

İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN KÖPÜK / SiO₂ KATKILI ŞOK EMİCİ
NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

ÇAĞLAR ERDEM
(Y190231006)

ORCID NO: 0000-0002-8755-3809

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. FETHULLAH GÜNEŞ

AĞUSTOS 2020

İZMİR KATİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN KÖPÜK / SiO₂ KATKILI ŞOK EMİCİ
NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

ÇAĞLAR ERDEM
(Y190231006)

ORCID NO: 0000-0002-8755-3809

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fethullah GÜNEŞ

AĞUSTOS 2020

İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsünün Y190231006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Çağlar ERDEM**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Kayma Gerilimi Altında Sertleşen Jel İçeren Grafen Köpük ile Şok Emici Nano-Kompozit Malzeme Üretimi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :

Doç. Dr. Fethullah GÜNEŞ

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

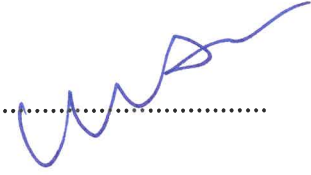
Jüri Üyeleri :

Dr. Öğr Üyesi Ahmet AYKAÇ

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa EROL

Dokuz Eylül Üniversitesi



Savunma Tarihi: 28/08/2020

GRAFEN KÖPÜK / SiO₂ KATKILI ŞOK EMİCİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Tez projesi kapsamında üretilen köpük grafen, kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. GK'nin yapısı, düzlemsel grafene göre daha fazla yüzey alana sahip ve gözenekli olması sebebiyle darbe soğurma etkisinin daha yüksek olması hedeflenmiştir. Köpük yapının doğası gereği bulunan boşluklar ve gözenekler ise kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan (KKA) ile doldurulmuştur. KKA malzemesi mekanik karıştırma yöntemi ile sentezlenerek, GK yapısına katılanmıştır. Böylece mevcut yapının darbe soğurma özelliği daha da artırılmıştır. Son olarak bu kompozit yapı, alttan ve üstten poli-dimetilsiloksan(PDMS) ile lamine edilerek tek parça ve bütün bir laminar kompozit yapı elde edilmiştir. Gerekli olduğu takdirde bu laminar tabakaların sayısı artırılarak istenilen şok emici değerlere sahip çok katmanlı bir malzeme elde edilmesi öngörülmüştür. Bu sayede oluşturulan yapının hafif, esnek ve ince olmasının yanı sıra muharebelerde bıçak gibi keskin ve sivri uçlu silahlara karşı da yüksek seviyede şok emici özellik göstermesi hedeflenmiştir. Üretilen GK yapısının karakterizasyonu, Raman spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) ile tespit edilmiştir. Ayrıca sentezlenen KKA malzemesinin performans değerlendirmeleri ve yapı özellikleri reoloji testleri ile değerlendirilmiştir. Uygun reolojideki akışkan ile GK yapıya emdirilerek PDMS ile lamine edilmiş ve elde edilen bu hiyerarşik kompozit yapıya bıçak batırma testi uygulanarak nihai ürünün optimum parametrelerde üretilmesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Köpük Grafen, Kayma Gerilimi Altında Kalınlaşan Akışkan, Poli-dimetilsiloksan (PDMS), Nano kompozit, Şok emici Malzeme

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE FOAM / SiO₂ BASED SHOCK ABSORBING NANOCOMPOSITE

ABSTRACT

Foam graphene produced as part of the thesis project was synthesized by using the chemical vapor deposition method. Because of the structure of GF has more surface area and being porous compared to planar graphene, it is aimed to have higher impact absorption effect. The existing cavities and pores due to the nature of the foam structure was filled with shear thickening fluid (STF). STF material was synthesized by mechanical mixing method and doped to GF structure. In this way, the impact absorption feature of the present structure is further increased. Eventually, this composite structure was laminated with poly-dimethylsiloxane (PDMS) from the bottom and top and to obtain a one-piece and a complete laminar composite structure. If necessary, it is foreseen to obtain a multilayer material with desired shock absorbing values by increasing the number of these laminar layers. In this way, the structure created is intended to be light, flexible and thin, as well as to show a high level of shock absorption against sharp and pointed weapons such as knives in combat. Characterization of the produced GF structure is determined by Raman Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD). Besides, performance evaluations and structure features of the synthesized STF material were evaluated by rheology tests. GF was absorbed into the structure with the appropriate rheology fluid and laminated with PDMS and by applying knife immersion test to this obtained hierarchical composite structure, it is provided to produce the final product in optimum parameters.

Keywords: Graphene Foam, Shear Thickening Fluid, Nano-Composite Material, Shock Absorbing Material

ÖNSÖZ

Tez araştırmamdaki engin bilgi birikimleri ve sağladığı bilimsel desteğin yanı sıra yapıcı fikirleri, yardımları, sürekli destekleri, rehberliği ve katkıları için danışmanım Doç. Dr. Fethullah GÜNEŞ'e derin Őukran duygumu belirtmek isterim. Tez çalışmalarımın geliştirilmesi için sağladığı bilimsel destek ve yardımları nedeniyle Doç. Dr. Mustafa EROL'a, araştırma süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Dr. Öğr Üyesi Ahmet AYKAÇ'a, çalışmalarımdaki yardımlarından dolayı Araç. Gör. Metehan ATAGÜR'e, deneysel karakterizasyon çalışmalarımın yürütülmesine olanak sağladığı için İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarının saygıdeğer çalışanlarından Uzman Nusret KAYA ve Uzman Evren ÇULCULAR'a ayrıca çalışmalarım boyunca laboratuvar da desteklerini eksik etmeyen İzel OK, Gülperi Feyza YAVUZ ve diğer grup arkadaşlarıma teŐekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam sürecinde “2210-C Öncelikli alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı” ve “TÜBİTAK-3501 Kariyer Geliştirme Programı” kapsamında sağladığı öğrenci burs desteği için TÜBİTAK-BİDEB ve ARDEB'e, “2018-TYL-FEBE-0069” proje nolu tez çalışmama sağladığı finansal destek için İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğüne teŐekkür ediyorum.

Her zaman desteğini yanımda hissettiğim Yağmur ALKIR'a, beni bugünlere getiren annem Semra ERDEM ile babam Oktay ERDEM'e ve tüm aileme,
SONSUZ TEŐEKKÜRLERİMİ SUNARIM

AĞUSTOS 2020
ÇAĞLAR ERDEM

İÇİNDEKİLER

ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xvii
1.GİRİŞ	1
1.1 Karbon Nano Yapılar ve Grafen.....	5
1.1.1 Grafenin özellikleri.....	11
1.1.1.1 Grafenin mekanik özellikleri	11
1.1.1.2 Grafenin elektriksel özellikleri	14
1.1.1.3 Grafenin termal özellikleri.....	15
1.1.1.4 Grafenin optik özellikleri	15
1.1.2 Grafenin üretim teknikleri.....	15
1.1.2.1 Mekanik yapraklanma yöntemi	16
1.1.2.2 Epitaksiyel büyütme yöntemi	16
1.1.2.3 Kimyasal yapraklanma yöntemi	17
1.1.2.4 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (KBB).....	17
1.2 Reoloji.....	19
1.2.1 Newtonsal olmayan akışkanlar	21
1.2.1.1 Visko elastik davranış	23
1.2.1.2 Zamana bağlı davranış.....	24
1.2.1.3 Zamandan bağımsız davranış	26
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
2.1 Malzemeler ve Method	42
2.1.1 Füme silika nanopartiküller	43
2.1.2 Poli-etilen glikol (PEG)	44
2.2 Malzeme Üretimi	44
2.2.1 Grafen köpük sentezi.....	44

2.2.2 Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın üretim yöntemi	46
2.2.3 Polidimetilsiloksan sentezi.....	48
2.3 Karakterizasyon Yöntemleri.....	49
2.3.1 Raman spektroskopisi.....	50
2.3.2 X-Işını difraktometresi.....	50
2.3.3 Taramalı elektron mikroskobu	51
2.3.4 Parça boyut analizi	52
2.3.5 Reolojik testler	53
2.3.5.1 Statik test	54
2.3.5.2 Dinamik testler.....	54
2.3.6 Yarı-statik yük testi	54
3. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	56
3.1 Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi.....	56
3.2 Kristal Yapının Belirlenmesi	58
3.3 Morfolojik Yapının Belirlenmesi	59
3.4 Parçacık Boyut Analizi	60
3.5 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi	61
3.5.1 Statik test.....	61
3.5.2 Dinamik test	64
3.6 Çekme Testi.....	66
3.7 Bıçak Batırma Testi	67
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
5. KAYNAKLAR	70
8. ÖZGEÇMİŞ	85

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan üretiminde kullanılan katkı malzemeleri.....	39
Tablo 2.1. Silika nanopartikülün karakteristik özellikleri [134].	42
Tablo 2.2. Poly-Etil Glikolün Karakteristik Özellikleri (Sigma Aldrich)	43
Tablo 2.3. Üretilen kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın silika nanopartikül ve PEG oranları.	48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan ve bununla üretilmiş fiberli zırh malzemesi.	3
Şekil 1.2. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın uygulama alanları ((a) Louis Garneau kask ve (b) BulletSafe yelek).	4
Şekil 1.3. Kompozit yapının görünümü.	5
Şekil 1.4. Karbon atomunun elektronik konfigürasyonu ve hibrit çeşitleri [16].	5
Şekil 1.5. Karbon atomunun allotrop yapıları [18].	7
Şekil 1.6. (a) En az iki grafit katman içeren iç içe geçmiş çok duvarlı karbon nanotüpler. (b) tek duvarlı karbon nanotüpleri [26-27].	8
Şekil 1.7. Grafit madeni.	9
Şekil 1.9. Grafenin bağ yapısı ve uzunluğu [33].	11
Şekil 1.7. Bilinen yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerde ki bant yapısı...14	
Şekil 1.8. (a) Grafenin karbon atomlarından oluşan kafes yapısı. (b) En yakın karbon atomlarının birbiri ile yaptığı sıkı π -bağının yapısı. (c) Grafenin K noktasında yaptığı elektronik band yapısı [50].	15
Şekil 1.10. Akışkanlara uygulanan farklı kayma gerilimleri [74]. İzotropik stres (a), anizotropik stres (b).	20
Şekil 1.11. Newtonsal olmayan akışkanların kayma gerilimi altındaki davranışları [80].	23
Şekil 1.12. Kayma gerilimi altında zamana bağlı olarak reolojik davranış gösteren akışkanlar [80].	24
Şekil 1.13. Tikotropi davranışına örnek bir grafik [80].	25
Şekil 1.15. Kayma incelmesi gösteren polimerlerin grafiği [80].	28

Şekil 1.16. Karbopol çözeltilisinin kayma gerilimi altındaki reolojik davranışı [91].	29
Şekil 1.17. Kayma gerilimi mekanizması [96].	30
Şekil 1.18. Kayma sertleşmesinin eklenen polimetilmetakrilat oranına göre değişimi [109].	34
Şekil 1.19. Küresel silikanın değişen katkı oranının artması ile vizkozitede meydana gelen değişim [110].	35
Şekil 1.20. Tane boyutunun kayma hızına etkisi [100].	36
Şekil 1.21. Tanecik şeklinin kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan üzerine etkisi [100].	37
Şekil 2.3. İki boyutlu grafen köpüğün transfer işlemi.	46
Şekil 2.4. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın üretim aşamaları.	47
Şekil 2.6. Kompozit yapı için oluşturulan kalıp.	49
Şekil 2.7. Raman spektrometre cihazı.	50
Şekil 2.8. Taramalı elektron mikroskobu.	52
Şekil 2.9. Tanecik boyutu analizi cihazı.	52
Şekil 2.10. Reometre cihazı.	53
Şekil 2.11. Yarı-statik test düzeneği.	55
Şekil 3.1. Grafen köpük üzerinde farklı noktalardan alınan Raman spektrumu.	56
Şekil 3.2. Raman spektrumunun 2D bandının detaylı gösterimi.	57
Şekil 3.3. Grafen kaplı nikel köpük (a) ve grafen köpük (b) XRD grafiği.	58
Şekil 3.4. Grafen kaplı nikel köpük yapısının SEM görüntüleri.	59
Şekil 3.6. Grafen köpük yapısının EDS analizi.	60
Şekil 3.7. Ticari olarak temin edilen silikanın tane boyut analizi.	61
Şekil 3.8. Silika partikül oranı ile artan viskozite ve stres grafiği.	62

Şekil 3.10. Farklı oranlarda sentezlenen kayma gerilimi altında sertleşen akışkanların stres sonuçları.....	63
Şekil 3.11. KKA-60 isimli numunenin stabilizasyon test sonuçları.	64
Şekil 3.12. KKA-60 isimli numunenin genlik testi.....	64
Şekil 3.13. KKA-60 isimli numunenin frekans testi.....	66
Şekil 3.15. PDMS ile lamine edilen KKA-60 ve GK/KKA-60 numunelerinin yarıstatik bıçak batırma testi.	67

KISALTMALAR

GK: Grafen Köpük

Ni/GK: Grafen Kaplı Nikel Köpük

KKA: Kayma Gerilimi Altında Kalınlaşan Akışkan

PDMS: Polidimetilsiloksan

PMMA: Polimetilmetakrilat

0D: Sıfır boyutlu

1D: Bir Boyutlu

2D: İki Boyutlu

3D: Üç Boyutlu

GO: Grafen Oksit

PVA: Polivinil Alkol

KNT: Karbon Nanotüp

KBB: Kimyasal Buhar Biriktirme

PEG: Polietil Glikol

SALS: Küçük Açılı Işık Saçılması

SANS: Küçük Açılı Nötron Saçılımı

HRTEM: Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

XRD: X-ışını difraktometrisi

SWCNT: Tek duvarlı karbon nanotüp

MWCNT: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

NP: Nano partikül

1. GİRİŞ

Kompozit yapılar, fiziksel ve kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla malzemenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesi ile yeni özelliklere sahip olan malzemelerdir. Bir araya getirilen malzemelerin en iyi özellikleri yeni oluşturulan kompozit malzemenin özelliklerini belirlemektedir. Bu durum, oluşan kompozit malzemenin, yapısında bulunan bileşen malzemelerden çok daha etkili karakteristik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [1]. Nanokompozit malzemesi, bileşenlerinden birinin en az nanometrik boyuta (10^{-9} m) sahip olmasıyla meydana gelen kompozit bir yapıdır. “Nanokompozit” terimi ilk defa 1986 yılında kullanılmıştır ve Google Scholar verilerine göre bu terimin kullanımı o zamandan beri hızlı bir artış göstermiştir. 1986 yılında nanokompozit malzemeler hakkında yazılan makale sayısı iki iken, 2020 yılında yüzlerce makale literatüre kazandırılmıştır [2]. Nanokompozit malzemeler; metal, plastik, seramik, biyomalzeme, elektronik malzemeler gibi pek çok mühendislik alanında kullanılabilirdiği için bu malzemelere olan ilgi ve yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Ticari olarak da hali hazırda kullanılan pek çok nanokompozit malzemeler bulunmaktadır. Bunlar, spor araçlar için otomotiv panelleri, mobilya, ev aletleri ve polipropilen nanokompozitlerdir. Ayrıca ileri teknolojik yöntemler ile kemik çimentosu, filtre membranları, aerogeller ve güneş pilleri de nanokompozit malzemeler ile üretilebilmektedir [2]. Malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için de nanokompozit yapılar kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda ilk zamanlar, nanoboyuttaki takviyelerin hacim oranını iyileştirmeye veya takviyeler arasındaki etkileşimi geliştirmeye yönelik çalışmalara odaklanılmıştır. Geleneksel kompozitler ağırlıkça %40'ın üzerinde takviyeler ile üretilirken, nanokompozitlerin içerisinde kullanılan %5'in altındaki takviyeler dahi iyileşme gösterebilmektedir. Geleneksel yöntemlerde az malzeme miktarı değiştirildiğinde özelliklerde anlamlı bir değişiklik görülmez iken, nanokompozitlerde %1-2 gibi küçük miktarlardaki takviye farklılıkları malzemenin özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu takviyeler ile

nanokompozitlerin; kırılma tokluğu, azami darbe enerjisi, darbe tokluğu, darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Bu mekanik özelliklerin geliştirilmesi malzemenin yüksek enerji emme kapasitesini arttırmaktadır. Bu mekanik özellikler ve hafif yapıları sayesinde nanokompozitler; enerji sönümleme, yapısal çarpışma, otomotiv ve havacılık gibi uygulamaların yanı sıra zırh malzemelerinde de özellikle tercih edilmektedir [3].

Zırh malzemelerine olan ihtiyaç, insanlık tarihi boyunca en önemli sorunlardan biri olan insan vücudunun olası tehlikelerden ve yaralanmalardan korunma ihtiyacına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Tarihin en eski ve içgüdüsel ihtiyaçlarından olan korunma ihtiyacı, yıllar içerisinde pek çok araştırmaya konu olmuş ihtiyaca çözüm olarak da farklı tür ve kullanım amaçlarıyla vücudu koruyan giysiler icat edilmiştir. Korunma ihtiyacına çözüm çalışmaları, süreç boyunca gelişen teknoloji ile birlikte bugün zırh olarak adlandırılan koruyucu giysilerin evrimine yol açmıştır. Vücut zırhları, vücudu fiziksel saldırılardan korumak için giyilen herhangi bir savunma kaplaması olarak tanımlanmaktadır. Tarih boyunca zırh olarak hayvan derileri, saz, pamuk ve ipekten yapılan doğal lifler, demir, bakır veya çelik gibi metal kalkanlar kullanılmıştır. Günümüzde, doğal elyaflar, 20. yüzyıl üretim teknolojisi ve malzeme bilimindeki yeniliklerle birlikte yerlerini sentetik elyaflara bırakmıştır [4–6].

Zaman içerisinde farklı şok emici yapılar zırh malzemelerinde kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan malzemelerin başında metaller, seramikler, lamine kompozitler ve örülmüş kumaşlar gelmektedir. Malzeme biliminin gelişmesi ile beraber zırh malzemelerinde de büyük değişiklikler görülmüştür. İlk zamanlarda çeşitli metaller kullanılarak zırhlar tasarlanmış ve bu zırhlarda istenilen özellik olan kurşun geçirmezlik sağlanmış olsa da yapıda kullanılan metallerden dolayı zırhların ağır olması, kullanan kişilerin çabuk yorulmasına, hareket kabiliyetlerinde kısıtlamaya ve bunlara bağlı olarak performanslarında oluşan düşüş gibi birçok dezavantaja sebep olmuştur. Gelişen teknoloji ile birlikte metalik alaşımların kullanımı artmış, daha hafif zırhlar üretilmeye başlanmış olsa da bu alaşımların da seri üretimi oldukça maliyetli olmuştur [7]. Metal yapıdaki zırhlara alternatif olarak üretilen seramik zırh malzemeleri ise hafif ve yüksek güçteki darbelere karşı iyi sonuçlar verebiliyor olmasına rağmen üretim

maliyetlerinin metallerden daha yüksek olması, yapılarının çabuk bozulmasından dolayı yenilenme gereksinimlerinin maliyetleri arttırmasından dolayı araçlarda ve kıyafetlerde kullanımları yaygınlaşmamıştır. Metal ve seramik yapıli zırhların ortak dezavantajı ise esnek yapıya sahip olmamalarıdır. Bu nedenle metal ve seramik malzemelerin koruyucu kıyafetlerde kullanımı son yıllarda azalmış olup, yerlerine daha esnek malzemeler olan ve örölerek oluşturulan fiberler veya lamine kompozit yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Fiberler diğler malzemelere göre çok daha esnek ve yoğunlukları daha düşük ($1000-1500 \text{ kg/m}^3$) olmasından dolayı sıklıkla tercih edilmektedirler [7]. Bu amaçla kullanılan fiber yapıların önemli bir dezavantajı ise bıçak, ok gibi keskin ve lifli yapıların arasından geçebilecek silahlara karşı dayanım gösterememeleridir. Üretilen fiberli yapıya ‘kayma ile kalınlaşan akışkanlar’ (KKA) emdirilerek bu fiberli yapıların sivri silahlar ile yapılan saldırılara karşı dayanımları, darbe altında bu akışkanların viskozitesinin ani şekilde yükselmesi ile akışkan maddenin sıvı halden katı hale dönüşmesi sayesinde, oldukça arttırılmıştır [8–10].



