve bunların karşılaştırılması

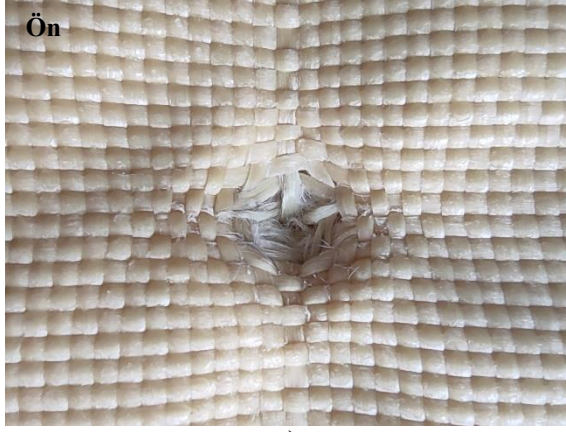
için tek katı fazlı KAKS kullanılmıştır. Balistik testlerde kullanılan süspansiyonların hazırlama işlemi önceki numunelerde de olduğu gibi Bölüm 3.1.3’de anlatıldığı şekliyle yapılmış ve Bölüm 3.3’de bahsedilen işlemler uygulanarak kumaşlara emdirilmiştir. Kumaşlara emdirilecek KAKS miktarı kumaş ağırlığının %50 si olacak şekilde ayarlanmıştır. Bölüm 3.6’da anlatıldığı gibi 250 x 250 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan temiz ve KAKS emdirilmiş kumaşlara NIJ 0101.06 standardına uygun olarak balistik atış testleri gerçekleştirilmiştir [25]. Balistik atışlarda hedef katman sayısı literatürde önerildiği gibi 16 katman olarak seçilmiştir [13].

4.7.1. KAKS Uygulamasının Balistik Test Sonuçlarına Etkileri

Balistik test sonuçları incelendiğinde; temiz kumaşlar ile yapılan testlerde her iki kumaş türünde de delinme gözlenmemiştir. Balistik test sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Literatürde bahsedildiği gibi temiz kumaşlarda mermiler iplikleri çekip çıkarmaya çalışmış ve genel hasar türünün kamalama (wedge through) olduğu tespit edilmiştir. KAKS ile muamele edilmiş kumaşların tamamında delinme meydana gelmiştir. Balistik çarpma altındaki kumaşlardaki temel enerji sönümlenme mekanizması Şekil 2.17’de gösterilmiş olan piramit formasyonu meydana getirmektedir. Temiz kumaşlarda mermi darbesiyle beraber iplikler hareket ederek piramit formasyonu oluşumu gözlenmiştir. Buna rağmen KAKS emdirilmiş kumaşlarda süspansiyon katmanlar arasında bağlayıcı gibi davranmış ve numune kumaş gibi değil kompozit levha gibi davranmıştır. Bu nedenle iplik hareketleri kısıtlanmış ve mermi çarpmasıyla iplikler kopmaya zorlanmıştır. KAKS oranının %50 olduğu bu numuneler balistik darbe karşısında başarısız olmuştur. İplik hareketini kısıtlayan diğer faktörün de iplikler arası sürtünmenin çok yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zeng vd. yaptıkları çalışmada sürtünme katsayısı yüksek olduğunda, enerji sönümlenme kapasitesinin yerel gerilim konsantrasyonlarından dolayı düştüğünü ve ipliğin hareketsizliğinden dolayı yüksek hızlı çarpmaların iplik kopması ile sonuçlandığını bildirmiştir [47]. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de verilen numunelerin test sonrası ön ve arka yüz görsellerinde delinme olan numuneler için bahsedilen hasar şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.33. Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) KAKS c-d) KAKS/SiC-B e-f) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Şekil 4.34. Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) KAKS c-d) KAKS/SiC-B e-f) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri

Tablo 4.1. KAKS oranı %50 olan numunelerin balistik test sonuçları

Hedef	Ortalama mermi hızı (m/sn)	Mermi kinetik enerjisi (J)	Hasara uğrayan katman sayısı	Travma çapı (mm)	Travma derinliği (mm)
NT_200	344,28	440,32	8	56,32	51,13
KAKS_200	337,72	423,72	16	41,94	140,00
KAKS/SiC-B_200	345,46	443,37	16	40,40	140,00
KAKS/SiC-B+GNP-A_200	338,70	426,17	16	39,54	124,12
NT_460	338,79	426,40	5	57,31	39,94
KAKS_460	341,08	432,17	16	35,01	83,83
KAKS/SiC-B_460	335,59	418,38	16	27,09	100,65
KAKS/SiC-B+GNP-A_460	342,05	434,65	16	30,97	122,63

KAKS oranı %50 olan numunelerin Tablo 4.1’de verilen test sonuçları incelendiğinde temiz Twaron 460 kumaşının temiz Twaron 200 kumaştan daha başarılı olduğu görülmüştür. Burada Twaron 460 kumaşı ile oluşturulan 16 katlı numunenin 460 gr ve Twaron 200 ile oluşturulan numunenin ise 200 gr olduğuna dikkat edilmelidir. NIJ 0101.06 standardına göre delinme olmadığı durumlarda arka yüzey iz miktarı (travma derinliği)’nin maksimum 44 mm olmasına izin verilmiştir [25]. Daha büyük travma derinlikleri, zırhı giyen kişinin hayati organlarına zarar verebileceği için başarısız olarak yorumlanmıştır. Bu standarda göre temiz Twaron 200 numunesi delinme olmasa dahi başarısız olarak değerlendirilmiştir.

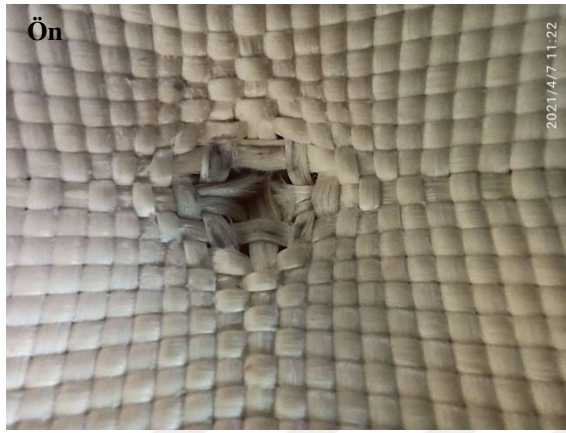
KAKS oranının %50 olduğu numuneler ile yapılan testlerde delinme meydana gelmesinin ardından bunun sebepleri incelenmiş ve bu etkinin sürtünme kuvvetinin istenilenden yüksek değerlere çıkarılması sonucunda iplik hareketlerinin neredeyse tamamen kısıtlanması olduğu görülmüştür. Bu nedenle aynı KAKS süspansiyonun daha düşük oranlarda kumaşlara emdirilerek daha düşük sürtünme kuvvetine sahip numuneler ile testlerin tekrarlanması fikri ortaya çıkmıştır. Bu fikirden yola çıkılarak Twaron 460 kumaşına ağırlıkça %5, %10 ve %20 olmak üzere 3 farklı oranda tek katı fazlı KAKS emdirilmiş ve balistik testleri yapılmıştır. Yapılan düşük oranlı tarama test sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.35’de yapılan balistik testlerin ardından kumaşlardaki merminin numuneye nüfuz ettiği ön yüz ve hasar gören tabakaların ardında merminin durdurulduğu tabakanın resimleri verilmiştir.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Şekil 4.35. a-b) %5 c-d) %10 e-f) %20 KAKS emdirilmiş numunelerin balistik test sonrası resimleri

Tablo 4.2. KAKS oranı %5, %10 ve %20 olan numunelerin balistik test sonuçları

Hedef	Ortalama mermi hızı (m/sn)	Mermi kinetik enerjisi (J)	Hasara uğrayan katman sayısı	Travma çapı (mm)	Travma derinliği (mm)
NT 460	338,79	426,40	5	57,31	39,94
KAKS_460 %5	339,25	427,55	4	49,59	34,29
KAKS_460 %10	337,42	422,96	5	57,27	47,84
KAKS_460 %20	335,59	418,38	8	60,05	48,52

Twaron 460 kumaşı ile yapılan ve tek katı fazlı KAKS'ın kumaş ağırlığına göre %5, %10 ve %20 oranında eklenmesiyle gerçekleştirilen deneylerin hiç birinde tam delinme olayı gerçekleşmemiştir. Şekil 4.35'de de görüldüğü üzere %5 KAKS emdirilmiş numunede piramit oluşumu için birincil ipliklerin yanı sıra ikincil ipliklerde görev yapmış ve enerji Emilimi geniş alanlara yayılmıştır. KAKS oranının artmasıyla kumaşlardaki hasar mekanizması kamalanmanın yanı sıra fiber kopması şeklinde meydana gelmiştir. Tablo 4.2'de verilen değerler dikkate alındığında test numunelerinin hiçbirinde delinme olmamasına rağmen travma derinliği 44 mm'nin üzerinde olan %10 ve %20 KAKS içeriğine sahip numuneler başarısız olarak değerlendirilmiştir. %5 KAKS içeriğine sahip Twaron 460 kumaşının temiz kumaşa göre başarılı olmasının ardından %50 oran ile yapılan deney numuneleri aynı konfigürasyon sabit tutularak KAKS oranı %5 olacak şekilde yeniden üretilmiş ve balistik testleri yapılmıştır. Olası test hatalarının önüne geçebilmek için temiz kumaş testleri de tekrarlanmıştır. Tablo 4.3'de KAKS oranı %5 olacak şekilde tekrarlanan test sonuçları verilmiştir. Balistik testler sonucunda incelenen numunelerin hiç birinde tam delinme gerçekleşmemiştir. NT_200 kodlu temiz Twaron 200 kumaştan oluşan numune hariç tüm numunelerin travma derinliği 44 mm'nin altında kalmış ve NIJ 0101.06'ya göre başarılı olmuştur. KAKS emdirilmesi her iki kumaş türü içinde enerji sönmüleme performansını artıran bir etki yapmıştır. Nanopartikül takviyeli KAKS uygulanmış kumaşlar incelendiğinde her iki kumaş türü için de koruma performansını arttırdığı görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar arasında en başarılı numunelerin her iki kumaş türünde de KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonun uygulandığı numuneler olduğu görülmüştür. Şekil 4.36 ve 4.37'de Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlar kullanılarak üretilen tüm numunelerdeki ön yüzey ve deformasyona uğrayan ara tabaka görselleri verilmiştir. Numunelerde baskın hasar mekanizmasının kamalanma olduğu tespit edilmiştir. Her iki kumaş türü içinde temel hasar mekanizması kamalanma olmasına rağmen merminin ilk nüfuz ettiği katmanlarda fiber kopması hasarının da meydana geldiği görülmüştür.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Şekil 4.36. Twaron 200 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri



a)