Şekil 1.1. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan ve bununla üretilmiş fiberli zırh malzemesi.

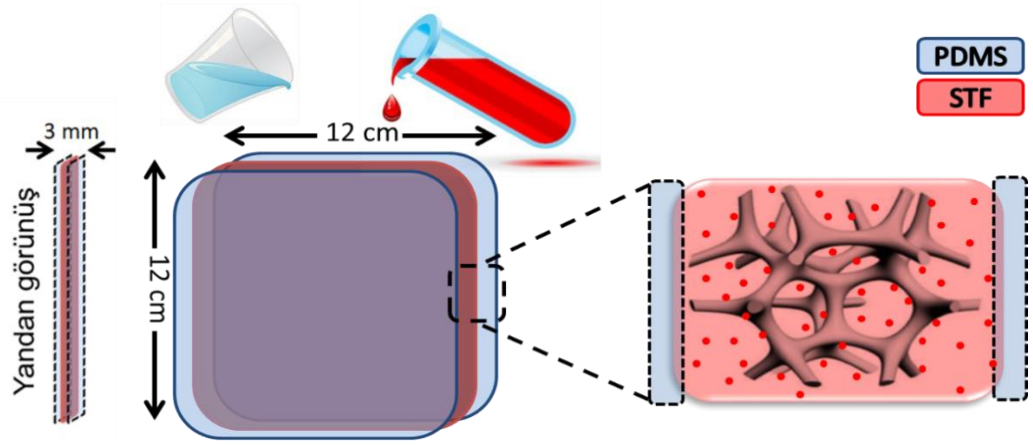
Kayma ile kalınlaşan akışkanlar (KKA); Newtonsal olmayan akışkan davranışı gösteren akışkanların bir alt grubunu oluşturmaktadır. KKA'larda görülen fenomen, artan stres ile viskozitenin artmasıdır [11]. Artan viskozite, KKA'ların bir çok endüstriyel uygulamaları için dezavantaj oluştursa da, bu özellik onları şok emici ve sönümlenme uygulamaları için ideal kılmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı KKA'lar, başta spor malzemeleri olmak üzere koruyucu kıyafetler ekipmanlar, zırh amaçlı kaplamalar, trafikte hız kesici tümsek uygulamaları gibi

birçok endüstriyel alanda şok emici malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu kullanım alanlarından, hafif, ince ve esnek özelliklerinden dolayı, özellikle zırh malzemelerinin üretim, araştırma ve geliştirmelerinde de sıklıkla tercih edilmektedirler.



Şekil 1.2. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın uygulama alanları ((a) Louis Garneau kask ve (b) BulletSafe yelek).

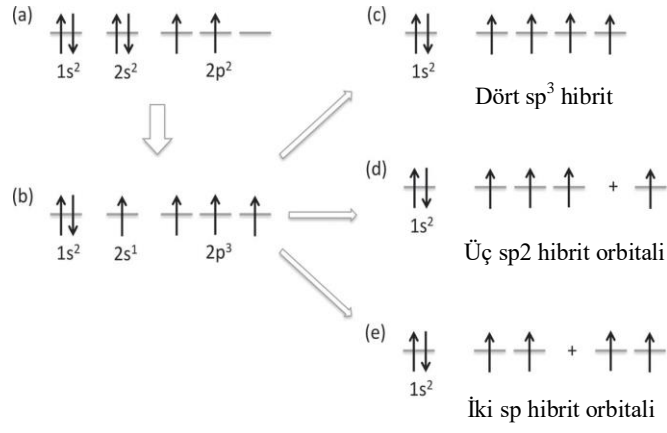
Günümüzde zırh malzemelerinde aranan başlıca özellikler ince, hafif ve esnek yapıda olmasıdır. Bu özellikleri sağlamak için yoğun olarak aramid, kevlar gibi sentetik elyaflar kullanılmaktadır. Kullanılan sentetik elyaflar, KKA ile güçlendirilerek ince zırh malzemeleri üretilmeye çalışılmaktadır. Bu tez çalışmasında sentetik elyaflara göre çok daha esnek bir yapıya, daha düşük yoğunluğa ve yüksek dayanıma sahip olan grafen köpük (GK) zırh malzemesi olarak tercih edilmiştir [12–14]. GK, nikel metali üzerinde kimyasal buhar biriktirme (KBB) yöntemi ile üretilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda sentetik fiberlerin arasına emdirilerek zırh malzemelerinin dayanımını arttıran KKA'lar, bu çalışmada GK yapısına entegre edilerek mevcut boşluklar ve gözenekler doldurulmuştur. Bu sayede fiberli yapılara göre daha hafif, ince, esnek ve geniş yüzey alanı olan bir nanokompozit üretilerek, yüzeyde meydana gelebilecek darbelerin etkisinin daha etkili bir şekilde absorbe edilebilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu kompozit yapının bütünleşik bir malzeme haline getirilerek giysilere, araçlara ve binalara entegre edilebilir olması için poli-dimetilsiloksan (PDMS) ile alttan ve üstten lamine edilmiştir. PDMS, silikon bazlı organik bir polimer olması, düşük maliyeti, kolay üretimi ve esnek yapısı gibi özelliklere sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir ve KKA/GK yapısını bir arada tutacak olan en dış katmandır [15]. Üretilmesi planlanan nanokompozit yapının görünümü şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Kompozit yapının görünümü.

1.1 Karbon Nano Yapılar ve Grafen

Karbon, periyodik tabloda bir kaç farklı bileşik oluşturabilen nadir elementlerden biridir. Bağ yapısından dolayı farklı atomlar ile kolayca bileşik oluşturabilir. Karbonun temel durum elektronik konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ olup, değerlik elektron konfigürasyonu hibridizasyon yapılarak yeniden düzenlenebilir. Yeniden düzenleme işlemine sadece 2s ve 2p elektronlarını etkiler ve bu sayede dört farklı elektron konfigürasyonu oluşturmaktadır [16].



Şekil 1.4. Karbon atomunun elektronik konfigürasyonu ve hibrit çeşitleri [16].

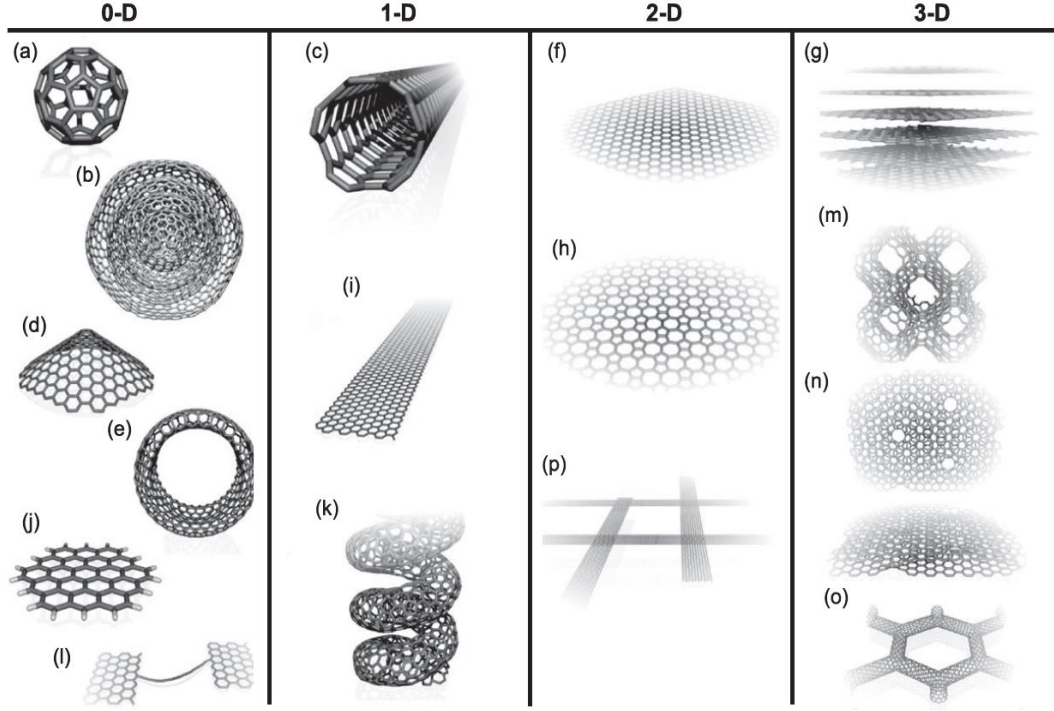
Hibritleşmelerden biri olan sp^3 hibritleşmesi, dört orbitalin de sadece bir elektronla doldurulmuş oluşumuna yol açan atomların bir araya gelmesinden oluşur (Şekil 1.4. (c)). İtmeyi en aza indirmek için, bu dört hibrit orbital birbirine 109.5° açıyla dört karbon atomunun komşularıyla oluşturulduğu dört yüzlü bir

geometriye yol açmaktadır. Elmas, atomların elmas kafesi adı verilen yüzey merkezli kübik kristal yapının bir varyasyonunda olan karbonun üç boyutlu allotropik şeklidir. Elmasta, tüm karbon atomları sp^3 hibridizasyonundadır ve σ bağlarıyla birbirine bağlanmıştır. Bağ uzunluğu ise 1.56 Å'dur (Şekil 1.4 (a)).

Bir başka olası hibritleşme şeması ise her biri sadece bir elektronla doldurulmuş üç sp^2 hibrit orbitalin oluşumuna yol açmaktadır (Şekil 1.4 (d)). Bu sp^2 hibrit orbitalleri, kendilerini birbirlerinden olabildiğince uzak olacak şekilde düzenlemektedirler ve her yörünge arasındaki açının 120° olduğu üçgen düzlemsel bir geometriye yol açmaktadırlar. Kalan p-tipi orbitali bu düzleme dik olacak şekilde konumlanmaktadır. Böyle bir konfigürasyonda, üç sp^2 hibrit orbitali, en yakın üç komşu ile σ bağlarını oluşturmaktadır. Ayrıca karışmamış saf p orbitallerinin yan yana çakışması, karbon atomları arasında karbon karbon çift bağını oluşturmaktadır.

Mümkün olan son hibritleşme şekli, iki sp hibrit orbitalidir. İki p orbitali birer elektron ile doldurarak karbon atomunun elektronik konfigürasyonunu oluşturmaktadır (Şekil 1.4. (e)). Ortaya çıkan geometri, sp orbitalleri arasında 180° 'lik bir açı ile doğrusaldır. 'P' orbitalleri birbirine diktir. Böyle bir konfigürasyonda, iki sp hibrit orbitalleri, en yakın iki komşu atomu ile σ bağları ve iki p orbitalinin üst üste binmesi ile atomlar arasında π bağlarını oluşturur [16-17].

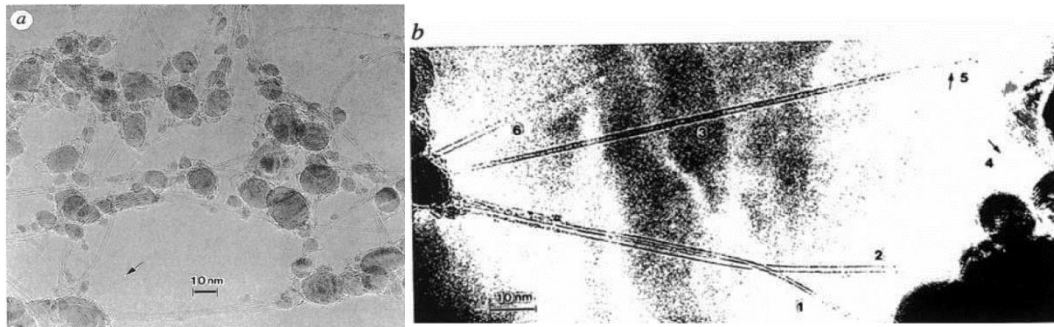
Karbon nanomalzemelerinin tüm boyutsallığını gösteren çeşitli allotropları zengin bir polimorfizmini ortaya çıkarmaktadır. Bu polimorfizme örnek olarak fulleren molekülü (0 boyutlu), nanotüpler (1 boyutlu), grafit katmanları ve grafenler (2 boyutlu) ve nano-elmaslar (3 boyutlu) verilebilmektedir [18], [19]. Farklı fiziksel ve kimyasal özellikler sergileyen nanomalzemelerin sahip oldukları bu olağanüstü çok yönlü özellikleri sayesinde karbon nano yapılar nanobilim ve nanoteknolojide önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 1.5. Karbon atomunun allotrop yapıları [18].

Grafit ve elmas, karbonun en yaygın allotroplarındandır. Diğer bir karbon atomu allotropu, 1985 yılında Kroto ve arkadaşları Smalley ile Curl tarafından C_{60} olarak keşfedilmiş olup daha sonra Buckminsterfulleren veya sadece fulleren olarak adlandırılmıştır (Şekil 1.5. (a)) [20-21]. Çalışmalar sırasında, Kroto ve arkadaşları laboratuvarındaki koşulları uygun hale getirerek grafitin lazerle buharlaştırılması deneyini gerçekleştirmiş ve C_{60} moleküllerinin, yapısında grafitte benzeyen beşgen ve altıgen halkalardan oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda sıfır (0) boyutlu fulleren yapısının bir gaz ortamı içerisinde karbon ve grafitin buharlaştırılmasıyla oluşturulabileceğini belirtmişlerdir [19, 22-23]. Fullerenler, içi boş bir küre, elipsoid ve diğer çeşitli yapılarda tamamen karbondan oluşan moleküller şeklinde tanımlanabilir. Küresel fullerenler, futbol topuna benzeyen şekillerinden dolayı yaygın olarak ‘Buckyballs’ olarak isimlendirilir. Kroto ve arkadaşları, C_{60} 'ın kütle spektrumunda ilk olarak C_{60} ve C_{70} kümelerinin varlığını deneysel olarak kanıtlamışlardır. Çalışmalar sırasında, grafitin kütle spektrumu alındığında ilginç bir şekilde her deneme de 720 g/mol’de pik görülmüştür. 720 g/mol’deki pik görülme durumu, karbon atomunun atomik kütlesinin 12 g/mol olduğu göz önüne alındığında, 60 adet karbon atomu, yani C_{60} molekülü ile ilişkilendirilmiştir [24].

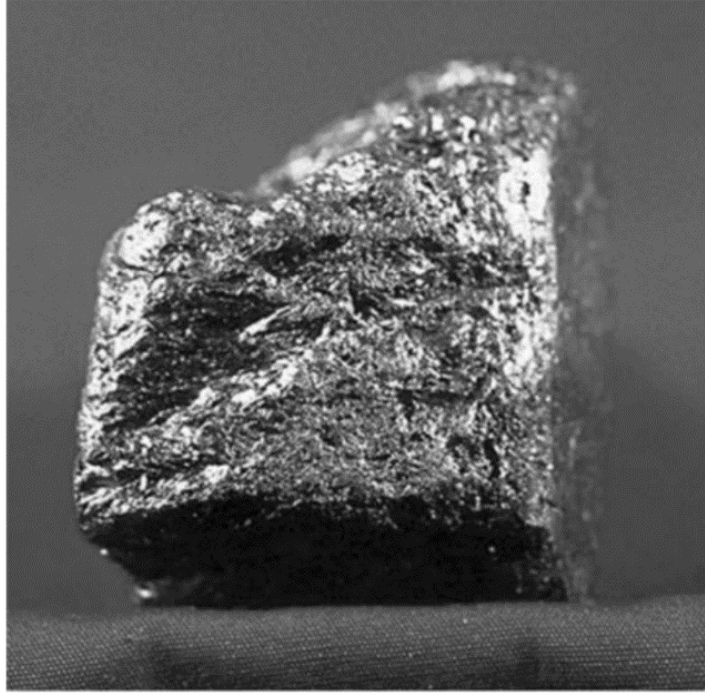
Fulleren yapısının yanı sıra, bir boyutlu (1D) olan karbon nanotüpler, son 15 yıldır yoğun olarak bilimsel çalışmalara konu olmaktadır. Karbon nanotüp ilk olarak 1991 yılında Iijima tarafından fullerenlerin sentez çalışmaları sırasında elektrik ark tekniği kullanılarak keşfedilmiştir [25]. Bu yapı yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM) ile gözlemlenmiştir. Iijima tarafından gözlemlenen karbon nanotüplerin, Şekil 1.6.a'da gösterildiği gibi, en az iki grafit katman içeren ve yaklaşık 4 nm'lik iç çaplara sahip olan iç içe geçmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNT'ler) şeklinde olduğu belirtilmiştir. İki yıl sonra NEC'den Iijima-Ichihashi ikilisi ve Kaliforniya'da bulunan Almaden Araştırma Merkezi'nden Bethune ve arkadaşları, Şekil 1.6.b'de gösterildiği gibi tek duvarlı karbon nanotüpleri (SWNT'ler) sentezlemişlerdir [26-27]. Yapılan çalışmalarda SWNT'lerin sentezinde kullanılan üretim tekniği ile MWNT sentezindeki üretim tekniği aynı olmasına karşılık, farklı olarak karbon elektrotlara bazı metal partiküller ilave edilmiştir bu nedenle SWNT'nin görünümü MWNT'den oldukça farklıdır. SWNT'ler çok küçük çaplara (~1nm) ve ipliksi bir yapıya sahiptir. 1990'ların başında, iki araştırma grubu bireysel SWNT'lerin elektronik özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır [25, 28]. Yapılan çalışmaların sonucunda, SWNT'lerin boylarına ve çaplarına bağlı olarak metal veya yarı iletken özelliği gösterebileceğini öngörmüşlerdir. Uzun süren çalışmalar sonucunda bu öngörü deneyler ile doğrulanmıştır [29-30]. Karbon nanotüpler, sahip oldukları ilgi çekici özelliklerinden dolayı; sentezi, karakterizasyonu, uygulamaları ve temel mekanik ve elektronik özellikleri ile ilgili kapsamlı birçok makale literatüre sunulmuştur.



Şekil 1.6. (a) En az iki grafit katman içeren iç içe geçmiş çok duvarlı karbon nanotüpler. (b) tek duvarlı karbon nanotüpleri [26-27].

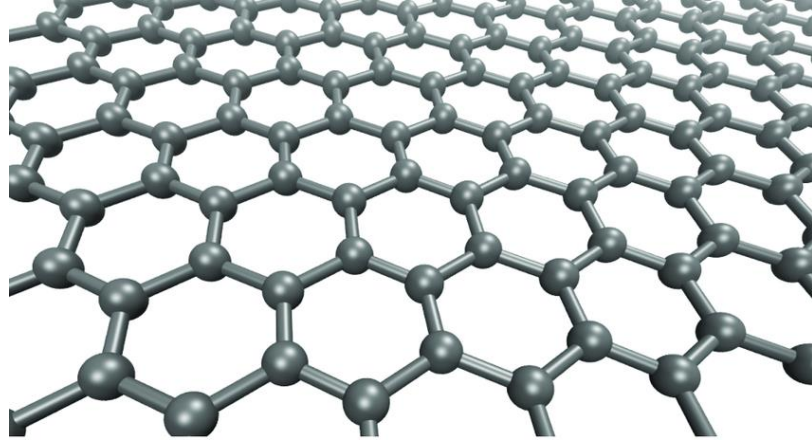
Tüm bu karbon nanoyapılardaki temel yapı taşı, grafen adı verilen iki boyutlu kristalin karbon allotropunun teorik konseptine dayanmaktadır (Şekil 1.5. (f)).

Grafen, iki boyutlu, tek atom kalınlığında olan bir malzemedir. Birçok grafen katmanının üst üste gelmesi ile birlikte ise grafit adı verilen üç boyutlu bir yapı oluşmaktadır. Avrupa'da grafit kullanımının kanıtları yaklaşık 6000 yıl önce grafitle süslenmiş çanak çömleklerde kaydedilmiştir. Grafit hakkındaki mevcut bulgular yaklaşık 500 yaşında olup şekil 1.7 de gösterilen grafit cevheri ise on altıncı yüzyılda İngiltere'de bulunmuş ve çıkarılmıştır. Eski dönemlerde insanların koyunlarını işaretlemek için grafit kullanmalarından dolayı bir Alman bilim adamı olan Verner (1789) bu malzemeye Yunanca “yazma” anlamına gelen ‘grafit’ adını vermiştir [31].



Şekil 1.7. Grafit madeni.

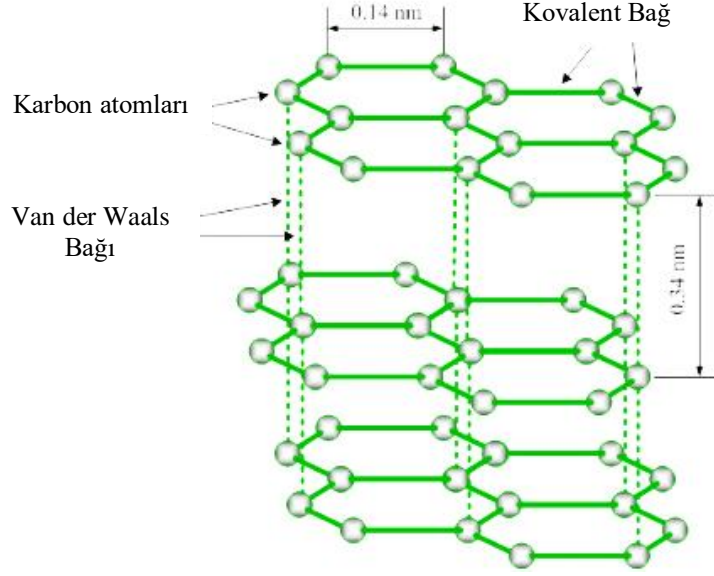
"Grafen" terimi ilk olarak tekli grafit tabakalarını tanımlamak amacıyla 1987'de ortaya çıkmıştır [32]. “Grafit tabakaları” terimi ise, IUPAC komisyonu tarafından “grafen” ile değiştirilmiştir. Son tanıma göre, “grafen, grafitik malzemelerin (fulleren, karbon nano tüpler, grafit) temel yapı taşı olan iki boyutlu ve tek bir karbon atomu tabakasıdır”. İki boyutlu bir malzeme olan grafen, petek benzeri bir yapıda düzenlenmiş tek bir karbon atomu katmanından oluşur (Şekil 1.8.).



Şekil 1.8. Grafenin atomik yapısı

Grafen, dünyanın en ince malzemesi olarak kabul edilen önemli bir malzeme olup günümüzde, grafen ve türevleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar kayda değer bir öneme sahip olmaktadır. Grafen ve grafitin fiziksel olarak anlaşılmasına yönelik temel atılımlar 1940 ve 1950'lerde tartışılmıştır [23-24]. Karbonun farklı allotroplarının sentezi başarılı bir şekilde yapılmış olsa dahi termodinamik açıdan iki boyutlu bir malzeme sentezinin mümkün olamayacağı bilim insanları tarafından düşünülmüştür. 2004 yılına kadar yapılan grafen çalışmaları da 50-100 katman arasında sentezlenerek literatüre sunulmaktayken, 2004 yılında, Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Kostya Novoselov, 'Scotch Tape' (mekanik yapraklanma) tekniği ile grafitten tek atom kalınlığında grafen sentezlemeyi başarmışlardır. Sentezlenen bu grafeni bir silikon alttaş üzerine aktararak farklı karakterizasyon işlemleri uygulamışlardır [13]. Bu çalışma, Andre Geim ve Kostya Novoselov'a 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırmıştır. Tek atom kalınlığındaki grafen, karbon-karbon bağından oluşur ve bağ uzunluğu yaklaşık 0.14 nanometredir. Tabaka yüksekliği sadece 0.34 nm olarak ölçülmüştür (Şekil 1.9). Ayrıca grafenin yapısında bulunan karbon atomları sp^2 hibritleşmesi yapan kovalent bağ ile birbirine sıkı bir şekilde bağlanmış altıgen bir yapıdadır. Grafen bu yapısından dolayı oda sıcaklığında $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ elektron hareketliliği, 1 TPa Young modülü ve 130 GPa doğal dayanımı gibi mükemmel teorik sınırlara sahip olmanın yanı sıra, 3000 W'ın üzerinde termal iletkenliğe, $\pi\alpha \approx 2.3\%$ optik emilimine, herhangi bir gazı sızdırmazlığa ve elektrik akımının yüksek hızda iletme yeteneği gibi bazı üstün özelliklere de sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde keşfedildiği günden bugüne bilim insanlarının ve

mühendislerin tüm dikkatini üzerine çeken grafen, birçok farklı çalışmanın ana konusu olmuştur ve olmaya da devam etmektedir [12].



Şekil 1.9. Grafenin bağ yapısı ve uzunluğu [33].

1.1.1 Grafenin özellikleri

Grafen, geniş yüzey alanı, en/boy oranı, elektrik iletkenliği, termal iletkenlik, düşük termal genleşme katsayısı, gerilme mukavemeti, esneklik ve şeffaflık gibi dikkate değer ve mükemmel karakteristik özellikleri ile bilinen iki boyutlu ve petek şeklinde olan, tek karbon atom kalınlığındaki bir malzemedir. Bu doğal özellikleri, termal ve elektriksel iletkenliği yüksek olan nano kompozit malzemeler, elektronik devreler, ultra ince karbon filmler, sensörler, ekranlar ve güneş pilleri için şeffaf ve esnek elektrotlar içeren cihazların geliştirilmesi ve üretilmesinde oldukça dikkat çeken faktörlerdir. Grafen tabakaları sentez yöntemlerine, yüzey modifikasyonuna ve işlevselleşmesine bağlı olarak farklı karakteristik özellikler sergiler.

1.1.1.1 Grafenin mekanik özellikleri

Tek katmanlı grafen tabakasının mekanik özellikleri, atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak nano indentasyon veya nano çizme yöntemleri ile ölçülebilmektedir. Kusursuz grafenin, kopma mukavemeti 42 Nm^{-1} ve Young modülü 1 TPa 'dır, bu değer şimdiye kadar ölçülen en yüksek değerler arasındadır. Harici mekanik

yükler, grafenin elektronik özelliklerinden olan elektron emisyon performansını değiştirebilir. Mekanik etkinin, grafenin G veya 2D bantlarında kayma etkisi yarattığı bulunmuştur [31-32, 34-35]. Cihazların zorlanması, çalışma performanslarını ve ömürlerini etkileyebilir. Genel olarak, kristalin malzemeler üzerine stres uygulanması atomlar arası mesafeleri değiştirebilir, bu durum elektriksel iletkenlik özelliğinin değişmesine neden olabilir. Bu, ayrıca elektriksel boyutta bir bant boşluğu oluşturabilir ve elektron hareketliliğini değiştirebilir. Kusursuz grafen tabakası yüksek elastik modülü ve mukavemete sahip malzeme olduğu için her türlü zorlanmalara karşı dayanım göstererek, kullanıldığı malzemelerde performans ve kullanım ömrü düşüklüğü gözlenmez.

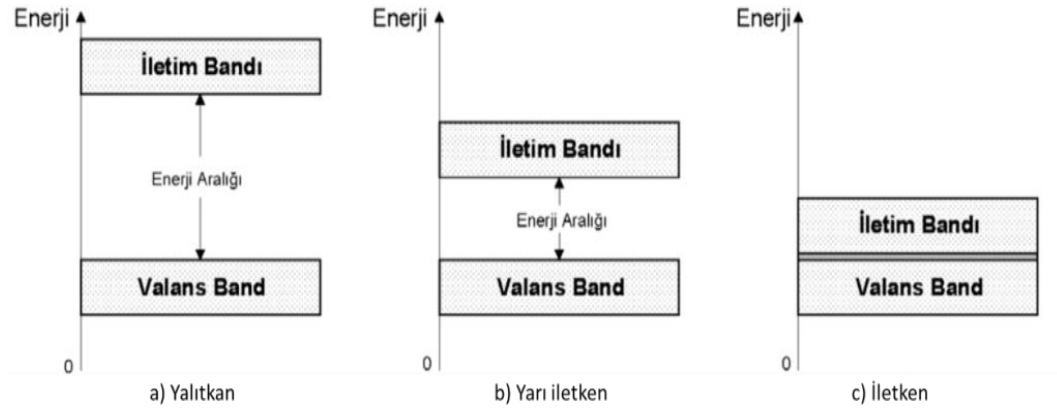
Grafen tabakaları, elastik modülü ve gerilme mukavemeti gibi gelişmiş mekanik özellikleri nedeniyle farklı kompozit yapılar ile birlikte kullanılmıştır. Grafen takviyeli polimer nano kompozitlerin mekanik özellikleri, grafen konsantrasyonuna ve matristeki dağılıma, arayüz bağlanmasına ayrıca grafenin en/boy oranı gibi özelliklerine bağlı olarak nano kompozitlerin mekanik özelliklerinde pozitif yönde bir gelişme sağlamaktadır [36].

Her ne kadar kusursuz grafen yüksek teorik güce sahip olsa da, kimyasal yöntemler kullanılarak üretilen grafen oksit (GO) yüzeylerinde bulunan fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle polar çözücülerde veya su içerisinde yüksek düzeyde çözülmeye sahiptir. Bu nedenle kompozit yapıların matriksi içerisinde, katkı malzemesi olarak kolaylıkla kullanılabilirler. Geliştirilmiş GO/polimer etkileşimi, yüksek moleküler düzeyde dağılım ve gelişmiş arayüz etkileşimi ile grafen/polimer nano kompozitlerde yüksek mekanik özellikler gösterirler. Örneğin, Xu ve arkadaşarı, GO ve polivinil alkol (PVA) kullanarak bir nano kompoziti yapı elde etmişlerdir. Bu yapı içerisinde, ağırlıkça % 0,7 GO içermesine rağmen, sırasıyla elastik modülü ve çekme dayanımı % 76 ve % 62'lik bir artış göstermiştir [37]. Ayrıca sertlik ve mekanik mukavemet istenen nano kompozit yapılarda grafen dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır [38–41]. Grafen takviyeli kompozitlerin diğer mekanik özellikleri olarak kırılma tokluğu, yorulma ve darbe dayanımları da araştırılmış ve incelenmiştir [42–45]. Grafen takviyeli Nasyon-12 kompozitleri, ağırlıkça % 0,6 grafen dolgu ilavesi ile çekme mukavemetinde % 35 oranında, kopma uzamasında ise % 200 oranında önemli bir

gelişme göstermiştir. Bunun yanı sıra darbe dayanım enerjisinde de % 175 oranında gelişme görülmüştür [46]. Ayrıca grafen dolgu maddesinin, epoksi polimer matrisindeki çatlak yayılmasını yavaşlattığı literatüre sunulmuştur. Karbon nanotüp (KNT) ve nano partikül (NP) kullanılarak üretilen nano kompozit yapılarının kırılma ve yorgunluk direncinde iyileşme gözlenmesine rağmen, 100 kat daha az grafen katılarak oluşturulan nano kompozit yapısında da aynı oranda gelişme gözlemlenmiştir [44]. Bunun nedeni, grafenin, KNT ve NP'lerden daha üstün mekanik özellikleri, geniş yüzey alanı, 2B düz geometrileri ve dolgu malzemesi olarak matrikse daha iyi karışmasıdır. Gao ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada silisyum karbür (SiC) üzerinde iki katmanlı grafen sentezlemişler ve sentezledikleri grafenin mekanik özelliklerini angstrom altı nano indentasyon, atomik kuvvet mikroskobu ve mikro sertlik cihazları ile test etmişlerdir. Epitaksiyel metod ile SiC üzerinde sentezlenen farklı katmanlı grafenin nano indentasyon testi sonucunda; çok katmanlı grafenin sertlik değeri grafitte yakın bir değer olan 30 GPa olarak bulunmuştur. Tek katman olarak sentezlenen grafenin sertlik değeri ise altlık malzemesi olarak kullanılan SiC ile aynı sonucu vermiştir. Rapor edilen sonuçlar, iki katmanlı grafenin sertliğinin, altlık malzemesi olarak kullanılan SiC'ün sertlik değeri olan 400 GPa'dan çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Mikro sertlik ölçümleri ise elmas uç kullanılarak 30 μN 'luk kuvvet uygulanılarak yapılmıştır. İki katmanlı grafen, bu yükteki deformasyonlara karşı direnç gösterirken, benzer yüklerde beş katmandan daha kalın grafen filmleri ve SiC kolayca deforme olmuştur. Teorik hesaplamalar, iki katmanlı grafenin nano indentasyon sonuçlarının, elmas benzeri bir filme yapısal olarak benzemesinden kaynaklandığını belirtmiş ve bu benzerliğin üç veya daha kalın katmanlarda görülmediği şeklinde karakterize edilerek literatüre sunulmuştur [14]. Bir başka çalışmada, Yue ve arkadaşlarının ürettiği yüksek dayanımlı biyouyumlu malzeme yapımında kullanılan köpük şeklindeki iki boyutlu grafen, bu yapının dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Ek olarak, bu malzeme yaklaşık %99,7 oranında yüksek bir gözenekliliğe sahiptir ve bu da onu, sinerjik etkiler oluşturarak diğer malzemelerle entegrasyonu için bir iskelet olarak kullanımı konusunda ideal bir malzeme haline getirmektedir [47].

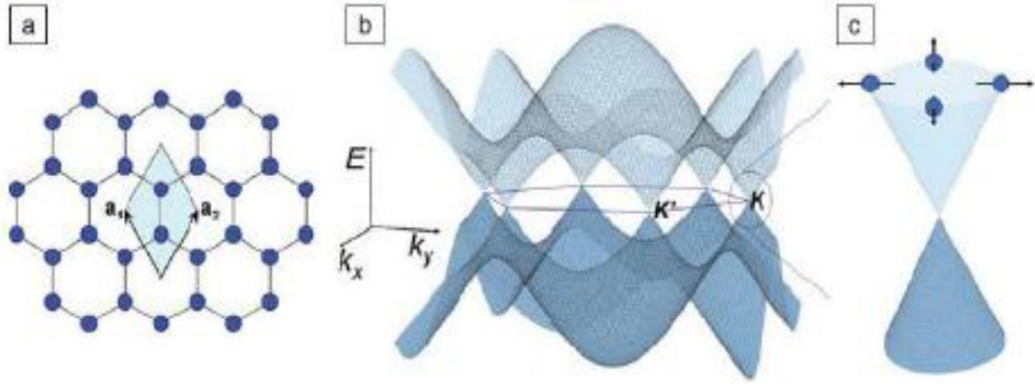
1.1.1.2 Grafenin elektriksel özellikleri

İletken malzemelerde, değerlik ve iletim bantları üst üste konumlanır ve uyarılmış elektronlar rahatlıkla değerlik bandından iletim bandına geçiş yapabilir. Bu özellik metal ve metal benzeri malzemelerde görülmektedir (Şekil 1.10). Grafen ise metal olmamasına rağmen iletken bir malzemedir [48]. Bu bant boşlukları Brillouin bölgesinin veya K noktalarının köşelerinde bulunur (Şekil 1.11). Sonuç olarak, π -bandı dispersiyonu K noktaları etrafında yaklaşık olarak doğrusaldır. Valans ve iletim bantları grafende çakışmamaktadır; Fermi seviyesinde birbirlerine dokunmaktadırlar. Bu nedenle elektronlar burada kütesizmiş gibi hareket edebilir. Bu da grafenin üstün elektriksel iletkenliğini açıklamaktadır. Bu, iki boyutlu bir grafen kafesin Fermi yüzeyini görselleştirerek görülebilir. Bazı deneyler, grafenin, oda sıcaklığında $15.000 \text{ cm}^{-1}\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'in üzerinde olağanüstü yüksek bir elektron hareketliliğine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.7. Bilinen yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerde ki bant yapısı.

Chen ve arkadaşları tarafından ilk defa KBB yöntemiyle nikel köpük üzerinde sentezlenmesiyle elde edilen köpük şeklinde iki boyutlu grafenin, 10 S/cm civarındaki iletkenlikleri ile tek-duvarlı karbon nanotüplerle hazırlanan filmlere oranla çok daha iyi bir iletkenlik değerine sahip olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra grafenin kendi yapısından kaynaklı esnekliğinin 3-boyutlu gözenekli yapıyla artırılması sayesinde GK'lere ileri düzeyde bir esneklik ve mekanik dayanım kazandırılmıştır [49]. GK'lerin bu özelliği sayesinde her türlü kıvrım ve eğriselliğe sahip yüzeylerde uygulanabilirlikleri artırılmıştır.



Şekil 1.8. (a) Grafenin karbon atomlarından oluşan kafes yapısı. (b) En yakın karbon atomlarının birbiri ile yaptığı sıkı π -bağının yapısı. (c) Grafenin K noktasında yaptığı elektronik band yapısı [50].

1.1.1.3 Grafenin termal özellikleri

Grafenin termal iletkenliği, yüksek çözünürlüklü vakumlu tarama termal mikroskobu ile ölçülmektedir. Grafen katmanlarının sayısı arttıkça, termal iletkenlik azalır. Grafenin silikon-dioksit altlık üzerindeki termal iletkenliği yaklaşık $600 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ değerine ulaşabilir, bu değer bakırdan yaklaşık 2 kat ve silikondan 50 kat daha yüksektir. Tek katman grafenin oda sıcaklığında termal iletkenliği boyutuna bağlı olarak ortalama $3000\text{-}5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür [51–53].

1.1.1.4 Grafenin optik özellikleri

Tek katmanlı grafenin, beyaz ışık absorpsiyonu ihmal edilebilir bir yansımaya ile % 2.3'tür ve bu absorpsiyon, bir katmandan beş katmana kadar doğrusal olarak artmaktadır. Grafenin şeffaflığı, ince yapı sabiti $\alpha = 2\pi e^2 / hc$ formülüne bağlıdır, bu denklem ışık ve rölativistik elektronlar arasındaki bağlantıyı tanımlar. Herhangi bir tabaka grafenin absorpsiyonu basitçe ' $n\pi\alpha$ ' olarak ifade edilebilir. Bununla birlikte, bu davranıştan sapma enerjisi 0.5 eV'den (veya $\sim 2480 \text{ nm}$ 'den daha büyük dalga boyu) daha az olan fotonlarda bulunur [54-55].

1.1.2 Grafenin üretim teknikleri

Grafen, ilk olarak mekanik yapraklanma yöntemi ile sentezlenmiştir [13]. Daha sonra yapılan çalışmalarla farklı grafen sentez yöntemleri de ortaya çıkarılmıştır. Başlıca grafen sentez yöntemleri;

- Mekanik yapraklanma,
- Kimyasal sentez,
- Silikon karbür (SiC) üzerinde epitaksiyal büyüme,
- Kimyasal buhar biriktirme (KBB)

Belirtilen bu yöntemlere ek olarak, nanotüpleri açmak veya sodyum etoksitin pirolizi gibi başka yöntemler de bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler, grafen tabakasının üretilmesi için daha kapsamlı bir çalışma gerektirmektedir. Grafenin katman sayısı ve kalitesi sentezlenen yöntemle göre değişiklik göstermektedir [46, 56, 57]. Çeşitli üretim teknikleri üzerinde yapılan karakterizasyon işlemleri sonucunda ideal yapıya en yakın sonuçlar KBB yöntemi ile üretilen grafenden alınmıştır. Bu nedenle grafen sentezi için kullanılan en popüler ve umut verici yöntem KBB'dir, çünkü bu yöntem büyük ölçekte yüksek kaliteli grafen üretimine ve endüstriyel uygulamalara en uygun yöntemdir [58-59].