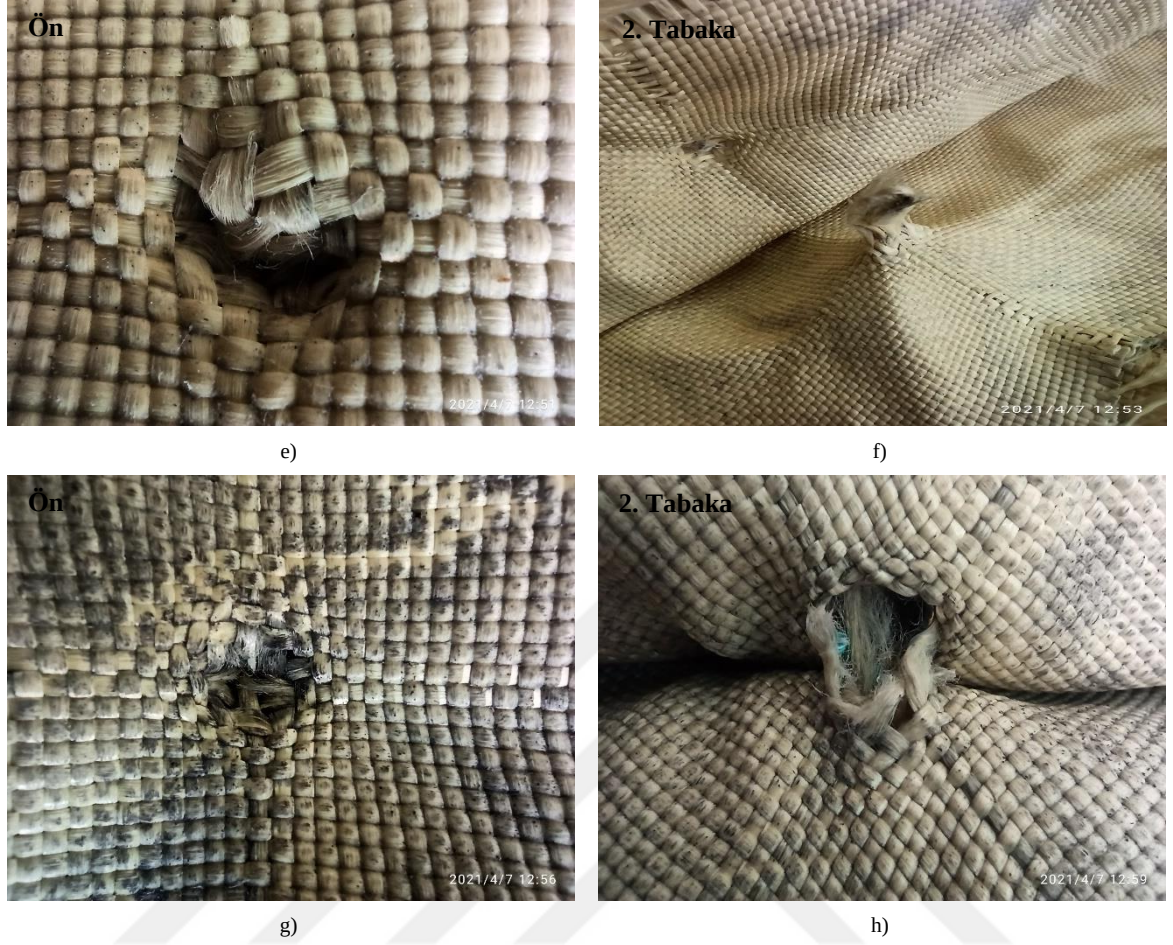
b)



c)



d)



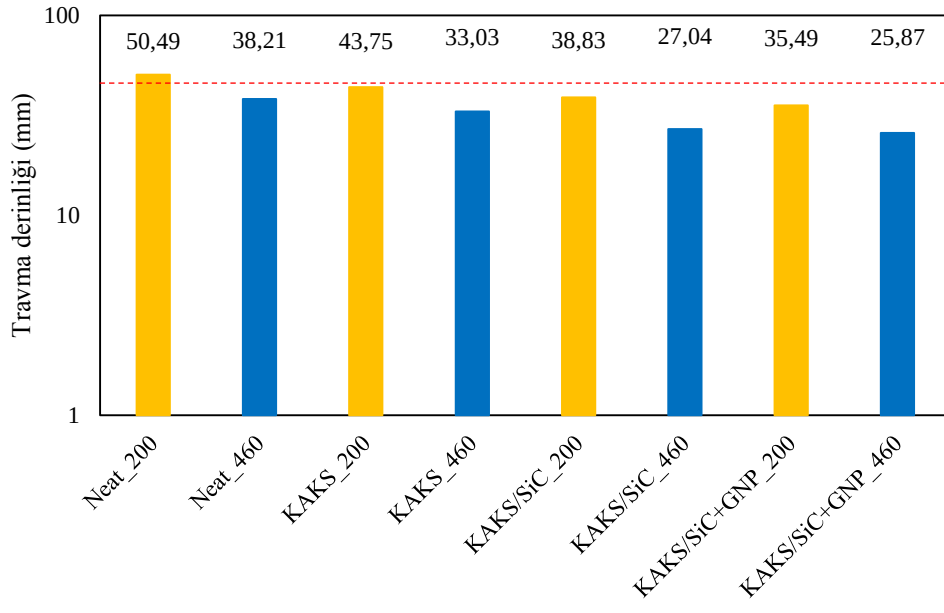
Şekil 4.37. Twaron 460 kumaşları ile üretilen a-b) NT c-d) KAKS e-f) KAKS/SiC-B g-h) KAKS/SiC-B+GNP-A kodlu numunelerin balistik test sonrası resimleri

Tablo 4.3. KAKS oranı %5 olan numunelerin balistik test sonuçları

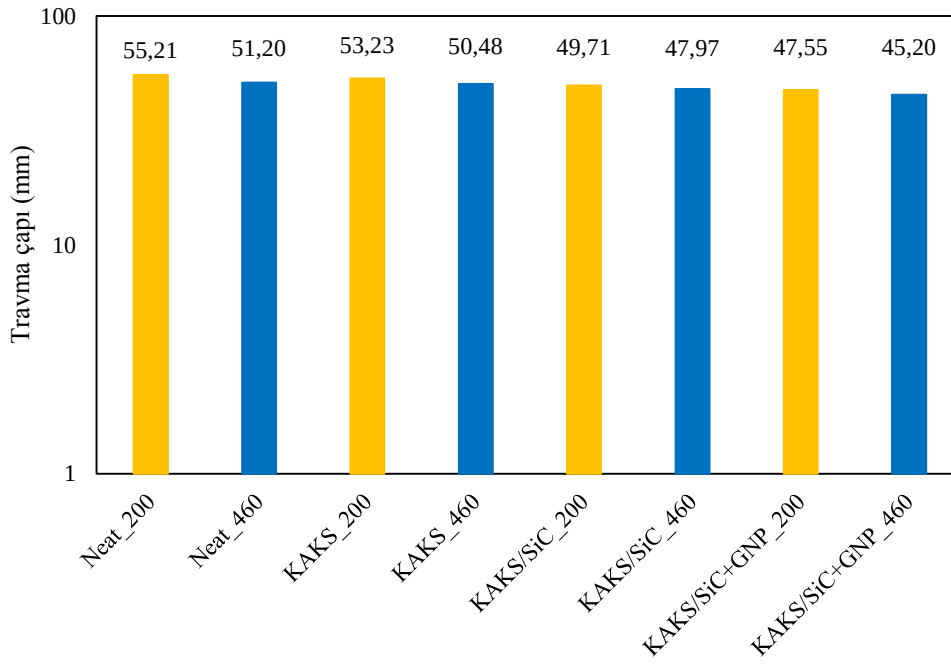
Hedef	Ortalama mermi hızı (m/sn)	Mermi kinetik enerjisi (J)	Hasara uğrayan katman sayısı	Travma çapı (mm)	Travma derinliği (mm)
NT_200	355,48	469,44	8	55,21	50,49
KAKS_200	349,00	452,49	6	53,23	43,75
KAKS/SiC-B_200	355,17	468,64	6	49,71	38,83
KAKS/SiC-B+GNP-A_200	345,04	442,27	6	47,55	35,49
NT_460	348,24	450,52	5	51,20	38,21
KAKS_460	356,72	472,74	4	50,48	33,03
KAKS/SiC-B_460	354,11	465,83	4	47,97	27,04
KAKS/SiC-B+GNP-A_460	356,24	471,46	4	45,20	25,87

4.7.2. Kumaş Yapısının Balistik Test Sonuçlarına Etkileri

Vücut korumasında kullanılan esnek veya sert zırhlar, silah vb. tehditlerle yapılan saldırılarda ölümcül yaralanmaların önüne geçmek için kullanılmaktadır. Bu zırhların koruyuculuk performanslarının ölçülerek değerlendirilmesi için kullanılan standartlardan biri Ulusal Adalet Enstitüsü (National Institute of Justice, NIJ) tarafından tanımlanmıştır. NIJ 0101.06 standardına göre vücut zırhı delinmese dahi arka yüzeyde meydana gelecek travma derinliğinin 44 mm'yi geçmemesi gerekmektedir. Bu değeri aşan travma derinliği zırhı kullanan kişi için ciddi yaralanmalara sebep olabilir [25]. Buna göre Twaron 200 ve Twaron 460 kumaş kullanılarak üretilmiş numunelerin travma derinliklerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.38'de verilmiştir. Şekilde verilen kırmızı kesikli çizgi NIJ 0101.06 standardına göre sınır kabul edilen 44 mm'yi temsil etmektedir. Bu değerin üzerinde kalan numuneler başarısız olarak değerlendirilmektedir. KAKS emdirilmesi tüm numuneler için travma derinliğini azaltan bir etkiye neden olmuştur. Nanopartikül takviyesi KAKS emdirilmiş numunelerde iplik çekme, yüzey sürtünme ve düşük hızlı darbe testlerine uyumlu şekilde balistik testlerde merminin enerjisinin sönmülmesinde pozitif bir etki yaratmış ve buna bağlı olarak travma derinliği azalmıştır. Twaron 460 kumaş ile üretilmiş numunelerin tamamının travma derinliği Twaron 200 ile üretilmiş numunelerden daha düşüktür. Her iki kumaş türü içinde merminin temas ettiği ilk tabakalardaki hasar türü fiber kopmasıdır. Fiber kopması hasarında ipliğin kırılma mukavemetinin etkisi ön plana çıkmaktadır. Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlarının üretildiği ipliğin kırılma mukavemetlerinin sırasıyla 8,0 N/5cm x 1000 ve 16,2 N/5cm x 1000 olduğu bildirilmiştir [134]. Bu nedenle merminin kumaşla temas anında fiberleri koparmak için harcadığı enerjinin Twaron 460 kumaşta daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna göre Twaron 460 kumaşının daha düşük travma derinliğine sahip olduğu düşünülmektedir. Burada iki kumaş arasındaki tek farkın iplik türü olmadığı unutulmamalıdır. Şekil 4.39'da numunelerin balistik darbe testi sonrası destek çamurunda meydana gelen travma çapları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Twaron 460 kumaşlarla üretilen numunelerin tamamı Twaron 200 ile üretilen kumaşlardan daha küçük travma çapına sahiptir. Buna göre Twaron 460 kumaşların arka yüzeyinde meydana gelen çöküntü hacminin de Twaron 200'e göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Numunelere takviyeli ve takviyesiz KAKS emdirilmesi de travma çapını düşürmede kısıtlı da olsa pozitif bir etkiye sebep olmuştur. Kumaş türleri kendi içlerinde değerlendirildiğinde hem travma derinliğinden hem de travma çapında en başarılı numune KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonun emdirildiği numuneler olmuştur.