1.1.2.1 Mekanik yapraklanma yöntemi

Mekanik yapraklanma, bir grafen tabakasının en basit sentez yöntemidir. Mekanik yapraklanma yöntemi prosedürü; öncelikle yüksek derecede üretilmiş pirolitik grafit numunesinin yüzeyinin kesilmesi ile başlar. Yapışkan bant üzerine küçük bir grafit parçası yerleştirilir, bant birçok kez katlanır ve açılır. Bu işlem süresince, grafit ara katmanında çok zayıf Van Der Waals kuvvetleri bulunmasından dolayı grafitten katmanlar kolayca ayrıştırılır. Bu işlemler sonunda grafen yapısına ulaşılır. Tek tabakalı grafen, ışık girişim desenleri veya Raman spektroskopisinde kullanılan basit bir optik mikroskop ile doğrulanabilir. Yapraklanmış grafenin mobilitesi $15000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'e ulaşabilir [60–63].

1.1.2.2 Epitaksiyal büyüme yöntemi

Epitaksiyal büyüme, altlık bazlı bir yöntemdir ve bu yöntemde izole grafen tek katmanı, vakum yoluyla tek kristalli bir silikon karbür (SiC) üzerinde büyütülmektedir. Bu yöntem ile sentezlenen grafenin elektron mobilite değeri, yapraklanmış grafenden daha küçük fakat kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile sentezlenen grafenden daha büyük bir değer aralığındadır. Epitaksiyal büyüme yöntemi prosedüründe; silikon karbüre, vakum altında yaklaşık $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de termal işlem uygulanır, yüzeyde sadece karbon atomları kalır ve süblimasyonun

dikkatlice kontrol edilmesiyle SiC altlığının tüm yüzeyi üzerinde grafen elde edilir. Grafen katman sayısı, tavlama sıcaklığı ve süresi ile kontrol edilebilir. Karbon atomlarının yüksek sıcaklıktan dolayı deforme olması ve oksijen veya hidrojen ile kirlenmiş olmasından dolayı yapıda bazı kusurlar görülebilir [64–66].

1.1.2.3 Kimyasal yapraklanma yöntemi

Kimyasal yapraklanma, mekanik yapraklanma yöntemi ile benzer özellikler göstermektedir. Grafitin kimyasal yapraklanma yöntemi, grafen üretimi için eski bir tekniktir. Kimyasal eksfoliasyonun mekanik yaklaşıma göre en önemli avantajları yüksek verim ve ölçeklenebilirliktir. Kimyasal yapraklanma işleminin iki aşaması vardır. İlk aşama, ara tabakaların türlerine bağlı olarak birkaç farklı formda oluşturulabilen grafit ara katkılı bileşikler oluşturarak grafen tabakaları arasındaki ara katman aralığını genişletmektir. Ancak bunların hepsi kimyasal yapraklanma işlemi için yeterli değildir [67-68]. Grafit ara katkılı bileşiklerin yapraklanması, sülfürik asit ve nitrik asit karışımlarının uzun bir süre boyunca grafiti ıslatmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. Islanma işleminde, asit molekülleri zamanla grafit içine nüfuz ederek grafit katmanları arasında kimyasal bağ oluşturarak tekrarlanan grafit ve ara madde katmanlarının yapısını değiştirir. Grafit tabakalarının kalınlığı katmanların zamanla birbirinden ayrılmaları ile azalır, böylece birkaç tabakalı grafen elde edilir [69]. İkinci aşama, tabakalı grafenin katmanlar arasında kalan sıvıların sıcaklık ile hızlı bir şekilde buharlaştırılması yoluyla yapraklanma sağlanmasıdır. Yapraklanma derecesi, bilyalı öğütme ve ultrasonikasyon gibi işlemlere tabii tutularak daha da arttırılabilir. Bu teknik basit olmasına rağmen, yöntemle elde edilen grafit nano tabakalar genellikle birkaç ila birkaç yüz tabaka arasında değişen kalınlıklar sergiler [70].

1.1.2.4 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (KBB)

Kimyasal buhar birikimi; bakır, nikel, paladyum, rutenyum, iridyum gibi geçiş metallerinin altlık olarak kullanıldığı yüksek kaliteli grafen sentezi için en uygun, ucuz ve kolay erişilebilir bir yöntemdir (Şekil 1.12). Tek katmanlı grafen sentezi için genel olarak bakır altlık kullanılır. Bu alanda yapılan araştırmalarda bilim insanları, düşük sıcaklıkta $7350 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ değerinde elektron mobilitesi ve geniş

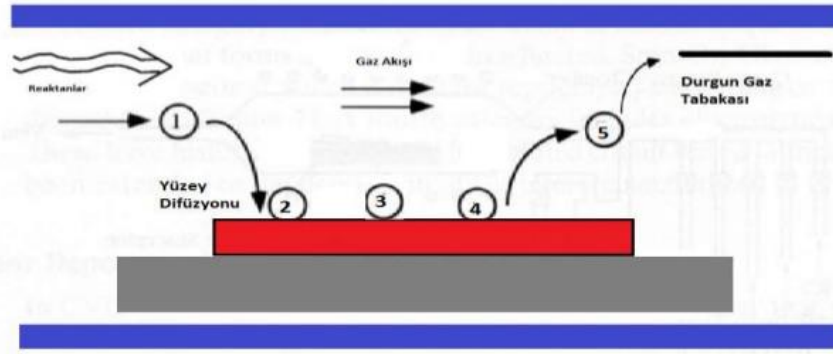
alan büyümesi gibi mükemmel özellikler bildirmişlerdir [71-72].

KBB yöntemi beş adımda tamamlanır.

- Birinci adım, ısıtma: Altlığın, gazlar ile önışleme sıcaklığına kadar ısıtılması işlemidir. İşlemin bu adımında argon ve hidrojen gazları kullanılır.
- İkinci adım, tavlama: Sıcaklık ve gaz atmosferini koruyarak uygulanır. Bu işlem, tüm sürecin ilk kimyasal reaksiyonudur. Altlık yüzeyini temizlemek ve metal altlığın kristal oryantasyonu, pürüzlülüğü ve tane boyutunu içeren yüzey morfolojisini mümkün olduğu kadar düzenlemek için yapılır.
- Üçüncü adım, büyütme: Karbon öncü gazının ortama girmesi ile metal altlık üzerinde grafen büyümesi başlar. Büyüme süreci boyunca grafen filmi büyütme için farklı stratejiler kullanılır. İşlem süreci tek adımlı veya çok adımlı olabilir. Adımlar sırasında gazın basıncını veya karışımını, sentez süresini, sıcaklığı, gaz akışını vb. değiştirmek mümkündür. Altlık ile karbon atomları bu adımda bir araya gelerek grafenin çekirdeklenmesi başlatılmış olunur.

Öncü gaz olarak karbon kaynaklı gazlar hidrokarbon bazlı reaktanlar kullanılabilir. En yaygın kullanılan gaz metan gazıdır (CH_4). Metan molekülündeki güçlü C-H bağları yüksek sıcaklıkta ayrışır ve karbon atomları metal altlığa tutunarak grafen tabakasını oluşturur [73].

- Dördüncü adım, soğutma: son aşamadan önceki aşama olan soğutmada, reaktörün argon ve hidrojen atmosferinde soğutulması gerçekleştirilir. Bu aşamada metan gazı kaynakları kapatılır. Bu gaz atmosferi, kaplanmayan metal yüzeyin oksidasyonunu veya oksijen içeren gruplarla grafen işlevselleşmesini önlemek için reaktör sıcaklığı $200\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altına düşene kadar tavlama aşamasına benzer bir işlem uygulanır. Yüksek karbon çözünürlükteki altlıklarla çalışırken soğutma adımı, büyütme için kritik öneme sahiptir.
- Son adım; kullanılan argon, azot ve metan gazları reaktörün içerisinden boşaltılır ve reaktör yeniden kullanıma uygun hale getirilir [59].



1. Reaktanın substrat yüzeyine difüzyonu
2. Reaktanın substrat yüzeyine absorpsiyonu
3. Reaktan- substrat arası kimyasal reaksiyon
4. Üründen gaz desorpsiyonu
5. Üründen atık gazın uzaklaşması

Şekil 1.9. Kimyasal buhar biriktirme yönteminin mekanizması.

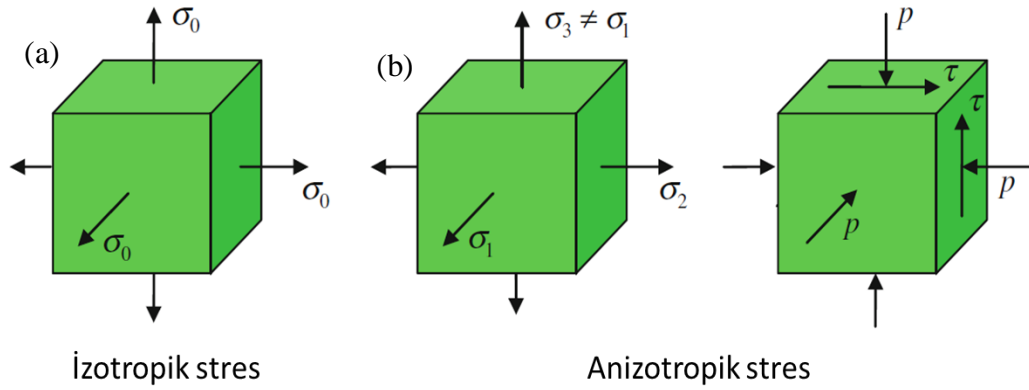
1.2 Reoloji

Sıvılar ve gazlar, onları sınırlayan katı veya sıvı yüzeylere bir basınç uygularlar. Bu tür yüzeyler üzerindeki teğetsel kuvvetler, sıvı veya gazı sınırlayan yüzey arasında hareket olduğunda ortaya çıkar. Bu tür kuvvetler, hava veya suda hareket eden cisimlerin yüzeyinde sürtünme kuvvetleri olarak tanımlanır. Bir nehirdeki akış incelendiğinde, nehrin ortasında akış hızının en yüksek olduğu ve nehir kıyısında sıfıra düştüğü görülür. Bu fenomen, akışı yavaşlatmaya çalışan su katmanları arasındaki teğetsel kuvvetler, kayma gerilmeleri kavramı ile açıklanmaktadır.

Sıvıların ve gazların makroskopik olarak benzer şekilde davranması nedeniyle, bu malzemeler için hareket denklemleri ve enerji denklemleri aynı forma sahiptir ve uygulanan en basit yapı modelleri prensip olarak sıvılar ve gazlar için aynıdır. Bu nedenle, bu tür modeller için pratik ve ilgi çekici bir isim olarak 'akışkan' terimi kullanılır. Akışkanlar mekaniği, sıvıların ve gazların mekanik davranışı için makromekanik teoridir. Katı maddeler de sıvı maddelerle benzer davranışlar gösterebilir. Sabit gerilmede deformasyonun artmasıyla karakterize edilen plastik deformasyon ve sürünme, sıvı benzeri davranıştır. Çelikte, erime sıcaklığının çok altında sürünme görülür. Granit gibi taşlar, uzun bir jeolojik zaman aralığında yerçekimi nedeniyle farklı deformasyonlara uğrar. Tüm termoplastikler katı halde bile sıvılar gibi davranır ve bu nedenle belli koşullarda sıvı gibi modellenir.

Sürekli belli kuvvetlerin olduğu bir ortam mekaniğinde, bir malzeme için en karakteristik özellik akışkan olma durumudur.

Sıvı, anizotropik stres durumlarına maruz kaldığında sürekli deforme olan bir malzemedir. Bir malzemenin yüzeyine uygulanan izotropik bir gerilim durumunda, yüzey eşit gerilmeye, gerginliğe veya sıkıştırmaya maruz kalır ve yüzeyler üzerindeki kayma gerilmeleri sıfırdır. Bir malzeme yüzeyindeki anizotropik bir stres durumunda çoğu malzeme yüzeyinde kayma gerilmeleri görülebilir (Şekil 1.13) [74].



Şekil 1.10. Akışkanlara uygulanan farklı kayma gerilmeleri [74]. İzotropik stres (a), anizotropik stres (b).

Bu çalışmaların temeli 'Reoloji' bilimine dayanmaktadır. Reoloji terimi ilk olarak 1920'de Indiana'da bulunan Lafayette Koleji'nde Profesör Eugene Bingham tarafından kullanılmıştır. Kimya profesörü Bingham, garip akış davranışı olan yeni malzemeler, özellikle boyalar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Reo hecesi, akış anlamına gelen Yunanca 'hein' kelimesinden gelir, bu nedenle reoloji adı, deformasyon ve madde akışı teorisi olarak tanımlanır. Reoloji ayrıca viskoelastik ve viskoplastik özellikler sergileyen yüksek viskoziteli sıvılar ve katıların teorisini de içermektedir. Reoloji başlığı altında farklı özellikler gösteren birçok akışkan malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler temelde Newtonsal ve Newtonsal olmayan sıvılar olarak ikiye ayrılır. Newtonsal akışkanlar kayma gerilmesi ile doğru orantılı olarak şekil değiştirmektedir. Newtonsal olmayan akışkanlarda ise kayma gerilmesi uygulandığında malzemenin viskozitesinde değişiklikler meydana gelir. Newtonsal olmayan akışkanlar boyar maddelerde, polimer çözeltilerinde, gıda sektöründe, sondaj sıvılarında ve biyolojik sıvılarda kullanılır. Newtonsal olmayan akışkanların içeriğinde kolloidal dispersiyonlar vardır [74].

Kolloidal dispersiyonlar, gıda, boya ve seramik endüstrilerinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu dispersiyonları üretmek için, akış davranışlarının iyi anlaşılması gerekir. 20. yüzyılın başından bu yana, konsantre dispersiyonların reolojik özellikleri farklı alanlarda araştırma konusu olmuştur. Son yıllarda, süspansiyonların reolojisine ilgi büyük ölçüde artmıştır ve konsantre dispersiyonlarda kayma kalınlaşması konusuna daha fazla ilgi duyulmaktadır [75]. Ek olarak, konsantre dispersiyonlar, kayma incilmesi, kayma kalınlaşması, tiksotropi ve akma stresini tanımlayabilen çok çeşitli reolojik özellikler gösterir. Bu dağılımlar hakkında sabit kayma özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır [76].

Kayma kalınlaşması, Newton tipi olmayan akış davranışıdır ve İngiliz Standart Reolojik İsimlendirmesinde kayma hızındaki artışla viskozitenin artması olarak tanımlanır. Dilatant, kayma kalınlaşmasını tanımlamak için kullanılan başka bir terimdir.

1.2.1 Newtonsal olmayan akışkanlar

Akışkan dinamiğinin evriminde üç ayrı aşama vardır. Gelişimin ilk aşaması, ideal sıvıların, yani viskozite veya elastikiyete sahip olmayan ve doğada sıkıştırılmayan sıvıların incelenmesiyle ilgilidir. Kayma hareketi bu tür sıvılarda herhangi bir kayma kuvvetine yol açmayacağı için akışın sürtünmesiz olacağı söylenmektedir. Yıllar boyunca, ideal akışkanları içeren çeşitli fiziksel durumlar için analizler geliştirilmiş olup bazı özel koşullar altında gerçek akışkanların performansı için yararlı yaklaşımlar keşfedilmiştir [77].

1904 yılında Prandtl tarafından geliştirilen sınır tabakası kavramı, klasik akışkan dinamiğinin gelişimini ve ikinci aşamasının başlangıcını işaret etmektedir. O yıllarda yapılan çalışmalarda, bir sınır tabakası kavramı olmadan, ideal akışkanlar için geliştirilen çözümlerin pratikte faydası görülemezdi. Prandtl basit bir şekilde, katı bir yüzey üzerindeki akışlarda, sürtünme etkilerinin katı yüzeye bitişik olan sınır tabakası olarak bilinen, nispeten ince bir tabaka ile sınırlı olduğunu varsaymaktadır. Böylece, akış alanı iki bölgeye ayrılabilir; sınır tabakasının dışındaki akış, diğer bir ifade ile ideal akışkan davranışı ve sınır tabakası içindeki akışkan sürtünmesi varsayılarak modellenir. İkincisi, daha az detaylı olmasına

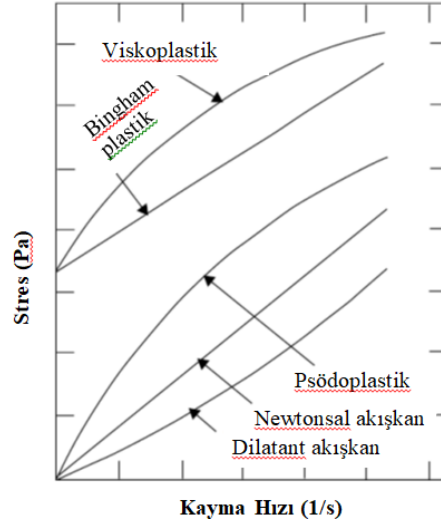
rağmen, genellikle Newtonsal akışkanlar olarak adlandırılan en basit gerçek akışkanlar sınıfı için dinamik bir teorisinin gelişmesine yol açmıştır.

Son olarak, akışkan dinamiği teorisinin üçüncü aşaması halen geliştirilemeye devam etmektedir [77]. Bu gelişme, endüstriyel ortamda üretilen çok çeşitli ticari uygulamalarda karşılaşılan çok sayıda akışkan malzemenin artan önemi ile ortaya çıkmıştır. Bu yeni malzeme sınıfının akış davranışı Newtonsal davranışına uymadığından dolayı bu tür materyaller Newtonsal olmayan akışkanlar olarak bilinir. Newtonsal olmayan akış karakteristikleri sergileyen malzemelerin tipik örnekleri arasında; çok fazlı karışımlar (bulamaçlar, emülsiyonlar ve gaz-sıvı dispersiyonları), eriyik polimer ve çözeltileri, sabun çözeltileri, kozmetik ve tuvalet malzemeleri dahil kişisel bakım ürünleri, gıda ürünleri (reçeller, jöleler, peynir, tereyağı, mayonez, et özü, çorbalar, yoğurt vb.), biyolojik sıvılar (kan, sinovyal sıvı, tükürük, meni vb.), yapı malzemeleri, doğal ürünler (protein çözeltileri, özler vb.), tarımsal ve süt atıkları, ve lav vb. akışkan yapıları bulunmaktadır [78–80].

Bir madde için, akış eğrisinin doğrusal olup olmaması önemli olmaksızın eğrinin başlangıç noktasından geçmemesi, yani viskozitesinin belirli bir sıcaklık ve basınçta sabit olmaması, ayrıca basit bir kayma etkisiyle akışında eşit olmayan stres davranışı sergilemesi durumunda Newtonsal olmayan akışkan olarak adlandırılır. Viskozitenin değeri, akış geometrisi, akışkan içinde geliştirilen kayma hızı (veya gerilme), kayma süresi, numunenin kinematik geçmişi gibi akış koşullarına bağlıdır. Newtonsal olmayan akışkan davranışı üç genel kategoride incelenebilir.

- Visko elastik davranış.
- Zamana bağlı davranış.
- Zamandan bağımsız davranış.

Bu sınıflandırmalar, Newtonsal olmayan akışkanların karakteristiklerinin üç türünü veya üçünün bir kombinasyonunu göstermektedir. Aynı maddenin koşullara bağlı olarak elastik veya viskoz bir malzeme olarak davranması da mümkündür. Bununla birlikte, çoğu durumda, baskın olan bu sınıflandırmaları Newtonsal olmayan özelliği tanımlamak ve sonraki proses mühendisliği hesaplamaları için temel olarak kullanmak mümkündür (Şekil 1.14) [80].



Şekil 1.11. Newtonsal olmayan akışkanların kayma gerilimi altındaki davranışları [80].

1.2.1.1 Visko elastik davranış

Esneklik teorisinde, kayma kuvvetine uğramış bir cisimdeki stres, gerinim ile doğru orantılıdır. Gerinim için, Hooke yasası uygulanır ve orantılılık katsayısına Young modülü denir. Bu durumda kayma stresi (τ_{yx}), plastik deformasyonun başlama noktası olan akma sınırını (G) belirler.