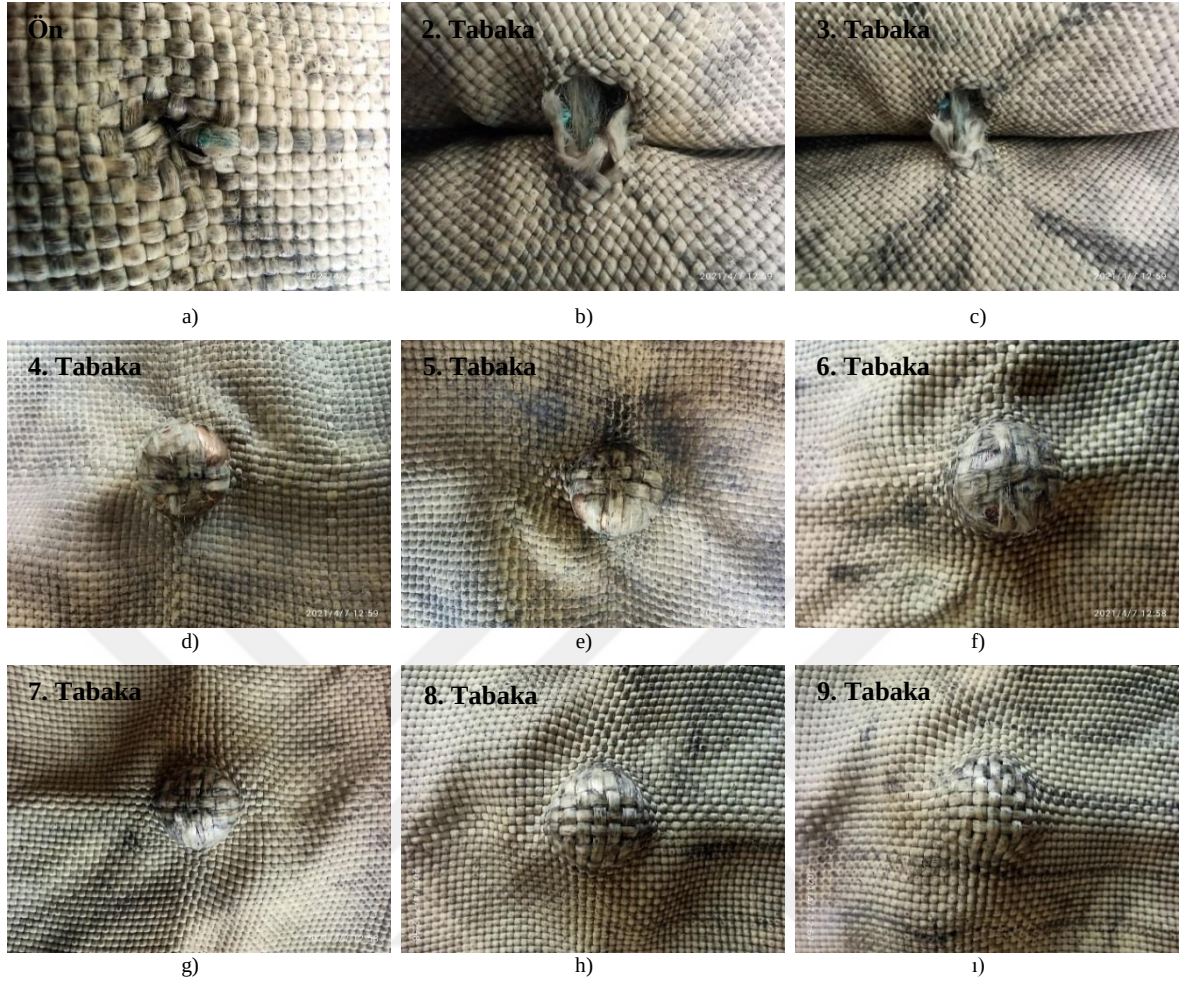
Şekil 4.38. Temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 600 kumaşların balistik test sonrası travma derinliği karşılaştırması



Şekil 4.39. Temiz ve KAKS emdirilmiş Twaron 200 ve Twaron 600 kumaşların balistik test sonrası travma çapı karşılaştırması

Gürgen, çalışmasında balistik darbelerde iplik genişliğinin mermi boyutuna oranının öneminden bahsetmiştir [13]. Mermi çapına göre iplik genişliğinin artmasının merminin örgü boşlukları arasından daha rahat ilerleme olasılığını arttırdığını bildirmiştir. İnce iplik kullanılan kumaşlarda ise örgü boşlukları küçüleceği ve mermiyle temasa geçerek enerji sönmlemeye katkı sağlayacak örgü sayısının artacağı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan kumaşlardan Twaron 200'ün iplik kalınlığı 0,2 mm iken Twaron 460'ın kalınlığı 0,4 mm'dir. İplik kalınlığını etkileyen temel parametre ipliğin oluşturan fiber demetlerindeki fiber sayısıdır. Twaron 200'deki fiber sayısı 1000 iken bu sayı Twaron 460 için 2000'dir. Aynı zamanda Twaron 200 ve Twaron 460'ın lineer yoğunlukları sırasıyla $105 \times 105 / 10 \text{ cm}^2$ ve $67 \times 67 / 10 \text{ cm}^2$ 'dir. Buna göre Twaron 200 kumaşının üretiminde daha ince iplikler kullanılmış ve daha sık dokunmuştur. Kişisel koruyucu zırh malzemelerinde hafiflik ve esnekliğin ön planda olduğu göz önüne alınarak, numune ağırlığının travma derinliğine göre değişimi yüzde fark olarak incelenmiştir. Temiz Twaron 460 numuneler 460 gr, KAKS emdirilmiş olanlar 483 gr'dır. Twaron 200 numuneleri ise temiz kumaşlarda 200 gr, KAKS emdirilmiş olanlarda 210 gr ağırlığa sahiptir. Balistik test sonuçlarına göre travma derinliği dikkate alındığında Twaron 460'ın Twaron 200'e olan üstünlüğü NT, KAKS, KAKS/SiC-B ve KAKS/SiC-B+GNP-A içeriğine sahip numuneler için sırasıyla %32,15, %32,45, %43,62 ve %37,19 olarak hesaplanmıştır. Twaron 460 kullanılarak üretilen numuneler Twaron 200 ile üretilen numunelerden %130 daha ağır olmasına rağmen enerji sönmleme seviyeleri arasındaki fark bu seviyenin çok altında kalmıştır. Twaron 200'ün iplik ve dokuma yapısı sayesinde mermi hareketini kısıtlayarak enerji sönmleme performansının geliştiği görülmüştür.

Balistik test sırasında merminin kumaş katmanları arasındaki hareketlerinin ve hasar mekanizmalarının anlaşılmasının tasarım yaparken karşılaşılabilecek durumlar hakkında yol gösterici olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle Şekil 4.40'da KAKS/SiC-B+GNP-A_460 numunesine nüfuz etmiş ve durdurulmuş bir merminin kumaş tabakaları arasındaki hareketine ait görseller verilmiştir. Merminin hedefle ilk temas ettiği 1.katmanda fiberler bir miktar hareket etmiş ardından fiber kopması hasarı meydana gelmiştir. İkinci katma kumaşta da temel hasar mekanizmasının fiber kopması olduğu görülmüştür. Üçüncü tabakadan itibaren mermi ile karşılaşan ipliklerden daha azı fiber kopmasına uğramaya başlamış ve baskın hasar mekanizmasının kamalanma olduğu görülmüştür. Bundan sonra gelen her tabakada daha fazla iplik mermiyi durdurmak için görev yapmış ve enerji sönmlemesi geniş bir alana yayılmıştır.

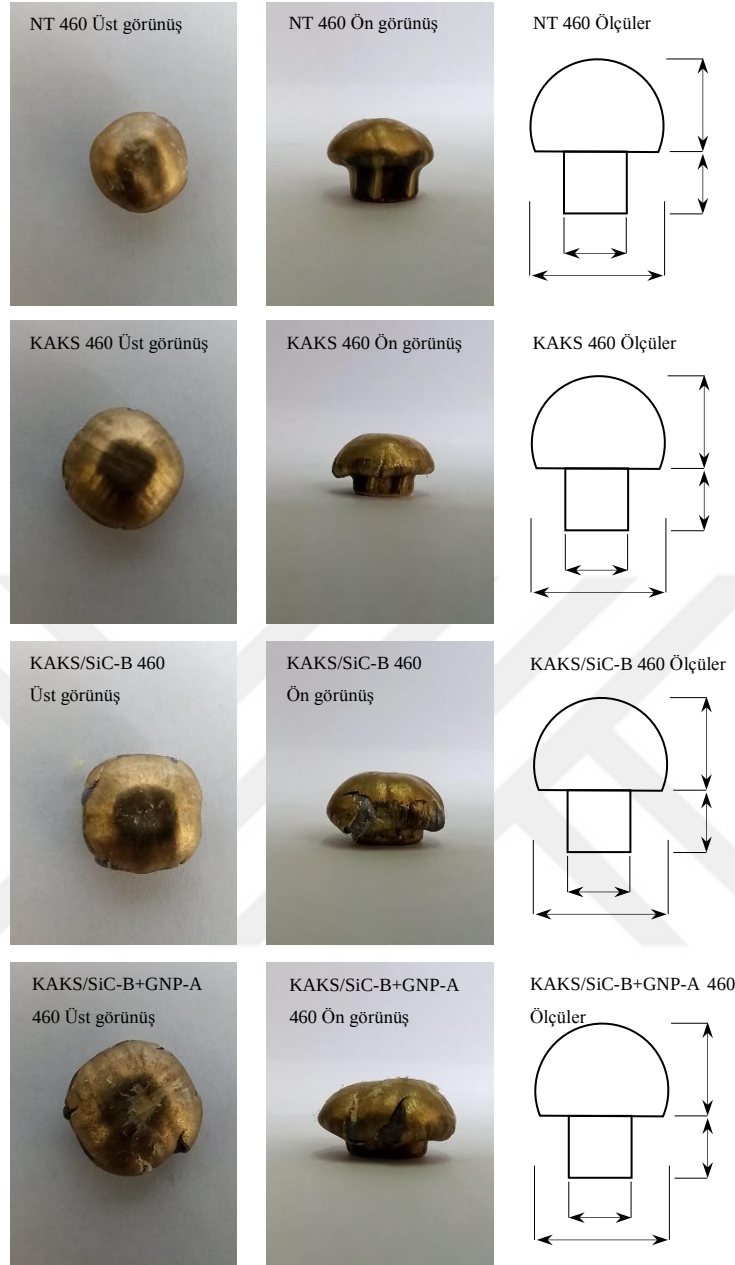


Şekil 4.40. Balistik testlerde merminin durdurulma mekanizması

Şekil 4.41 ve 4.42’de Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşlara ağırlıkça %5 KAKS emdirilerek üretilmiş numunelere uygulanan balistik testlerde numune içerisinde durdurulan mermi resimleri verilmiştir. Bunun yanı sıra mermi geometrilerine ait veriler de gösterilmiştir. Mermilerin tamamında darbe etkisiyle mantar şekli oluşumu gözlenmiştir. Mermi geometrileri incelendiğinde numunelerin enerji sönmüleme kapasiteleriyle aralarında benzerlik olduğu görülmüştür. Buna göre travma derinliği arttıkça mermilerin toplam boylarının kısaldığı ve üst kısmın genişliğinin arttığı tespit edilmiştir. Hedefe ilk çarptığında düzgün olarak burnuyla çarpmış mermilerin oluşturdukları giriş deliklerinin çapı, merminin çapı kadar veya biraz daha küçük ölçülmüştür. Vücuda çarptığında deforme olup küntleşen merminin, düz bir yol izlediği ve çıkışa burnuyla ulaştığı kabul edilse bile oluşturacağı çıkış deliğinin giriş deliğinden büyük olacağı bildirilmiştir [135]. Şekil 4.41 ve 4.42’de verilen resimleri incelediğimizde mermi şeklinde meydana gelen değişiklik açıkça görülmektedir. Bu durum merminin hedefe girdiği noktadaki delik çapı ile hedeften çıktığı delik çapı arasındaki farkın nasıl meydana geldiğinin anlaşılması açısından önemlidir.



Şekil 4.41. Twaron 200 kumaş ile üretilen numunelerin balistik testlerinde kullanılan 9 mm FMJ merminin ilk ve balistik testlerden sonraki resimleri ve ölçüleri



Şekil 4.42. Twaron 460 kumaş ile üretilen numunelerin balistik testlerinde durdurulan mermi resimleri

4.7.3. Balistik Testler Üzerine Tartışma

KAKS'ların yüksek performanslı kumaşların enerji sönmüleme performanslarını arttırmak için balistik uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır. KAKS'ların yüksek hızlı testlerdeki bu başarısının nedeni ilk olarak reolojik özelliklerine bağlanmış olmasına rağmen son yıllarda yapılan çalışmalarda KAKS emdirilmesinin kumaşların sürtünme katsayısını arttırdığı ve bu sayede enerji sönmüleme kapasitesinin arttığı öne sürülmüştür [123,136]. Kumaş ağırlığının %50'si oranında KAKS emdirilmiş numuneler ile yapılan deneyler şaşırtıcı sonuçlar vermiştir. 16 tabakalı numuneler kullanılarak NIJ 0101.06 standardına göre gerçekleştirilen testlerde temiz

kumaşlarda delinme olmamış ve mermi durdurulmuştur. Buna rağmen KAKS emdirilmiş numunelere uygulanan atışların tamamında delinme gerçekleşmiştir. Burada dikkat çeken nokta KAKS emdirilmiş kumaşların temiz kumaşların aksine birbirine sabitlenmiş kompozit yapılar gibi davranmasıydı. Bu durum KAKS emdirilmiş numunelerin gereğinden fazla gergin durmasına neden olmuş ve mermi ile temas anında ipliklerin hareket etmesine izin vermemiştir. Bu nedenle balistik darbelerde kumaşların en önemli enerji sönümleme mekanizması olan piramit oluşumu gerçekleşmemiştir. Mermi darbesiyle hareket edemeyen ipliklerde enerji sönümleme gerçekleşmeden fiber kopması meydana gelmiştir. Literatürde yapılan inceleme sonucu 300 m/sn üzerindeki balistik darbelerde sürtünme katsayısının çok yüksek olmasının enerji sönümlemeye zarar vereceği bildirilmiştir [47]. Buna göre daha düşük KAKS emdirilmesinin kumaşların balistik koruyuculuk seviyesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla Twaron 460 kumaşına %5, %10 ve %20 oranında tek katı fazlı KAKS emdirilmiş ve NIJ 0101.06 standardına göre balistik testler tekrarlanmıştır. Bu testler sonucunda ağırlıkça %5 takviye oranının uygun olduğuna karar verilmiş ve deneyler bu orana göre yapılmıştır. Ağırlıkça %5 KAKS emdirilmiş kumaşların balistik test sonuçları incelendiğinde, her iki kumaş türü içinde KAKS emdirilmesinin temiz kumaşların balistik performansını yükselttiği görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerinde balistik testlerde koruyuculuk performansının arttığı tespit edilmiştir. Her iki kumaş türü içinde en iyi koruma performansı KAKS/SiC-B+GNP-A emdirilmiş numunelerde görülmüştür. Reolojik özellikler incelendiğinde nanopartikül takviyeleri tek katı fazlı KAKS'ların katılma mekanizmalarını bozmuştur. Nanopartiküllerin hibrit olarak kullanıldığı KAKS'ların reolojik özellikleri genellikle süspansiyonu oluşturan nanopartiküle benzer özellik göstermiştir. Burada diğer numunelerden ayrılan iki hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'tan biri olan KAKS/SiC-B+GNP-A balistik testlerin yanı sıra yüzey ve iplikler arası sürtünme ve düşük hızlı darbe deneylerindeki en başarılı numune olduğu görülmektedir. KAKS takviyesinin balistik testlerdeki enerji sönümleme performansını yükseltmesindeki ana etmenin sürtünme özellikleri ile bağlantılı olduğu ancak bu durumun reolojik özelliklerden tamamen bağımsız olmadığı görülmüştür.

Twaron 460 kumaşı ile üretilen numunelerin tamamı Twaron 200 kullanılarak üretilen numunelerden daha başarılı olmuştur. Twaron 460 kumaşı Twaron 200'e göre %130 daha ağır olmasına rağmen koruyuculuk performansını tüm numuneler için ortalama %36,35 oranında arttırmıştır. Kumaş yapısının etkisi incelendiğinde ise Twaron 200 kumaşının daha ince iplikler kullanılarak daha sık yapıda dokunmasının mermi hareketini kısıtlayarak balistik testlerde avantaj sağladığı tespit edilmiştir. Burada iplik kalınlığı kadar önemli bir faktörde mermi tipi olmuştur. Bu nedenle balistik tehditlere karşı koruma sağlamada zırh üretimi için kumaş seçimi yapılırken ağırlık, kalınlık, hasar tipi ve mermi türüne göre karar verilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında üretilen süspansiyonlarda kayma altında katılma davranışının gerçekleştiği görülmüş ve kritik kayma oranı, viskozite profili gibi özelliklerin; partikül boyutu, partikül konsantrasyonu, sıvı ortam, takviye malzemesinin türü ve oranı gibi özellikler ile kontrol edilebileceği tespit edilmiştir. Çalışmada tek ve çok katı fazlı KAKS'lar iki farklı Twaron para-aramid kumaşa emdirilmiştir. Yüksek performanslı bu kumaşlara KAKS emdirilmesinin enerji sönümleme kapasiteleri üzerindeki etkileri, yüzey sürtünme testi, iplik çekme testi, düşük hızlı darbe testi ve balistik test yapılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Tek katı fazlı KAKS'larda silika partikül boyutunun etkisini incelemek için yapılan deneylerde, silika partikül boyutu arttıkça kritik kayma oranının azaldığı ve viskozite profilinin yükseldiği görülmüştür. En düşük kritik kayma oranına ve en yüksek viskozite profiline sahip olan numunede katı partikül olarak 14 nm partikül büyüklüğüne sahip Aerosil 150 kullanılmıştır.
- Tek katı fazlı KAKS'larda partikül konsantrasyonunun etkisini incelemek için %10, %15, %20 ve %25 katı partikül oranına sahip süspansiyonlar üretilmiştir. Yapılan reolojik testler sonucunda katı partikül oranı arttıkça kritik kayma oranının azaldığı ve viskozite profilinin arttığı tespit edilmiştir.
- Tek katı fazlı KAKS'larda sıvı ortamın etkisini incelemek için farklı moleküler yoğunluğa sahip PEG'ler (PEG 200, PEG 300 ve PEG 400) kullanılmıştır. Süspansiyondaki sıvı ortam olan PEG'in moleküler yoğunluğu arttıkça kayma altında katılma davranışı daha düşük kayma oranlarında meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra PEG'in moleküler yoğunluğuna bağlı olarak süspansiyonun viskozite profili de yükselmiştir.
- Çok katı fazlı KAKS üretiminde nanopartikül takviye oranının belirlenebilmesi için tek katı fazlı KAKS'lara ağırlık oranı %0,3, %0,6 ve %0,9 olacak şekilde KNT-A nanopartikül takviye edilmiş ve reolojik özellikleri incelenmiştir. Buna göre en düşük viskozite değerleri ağırlıkça %0,3 takviye oranına sahip süspansiyonda meydana gelmiştir. Takviye oranı arttıkça süspansiyonun viskozite profili yükselmekteyken %0,6 oranın üzerine çıktığında süspansiyonun viskozitesinin düştüğü görülmüştür. Bu nedenle nanopartikül takviye oranı tüm çalışmada %0,6 olarak sabit tutulmuştur.
- Çok katı fazlı KAKS'ların tamamında toplam nanopartikül oranı ağırlıkça %0,6 olarak sabit tutulmuştur. Nanopartikül takviyelerinin tek katı fazlı KAKS'ların viskozite profilini bozduğu tespit edilmiştir. Nanopartikül takviyesi KAKS'ların kritik kayma oranlarını artırmış ve kayma altında katılma davranışının gecikmesine neden olmuştur.

Bu bulgu, nanopartikül takviyelerinin kayma altında katılaşma evresinin başlangıcını ve silika süspansiyonlarının reolojik davranışını ayarlamak için etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

- Takviye olarak kullanılan nanopartiküllerin silika partiküller arasına girerek hidroküme oluşumunu engellediği ve hidrokümelere yıkan engeller olarak görev yaptığı görülmüştür. Sadece KAKS/KNT-A numunesinin başlangıç viskozite değerinde KAKS numunesinden daha iyi performans sergilediği diğer tüm değerlerde tek katı fazlı KAKS numunesinin en başarılı numune olduğu görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar incelendiğinde özellikle iki numune dikkat çekmektedir. KAKS/SiC-B+GNP-A ve KAKS/GNP-A+SiC-B numuneleri takviye malzemeleri olan SiC-B ve GNP-A kullanılarak takviyelendirilen KAKS'lardan daha iyi bir viskozite profiline sahiptirler. Bu durum nanopartiküllerin hibrit olarak kullanılmasının avantajları olabileceğini göstermiştir.
- Temiz ve KAKS emdirilmiş numunelere yapılan yüzey sürtünme test sonuçları incelendiğinde; Twaron 200 kumaşının, Twaron 460 kumaştan daha yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Twaron 200 daha sık dokunmuş olması nedeniyle temiz kumaşlarda ortalama yüzey sürtünme katsayısı Twaron 460'a göre yaklaşık %35 daha yüksektir. Takviyeli ve takviyesiz tüm KAKS emdirilmiş numunelerde de Twaron 200 kumaş Twaron 460 kumaşa göre daha yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahiptir. Twaron 200 ve Twaron 460 kumaşların her ikisi de plain dokuma tipine sahip para-aramid kumaşlar olmasına rağmen metrekare başına düşen ağırlık, atkı çözgü iplik sayısı, iplik yoğunluğu gibi farkları bulunmaktadır. Burada yüzey sürtünmesine etki eden en önemli faktörün iplik sayısı olduğu düşünülmektedir. En yüksek artış her iki kumaş türü içinde KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonunun emdirildiği kumaşlarda görülmüştür. KAKS/SiC-B+GNP-A süspansiyonunun emdirilmesi temiz kumaşa göre Twaron 200'de yaklaşık %82 oranında bir iyileşme sağlarken Twaron 460'da bu oran %120 olarak bulunmuştur. Nanopartikül takviyeli KAKS'lar arasında en düşük etkiye sebep olan KNT-A takviyesi ise Twaron 200 kumaşta %33'lük iyileşmeye sebep olurken Twaron 460 kumaşta %50 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Her iki kumaş türü içinde KAKS emdirilmiş kumaşların iplikler arası sürtünme değerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS kullanılan numunelerin tamamı tek katı fazlı KAKS'a göre daha başarılı olmuştur. Her iki kumaş türü içinde en yüksek iplik çekme kuvveti KAKS/SiC-B, en düşük iplik çekme kuvveti ise KAKS/KNT-A emdirilmiş kumaşlarda meydana gelmiştir. Hibrit nanopartikül takviyeli numunelerde iplik çekme kuvveti genellikle bileşiği oluşturan hibrit nanopartikül türüne göre sistematik hareket etmektedir. Buna göre hibrit nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerde GNP-A ve SiC-B oranı arttıkça sürtünme kuvveti artmakta,

KNT-A oranı arttıkça ise sürtünme kuvveti azalmaktadır. Bunun aksi tek durum KAKS/SiC-B+GNP-A numunesinin sürtünme kuvveti değerinin KAKS/SiC-B ve KAKS/GNP-A numunesinden daha yüksek olmasıdır. Nanopartiküllerin hibrit yapılarak kullanılması iplikler arası sürtünme kuvvetini arttırmıştır.