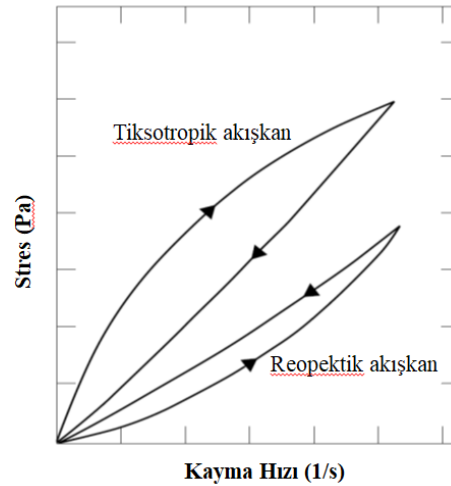
$$\tau_{yx} = G \frac{dx}{dy} \quad (1.1)$$

Bir katı, elastik sınır içinde deforme olduğunda, stresin giderilmesi ile orijinal haline geri döner. Bununla birlikte, uygulanan gerilim, malzemenin karakteristik akma noktasını aşarsa, tam bir geri kazanım meydana gelmez ve sürünme meydana gelir. Başka bir deyişle, katı akmış olur. Birçok madde, uygun koşullar altında hem elastik hem de viskoz etkiler gösterir. Zamana bağlı etkilerin yokluğunda, bu tür malzemeler visko-elastik akışkanlar olarak bilinir. Mükemmel viskoz akış ve elastik deformasyon, viskoelastik davranışın iki sınırlayıcı durumudur. Bazı malzemeler için uygulamada sadece bu sınırlayıcı koşullar gözlenir. Malzemelerin davranışı sadece doğasına, akış alanına değil, aynı zamanda kinematik geçmişine de bağlıdır. Dolayısıyla, katı ile akışkan arasındaki ve elastik ile viskoz deformasyonlar arasındaki ayrımlar bir dereceye kadar düzensizdir. Polimerin eriyik çözeltileri, sinovyal sıvı, sabun çözeltileri gibi ilgi çekici birçok malzeme visko elastik davranış sergiler, enerjiyi saklama yeteneklerivardır ve bu nedenle stresin giderilmesi ile kısmi iyileşme gösterirler.

Bunlar, geçmişte meydana gelen olayları tekrarlayabilecekleri bellek etkileri gösterirler.

1.2.1.2 Zamana bağlı davranış

Endüstriyel açıdan önemli birçok malzeme için, kayma akışı özellikleri hem kayma hızına hem de kayma süresine bağlıdır. Örneğin, kırmızı çamur ve bentonitin sulu süspansiyonları, ham yağlar, yapı malzemeleri ve bazı gıda maddeleri yeterli derece dinlenme süresinin ardından sabit bir kesme hızında kesildiğinde, içyapıları zamanla parçalanır ve viskoziteleri kademeli olarak azalır. Mevcut yapısal moleküler etkileşim sayısı azaldıkça, zamanla viskozite değişim hızı da sıfıra düşer. Öte yandan, moleküler etkileşimlerin yeniden şekillenme hızları artar ve sonunda birikme ve parçalanma oranları eşit olduğunda dinamik bir denge durumuna ulaşılır. Bu tür akışkan davranışları iki kategoriye ayrılır; tiksotropi ve reopeksi (negatif tiksotropi) (Şekil 1.15) [80].

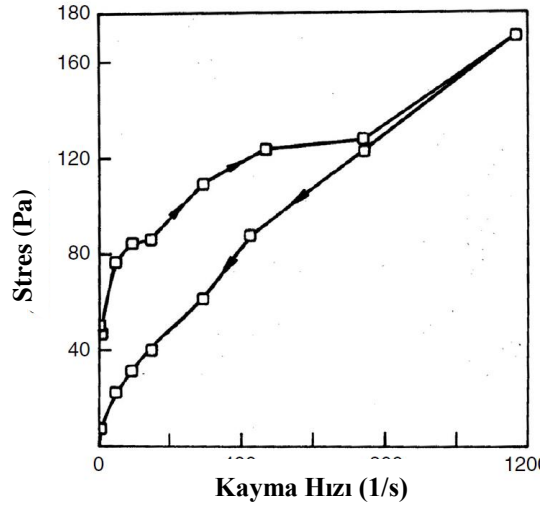


Şekil 1.12. Kayma gerilimi altında zamana bağlı olarak reolojik davranış gösteren akışkanlar [80].

Tiksotropi

Bir malzemenin, görünür viskozitesi (veya kayma gerilimi), sabit bir kayma hızında zamanla azalırsa tiksotropik davranış sergilediği bilinmektedir. Akış eğrisi, kayma hızının sabit bir hız ile sıfırdan maksimum değere sürekli olarak yükseltildiği ve daha sonra aynı hız ile tekrar sıfıra düşürüldüğü tek bir deneyle ölçülürse, bir histerez (gecikme) döngüsü elde edilir. Döngünün yüksekliği, şekli ve kapalı alanı; kayma süresi ve hızı ile deformasyon geçmişi gibi kinematik parametrelere bağlıdır. Benzer şekilde, Şekil 1.16'da çizilen grafik, kırmızı bir

çamur süspansiyonunun tiksotropik davranışını göstermektedir [81]. Burada kayma gerilimi, kayma süresi ile azalmaktadır ve sonunda uygulanan kayma hızına karşılık gelen bir denge değerine yaklaşmaktadır. Sahte gövde terimi, visko-plastik malzemelerin tiksotropik davranışını tanımlamak için kullanılmıştır. Tiksotropik davranış, yapının bozulmasıyla ilişkili olsa da, visko-plastik malzemeler başlangıç değerinden daha az olabilecek akma gerilmesi gibi katı benzeri özelliklerini tamamen kaybetmezler. Dahası uzun bir iyileşme sürecinden sonra kaybedilen özellikler geri kazanılabilir.

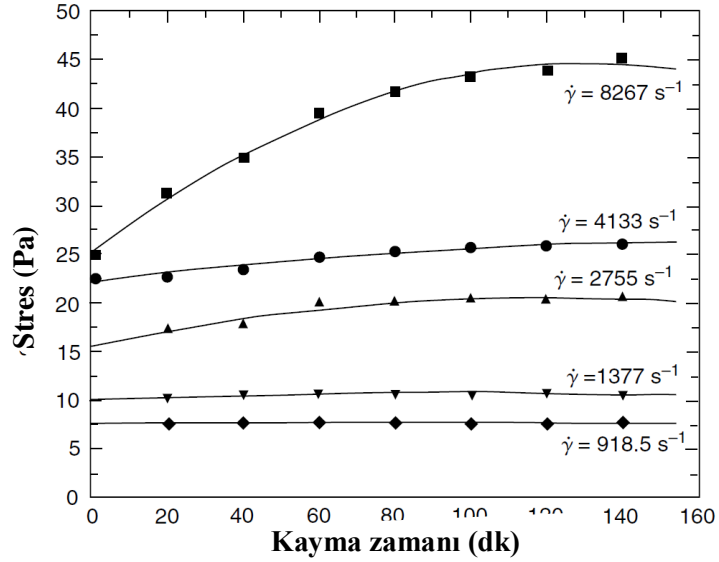


Şekil 1.13. Tiksotropi davranışına örnek bir grafik [80].

Reopeksi (Negatif Tiksotropi)

Viskozitenin, kayma süresi ile arttığı sistemlere reopeksi veya negatif tiksotropi adı verilir. Bu sistemlerde akış eğrisinde histerez etkileri gözlenir, ancak bu durum tiksotropik bir malzeme ile karşılaştırıldığında tam tersidir (Şekil 1.17). Tiksotropi ile kıyaslandığında, reopeksi özelliği gösteren akışkan üzerinde kayma kuvveti oluştuğunda yapının viskozitesi kademeli olarak artar, ancak bir dengeye ulaşıp ulaşılamayacağı kesin değildir. Bu nedenle, reopektik bir malzemede, yapının kayma ile viskozitesi artar ve malzeme eski haline tekrar geri dönemez. Örneğin, %42 sulu alçı kullanan Freundlich ve Juliusburger, çalkalandıktan sonra bu malzemenin, normal koşullarda 40 dakika içerisinde, malzemenin avuç içlerinde hafifçe yuvarlanması durumunda ise sadece 20 saniye içinde çözüldüğünü keşfetmişlerdir [82]. Sonuç olarak reopeksik akışkanda yumuşak bir kayma hareketi (yuvarlanma) ile yapısal değişimin kolayca gözlenebildiği, ancak

daha yoğun bir hareketin (çalkalama) yapıyı tahrip ettiğini ve bu davranışın alçı parçacıklarının anizometrik şekline bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Aynı süspansiyon veya dispersiyonda, uygun kayma hızı ve belirli katkı maddesi oranlarında hem tiksotropik hem de reopeksik akışkan davranışı görülebilir. Niteliksel olarak, amonyum oleat süspansiyonlarında, orta kayma hızlarında vanadyum pentaoksitin koloidal dispersiyonlarında [83], kömür-su bulamaçlarında [84] ve protein çözeltilerinde [85] benzer davranışların meydana geldiği bildirilmektedir. Tiksotropik ve reopektik davranışı tanımlamak için mevcut olan matematiksel denklemler karmaşıktır ve genellikle ilgili koşullar aralığında ölçümler yapmak gerekir. Ayrıca, bunların çoğu belirli bir malzemenin davranışını tanımlamak için özel olarak formüle edilir.



Şekil 1.14. Doymuş polyesterin reopektik davranışı [80].

1.2.1.3 Zamandan bağımsız davranış

Akış özellikleri kayma süresinden bağımsız olan akışkanlar, basit bir reolojik formülle ifade edilebilir; kayma stresi, kayma hızının ($\dot{\gamma}_{yx}$) fonksiyonuna eşittir.

$$\tau_{yx} = f(\dot{\gamma}_{yx}) \quad (1.2)$$

Denklem, kayma kuvvetine maruz kalmış akışkan içerisindeki herhangi bir noktadaki kayma hızının, yalnızca o noktadaki kayma geriliminin mevcut değeri ile belirlendiğini ya da tam tersini belirtir. Denkleme bağlı olarak, bu akışkanlar üç farklı kategoriye ayrılır:

- Kayma incelmesi veya psödoplastikler
- Visko-plastikler
- Kayma kalınlaşması veya dilatant

Şekil 1.14, bu üç tür sıvı davranışı için nitel akış eğrilerini ve Newtonsal akışkanlara özgü doğrusal ilişkiyi göstermektedir.

Kayma İncelmesi (Psödoplastikler)

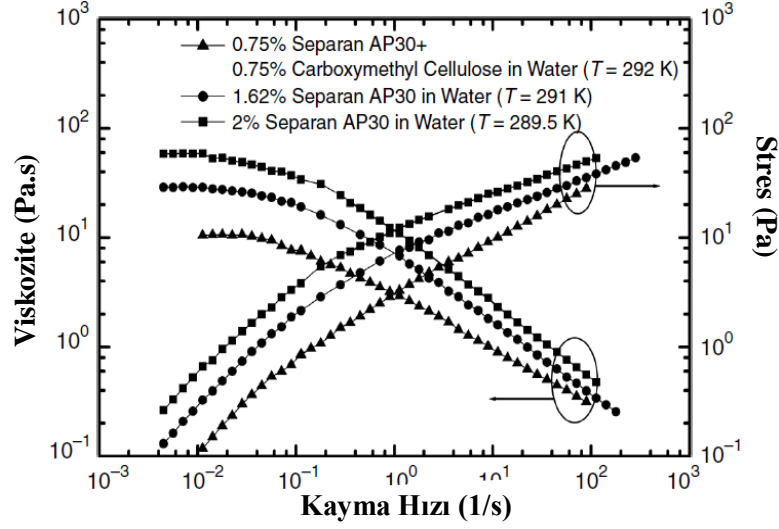
Zamandan bağımsız akışkanlar incelendiğinde en sık görülen davranış kayma incelmesi davranışıdır. Kayma ile incelenmiş olan veya psödoplastik akışkanlar, artan kayma oranıyla azalan viskozite değeri ile tanımlanır. Şekil 1.18’de, bir dizi sulu polimer çözeltisinde gözlenen kayma incelmesi davranışı açıkça gösterilmektedir. Bu tür akışkanlarda viskozitenin azalma oranı her akışkan için aynı değildir. Ayrıca, bu ölçümler yeterince geniş bir kayma hızı aralığına yayılırsa, çoğu polimerik çözeltinin hem çok düşük hem de çok yüksek kayma hızlarında sabit viskozite sergilediği bölgeler, yani

$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx} \rightarrow 0} \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \mu_0 \quad \text{Viskozitenin sıfır olma durumu} \quad (1.3)$$

$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx} \rightarrow \infty} \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \mu_\infty \quad \text{Viskozitenin sonsuz olma durumu} \quad (1.4)$$

bu formüllere dayanarak, kayma ile incelen bir maddenin viskozitesi (μ), kayma hızı ile μ_0 veya μ_∞ olabilir. Üst ve alt Newton bölgelerini gösteren verileri elde etmek zordur ve nadiren görülür, sulu bir poliakrilamid çözeltisi için böyle bir veri elde edilmiştir [86]. Ayrıca, bu polimer çözeltisinin viskozitesinin 1400 MPa.s’dan 4.2 MPa.s değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Kayma incelmesi görülen bölgede viskozitenin azalma hızı; polimerin tipi ve konsantrasyonu, moleküler ağırlık dağılımı ve solvent tipi gibi fizikokimyasal faktörlere bağlıdır. Graessley, Larson, Morrison ve Witten ile Pincus gibi bilim insanları, yaygın olarak karşılaşılan polimerik sistemlerin toplu reolojik özellikleri ve mikro-yapısal yönlerine ışık tutmuşlardır [87–90]. Genel olarak, viskozitenin sabit olduğu kayma hızı aralığını (sıfır kesme bölgesinde) arttırmak için polimerin molekül ağırlığının düşmesi, moleküler ağırlık dağılımının daralması ve polimer konsantrasyonunun (çözelti içinde) azalması gerekmektedir. Hemen hemen tüm

Newtonsal olmayan akışkanlar uygun koşullar altında kayma incelmesi davranışı gösterir.

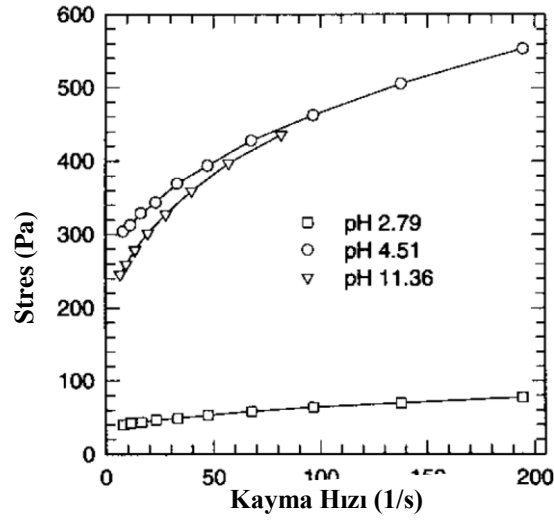


Şekil 1.15. Kayma incelmesi gösteren polimerlerin grafiği [80].

Visko-Plastik Akışkanlar

Bu akışkan malzeme, sıvının deforme olması veya akması için aşılması gereken bir akma gerilimi (τ_0) varlığı ile karakterize edilir. Uygulanan gerilim akma gerilimini aştığında, akış eğrisi doğrusal ya da doğrusal olmayabilir. Bu tür bir maddenin, katı fiziksel tanıma göre gerçekten bir akışkan olmadığı belirtilmelidir. Bununla birlikte, bu tür bir davranış, dinlenme halindeki maddenin τ_0 'dan daha düşük herhangi bir dış strese direnmek için yeterli sertlik veya mukavemete sahip üç boyutlu bir yapıdan oluşması ile açıklanabilir. τ_0 'dan daha yüksek kayma gerilimi uygulandığında, malzeme yapısal olarak parçalanır ve malzeme viskoz bir akışkan gibi davranır.

Şekil 1.19'da verilen karbopol akışkanı visko-plastik tipi bir akış davranışını göstermektedir; akma gerilimi ve viskozitenin sonuçları pH değerleri ile değişkenlik göstermiştir [91]. Diğer yandan, doğrusal olmayan bir akış eğrisinin yanı sıra akma stresine sahip olan bir madde, Şekil 1.15'te (bütün davranışlar gösterildiği) veya Şekil 1.19'daki bir karbopol çözeltisi gibi visko-plastik malzeme olarak bilinir. Endüstriyel öneme sahip bazı sıvılar bu tip akış davranışına yakındır. Örneğin; gres yağı, köpükler, sondaj çamurları, boyalar, konsantre bulamaçlar, kan, gıda maddeleri, elmas madeni atıkları, mukus, erimiş lav, doldurulmuş polimerler vb.



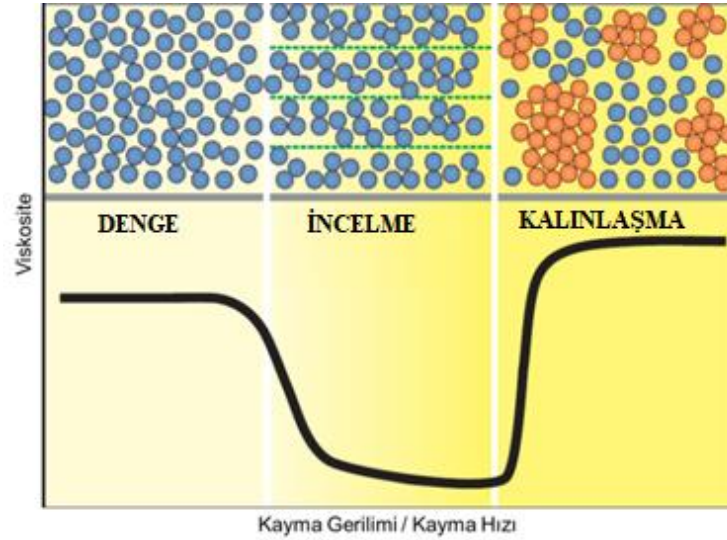
Şekil 1.16. Karbopol çözeltisinin kayma gerilimi altındaki reolojik davranışı [91].

Kayma Kalınlaşması

Dilatant malzemeler olarak da bilinen bu akışkanlar, akma gerilimi göstermemesi nedeniyle kayma incelmeleri davranışı gösteren akışkan malzemelere benzer. Ancak artan kayma hızıyla viskozite değeri artmaktadır. Bu tip akış davranışı katıların konsantre süspansiyonlarında görülür ve niteliksel olarak şu şekilde açıklanabilir: Bir süspansiyon üzerinde herhangi bir kuvvet yokken, boşluk minimumdur ve mevcut olan boşluklar da akışkan tarafından doldurulur. Düşük kesme hızlarında maruz bırakılan sıvı, bir parçacığın diğerini geçme hareketini kolaylaştırır ve ortaya çıkan gerilmeler düşüktür. Yüksek kesme hızlarında ise katıların yoğun bir şekilde bulunma durumu bozulur ve malzeme hafifçe genişler ve boşlukta bir artışa neden olur. Dolayısıyla, mevcut sıvı miktarı artık katı bir parçacığın hareketini kolaylaştırmak için yeterli değildir ve sonuçta meydana gelen katı katı sürtünme, streslerin hızla artmasına neden olur ve bu da viskozitede artışa neden olur. Bu etkiler sadece yüksek konsantrasyonlu süspansiyonlarda ve yüksek kayma hızlarında gözlemlenebilir. Pirinç nişastası süspansiyonları dilatant davranışı için de benzer mekanizma oluşmaktadır. Bu durum 1949 yılında Andrade ve Fox tarafından tarif edilmiştir. Dilatant terimi, kayma oranıyla viskozitede bir artış gösteren diğer tüm sıvılar için de kullanılmaktadır (Şekil 1.20) [92].