- Hem temiz kumaşlarda hem de KAKS emdirilmiş kumaşların tamamında Twaron 460'ın maksimum iplik çekme kuvvetinin Twaron 200'e göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Tablo 3.9'da verildiği gibi Twaron 200, 930 Dtex ve Twaron 460 3360 Dtex kumaştan dokunmuştur. 930 Dtex iplikleri 3360 Dtex ipliklerinden daha ince olduğundan, iplikler arasındaki temas alanı 3360 Dtex ipliğe göre çok daha düşüktür. Bu nedenle Twaron 200, Twaron 460'a göre daha düşük bir maksimum iplik çekme kuvvetine sahiptir.
- Kumaşlarda atkı ve çözgü sayısı az olduğunda, tek ipliğin çözgü ve atkı iplikleri arasındaki geçiş noktaları da daha azdır. Twaron 460 kumaşındaki yerel tepelerin sayısının Twaron 200'e göre daha az olmasının sebebi budur. İplik çekme kuvveti, atkı ve çözgü iplikleri arasındaki geçiş noktalarının sayısı ve dolayısıyla kumaş dokuma yoğunluğuyla da ilgilidir. Bu nedenle, bir ipliği daha az atkı ve çözgü içeren kumaştan çekmek için daha az kuvvet gerekir. Ancak burada Twaron 460 ve Twaron 200'ün farklı Dtex'lere sahip kumaşlarla dokunduğunu unutmamak gerekir. KAKS Twaron 460 kumaş üzerine daha az atkı ve çözgü ile dokunduğu için KAKS'ların ipliklerin arasına nüfuz etmesi nispeten kolay olur ve iplikler arası sürtünme önemli ölçüde artar. Maksimum iplik çekme kuvvetindeki artış Twaron 460 için KAKS emdirilmiş tüm numunelerde ortalama 14 kat olarak hesaplanmıştır. Twaron 200 kumaş daha yüksek atkı ve çözgü sayısına sahip olduğu için kumaşın yapısı gereği iplikler arası sürtünme de artar. Ancak geçiş noktalarının sayısı fazla olduğu için KAKS'ın iplikler arasına nüfuz etmesi ve zaten yüksek olan sürtünme kuvvetini arttırması daha zordur. Bu nedenle, Twaron 200 kumaşa KAKS emdirilmesi iplikler arasındaki sürtünme etkisini daha sınırlı ölçüde arttırmıştır.
- NIJ 0115.00 standardına uygun olarak bıçak ve çivi uç ile yapılan düşük hızlı darbe test sonuçlarına göre: Yüksek performanslı kumaşlara KAKS uygulanması genel olarak enerji sönümleme performansını pozitif etkilemiştir. KAKS uygulanmasıyla fiberler arası temas noktaları artarak fiberleri daha çok etkileşime geçirmekte ve fiberler arası sürtünmeyi arttırmaktadır. Bu sayede darbe enerjisi daha geniş alanlara yayılarak KAKS uygulanmış kumaşların enerji sönümleme performansları yükselmektedir. KAKS'lara nanopartikül takviye edilmesi koruyuculuk performansını artıran bir etken olarak öne çıkmaktadır. Nanopartikül takviyeleri, KAKS'ların sürtünme özelliklerini yükseltmiş ve bu sayede enerji sönümleme olayında faydalı olmuşlardır. Nanopartikül türünün ve şeklinin burada önemli bir etken olduğu görülmüştür. SiC nanopartikül takviyesinin hem vurucu uçlar ile kumaş arasındaki sürtünmeyi arttırarak hem de iplikler arası sürtünmeyi yükselterek

enerji sönümlemede pay almasının yanı sıra sert yapısı sayesinde darbe enerjisini düşüren bir etkiye neden olmaktadır [133]. Nanopartikül yapıların olumlu özelliklerini bir arada toplayarak daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmek için yapılan hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'lar da koruyuculuk performansını etkilemişlerdir. SiC ve GNP nanopartiküllerinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan KAKS/SiC-B+GNP-A numunesi düşük hızlı darbe testlerinin tamamında en başarılı numune olmuştur. GNP geniş yüzey özellikleri sayesinde fiberler arasına girerek ön gerilmeye sebep olmakta ve bu nedenle sürtünmeyi arttırmaktadır.

- Bıçak uçlar ile yapılan test sonuçları incelendiğinde kumaşlarının ana hasar mekanizmasının kesilme hasarı olduğu görülmüştür. Çivi uç kullanıldığında ise fiberler kenarlara itilerek çivi ucun batmasına olanak sağlayan boşluklar oluşmaktadır. Bıçak uç ile yapılan deneylerde Twaron 460 kumaşının Twaron 200'e göre bariz bir üstünlüğü vardır. Bunun yanı sıra Twaron 200 çivi uç ile yapılan düşük hızlı darbe testlerinde hem temiz hem de KAKS emdirilmiş kumaşlarda Twaron 460'a yakın performans göstermiştir. Twaron 200 ile Twaron 460 arasında 2 temel fark vardır. Bunlardan biri iplik sayısı diğeri de lineer yoğunluktur. Twaron 200 kumaşında her 10 cm²'de 105 x 105 atkı çözgü ipliği bulunurken bu sayı Twaron 460'da 67 x 67'dir. Yani Twaron 200 daha sık dokunmuş bir kumaştır. Öte yandan Twaron 200, 930 Dtex, Twaron 460 ise 3360 Dtex lineer yoğunluğuna sahip iplik kullanılarak örülmüştür. Twaron 460'ın daha yoğun iplik kullanılması sonucu alansal yoğunluğu 460 gr/m² ve kalınlığı 0,4 mm iken Twaron 200 ise 200 gr/m² alansal yoğunluğa ve 0,2 mm kalınlığa sahiptir. Bıçak uç kullanılarak yapılan düşük hızlı darbe testlerindeki ana hasar mekanizmasının kesilme hasarı olduğu göz önüne alındığında Twaron 460 kumaşının başarısının kullanılan ipliğin lineer yoğunluğundan kaynaklandığı görülmektedir. Çivi uç ise tamamen farklı bir mekanizma ile çalışmaktadır. Çivi uç ile yapılan testlerde ana hasar mekanizmasının aralanma etkisi olduğu düşünüldüğünde Twaron 200 kumaşının sık yapısı sayesinde fiber hareketini yatay yönde kısıtladığı ve enerji sönümleme performansını arttırdığı görülmüştür.
- NIJ 0101.06 standardına göre yapılan balistik test sonuçları iki aşamada incelenmiştir. İlk aşamada kumaş ağırlığının %50'si oranında KAKS emdirilmiş numuneler ile yapılan deneyler literatürde az karşılaşılan ilginç sonuçlar vermiştir. 16 tabakalı numuneler kullanılarak gerçekleştirilen testlerde temiz kumaşlarda delinme olmamış ve mermi durdurulmuştur. Buna rağmen KAKS emdirilmiş numunelere uygulanan atışların tamamında delinme gerçekleşmiştir. Burada dikkat çeken nokta KAKS emdirilmiş kumaşların temiz kumaşların aksine birbirine sabitlenmiş kompozit yapılar gibi davranmasıydı. Bu durum KAKS emdirilmiş numunelerin gereğinden fazla gergin durmasına neden olmuş ve mermi ile temas anında ipliklerin hareket etmesine izin

vermemiştir. Bu nedenle balistik darbelerde kumaşların en önemli enerji sönümleme mekanizması olan piramit oluşumu gerçekleşmemiştir. Mermi darbesiyle hareket edemeyen ipliklerde enerji sönümleme gerçekleşmeden fiber kopması meydana gelmiştir. Literatürde yapılan inceleme sonucu 300 m/sn üzerindeki balistik darbelerde sürtünme katsayısının çok yüksek olmasının enerji sönümlemeye zarar vereceği bildirilmiştir [47]. Buna göre daha düşük KAKS emdirilmesinin kumaşların balistik koruyuculuk seviyesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla Twaron 460 kumaşına %5, %10 ve %20 oranında tek katı fazlı KAKS emdirilmiş ve balistik testler aynı şartlarda yeniden yapılmıştır. Bu testler sonucunda literatürde bahsedildiği gibi KAKS oranı arttıkça numunelerin sürtünme kuvvetinin artmasına bağlı olarak iplik hareketlerinin kısıtlandığı ve mermi çarpmasıyla fiber kopması hasarı meydana geldiği görülmüştür [116]. Bu nedenle balistik testler ağırlıkça %5 KAKS olacak şekilde tüm numuneler için tekrarlanmıştır. Her iki kumaş türü içinde KAKS emdirilmesinin temiz kumaşların balistik performansını yükselttiği görülmüştür. Nanopartikül takviyeli KAKS emdirilmiş numunelerinde balistik testlerde koruyuculuk performansının arttığı tespit edilmiştir. Her iki kumaş türü içinde en iyi koruma performansı KAKS/SiC-B+GNP-A emdirilmiş numunelerde görülmüştür. Reolojik özellikler incelendiğinde nanopartikül takviyeleri tek katı fazlı KAKS'ların katılma mekanizmalarını bozmuştur. Nanopartiküllerin hibrit olarak kullanıldığı KAKS'ların reolojik özellikleri genellikle süspansiyonu oluşturan nanopartiküle benzer özellik göstermiştir. Burada diğer numunelerden ayrılan iki hibrit nanopartikül takviyeli KAKS'tan biri olan KAKS/SiC-B+GNP-A balistik testlerin yanı sıra yüzey ve iplikler arası sürtünme ve düşük hızlı darbe deneylerindeki en başarılı numune olmuştur. Grafenin bal peteği örgülü yapısı ve çok güçlü karbon bağlarına sahip olması, silisyum karbürün ise dallanmış üç boyutlu geometrik ve sert yapısından dolayı birlikte kullanıldıklarında bir ağ örgü oluşturmakta, kolay kümeleşebildiklerinden KAKS içerisinde uzun zincir ve dallanmalar oluşturmaktadır. Ayrıca Si atomları, karbon atomlarıyla çok güçlü bileşikler oluşturabilmekte ve atomların son yörüngesindeki orbitallerin kararlı bir elektron dengesine sahip olması uyumluluğu artırabilmektedir. KAKS takviyesinin balistik testlerdeki enerji sönümleme performansını yükseltmesindeki ana etmenin sürtünme özellikleri ile bağlantılı olduğu ancak bu durumun reolojik özelliklerden tamamen bağımsız olmadığı görülmüştür.

- Twaron 460 kumaşı ile üretilen numunelerin tamamı Twaron 200 kullanılarak üretilen numunelerden daha başarılı olmuştur. Twaron 460 kumaşı Twaron 200'e göre %130 daha ağır olmasına rağmen koruyuculuk performansını tüm numuneler için ortalama %36,35 oranında arttırmıştır. Kumaş yapısının etkisi incelendiğinde ise Twaron 200 kumaşının

daha ince iplikler kullanılarak daha sık yapıda dokunmasının mermi hareketini kısıtlayarak balistik testlerde avantaj sağladığı tespit edilmiştir.