Kimya ve işleme endüstrilerinde çok fazla kullanılmaması nedeniyle kayma sertleşmesi davranışı çok fazla dikkat çekmemiştir. Bu nedenle literatürde dilatant

davranışı gösteren az sayıda güvenilir veri bulunmaktadır. Son yıllarda, aşırı yüklü sistemlerin işlenmesinin öneminin artmasıyla, dilatant davranışı incelemeye olan ilgi artmıştır [75]. Dilatant davranışı sergileyen sistemlerin tipik örnekleri arasında TiO_2 -su süspansiyonları [93], mısır unu-su süspansiyonları [94-95], kil süspansiyonları bulunmaktadır. Yakın zamanda, uygun koşullar altında, gliserol-su karışımlarında bazı polimerlerin (kısmen hidrolize poliakrilamid gibi) çözeltilerinin yüksek kesme hızlarında belirgin kayma kalınlaşma davranışı sergilediği gösterilmiştir [96-97]. Son yıllarda, seyreltik polimer çözeltilerinin Brownian dinamiği hesaplamaları kullanılarak kayma kalınlaşması davranışı açıklanmaya çalışılmıştır [94]. Yakın zamanda yapılan bir araştırma bu alandaki faaliyetlere gıda maddeleri ve biyopolimerlere özel atıfta bulunarak genel bir bakış sunmaktadır [95]. Ayrıca; tehlikeli bölgelerde özellikle de askeri kıyafetlerde; ince, hafif, esnek, dayanımı yüksek ve üretim maliyeti düşük özelliklere sahip olmasından dolayı Amerikan Ordu Araştırma Laboratuvarında bu akışkanın zırh olarak denemeleri yapılmıştır [96].



Şekil 1.17. Kayma gerilimi mekanizması [96].

Yüksek konsantrasyonlu kolloidal süspansiyonların, kayma hızının artmasıyla birlikte viskozitleri artar ve bu duruma kayma kalınlaşması denir. Yüksek katkı maddeli bu tip akışkanlarda, kritik bir kayma gerilmesinde viskozite de büyük bir sıçrama ile artar ve süreksiz kalınlaşma meydana gelebilir. Öte yandan, daha düşük hacimli konsantrasyonlarda ve daha düşük gerilimlerde genellikle daha sürekli bir artış rapor edilmektedir [98-99]. Tekil dağılımlı (monodisperse) küresel

parçacıkların kolloidleri dahil olmak üzere birçok farklı karışımlarda kayma kalınlaşması görülebilir. Kayma kalınlaşmasını kontrol eden önemli parametreler; parçacık boyutu dağılımı, parçacık hacim fraksiyonu, parçacık şekli, parçacık-parçacık etkileşimleri ve asılı fazın viskozitesi ile deformasyonun tipi, oranı ve zamanıdır. Bu parametrelerin tümü incelenerek literatüre sunulmuştur [100]. Bu yapının incelenmesi ve üretilmesi teknolojik açıdan önem arz etse de geçmişte bununla ilgili çok fazla çalışma yapılmamıştır [101].

Kayma kalınlaşmasının başlangıç süspansiyon içindeki yapısal bir değişiklikle ilişkili olduğu keşfedilmiştir. Bazı durumlarda süreksiz veya kritik dilatanlık olarak bilinen bu fenomen, kayma hızı veya kayma geriliminin bir fonksiyonu olarak viskozitede ani bir artış gösteren bir malzeme karakteridir. Kayma kalınlaşmasının başlangıcında mikroyapıda değişiklik oluşmaktadır. Farklı süspansiyon tiplerinde de bu durum gözlemlenmiştir [75, 102].

Kayma kalınlaşma mekanizmasını açıklamak için literatüre çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bugüne kadar, bu akışkanların davranışını açıklamak için iki farklı mekanizma önerilmiştir. Bunlar; düzen-düzensizlik teorisi ve kümelenme (hydrocluster theory) teorisidir. Tüm bu mekanizma yapısal geçişlerden oluşmaktadır. Süreksiz kayma kalınlaşma davranışı sırasında, kritik kayma hızındaki akışkanın tepkisinin incelenmesi ilk zamanlarda oldukça zordu. Bunun sebebi çoğu reometrenin, uygulanan deformasyon hızının kontrol edilmesiyle çalıştırılmasıdır. Gelişen teknoloji ile beraber, stres kontrollü reometrelerin iyileştirilmesi, küçük açılı nötron saçılması ve reo optik cihazlarla kolloidal dispersiyonların mikro yapısını karakterize edebilen ek teknikler yardımıyla bu yapıların karakterizasyonları kolaylaşmıştır. Bu sayede, kayma kalınlaşması fenomeni ve mikro yapıların anlaşılması sağlanmıştır [103]. Ayrıca Stokesian Dinamiği teknikleri de süspansiyonlarda oluşan kayma kalınlaşması davranışını anlamak için kullanılmıştır [104, 105].

Hoffman, kayma kalınlaşması mekanizmasını literatüre sunan ilk kişidir. Tekil dağılım dioktil ftalat içerisindeki polivinil klorür kürelerinin, viskozitesinde kayma kalınlaşması davranışına sahip olduğunu keşfetti. Ayrıca etilen glikol içerisinde (poli) stiren-akrilonitril, polistiren ve polivinil tolüen gibi farklı kimyasal süspansiyonları ile de benzer sonuçlar elde ettiğini gözlemlenmiştir. Bu

durumda akış eğrisi, belirli bir kritik kayma hızında viskozitede ani bir sıçrama göstermektedir. Bu artış yüz kat kadar olabilir ayrıca kayma kalınlaşması sürekli ya da süresiz olabilir. Kayma kalınlaşmasına eşlik eden bir düzensizlik geçişine ilişkin deneysel kanıtlar, küçük açılı ışık saçılması (SALS) ile karakterize edilmektedir [102].

Boersma ve arkadaşları yeni bir model geliştirmek için kayma kalınlaşması mekanizmasına odaklanmıştır. Kayma kalınlaşmasının, düzen-düzensizlik geçişinin bir sonucu olduğu varsayımına dayanarak, kalınlaşma için kritik kesme hızının, eşleşmiş parçacıklar üzerinde etkili olan elektrostatik ve kayma kuvvetleri arasındaki dengeden elde edilebileceğini önermişlerdir. Hoffman'ın orjinal analizini de basitleştirmişlerdir. Bu model, kritik kayma hızının doğru bir tahminini sağlayarak, bir düzensizlik geçişinin kayma kalınlaşmasını tetiklediğinin kanıtı olarak kabul edilmiştir [75].

Kayma kalınlaşması davranışını açıklayan bir diğer mekanizma kümelenme teorisidir. Bu fenomenin hidrodinamik temelini kanıtlamak için reo optik deneyler ve stres altında reolojik ölçümler yapılmalıdır. Ek olarak, kaymaya bağlı mikroyapının küçük açılı nötron saçılımı (SANS) ölçümlerinde, kayma kalınlaşmasını destekleyen hidroküster oluşumu ile niteliksel olarak tutarlı bir mikroyapı oluşumu görülmektedir. Bu teori ilk olarak Brady tarafından Skosian Dynamics simülasyonları sayesinde fark edilmiştir [106].

Kayma kalınlaşması durumunun, bu süspansiyondaki tüm koloidal kuvvetlere hükmeden bir hidrodinamik kümeler ve hidrodinamik kayma kuvvetlerinin oluşumu ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Bu durum, reo optik deneyler ile kanıtlanır [104]. Hem kayma incelmesi hem de kayma kalınlaşması bölgesindeki akışkan mikro yapısını araştırmak için SANS karakterizasyon yöntemi kullanılmıştır [105].

Bender ve Wagner, yüklü parçacıkların bazı dispersiyonlarının hazırlanması sırasında düzen-düzensizlik geçişinin gerçekleşebilmesine rağmen, düzen-düzensizlik geçişlerinin kayma kalınlaşmasını açıklamak için yetersiz olduğunu ileri sürmüştür. Hem hidrodinamik küme teorisi hem de Hoffman'ın teorisi, hidrodinamik etkileşimlerin kayma kalınlaşması geçişini açıklamak için en uygun teoriler olduğunu bildirmiştir [104].

Frith ve arkadaşları, kayma kalınlaşmasının, parçacık yüzeyinin yapısından büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Parçacık-parçacık etkileşimleri, parçacık yüzeyinin yapısına ve kimyasına bağlıdır. Kayma kalınlaşması, hidrodinamik kuvvetler, Brownian, sterik veya elektrostatik kuvvetler ile güçlü dengeleme kuvvetlerinin etkisi ile oluşur [103].

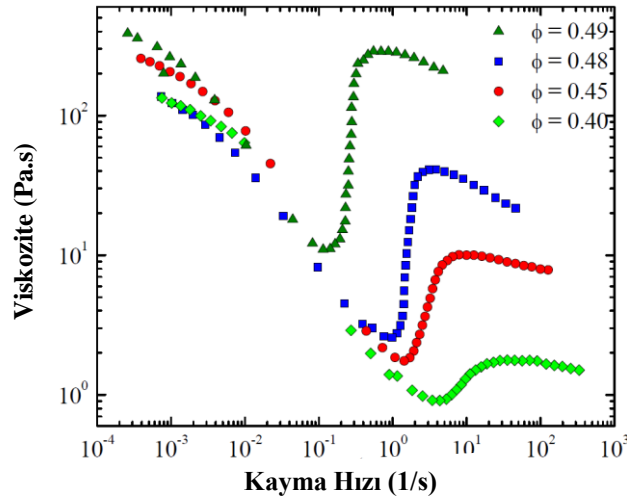
Kayma sertleşmesi elde etmek için farklı fiziksel ve kimyasal özellikler ön plana çıkmaktadır. Bunlar; parçacık büyüklüğü ve dağılımı, parçacık şekli, yoğunluğu, pürüzlülüğü ve bazı durumlarda parçacık yüzeyi ile taşıyıcı sıvı arasındaki kimyasal etkileşimi gibi özelliklerdir. Ayrıca akışkanın vizkozitesini ve kayma hızını etkileyen farklı faktörler vardır. Bunlar, parçacık boyutu, boyut dağılımı, şekli, parçacık-parçacık etkileşimi ve parçacıkların hacim oranıdır [107]. Maranzano ve Wagner, tersinir kayma kalınlaşmasının başlamasının, kritik bir gerilimde dispersiyonun partikül büyüklüğüne, konsantrasyonuna, polidispersitesine ve parçacıklar arası etkileşime bağlı olduğunu göstermiştir [108].

Partikül Hacim Oranı

Tersinir kayma kalınlaşmasını etkileyen en önemli parametrelerden biri, süspansiyondaki parçacık hacim oranı veya konsantrasyonudur. Bu parametrenin etkisi, özellikle sıvı zırh üretimi alanında yaygın olarak incelenmiştir. Çünkü önemli bir kalınlaşma elde etmek için bir KKA'nın mevcut maksimum hacim oranını belirlemek önemlidir. Daha eski çalışmalarda, kayma kalınlaşmasının başlaması için gerekli hacim oranının 0.50 olduğu gösterilmiştir. Fakat bu bir kural değildir ve dispersiyondan dispersiyona değişebilir. Kayma kalınlaşmasının gerçekleşmesi için gereken tek şey, parçacıkların birbirleriyle temas etmeleri, diğer bir deyişle birbirlerinin varlığını hissetmeleri gerektiğidir. Parçacıklar birbirlerine daha yakında durduklarında birbirlerinin kuvvet alanlarını, dolayısıyla etkileşim alanlarını etkilerler. Ayrıca, kayma kuvveti altında sürtünme kuvvetinin artmasına da neden olurlar. Şekil 1.21, parçacık hacim oranı, kayma kalınlaşmasının başladığı viskozite değerini ve kritik kayma hızı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

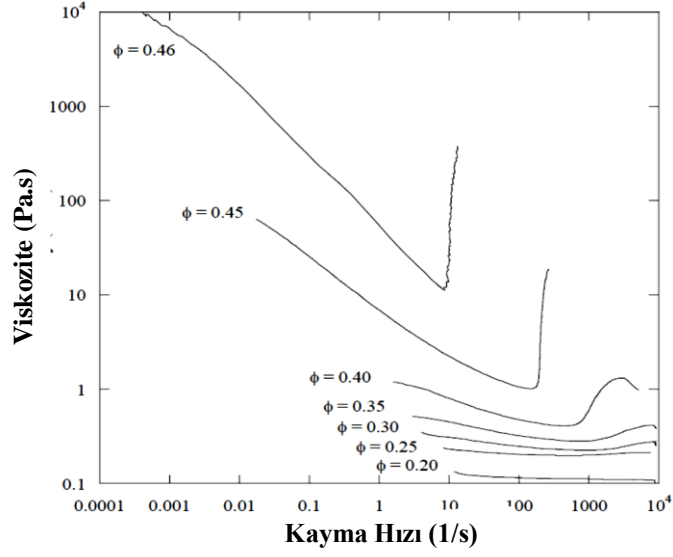
Kalman ve arkadaşları (2007) nispeten monodispers poli-metil metakrilatın (PMMA) katkı oranının kayma kalınlaştırma davranışı üzerindeki etkisini

incelemişlerdir. Bu çalışmada, PMMA parçacıkları, metanol-su karışımı ile sentezlenmiş ve ortam sıvısı olarak 200 g/mol moleküler ağırlığa sahip Poli-etil glikol (PEG) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada, tersinir kayma kalınlaşması gözlenmiştir. Herbir parçacık hacim oranında kritik kayma hızı noktasında bir kalınlaşma gözlenmiştir. Kayma kalınlaşması bölgesindeki viskozite değişikliğinin büyüklüğü yavaş yavaş artmıştır. Ayrıca, parçacık hacim oranı arttırıldığında kritik kayma hızı değerine daha erken ulaşılmıştır [109].



Şekil 1.18. Kayma sertleşmesinin eklenen polimetilmetakrilat oranına göre değişimi [109].

Wetzel ve arkadaşları, deneylerinde parçacık yükünün artmasıyla kayma kalınlaşması özelliğinin arttığını göstermiştir. Çeşitli oranlarda küresel silika ve PEG 200 kullanılan bu çalışmada, Kalman ve Wetzel çözeltideki partiküllerin hacim oranı arttıkça, kayma kalınlaşması etkisinin daha çarpıcı bir şekilde gözlemlendiğini ve kayma kalınlaşma geçişinin daha erken başladığını tespit etmişlerdir. Bu durum kümelenme oluşum kolaylığı ile ilişkilendirilir. Bu çalışmanın dikkate değer bir noktası da, bir kayma kalınlaşması gözlemlenmek için % 50'ye yakın çok yüksek partikül hacim oranına gerek olmamasıdır. %25 ve hatta bu değer altında da kayma kalınlaşması gözlemlenmiştir (Şekil 1.22.). Daha önce belirtildiği gibi, bir kayma kalınlaştırma etkisi elde etmek için gereken parçacık hacminin dağılımı dispersiyondan dispersiyona farklılık gösterir. Partikül hacim oranı parametresi, parçacık boyutu ve boyut dağılımı gibi diğer parametrelerle de ilişkili olduğundan, KKA'ların reolojik davranışı üzerinde bireysel bir etkisi vardır. Bununla birlikte, tüm faktörlerin kombinasyonu genel davranışı belirler [110].



Şekil 1.19. Küresel silikanın değişen katkı oranının artması ile viskozitede meydana gelen değişim [110].

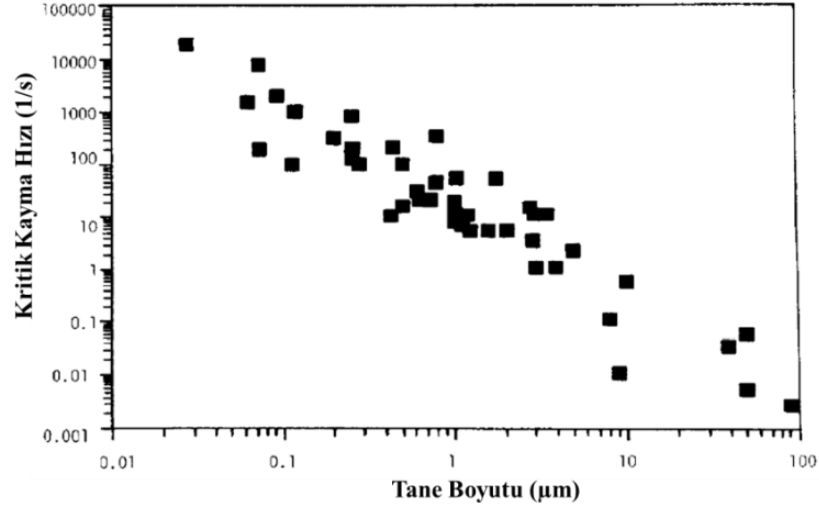
Genel olarak literatürdeki çalışmalara dayanarak, dolgu maddesi taneciklerinin hacim oranı arttıkça kayma kalınlaşmasının daha belirgin hale geldiği sonucuna varılabilir. Bunun sonucunda dağılımın genel viskozitesi daha yüksek bir sıçrama ile artmakta ve bu kayma kalınlaşması üzerindeki kritik kayma gerilimi ve kayma hızı daha erken gözlemlenmeye başlanmaktadır [111, 112].

Partikül Tane Boyutunun Etkisi

KKA'ların reolojik tepkileri, kayma kuvveti ile kalınlaşan koloidal dispersiyonların içerisinde ki partiküllerin boyutuna da bağlıdır. Barnes ve Hoffman, parçacık boyutundaki artışın kayma kalınlaşmasının başlaması ile ters orantılı olduğunu ve bu artışın kritik kayma hızını daha düşük değerlere taşıdığını belirtmişlerdir (Şekil 1.23) [94-95, 113].

Literatürdeki bazı çalışmalar Barnes ve Hoffman tarafından öne sürülen bu ifadenin tersini ileri sürmektedir. Zhang ve arkadaşları %30, %40 ve %50 hacim oranlarında etilen glikol içerisinde 1-5 μm boyutunda bulunan silika tozlar ve 14 nm tanecik boyutunda füme silika partiküllerinin kaymaya bağlı reolojik özellikleri üzerindeki partikül büyüklüğü etkisini araştırmışlardır. KKA'lar; silika partiküllerine belirli sıvılar ilave edilerek hazırlanmış ve 1 saat boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Elde edilen süspansiyonların kabarcıklarının giderilmesi için vakum işlemi uygulanmıştır. Literatürde elde edilen bilgilerin aksine, büyük parçacıkların 1000 s^{-1} kayma hızına kadar kayda değer kalınlaşma etkisi

göstermemektedir. Hacim oranı arttıkça, kalınlaşma küçük silika parçacıkları içeren KKA için viskozitede ani bir sıçrama ile gözlemlenmiştir [111].



Şekil 1.20. Tane boyutunun kayma hızına etkisi [100].

Hassan ve arkadaşları partikül büyüklüğü sırasıyla 15 ve 200 nm büyüklüğe sahip küresel toz silika nano parçacıkların reolojik davranışlarını gözlemlenmiştir [9]. Parçacıklar, 200 g/mol moleküler ağırlığa sahip olan polietilen glikol içinde dağılmıştır ve solvent olarak ayrıca etil alkol kullanılmıştır. Silikanın homojen dağılımını sağlamak için, yüksek yoğunluklu ultrasonik karıştırma yöntemi yardımıyla, ağırlıkça % 38 ve % 52 oranlarında KKA sentezlenmiştir. Daha sonra solvent, yaklaşık 100 °C'de ısıtılarak bir buharlaştırma işlemiyle ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Sonuç olarak; 200 nm büyüklüğünde silika kullanılarak hazırlanan numune, herhangi bir kayma kalınlaşması sergilememiş, bunun yerine, ~ 2-20 s⁻¹ kayma hızı aralığında kayma incelmeleri davranışı gözlemlenmiştir. Öte yandan, daha küçük boyutlu silika parçacıkları kayma kalınlaşması sergilemiş ve viskozite 2 Pa.s'den 3,3 Pa.s'ye çıkmıştır [9].