- KAKS'ların kumaşlara emdirilmesinin enerji sönümlleme performansı üzerindeki etkilerinin büyük oranda sürtünme özellikleri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle KNT, GNP ve SiC vb. nanopartiküllerinin silika partiküller olmaksızın PEG içinde dağıtılarak üretilen süspansiyonların enerji sönümlleme performansına etkileri incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.
- Bu doktora çalışması kapsamında KAKS'ların yüksek performanslı kumaşlara emdirilmesinin enerji sönümlleme performansını pozitif etkilediği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra darbe türlerine bağlı olarak kumaş yapısının da etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle gelecek çalışmalarda kişisel koruyucu zırh üretimi için farklı özelliklere sahip kumaşların bir arada kullanılmasının etkili olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] R.L. Hoffman, Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions--1. Observation of a Flow Instability, *Trans Soc Rheol.* (1972).
- [2] R.L. Hoffman, Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. II. Theory and experimental tests, *J. Colloid Interface Sci.* (1974). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90059-9).
- [3] W.H. Boersma, J. Laven, H.N. Stein, Viscoelastic properties of concentrated shear-thickening dispersions, *J. Colloid Interface Sci.* (1992). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(92\)90385-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90385-Y).
- [4] G. Bossis, J.F. Brady, The rheology of Brownian suspensions, *J. Chem. Phys.* (1989). <https://doi.org/10.1063/1.457091>.
- [5] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, M. Rezaei, Rheological and viscoelastic behavior of concentrated colloidal suspensions of silica nanoparticles: A response surface methodology approach, *Adv. Powder Technol.* 26 (2015) 1570–1577. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.08.011>.
- [6] Q. Chen, M. Liu, S. Xuan, W. Jiang, S. Cao, X. Gong, Shear dependent electrical property of conductive shear thickening fluid, *Mater. Des.* 121 (2017) 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.056>.
- [7] M.A. Green, Stab Wound Dynamics—A Recording Technique for Use in Medico-Legal Investigations, *J. Forensic Sci. Soc.* 18 (1978) 161–163. [https://doi.org/10.1016/S0015-7368\(78\)71196-5](https://doi.org/10.1016/S0015-7368(78)71196-5).
- [8] D.A. Rouse, Patterns of Stab Wounds: A Six Year Study, *Med. Sci. Law.* 34 (1994) 67–71. <https://doi.org/10.1177/002580249403400110>.
- [9] L.A. Murray, M.A. Green, Hilts and knives: a survey of ten years of fatal stabbings., *Med. Sci. Law.* 27 (1987) 182–4. <https://doi.org/10.1177/002580248702700308>.
- [10] I. HORSFALL, STAB RESISTANT BODY ARMOUR, CRANFIEALD, 2000.
- [11] C. L. Farrar; D. W. Leeming, *Military Ballistics. A Basic Manual*, Brassey, 1983.
- [12] S.S.J. Donald E. Carlucci, *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*, Third Edition, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018.
- [13] S. Gürgen, Kayma altında katılan sıvı takviyeli zırh kumaşının seramik toz katkıları ile özelliklerinin geliştirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2017.
- [14] D.O. URSENBACH, Penetration of CFRP Laminates by Cylindrical Indenters, THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, 1995.
- [15] M. Shaker, F. Ko, J. Song, Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of Kevlar Fiber-Reinforced Epoxy Composites, *J. Compos. Technol. Res.* 21 (1999) 224–

229. <https://doi.org/10.1520/CTR10985J>.
- [16] W.J. Cantwell, J. Morton, Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic, *Compos. Sci. Technol.* 38 (1990) 119–141. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0266-3538\(90\)90002-M](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0266-3538(90)90002-M).
- [17] J.C. Smith, F.L. McCrackin, H.F. Schiefer, Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading, *Text. Res. J.* 28 (1958) 288–302. <https://doi.org/10.1177/004051755802800402>.
- [18] N.K. Naik, P. Shrirao, B.C.K. Reddy, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *Int. J. Impact Eng.* 32 (2006) 1521–1552. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.004>.
- [19] Ç.G. GÜLDİKEN, Balistik uygulamalar için nanokompozit nanolif malzeme üretiminin geliştirilmesi, (2020).
- [20] D. Roylance, Stress wave-propagation in fibers-effects of cross- overs, *Fiber Sci Technol.* 13 (1980) 385–395.
- [21] D.J. Carr, Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact, *J. Mater. Sci. Lett.* 18 (1999) 585–588. <https://doi.org/10.1023/A:1006655301587>.
- [22] P.M. Cunniff, An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics under Ballistic Impact, *Text. Res. J.* 62 (1992) 495–509. <https://doi.org/10.1177/004051759206200902>.
- [23] R.H. Zee, C.Y. Hsieh, Energy loss partitioning during ballistic impact of polymer composites, *Polym. Compos.* 14 (1993) 265–271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.750140312>.
- [24] A. Shahkarami, R. Vaziri, An Efficient Shell Element Based Approach to Modeling the Impact Response of Fabrics, 9th Int. LS-DYNA Users Conf. (2006) 1–12.
- [25] NIJ Standard-0101.06, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, NIJ Stand. (2008) 89.
- [26] I.G. Crouch, Critical interfaces in body armour systems, *Def. Technol.* (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.006>.
- [27] I.G. Crouch, Body armour – New materials, new systems, *Def. Technol.* 15 (2019) 241–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.002>.
- [28] R. Yadav, M. Naebe, X. Wang, B. Kandasubramanian, Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems, *RSC Adv.* 6 (2016) 115145–115174. <https://doi.org/10.1039/C6RA24016J>.
- [29] U. Mawkhlieng, A. Majumdar, Soft body armour, *Text. Prog.* 51 (2019) 139–224. <https://doi.org/10.1080/00405167.2019.1692583>.
- [30] U. Mawkhlieng, A. Majumdar, Soft body armour, *Text. Prog.* 51 (2019) 139–224. <https://doi.org/10.1080/00405167.2019.1692583>.

- [31] P. Cunniff, The V50 Performance of Body Armor under Oblique Impact, 1999.
- [32] G. Liaghat, H. Shanazari, H. Hadavinia, A. Aboutorabi, Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/ woven composite panels, *J. Thermoplastic Compos. Mater.* 30 (2015). <https://doi.org/10.1177/0892705715604680>.
- [33] A.R. Othman, M.H. Hassan, Effect of different construction designs of aramid fabric on the ballistic performances, *Mater. Des.* 44 (2013) 407–413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.061>.
- [34] T.J. Kang, C.Y. Kim, K.H. Hong, Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor, *J. Appl. Polym. Sci.* 124 (2012) 1534–1541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.34843>.
- [35] M. Karahan, Comparison of Ballistic Performance and Energy Absorption Capabilities of Woven and Unidirectional Aramid Fabrics, *Text. Res. J.* 78 (2008) 718–730. <https://doi.org/10.1177/0040517508090487>.
- [36] K. Bilisik, M. Korkmaz, Multilayered and Multidirectionally-stitched aramid Woven Fabric Structures: Experimental Characterization of Ballistic Performance by Considering the Yarn Pull-out Test, *Text. Res. J.* 80 (2010) 1697–1720. <https://doi.org/10.1177/0040517510365954>.
- [37] A. Kadir Bilisik, Y. Turhan, Multidirectional Stitched Layered Aramid Woven Fabric Structures and their Experimental Characterization of Ballistic Performance, *Text. Res. J.* 79 (2009) 1331–1343. <https://doi.org/10.1177/0040517509104275>.
- [38] Y.S. Lee, E.D. Wetzel, N.J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *J. Mater. Sci.* 38 (2003) 2825–2833. <https://doi.org/10.1023/A:1024424200221>.
- [39] A. Bhatnagar, E.S. Parrish, United States Patent, 10/179,715, 2005. <https://patents.google.com/patent/US6841492B2/en>.
- [40] N. Gokarneshan, A. Ramasamy, Weaving of 3D fabrics: A critical appreciation of the developments, *Text. Prog.* 41 (2009) 1–58. <https://doi.org/10.1080/00405160902804239>.
- [41] B.K. Behera, R. Mishra, 3-Dimensional weaving, *Indian J. Fibre Text. Res.* 33 (2008) 274–287.
- [42] A. Majumdar, A. Laha, D. Bhattacharjee, I. Biswas, Tuning the structure of 3D woven aramid fabrics reinforced with shear thickening fluid for developing soft body armour, *Compos. Struct.* 178 (2017) 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.018>.
- [43] M.P. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B.M. Powers, T.A. Bogetti, Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric, *Compos. Struct.* 89 (2009) 556–566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.11.012>.

- [44] Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman, B. Powers, A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact, *Int. J. Impact Eng.* 32 (2006) 1299–1312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.11.005>.
- [45] J.W.S. HEARLE, 1 - Introduction, in: J.W.S. Hearle (Ed.), *Woodhead Publ. Ser. Text.*, Woodhead Publishing, 2001: pp. 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781855737549.1>.
- [46] S. Bazhenov, Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 4167–4173. <https://doi.org/10.1023/A:1018674528993>.
- [47] X.S. Zeng, V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 66 (2006) 1309–1330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nme.1596>.
- [48] D.L. Starratt, An instrumented experimental study of the ballistic response of textile materials, The University of British Columbia, 1998. <https://open.library.ubc.ca/collections/831/items/1.0078506>.
- [49] A. Majumdar, A. Laha, Effects of fabric construction and shear thickening fluid on yarn pull-out from high-performance fabrics, *Text. Res. J.* 86 (2016) 2056–2066. <https://doi.org/10.1177/0040517515619357>.
- [50] C. Chu, Y. Chen, Ballistic-proof Effects of Various Woven Constructions, *Fibres Text. East. Eur.* (2010).
- [51] M.E. Shimek, E.P. Fahrenthold, Impact Dynamics Simulation for Multilayer Fabrics of Various Weaves, *AIAA J.* 53 (2015) 1793–1811. <https://doi.org/10.2514/1.J053504>.
- [52] R. Laible, ed., *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier, 1980.
- [53] S. REBOUILLAT, 2 - Aramids, in: J.W.S.B.T.-H.-P.F. Hearle (Ed.), *Woodhead Publ. Ser. Text.*, Woodhead Publishing, 2001: pp. 23–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781855737549.23>.
- [54] R.A. Scott, ed., *Textiles for Protection*, Woodhead Publishing, 2005.
- [55] A. GUPTA, Improving UV resistance of high strength fibers, North Carolina State University, 2005.
- [56] J.W.S.B.T.-H.-P.F. Hearle, ed., *High-Performance Fibres*, Woodhead Publishing, 2001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-539-2.50024-0>.
- [57] D. BEERS, R.J. YOUNG, C.L. SO, D.J. SIKKEMA, K.E. PEREPELKIN, G. WEEDON, 4 - Other high modulus-high tenacity (HM-HT) fibres from linear polymers, in: J.W.S.B.T.-H.-P.F. Hearle (Ed.), *Woodhead Publ. Ser. Text.*, Woodhead Publishing, 2001: pp. 93–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781855737549.93>.
- [58] R.A. Prosser, S.H. Cohen, R.A. Segars, Heat as a Factor in the Penetration of Cloth

- Ballistic Panels by 0.22 Caliber Projectiles, *Text. Res. J.* 70 (2000) 709–722. <https://doi.org/10.1177/004051750007000809>.
- [59] V.B.C. Tan, C.T. Lim, C. Cheong, Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry, *Int. J. Impact Eng. - INT J IMPACT ENG.* 28 (2003) 207–222. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00055-6).
- [60] H.-S. Hwang, M.H. Malakooti, H.A. Sodano, Tailored inter yarn friction in aramid fabrics through morphology control of surface grown ZnO nanowires, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 76 (2015) 326–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.012>.
- [61] G. Nilakantan, R.L. Merrill, M. Keefe, J.W. Gillespie, E.D. Wetzal, Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of kevlar fabrics, *Compos. Part B Eng.* 68 (2015) 215–229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.033>.
- [62] A. Laha, A. Majumdar, Interactive effects of p-aramid fabric structure and shear thickening fluid on impact resistance performance of soft armor materials, *Mater. Des.* 89 (2016) 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.077>.
- [63] B. Gu, Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile, *Compos. Part B Eng.* 34 (2003) 361–371. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00137-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00137-3).
- [64] F. Irgens, *Rheology and Non-Newtonian Fluids*, Springer International Publishing, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01053-3>.
- [65] Y.S. Lee, N.J. Wagner, Rheological Properties and Small-Angle Neutron Scattering of a Shear Thickening, Nanoparticle Dispersion at High Shear Rates, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 7015–7024. <https://doi.org/10.1021/ie0512690>.
- [66] N. Wagner, J. Brady, Shear thickening in colloidal dispersions, *Phys. Today.* 62 (2009). <https://doi.org/10.1063/1.3248476>.
- [67] J. Kaldasch, B. Senge, Shear Thickening in Polymer Stabilized Colloidal Suspensions, *Colloid Polym. Sci.* 287 (2009) 1481–1485. <https://doi.org/10.1007/s00396-009-2121-1>.
- [68] S. Gürgen, M. Cemal KUŞHAN, U. Meslek Yüksekokulu, A. Üniversitesi, M. Mühendisliği Bölümü, E. Osmangazi Üniversitesi, Kayma Altında Katılacak Sıvıların Reolojik Özellikleri, *J. Polytech.* 19 (2016) 409–414. <https://doi.org/10.2339/2016.19.4>.
- [69] F. Pinto, M. Meo, Design and Manufacturing of a Novel Shear Thickening Fluid Composite (STFC) with Enhanced out-of-Plane Properties and Damage Suppression, *Appl. Compos. Mater.* 24 (2017) 643–660. <https://doi.org/10.1007/s10443-016-9532-1>.
- [70] S. Bazhenov, On the role of friction in energy dissipation upon transverse ballistic impact on fabric, *Polym. Sci. Ser. B.* 48 (2006) 282–286.

- <https://doi.org/10.1134/S1560090406090144>.
- [71] L. V Woodcock, Origins of shear dilatancy and shear thickening phenomena, *Chem. Phys. Lett.* 111 (1984) 455–461. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(84\)85540-2](https://doi.org/10.1016/0009-2614(84)85540-2).
 - [72] R.L. Hoffman, Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions, *J. Rheol.* (N. Y. N. Y). (1998). <https://doi.org/10.1122/1.550884>.
 - [73] P. D’Haene, J. Mewis, G.G. Fuller, Scattering Dichroism Measurements of Flow-Induced Structure of a Shear Thickening Suspension, *J. Colloid Interface Sci.* 156 (1993) 350–358. <https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1122>.
 - [74] Y.S. Lee, N.J. Wagner, Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions, *Rheol. Acta.* 42 (2003) 199–208. <https://doi.org/10.1007/s00397-002-0290-7>.
 - [75] D.P. Kalman, R.L. Merrill, N.J. Wagner, E.D. Wetzel, Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle-fluid suspensions, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* (2009). <https://doi.org/10.1021/am900516w>.
 - [76] B. Kaffashi, V.T. O’Brien, M.E. Mackay, S.M. Underwood, Elastic-Like and Viscous-Like Components of the Shear Viscosity for Nearly Hard Sphere, Brownian Suspensions., *J. Colloid Interface Sci.* 187 (1997) 22–28. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.4611>.
 - [77] R.S. Farr, J.R. Melrose, R.C. Ball, Kinetic theory of jamming in hard-sphere startup flows, *Phys. Rev. E.* 55 (1997) 7203–7211. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7203>.
 - [78] T.N. Phung, J.F. Brady, G. Bossis, Stokesian Dynamics simulation of Brownian suspensions, *J. Fluid Mech.* 313 (1996) 181–207. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0022112096002170>.
 - [79] J.F. Brady, Model hard-sphere dispersions: statistical mechanical theory, simulations, and experiments, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 1 (1996) 472–480. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(96\)80115-4](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(96)80115-4).
 - [80] J.M. Szczepansk, Modification and integration of shear thickening fluids into high performance fabrics - Paper 761, Ryerson, 2011. <http://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA:1368>.
 - [81] H.A. Barnes, Shear- Thickening (“Dilatancy”) in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids, *J. Rheol.* (N. Y. N. Y). 33 (1989) 329–366. <https://doi.org/10.1122/1.550017>.
 - [82] Y. Xu, X. Chen, Y. Wang, Z. Yuan, Stabbing resistance of body armour panels impregnated with shear thickening fluid, *Compos. Struct.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.056>.
 - [83] Y. Xu, Stabbing Resistance of Soft Ballistic Body Armour Impregnated with Shear Thickening Fluid, 2016.

- [84] K.M. Beazley, Industrial aqueous suspensions, Research Studies Press, 1980.
- [85] E.D. Wetzel, Y.S. Lee, R.G. Egres, K.M. Kirkwood, J.E. Kirkwood, N.J. Wagner, The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)- Kevlar Composites, AIP Conf. Proc. 712 (2004) 288–293. <https://doi.org/10.1063/1.1766538>.
- [86] Y. Otsubo, K. Umeya, Adsorption of polyacrylamide on silica particles and its effect on the rheological properties of suspensions, J. Colloid Interface Sci. 95 (1983) 279–282. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9797\(83\)90101-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9797(83)90101-7).
- [87] O. Petel, S. Ouellet, J. Loiseau, B. Marr, D. Frost, A. Higgins, The Effect of Particle Strength on the Ballistic Resistance of Shear Thickening Fluids, Appl. Phys. Lett. 102 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4791785>.
- [88] O.E. Petel, S. Ouellet, J. Loiseau, D.L. Frost, A.J. Higgins, A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction, Int. J. Impact Eng. 85 (2015) 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.004>.
- [89] J. Qin, G. Zhang, X. Shi, Study of a shear thickening fluid: the suspensions of monodisperse polystyrene microspheres in polyethylene glycol, J. Dispers. Sci. Technol. 38 (2017) 935–942. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1216435>.
- [90] H.R. Baharvandi, M. Alebooyeh, M. Alizadeh, P. Khaksari, N. Kordani, Effect of silica weight fraction on rheological and quasi-static puncture characteristics of shear thickening fluid-treated Twaron® composite, J. Ind. Text. 46 (2016) 473–494. <https://doi.org/10.1177/1528083715589750>.
- [91] T.A. Strivens, The viscoelastic properties of concentrated non-aqueous dispersions, Colloids and Surfaces. 18 (1986) 395–410. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-6622\(86\)80325-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-6622(86)80325-0).
- [92] S.S. Shenoy, N.J. Wagner, Influence of medium viscosity and adsorbed polymer on the reversible shear thickening transition in concentrated colloidal dispersions, Rheol. Acta. 44 (2005) 360–371. <https://doi.org/10.1007/s00397-004-0418-z>.
- [93] X. Miao, G. Jiang, X. Kong, Z. Shuaiquan, Experimental Investigation on the Stab Resistance of Warp Knitted Fabrics, Fibres Text. East. Eur. 22 (2014) 65–70.
- [94] F. Galindo-Rosales, F. Rubio-Hernández, J. Velázquez-Navarro, Shear-thickening behavior of Aerosil® R816 nanoparticles suspensions in polar organic liquids, Rheol. Acta. 48 (2009) 699–708. <https://doi.org/10.1007/s00397-009-0367-7>.
- [95] F.J. Galindo-Rosales, P. Moldenaers, J. Vermant, Assessment of the dispersion quality in polymer nanocomposites by rheological methods, Macromol. Mater. Eng. 296 (2011) 331–340. <https://doi.org/10.1002/mame.201000345>.
- [96] A.D. Moriana, T. Tian, V. Sencadas, W. Li, Comparison of rheological behaviors with

- fumed silica-based shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheol. J.* 28 (2016) 197–205. <https://doi.org/10.1007/s13367-016-0020-9>.
- [97] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, W. Li, Shear thickening fluids in protective applications: A review, *Prog. Polym. Sci.* 75 (2017) 48–72. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.07.003>.
- [98] X. Sha, K. Yu, H. Cao, K. Qian, Shear thickening behavior of nanoparticle suspensions with carbon nanofillers, *J. Nanoparticle Res.* 15 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1816-x>.
- [99] W. Huang, Y. Wu, L. Qiu, C. Dong, J. Ding, D. Li, Tuning rheological performance of silica concentrated shear thickening fluid by using graphene oxide, *Adv. Condens. Matter Phys.* 2015 (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/734250>.
- [100] A. Laha, A. Majumdar, Shear thickening fluids using silica-halloysite nanotubes to improve the impact resistance of p-aramid fabrics, *Appl. Clay Sci.* 132–133 (2016) 468–474. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.017>.
- [101] S. Gürgen, W. Li, M.C. Kuşhan, The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives, *Mater. Des.* 104 (2016) 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.055>.
- [102] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, Tuning of the rheological properties of concentrated silica suspensions using carbon nanotubes, *Rheol. Acta.* 55 (2016) 759–766. <https://doi.org/10.1007/s00397-016-0950-7>.
- [103] Z. Tan, W. Li, W. Huang, The effect of graphene on the yarn pull-out force and ballistic performance of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluids, *Smart Mater. Struct.* 27 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaca4b>.
- [104] F.F. Wang, Y. Zhang, H. Zhang, L. Xu, P. Wang, C. Bin Guo, The influence of graphene nanoplatelets (GNPs) on the semi-blunt puncture behavior of woven fabrics impregnated with shear thickening fluid (STF), *RSC Adv.* 8 (2018) 5268–5279. <https://doi.org/10.1039/c7ra12802a>.
- [105] L.L. Sun, D.S. Xiong, C.Y. Xu, Application of shear thickening fluid in ultra high molecular weight polyethylene fabric, *J. Appl. Polym. Sci.* 129 (2013) 1922–1928. <https://doi.org/10.1002/app.38844>.
- [106] H.R. Baharvandi, P. Khaksari, M. Alebouyeh, M. Alizadeh, J. Khojasteh, N. Kordani, Investigating the quasi-static puncture resistance of p-aramid nanocomposite impregnated with the shear thickening fluid, *J. Reinf. Plast. Compos.* 33 (2014) 2064–2072. <https://doi.org/10.1177/0731684414554635>.
- [107] M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, H. Babaei, M. Rezaei, The influence of carbon nanotubes on quasi-static puncture resistance and yarn pull-out behavior of shear-

- thickening fluids (STFs) impregnated woven fabrics, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 88 (2016) 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.06.006>.
- [108] W. Li, D. Xiong, X. Zhao, L. Sun, J. Liu, Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid, *Mater. Des.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>.
- [109] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multi-phase shear thickening fluids, *Polym. Test.* 64 (2017) 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.11.003>.
- [110] A. Majumdar, A. Laha, D. Bhattacharjee, I. Biswas, Tuning the structure of 3D woven aramid fabrics reinforced with shear thickening fluid for developing soft body armour, *Compos. Struct.* 178 (2017) 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.018>.
- [111] S. Gürgen, V. Kuşhan, M. Cemal, E.M. Yüksekokulu, O. Üniversitesi, Seramik Tozu İçeren Nano Süspansiyonların Kumaş Yüksek Hızlı Çarpma Direncine Etkileri, n.d.
- [112] V.A. Chatterjee, S.K. Verma, D. Bhattacharjee, I. Biswas, S. Neogi, Enhancement of energy absorption by incorporation of shear thickening fluids in 3D-mat sandwich composite panels upon ballistic impact, *Compos. Struct.* 225 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111148>.
- [113] S. Arora, A. Majumdar, B.S. Butola, Structure induced effectiveness of shear thickening fluid for modulating impact resistance of UHMWPE fabrics, *Compos. Struct.* 210 (2019) 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.028>.
- [114] Z. Lu, Z. Yuan, X. Chen, J. Qiu, Evaluation of ballistic performance of STF impregnated fabrics under high velocity impact, *Compos. Struct.* 227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111208>.
- [115] Q. shi Wang, R. jun Sun, M. Yao, M. yu Chen, Y. Feng, The influence of temperature on inter-yarns fictional properties of shear thickening fluids treated Kevlar fabrics, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 116 (2019) 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.10.020>.
- [116] L. Liu, Z. Yang, Z. Zhao, X. Liu, W. Chen, The influences of rheological property on the impact performance of kevlar fabrics impregnated with SiO₂/PEG shear thickening fluid, *Thin-Walled Struct.* 151 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106717>.
- [117] S. Arora, A. Majumdar, B.S. Butola, Soft armour design by angular stacking of shear thickening fluid impregnated high-performance fabrics for quasi-isotropic ballistic response, *Compos. Struct.* 233 (2020) 111720. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111720>.
- [118] S. Gürgen, M.C. Kuşhan, The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 94