Partiküllerin Boyut Dağılımı

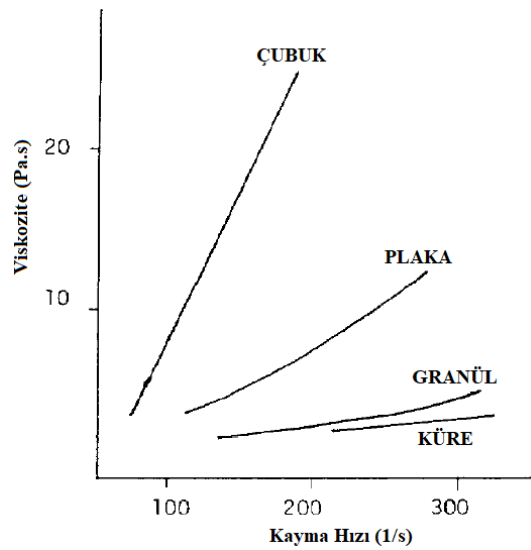
Kayma kalınlaşmasını etkileyen diğer bir parametre kolloidal dispersiyonlar içindeki partiküllerin boyut dağılımıdır. Çeşitli büyüklükteki parçacıklardan oluşan kümeler daha etkili bir şekilde paketlenir. Daha küçük parçacıklar, daha büyük parçacıkların arasındaki boşlukları kayma gerilimi altında doldurduklarından, daha büyük parçacıkların akışı için bir yağlayıcı görevi görürler ve bu da toplam viskozitede bir azalmaya neden olur. Bu durumda daha

yüksek viskoziteler elde etmek için, homojen parçacık yüklemesi daha yüksek olmalıdır. Öte yandan, aynı hacim oranında, çok yönlü ve monodisper akışkanlar birbiriyle karşılaştırıldığında, monodisper olan akışkan daha düşük kayma hızlarında çok daha yüksek kayma kalınlaşması sergilemiştir [114–116]. Sonuç olarak, parçacık boyutu dağılımı ne kadar geniş olursa, kritik kayma gerilimi o kadar yüksek ve daha az kayma kalınlaşması görülür.

Ek olarak, Bender ve Wagner, küçük ve büyük parçacıkların oranını artırarak kritik stresi kontrol edebildiklerini ve arttırabildiklerini göstermişlerdir. Çalışmalarında elektrostatik olarak stabilize edilmiş monodispers silika küreler kullanılmıştır [104].

Partikül Şeklinin Etkisi

KKA'larda parçacıkların şeklinin, kalınlaşma davranışı üzerinde önemli etkisi vardır. Çalışmalar çubuk şeklindeki parçacıkların plaka şeklindeki parçacıklarından daha etkili olduğunu göstermektedir. Çünkü çubuk şekilli parçacıklar akış yönünde hizalanma eğilimindedir ve çok daha fazla elastik davranış sergilerler. Küresel olmayan partiküller daha fazla enerji yayar ve bu da viskozitede daha büyük bir artışa neden olur. Bunun yanı sıra, anizotropik parçacıklar, küresel olmayan parçacıklardan daha düşük hacimli dispersiyonlarda kayma incelme etkisi göstermektedir. Küresel parçacıkların hacim oranı %30'un üzerinde ise incelme rejimi gösterirler (Şekil 1.24) [114–116].



Şekil 1.21. Tanecik şeklinin kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan üzerine etkisi [100].

Egres ve Wagner poli etilen glikol (PEG) içinde çubuk şeklinde kalsiyum karbonat parçacıkları kullanarak kayma kalınlaşması davranışını sağlamışlardır. Sonuç olarak, parçacık en-boy oranındaki artışın (2-7 arasında değişen oranlarda), küresel parçacıklara kıyasla çok daha düşük hacim oranlarında kayma kalınlaşması davranışı gözlemlenmiştir [117].

Partikül-Partikül Etkileşimi

Parçacıklar arasındaki etkileşimler, kolloidal dispersiyonların reolojik davranışlarını tahmin etmek açısından çok önemlidir. Kolloidal dispersiyonların stabilitesi, parçacıklar arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengesi ile kontrol edilir. Bu etkileşimler Van der Waals etkileşimleri gibi kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu etkileşimler kolloidal dispersiyonların mikroyapısal davranışlarını da belirlemektedir. Çökelmemiş parçacıklı, yani parçacıklar arasında genel bir çekim olmayan akışkanlar, kayma kalınlaştırıcı etki gösterirler, aksine çökelmiş parçacıklı akışkanlar ise yüksek kayma hızlarında incelme rejimine uğrarlar. Bir kayma kalınlaşması gözlemek için parçacıklar nötr olmalı veya birbirlerini elektrostatik, entropik veya sterik olarak itmeli [100].

Literatürde, yukarıda bahsedilen KKA'nın özelliklerini değiştirebilen faktörler incelenerek farklı reolojide KKA'lar sentezlendiği görülmüştür (Tablo 1.1). Sentezlenen KKA'lar aramid veya kompozit yapılar içerisine emdirilerek daha dayanıklı zırhlar üretilmiştir. Özellikle aramidlerin zayıf olduğu bilinen delinme direncinin KKA'lar ile büyük ölçüde artırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır [98–100].

Yapılan literatür araştırmasında da görüldüğü gibi (Tablo 1) KKA, günümüzde sıklıkla kurşun geçirmez malzemelerin eksikliklerini gidermek için farklı katkıları kullanılarak aramid gibi fiberli yapılara emdirilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde katkı malzemesi olarak genellikle silika nanopartiküllerin kullanıldığı görülmüştür. Farklı katkı malzemeleri ile silikanın karşılaştırıldığı pek çok makalede silika nanopartiküller daha iyi sonuçlar vermiştir [115], [126]–[131]. Ayrıca KKA malzemesini geliştirmek için silika ile beraber kullanılan silikon karbür, alüminyum oksit, boron karbür partikülleri ve selüloz nanofiber yapıları kullanılmıştır [114], [119], [121]. Bu çalışmalarda,

kullanılan silika nanopartikül boyutlarının ve şekillerinin, kayma gerilimi altında sertleşen akışkanın reolojisini doğrudan etkilediği belirtilmiştir.

Tablo 1.1. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan üretiminde kullanılan katkı malzemeleri

MALZEMELER	KATKI MALZEMELERİ	KAYNAK
1. KKA	1. Silika nanopartikül (500nm) 2. Selüloz nanofiber (175 nm)	[118]
1. Kevlar fabric - style 706 (Kevlar KM-2, 600 denier) 2. KKA	Silika nanopartikül (500 nm)	[119]
1. 3D örülü ortogonal aramid 2. KKA	Silika nanopartikül (100 nm)	[120]
1. KKA	1. Silika nanopartikül (400 nm) 2. SiC nanotel	[121]
1.UHMWPE Spectra Shield® and Gold Shield® 2. KKA	Silika nanopartikül (100 nm)	[122]
1. Örülü Kevlar 2. Epoksi 3. AA 5086-H32 Alüminyum 4. KKA	1. Alüminyum tozu 2. Gamma alümina 3. Silikon karbit 4. Kolloidal silika 5. Patates unu	[123]
1. KKA	1. Silikon karbit (1.114 µm) 2. Alüminyum oksit (0.98 µm) 3. Boron karbit (1.006 µm) 4. Füme silika(20 nm)	[124]
1. P-aramid (Technora) 2. p-aramid (Kevlar) 3. UHMWPE 4. KKa	Silika nanopartikül (100 nm)	[125]
1. Kevlar Twaron 2. KKA	Hidrofilik isli silika nanopartikül (12 nm)	[126]
1. Alüminyum 5086-H32 alaşım 2. Kevlar 3. Epoksi reçine 4. KKA	Kuartz nanopartikül	[127]
1. Twaron Kevlar T717 2. KKA	Füme silika nanopartikül (12 nm)	[128]
1. KKA	1. Silikon karbit (5 µm) 2. Silikon Dioksit (1 µm) 3. Mısır unu (10 µm)	[129]

1. Kevlar 2. KKA	Silika nanopartikül (100 nm)	[115]
1. Örölmüş Kevlar 2. KKA	Küresel silika nanopartikül (100 nm)	[130]
1. Örölü cam elyaf 2. KKA	Silika nanopartikül (12 nm)	[131]
1.Kevlar 2. KKA	Silika nanopartikül (343 nm)	[116]
1.Kevlar 2.Naylon kumaş 3. KKA	Silika nanopartikül (15 nm)	[9]
1. Kevlar 2. KKA	1. Silika (50 nm) 2. Amorf silika (7 nm)	[132]
1. Kevlar (Hexcel-Schwebel style 706) 2. KKA	1. Kaolin kil partikülleri (500nm) 2. Küresel silika (450 nm)	[133]
1. Kevlar (Hexcel Schwebel Style 706) 2. KKA	1. Kolloidal silika (450 nm)	[5]

Gürgen ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada 20 nm silika nanopartiküller ile sentezledikleri KKA'da, silikon karbür, alüminyum oksit ve boron karbür partiküllerini katkı malzemesi olarak kullanmıştır. Bu çalışmada farklı seramik partiküller ile modifiye edilen KKA'larda viskozitesi en yüksek karışım boron karbür ile yapılan karışımla elde edilmiştir fakat Newtonsal olmayan akışkan davranışı gösterememiştir. Bunun nedeni boron karbürün öz kütlelerinin diğer katkı malzemelerine göre düşük olması ve hacimsel oranda hazırlanan karışımda yapıya daha fazla boron karbürün girmesidir. Ayrıca yapılan reoloji testinde sıcaklığın da önemi ortaya çıkmıştır. Sıcaklık düştükçe viskozitenin arttığı görölmüştür. Fakat KKA'ya eklenen katkı malzemeleri kayma hızını arttıramamıştır [124].

Ghosh ve arkadaşları, 500 nm boyutunda silika nanopartiküller kullanarak hazırladıkları KKA'nın içerisine 150-200 nm çapında selüloz nanofiberler katkılanmışlardır. Yapıya eklenen selüloz nanofiberler kayma hızını belirgin bir şekilde etkilemiştir. Fibersiz KKA'nın kayma hızı 33.45 s^{-1} iken yapıya eklenen fiberler sayesinde $14,8 \text{ s}^{-1}$ değerine düşmüştür. Ayrıca viskozite değeri de 36,8

Pa.s den 139 Pa.s değerine kadar yükselmiştir. Bunun sebebi kayma gerilimi altında kümelenen nanoboyuttaki silikalar ile beraber yapıda bulunan fiberlerin de kümelenerek sentezlenen akışkanın viskozite değerini arttırması, ve KKA'nın kayma hızının azaltmış olmasıdır [118].

2016 yılında Albuja ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kompozit bir malzeme olarak hazırlanan Alüminyum-Epoksi-Kevlar içerisine 200-300 nm büyüklüğünde silika kullanılarak hazırlanan KKA emdirilerek NIJ 0108.01 standartına uygun balistik test yapılmıştır. Uygulanan balistik testte KKA katkılı kompozit yapı, 685 J enerji absorblarken KKA katkısı olmayan kompozitin 507 J'lük bir enerji absorbe ettiği tespit edilmiş böylece KKA'lı yapıda %5 daha fazla verim alınması sağlanmıştır [127].

Rosen ve arkadaşları 2007 yılında, 500 nm boyutunda kaolin ve 450 nm silika nanopartiküller kullanarak KKA sentezlemiştir. Sentezlenen akışkanlardan kaolin katkılı KKA, devamlı kayma gerilimi altında sertleşme özelliği gösterirken silika katkılı KKA, devamsız kayma gerilimi altında sertleşme özelliği göstermektedir. Bu akışkanlar örgü yapılı kevlar kumaşa emdirilerek balistik testler yapılmıştır. NIJ 0115.0. standardına göre yapılan iğne ve bıçak batırma testinde silika katkılı KKA-Kevlar yapısı katkısız kevlarlara göre çok daha üstün bir performans göstererek, Silika katkılı KKA-Kevlar 810 J, Kaolin katkılı-Kevlar 760 J, Katkısız Kevlar 150 J enerji absorbe etmiştir [133].

Bu tez çalışmasında üretilecek olan nanokompozit yapının benzerine, yapılan literatür araştırması sırasında rastlanmamıştır. Kullanılacak ana malzeme olan grafen köpüğün kanalları içerisine kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan enjekte edilerek nanokompozit bir yapı oluşturulacaktır. Grafen köpüğün üstün mekanik özelliği ve esnek yapısı, yüksek darbe dayanımına sahip olan kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkan ile birleştirilerek şok emici uygulamalarda kullanılabilir yeni nesil bir nanokompozit üretimi yapılacaktır. Son olarak bu akışkan nanokompozit yapı, alttan ve üstten poli-dimetilsiloksan ile lamine edilerek tek parça ve bütün bir laminar nanokompozit yapı elde edilecektir. Gerektiğinde bu laminar tabakaların sayısı arttırılarak istenilen şok emici değerlere sahip çok katmanlı bir malzeme elde edilmesi öngörülmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Malzemeler ve Method

Bu tez çalışmasında, literatür araştırması kısmında belirtilen fiziksel ve kimyasal etkiler gözönünde bulundurularak KKA sentezi için üç farklı malzeme seçilmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda KKA sentezi yapan birçok araştırmacının koloidal yapı içerisinde dağılan katı malzeme olarak silika nanopartiküller kullandıkları tespit edilmiş olup Tablo 2.1’de özellikleri belirtilen Aerosil R-972 (Kale Kimya) marka füme silika nanopartiküller kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Silika nanopartikülün karakteristik özellikleri [134].

Silika Nanopartikülün Karakteristik Verileri		
Özellikleri	Birim	Değer
Yüzey alanı	m ² /g	90-130
pH değeri		3.6-5.5
Karbon içeriği	%	0.6-1.2
Sıkıştırılmış yoğunluk	g/l	~ 50
SiO ₂ içeriği	%	>99.8

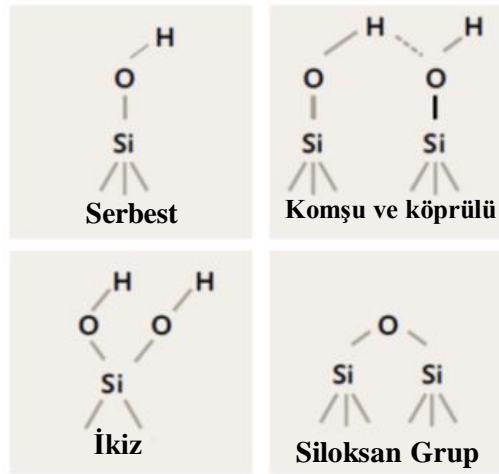
Koloidal yapının dağıtıcı fazı olarak silika nanopartikülleri askıda tutmayı sağlayan, toksik olmaması, termal stabilitesi ve yüksek miktarlarda üretim için kullanışlı olması nedenleriyle bir çok bilim insanı tarafından da tercih edilen PEG (Poli Etilen Glikol / MA:200 g/mol / PEG200-SigmaAldrich) kullanılmıştır. Kullanılan PEG’in özellikleri Tablo 2.2’de belirtilmiştir. Son olarak, Silika ve PEG’in homejen olarak dağılması amacıyla çözügen olarak etanol kullanılmıştır.

Tablo 2.2. Poly-Etil Glikolün Karakteristik Özellikleri (Sigma Aldrich)

Poly-Etil Glikolün Karakteristik Özellikleri		
Özellikler	Birim	Değer
Moleküler ağırlık	kg/mol	200
Buhar basıncı	hPa	<0.01
pH		5-7
Kaynama noktası	°C	>150 °C
Çözünürlük	g/L	70
Yoğunluk	g/cm ³	1.124

2.1.1 Füme silika nanopartiküller

Füme silika nanopartiküller, darbeye dayanıklı malzemelerin üretiminde kaplama, takviye elemanı veya KKA üretimi gibi endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Silika nanopartiküller alev sprej piroliz işlemi ile üretilebilir. Bu yöntemde, metan/oksijen gazı alevi içindeki tetraetil ortosilikat öncü malzemesi yanarak silika nanopartikülleri oluşturur. Silikanın, zincir benzeri morfolojisi ve yüzey kimyası nedeniyle birincil tanecikler hidrojen bağı yoluyla birbirine bağlanır ve ağısı bir yapı oluşur. İşlenmemiş füme silika, yüksek yüzey alanına ve çok düşük kütle yoğunluğuna sahip anamorfik ve hidrofilik bir malzemedir. Hidrofilik özelliği, yüzeyinin yaklaşık %40'ını kaplayan hidroksil (-OH) grupları tarafından sağlanmaktadır. Bu gruplar ayrıca füme silikaya eşsiz kayma kalınlaşması özelliğini sağlar. Füme silika yüzeyinde kalan gruplar siloksan ve silanol gruplardır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Silikanın farklı yüzey yapıları [135].

2.1.2 Poli-etilen glikol (PEG)

KKA'lar temel olarak bir dolgu malzemesi ve bir taşıyıcı akışkandan oluşur. Taşıyıcı akışkanların eklenmesi, KKA'ların reolojik özelliklerini kontrol etmek için önemli bir parametredir. Sıvı polimerler dolgu malzemesinin yüzeyine adsorbe olma özelliğine sahiptir. Adsorpsiyonlar, kolloidlerin hidrodinamik çapının artması ve nihai süspansiyonun viskoz yapısı ile sonuçlanır, bu nedenle kolloidal dispersiyonların stabilitesini sağlamak için en yaygın kullanılan taşıyıcılar sıvı polimerlerdir. Dolgu malzemesinin polimer kaplaması, kayma kalınlaştırıcı kolloidal dispersiyonlardaki hidrodinamik kuvvetleri ve parçacıklar arası itici kuvvetleri değiştirerek kayma kalınlaşmasının başlaması için kritik kayma gerilmesinin değiştirilmesine yardımcı olur [136]. Polimer kaplı parçacıklar arasında itme kuvvetleri etkindir. Uygulanan kayma kuvveti, polimer tabakasının varlığı nedeniyle gelişen itici kuvveti dengeler.

Bu tez çalışmasında, taşıyıcı sıvı olarak PEG seçilmiştir. PEG, 200 ila 20000 g/mol molekül ağırlığı aralığında ticari olarak temin edilebilen suda çözünür, sentetik polar bir organik bileşiktir. Aynı zamanda, toksik olmayan ve kullanımı kolay, termal olarak kararlı ve toplu üretim için yüksek miktarlarda kolayca temin edilebilir bir kimyasaldır [137]. PEG'in moleküler formülü $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$ 'dir.