- (2017) 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.12.019>.
- [119] X.Z. Zhang, W.H. Li, X.L. Gong, The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper, *Smart Mater. Struct.* 17 (2008). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035027>.
- [120] B. Cheeseman, T. Bogetti, Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates, *Compos. Struct.* 61 (2003) 161–173. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00029-1).
- [121] A. Ghosh, A. Majumdar, B.S. Butola, Role of surface chemistry of fibres additives on rheological behavior of ceramic particle based Shear Thickening Fluids, *Ceram. Int.* 44 (2018) 21514–21524. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.213>.
- [122] Y. Sun, R. Wang, X. Liu, M. Li, H. Yang, B. Li, Improvements in the thermal conductivity and mechanical properties of phase-change microcapsules with oxygen-plasma-modified multiwalled carbon nanotubes, *J. Appl. Polym. Sci.* 134 (2017). <https://doi.org/10.1002/app.45269>.
- [123] M. Fahool, A.R. Sabet, Parametric study of energy absorption mechanism in Twaron fabric impregnated with a shear thickening fluid, *Int. J. Impact Eng.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.11.016>.
- [124] C. Yanen, M.Y. Solmaz, E. Aydoğmuş, Investigation of the Effect of Shear Thickening Fluid and Fabric Structure on Inter-Yarn Friction Properties in Twaron Fabrics, *Eur. J. Tech.* 10 (2020) 501–510. <https://doi.org/10.36222/ejt.823112>.
- [125] R.D. Morgan, National Institute of Justice, *SAGE Encycl. Crim. Psychol.* (2019). <https://doi.org/10.4135/9781483392240.n299>.
- [126] M. Bajya, A. Majumdar, B.S. Butola, S.K. Verma, D. Bhattacharjee, Design strategy for optimising weight and ballistic performance of soft body armour reinforced with shear thickening fluid, *Compos. Part B Eng.* 183 (2020) 107721. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107721>.
- [127] D.-M. Liu, Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions: ϕ_m determination and viscosity prediction, *J. Mater. Sci.* 35 (2000) 5503–5507. <https://doi.org/10.1023/A:1004885432221>.
- [128] C. Yanen, E. Aydoğmuş, M.Y. Solmaz, Determination of Suitable Rheological Model for Polyethylene Glycols and Silica Particle Mixtures, *Middle East J. Sci.* 6 (2020) 57–67.
- [129] M. Zabet, K. Trinh, H. Toghiani, T.E. Lacy, C.U. Pittman, S. Kundu, Anisotropic Nanoparticles Contributing to Shear-Thickening Behavior of Fumed Silica Suspensions, *ACS Omega.* 2 (2017) 8877–8887. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01484>.
- [130] J. Ge, Z. Tan, W. Li, H. Zhang, The rheological properties of shear thickening fluid reinforced with SiC nanowires, *Results Phys.* 7 (2017) 3369–3372.

- <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.08.065>.
- [131] C. Yanen, M.Y. Solmaz, E. Aydoğmuş, Investigation of the Effect of Nanoparticle Reinforcement in Shear Thickening Fluids on Inter-Yarn Friction Properties, in: EUROASIA SUMMIT Congr. Sci. Res. Recent Trends-7, Azerbaijan, 2020: pp. 202–209.
 - [132] O.E. Petel, S. Ouellet, J. Loiseau, D.L. Frost, A.J. Higgins, A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction, *Int. J. Impact Eng.* 85 (2015) 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.004>.
 - [133] G.M. Pharr, Measurement of mechanical properties by ultra-low load indentation, *Mater. Sci. Eng. A.* 253 (1998) 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00724-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00724-2).
 - [134] https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ_Handbook_Ballistics_2019_DEF.pdf, Ballistic materials handbook Teijin Aramid and ballistic protection, (n.d.).
 - [135] A. Yilmaz, Ateşli Silahlarla Oluşan Yaralanmalar, *TBB Derg.* 50 (2004) 167–178.
 - [136] T.A. Hassan, V.K. Rangari, S. Jeelani, Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites, *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 2892–2899. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.018>.

ÖZGEÇMİŞ

Cenk YANEN

████████████████████

██████████ ██████████

114

114

© 2006 The Authors

██████████

████████████████████

████████████████████

■■■■■■■■■■

103

114

■■■■■■■■■■

114

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Çekme-basma test cihazı, Mekanik ve ultrasonik karıştırıcı, Reometre
- ✓ ANSYS, Solidworks

İŞ DENEYİMİ

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Yanen, C., Aydoğmuş, E., Solmaz, M.Y., (2020). Determination of Suitable Rheological Model for Polyethylene Glycols and Silica Particle Mixtures. Middle East Journal of Science, 6(2),85-93 (Doktora tezinden üretilmiştir.)
2. Yanen, C., , S.M.Y., , A.E., (2020). Investigation of the Effect of Shear Thickening Fluid and Fabric Structure on Inter-Yarn Friction Properties in Twaron Fabrics. European Journal of Technique, 10(2),501-510 (Doktora tezinden üretilmiştir.)
3. Yanen, C., Solmaz, M.Y., (2019). Ballistic tests of lightweight hybrid composites for body armor. Materials Testing, 61(5),425-433
4. DüNDAR, S., Bozoğlan, A., Yaman, F., Kırtay, M., Bulmuş, Ö., Şahin, A.H., Solmaz, M.Y., Yanen, C., (2019). An experimental investigation of the effects of chronic stress on

bone-to-implant contact. Journal of the Korean Association of Oral and Maxillofacial Surgeons, 45(2),91-96

5. Yanen, C., Solmaz, M.Y., (2016). Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 3(2),351-362

Bildiriler:

1. Yanen, C., Solmaz, M.Y., Aydoğmuş, E., (2020). Investigation of The Effect of Nanoparticle Reinforcement in Shear Thickening Fluids on Inter-Yarn Friction Properties. EUROASIA Congress on Scientific Researches and Recent Trends-VII, 279-287 (Doktora tezinden üretilmiştir.)
2. Yanen, C., Solmaz, M.Y., Aydoğmuş, E., (2020). Investigation Of The Effect Of Shear Thickening Fluid And Fabric Structure On Inter-Yarn Friction Properties In Twaron Fabrics. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2020) (Doktora tezinden üretilmiştir.)
3. Yanen, C., Aydoğmuş, E., Solmaz, M.Y., (2020). Determination Of Suitable Rheological Model For Polyethylene Glycol And Silica Particles Mixtures. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2020) (Doktora tezinden üretilmiştir.)
4. Yanen, C., Solmaz, M.Y., (2016). Investigation of Ballistic Performance of Laminated Hybrid Composites. 22nd International Conference on Engineering Mechanics
5. Yanen, C., Solmaz, M.Y., (2016). Production and experimental investigation of ballistic performance of laminated hybrid composites. Fourth International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering
6. Yanen, C., Solmaz, M.Y., (2017). Ballistic Performance of 21 Layered Hybrid Composites. 12th International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology (ICLTET'xx2017)

Projeler:

1. Kurumsal (BAP), Araştırmacı, Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Eğrisel Formdaki Tabakalı Kompozit Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Destek Alınan Kuruluş: Fırat Üniversitesi, 8 Mart 2021, Devam Ediyor
2. Kurumsal (BAP), Araştırmacı, Hibrit Nanopartikül Takviyeli Kayma Altında Katılaştan Sıvıların Balistik Uygulamalarında Kullanımının Araştırılması, Destek Alınan Kuruluş: Fırat Üniversitesi, 28 Kasım 2019, Devam Ediyor (Doktora Tezi Projesi)
3. TÜBİTAK, Proje Yürütücüsü, Otonom Tarımsal Fide Filizlenme Alanı Tespit Robotu Tasarım ve İmalatı, Yürütülen Kuruluş: Metis Danışmanlık Mühendislik Elektronik Medikal Bilişim Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, Destek Alınan Kuruluş: TÜBİTAK Başkanlık, 01 Ağustos 2017, 01 Ocak 2019.
4. Kamu, Araştırmacı, Grafit Elektrotlu Ohmik Su Isıtma Sistemi Prototipinin Geliştirilmesi, Yürütülen Kuruluş: Geosis Mühendislik Makina Elektrik Elektronik Medikal San. ve Tic. Ltd. Şti, Destek Alınan Kuruluş: KOSGEB Elazığ Hizmet Merkezi Müdürlüğü, 01 Nisan 2017, 01 Ekim 2018.
5. Kurumsal (BAP), Araştırmacı, 40 Ton Kapasiteli Hidrolik Çekme Cihazı Yazılım ve Donanımının Revizyonu, Yürütülen Kuruluş: Makine Mühendisliği Bölümü, Destek Alınan Kuruluş: Fırat Üniversitesi, 01 Haziran 2016, 01 Aralık 2016.
6. Kamu, Araştırmacı, Grafit Elektrotlu Ohmik Isıtma Sistemi Tasarımı ve İmalatı, Yürütülen Kuruluş: Geosis Mühendislik Danışmanlık San. ve Tic. Ltd. Şti, Destek Alınan Kuruluş: Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 01 Haziran 2015, 01 Ağustos 2016.

7. Kurumsal (BAP), Araştırmacı, Universal ekme Cihazı Yazılım ve Donanımının Modernizasyonu, Yürütölen Kuruluş: Makine Mühendisliğı Bölümü, Destek Alınan Kuruluş: Fırat Üniversitesi, 01 Kasım 2015, 01 Mayıs 2016.
8. Kurumsal (BAP), Araştırmacı, Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğı, Yürütölen Kuruluş: Fırat Üniversitesi, Destek Alınan Kuruluş: Fırat Üniversitesi, 01 Ağustos 2013, 01 Ocak 2016.
9. Kamu, Proje Yürütücüsü, Ozon ve Negatif İyon Destekli amaşır Kurutma ve Sterilizasyon Sistemi, Yürütölen Kuruluş Metis Danışmanlık Mühendislik Elektronik Medikal Bilişim Sanayi ve Ticaret Ltd. şti, Destek Alınan Kuruluş: Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 01 Nisan 2014, 01 Nisan 2015.
10. Kamu, Araştırmacı, İklimlendirme Ve Havalandırma Sistemleri İçin Sterilizasyonlu Likit Filtre Tasarımı, Yürütölen Kuruluş: Gürgeç Mühendislik Makina San. ve Tic. Ltd. şti, Destek Alınan Kuruluş: Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 01 Nisan 2014, 01 Nisan 2015.
11. Kamu, Araştırmacı, Termoelektrik Modöllerin Fırınlarda Enerji Verimliliğinin Artırılmasında Kullanımı, Yürütölen Kuruluş: Arkhe Ar-Ge Enerji Eğıtim Danışmanlık San. ve Tic. Ltd. şti. Destek Alınan Kuruluş: Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 01 Nisan 2013, 01 Nisan 2014.