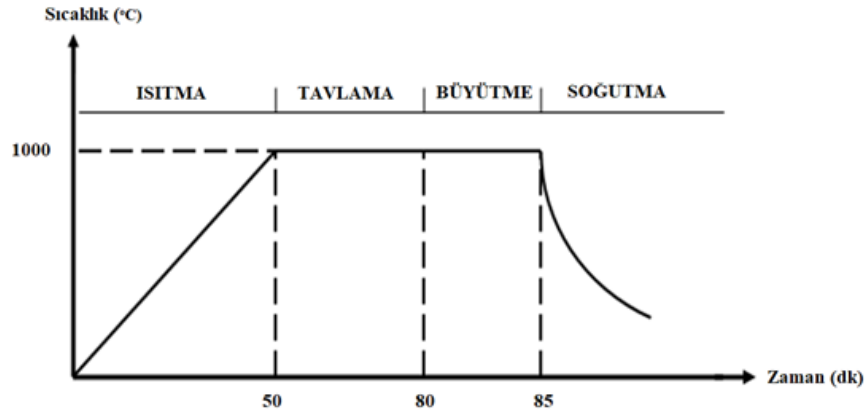
2.2 Malzeme Üretimi

2.2.1 Grafen köpük sentezi

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile köpük şeklinde iki boyutlu grafen iskeleti oluşturabilmek için tercih edilen altlık malzemesi büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda köpük şeklinde iki boyutlu grafen üretimi için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle nikel altlığın kullanıldığı görülmektedir [47, 138–140]. Grafen köpük yapısının sentezi için KBB reaktörü içerisine nikel köpük altlık konularak argon (1000 sccm) ile hidrojen (10 sccm) gazları ortama salınmıştır. Ortam sıcaklığı nikelin ergime noktasına yakın bir sıcaklık olan 1000 °C'ye getirilerek bu sıcaklıkta nikel 30 dakika ısıl işlem uygulanmış, hem nikelin temizlenmesi hem de tane sınırlarının genişletilerek daha kaliteli grafen

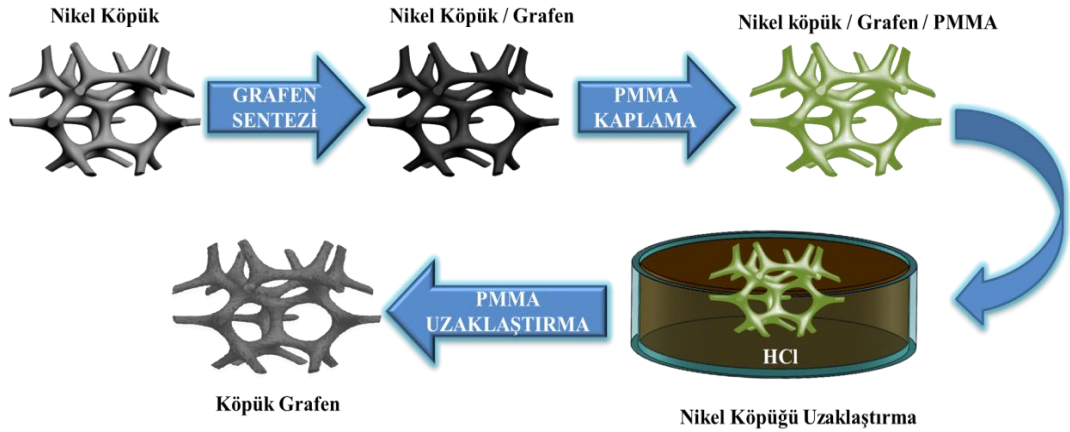
sentezlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra ortama salınan metan gazının (20 sccm) yüksek sıcaklıkta ayrışmasıyla karbon radikallerini meydana getirmesi sağlanmıştır. Kimyasal gazlar kapalı ortam içerisinde ve nikel yüzeyinde elementel bir gaz bulutu oluşturur, bu gaz bulutu içinde nikelin karbon çözücülüğü sayesinde yüzeye yaklaştıkça artan konsantrasyonlar da karbon-nikel alaşımları oluşur ve belli süre sonunda sıcaklığın belli hızlarda düşürülmesi neticesinde karbon atomları yüksek sıcaklıktaki iç katmanlardan daha düşük sıcaklıktaki dış yüzeye doğru difüze olurlar. Yüzeye ulaşan karbon atomları en düşük enerji seviyesine geçmek için, komşu karbon atomlarıyla sp^2 hibritleşmesi ile bağlanarak grafenin bal peteği formunu meydana getirirler. Bu işlem küçük grafen öbeklerinin diğer öbeklenmeler ile birleşmeleriyle Ni yüzeyinin tamamı kaplanıncaya kadar devam ederek tümleşik bir grafen film meydana getirilir (Şekil 2.2).

Karbon, nikel yüzeyindeki farklı dizilimlerde olan çekirdeklere farklı konsantrasyonlarda çözünme göstermesinden dolayı, nikel yüzeyinde elde edilen grafen filmin altındaki nikel çekirdeğine göre, farklı sayıda grafen tabakaları oluşturabilir. Fakat bu farklılıklar ve yüzeysel kusurlar gaz oranlarının ayarlanması ile en aza indirgenebilir. Ayrıca, bakır yüzeylerde elde edilen tek katmanlı grafene göre, yüzeysel kusurların diğer katmanlar ile giderilmesiyle, daha iyi mekanik dayanım elde edilebilmektedir. Bu bilgiler ışığında, yüksek saflıktaki nikel köpük altlıklar üzerine İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde mevcut KBB reaktörü (PROTECH- PT-O1200-60IIC-4C CVD Furnace) kullanılarak grafen tabakalar büyütülmüştür.



Şekil 2.2. Grafen köpük sentezleme süreç grafiği.

Kaplama işlemi sonucunda elde edilen numuneler uygun şekillerde kesilerek poli metilmetakrilat (PMMA) çözeltisi ile kaplanır. Bu işlem gözenekli grafen yapısının korunması için gereklidir. CVD yöntemi ile üretilen grafen ve PMMA kaplama işlemini takiben üretilmesi hedeflenen köpük şeklinde iki boyutlu grafen yapısına ulaşmak için seçici dağılama işlemiyle nikel yapıdan uzaklaştırılmıştır. Bu işlem Ni/GK/PMMA yapısını, hidroklorik asit (HCl) içerisine daldırılarak 50°C’de bir gece beklenilerek uygulanmıştır. Elde edilen yapıdaki asidik kirlilikten kurtulmak için üç aşamalı temizlik işlemi uygulanır. KG/PMMA yapısı bol miktarda saf su içerisine daldırılarak 15 dk beklenmiş ve bu işlem 3 kez tekrarlanmıştır. Bu işlemin devamında 50 °C sıcaklıktaki aseton içerisinde 20 dakika bekletilerek PMMA’nın da yapıdan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu sayede köpük şeklinde grafen köpük (GK) iskeleti elde edilmiştir [47]. Ardından elde edilen iki boyutlu grafen yapısı tekrar saf su ile temizlenir (Şekil 2.3). Bu işlemlerin sonunda sentezlenen grafene karakterizasyon işlemleri uygulanarak katman sayısı, kristalinitesi gibi özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Grafenin bu gibi özelliklerini belirlemek için Raman spektroskopisi, X-ışını difraktometresi (XRD) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları ile karakterizasyon testleri yapılmıştır.

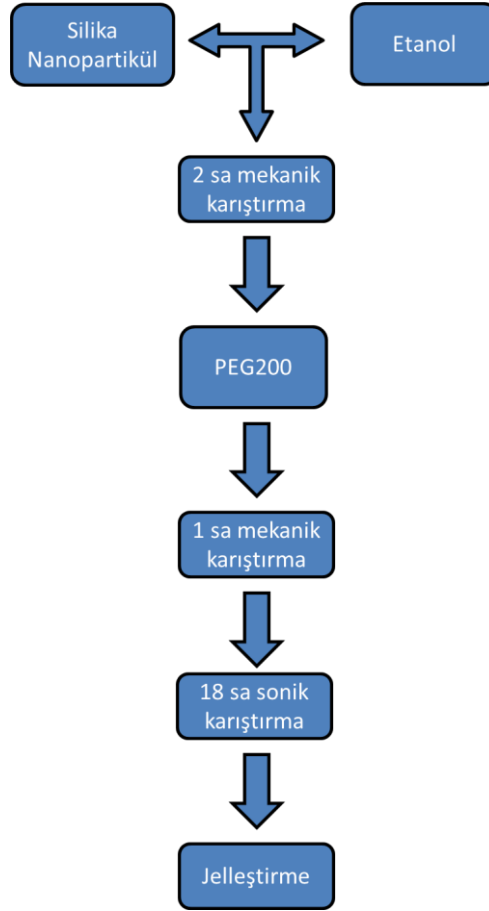


Şekil 2.3. İki boyutlu grafen köpüğün transfer işlemi.

2.2.2 Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın üretim yöntemi

KKA’lar koloidal bir çözelti olup bir dağıtan bir de dağılan malzemelerden oluşmaktadır. Yapılan literatür araştırmasında görülmüştür ki bu koloidal yapı mekanik ve sonik karıştırma yöntemleri kullanılarak üretilmektedir [115, 127–

129]. Bu tez projesinde, KKA sentezi için füme silika ve 200 g/mol moleküler ağırlığa sahip PEG tercih edilmiştir.



şekil 2.4. Kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın üretim aşamaları.

Sentez işlemi, silika nanopartiküller de mevcut olan nemi uzaklaştırma işlemi ile başlatılmaktadır. Silika nanopartiküllerin doğası gereği nem tutan bir malzemedir. Bu nedenle bir gece boyunca 100 °C’lik vakumlu fırında silika nanopartiküller kurutulur. Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra fırın içerisinden çıkarılan silika nanopartiküller solvent olarak kullanılan etanol ile hızlı bir şekilde buluşturularak silika nanopartiküllerin tekrar nemlenmesinin önüne geçilir. Silika nanopartiküller etanol içerisinde çözünmesi için 300 rpm ile 2 saat karıştırılır. Sonrasında bu karışımın içerisine belirli oranda PEG eklenerek 1 saat daha karıştırılır. Mekanik olarak karıştırılan kimyasallar homojen bir yapıya ulaşması için 18 saat boyunca sonikatör (Hielscher UP400S; genlik %80, tekrar 2) ile karıştırılır. Bu işlem sonunda elde edilen homojen yapıdan, solvent olarak kullanılan etanol yavaşça uzaklaştırılır. Bunun için, homojen yapıdaki solüsyon içindeki etanol, kaynama

noktası olan 70 °C’de 200 rpm’de karıştırılarak etanol yapıdan yaklaşık 4 saatte uçurulur. Sonuç olarak PEG içerisinde yüzen silika nanopartiküllü koloidal bir karışım elde edilir (Şekil 2.4). Bu yöntem kullanılarak üç farklı oranda (ağırlıkça %30, %40, %50 ve %60) KKA’lar hazırlanmıştır (Tablo 2.3). Elde edilen bu karışımlara reolojik testler uygulanarak kayma gerilimi altında nasıl davrandıkları incelenmiştir. Reolojik testler kapsamında statik, frekans ve genlik testleri uygulanmıştır.

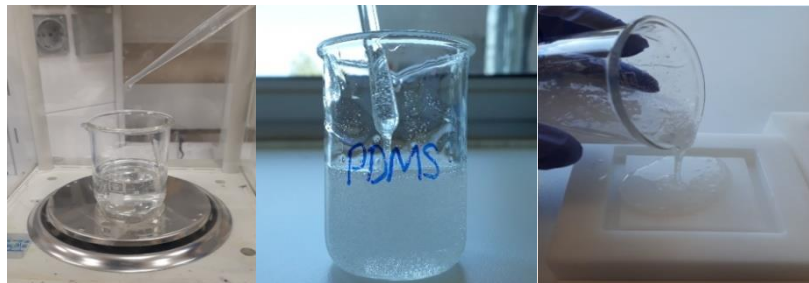
Tablo 2.3. Üretilen kayma gerilimi altında kalınlaşan akışkanın silika nanopartikül ve PEG oranları.

Numune Adı	Silika Nanopartikül Oranı (%)	PEG Oranı (%)
KKA-30	30	70
KKA-40	40	60
KKA-50	50	50
KKA-60	60	40

2.2.3 Polidimetilsiloksan sentezi

Bu tez çalışmasında üretilen son ürün PDMS’dir. PDMS kompozit malzemenin dış yapısını oluşturarak akışkan bir yapıda olan KKA’yı ve hassas bir yapıda olan GK yapılarının bir arada tutulmasını sağlamıştır. Bu işlemle kompozit yapının istenilen yere rahatça entegre edilebilir hale getirilmesi sağlanmıştır olacaktır.

PDMS (Dowsil, Silygard 184) hazır alınan bir kimyasal olmasına karşın, son ürün haline gelmesi için belirli sıcaklıkta uygun katalizör ile üretim işlemlerine tabi tutulmalıdır. Bu ürün iki kimyasaldan oluşmaktadır; ana malzeme olan PDMS ve silikon elastomer kür kimyasalından oluşmaktadır. Ana malzeme ile kür kimyasalı yani katalizör 10/1 oranında, mekanik olarak 10 dakika karıştırılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Polidimetilsiloksan kimyasalının sentez aşamaları.

Bu karışım sırasında iki kimyasal, tepkimeye girerek hava kabarcıkları oluştururlar. Nihai üründe olması istenmeyen bu hava kabarcıkları karışımın

hemen sonrasında vakum ile alınır. Vakum işleminin ardından hiç bir hava kabarcığı kalmayan PDMS kalıba dökülür, etüv içerisine konulur ve 1 saat uygun sıcaklıkta bekletildikten sonra kullanıma hazır hale gelir (Şekil 2.6). Bu çalışmada dört farklı sıcaklıkta (60 °C, 90 °C, 120 °C ve 150 °C) tekrarlanan işlemler sonrasında PDMS'in en ideal değerleri 60° C de 1 saat fırınlama işleminde verdiği tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlarda kullanılan PDMS, bu prosedüre göre hazırlanmıştır.



Şekil 2.6. Kompozit yapı için oluşturulan kalıp.

2.3 Karakterizasyon Yöntemleri

Bu tez çalışması boyunca üç farklı malzeme sentezlenmiştir ve sentezlenen malzemelere gerekli karakterizasyon testleri yapılarak optimum sentez parametreleri bulunmuştur. Sentezlenen malzemelerden biri olan KKA'ya farklı reolojik testler uygulanmıştır. Bunlar statik, frekans ve genlik testleridir. Diğer bir ürün olan grafen köpüğe ise Raman spektrokopisi, X-ışını difraktometresi ve Taramalı elektron mikroskobu ile gerekli analizler yapılmıştır. Sentezlenen ürünlerin bir araya getirilip son ürün olarak kullanılır hale getirilmesini sağlayan PDMS malzemesine çekme testleri yapılarak en uygun numune seçilmiştir. Ayrıca hazır olarak temin edilen silika nanopartiküllere de tanecik boyutu analizi ve taramalı elektron analizi yapılarak, çalışılan malzemenin boyutu ve şekli hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

2.3.1 Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi genel olarak karbon malzemelerin yapısal ve elektronik özelliklerini araştırmak için kullanılır. Özellikle; grafenin katman sayısını tanımlamak için hızlı ve kolay bir yöntem olarak kullanılır [141-142].

Raman spektrumları 532 nm'lik bir uyarım kaynağı ile elde edilir. Raman spektroskopisinde 3 pik karşımıza çıkar bunlar sırası ile D piki, G piki ve 2D pikidir. D piki yapıda oluşan karbon atomlarının sp^3 hibritlemesini gösterir ve kusur konsantrasyonunun artması ile artan bir piktir. G piki ise karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesini gösterir, grafenin en önemli karakteristik özelliğı karbon atomunun sp^2 hibritleşmesinden oluşmasıdır ve bu pikin yüksek olması yüksek kristalinite değerlerini gösterir. 2D piki ise yüzey de oluşan katmanlı yapının parmak izidir. Grafenin katman sayısı 2D ve G piklerinin birbirine oranını hesaplanması ile bulunur bu nedenle raman analizi grafenin tespiti için kantitatif bir karakterizasyon yöntemidir. Kimyasal buhar biriktirme işlemi ardından elde edilen grafen tabakasının oluşumunun değerlendirilmesi için Raman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Renishaw/In Via cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Raman spektrometre cihazı.

2.3.2 X-Işını difraktometresi

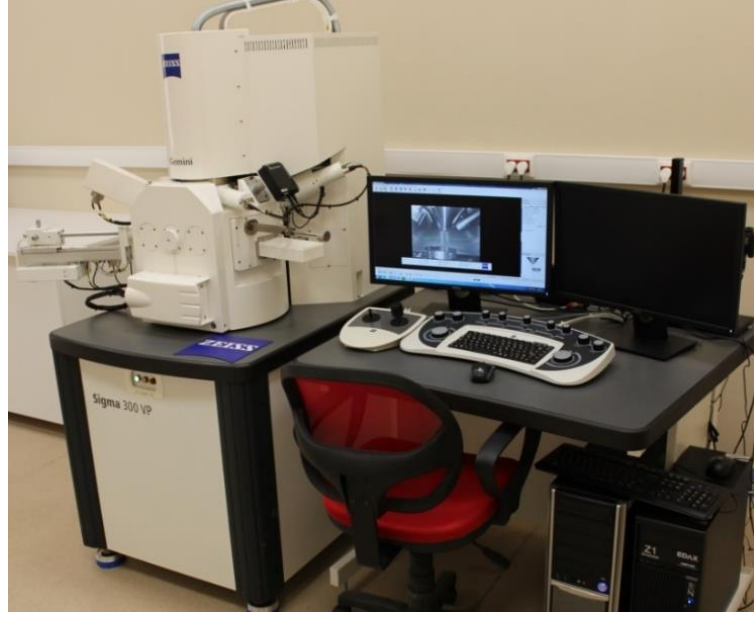
X-Işını difraktometresi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağılı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir açı ile kırarak meydana

gelmektedir. Her bir kristalin faz için bu kırınım açıları malzemenin parmak izi gibidir. X-Işını kırınımı, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi karakterizasyonlarının yapılmasını sağlamaktadır. X-Işını kırınım cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir.

Grafen; karbon atomunun allotroplarından biri olması sebebiyle X-ışını difraktometresinde diğer karbon atomundan oluşan allotroplara benzer pikler verir. Yaklaşık olarak 26 ve 54 derecelerde grafen piklerinin görülmesi beklenmektedir. X-ışını difraktometresi analizi İzmir Katip Çelebi üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan Bruker D2 Phaser marka cihaz ile yapılmıştır.

2.3.3 Taramalı elektron mikroskobu

SEM genellikle nano malzemeleri görüntülemek için kullanılır ve grafenin morfolojik analizini yapabilen standart, kullanımı kolay bir araç haline gelmiştir. SEM'in dört farklı görüntüleme modu vardır. Bunlar geri saçılım, ikincil elektronlar, auger elektronlar ve X-ışınıdır. Taramalı elektron mikroskobunda, elektronlar yüzeye gönderilir ve geri gelen elektronlar toplanarak görüntü oluşturulur. Geri saçılmış elektron sinyali numunenin atomik bileşimine duyarlıdır, ikincil elektron sinyali yüksek çözünürlüklü görüntüler üretebilir ancak yüzey elektron yüklenmesine dayanaklı olmalıdır. SEM görüntüleri grafen için zor elde edildiğinde iyi bir kontrast oluşturularak görüntüler alınmalıdır. Bu analiz İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Carl Zeiss 300VP cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Taramalı elektron mikroskobu.

2.3.4 Parça boyut analizi

Silika nanopartiküllerin boyut analizi Zetasizer cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, kolloidal çözeltilerde partiküllerin boyutunu, zeta potansiyelini ve molekül ağırlığını bulmak için kullanılmaktadır. Zetasizer cihazı, belirli bir potansiyel altında hareketi sağlanan tanelerin kayma yüzeylerindeki hızını belirleyerek zeta potansiyelini hesaplamaktadır. Bu analiz İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Malvern Nano ZS 90 Zetasizer cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Tanecik boyutu analizi cihazı.

2.3.5 Reolojik testler

KKA numunelerine uygulanan bütün testlerde paralel plaka yöntemi kullanılmıştır. Bu ölçüm geometrisinde, numune üstünde dönen veya salınan düz paslanmaz çelik plaka ile sabit plaka arasında bulunur. Gösterilen örnekteki üst plaka 20 mm çapındadır. Koni-plaka geometrisinin aksine, kayma gerilimi boşluk yüksekliği, h ile orantılıdır ve duvar (kayma) etkileri için testi kolaylaştıran bir özellik olan kayma hızının hassasiyetini ayarlamak için değiştirilebilir.

Paralel plaka geometrisi özellikle yüksek kesme hızlarında belirgin viskozite ve normal gerilim verilerinin elde edilmesini sağlar. Test sırasında oluşabilecek cihaz kaynaklı hatalar diğer reolojik testlere göre daha azdır. Özellikle yüksek viskoziteli akışkanlar, gıdalar veya jeller gibi 'yumuşak katı' durumundaki numunelerin test edilmesi koni-plaka veya eş merkezli silindir geometrilerinden paralel plaka ile test edilmesi daha kolaydır.

Reolojik Testler iki başlık altında incelenmiştir bunlar statik ve dinamik testlerdir. Reolojik testlerin tamamı İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Hybrid Rheometer Discovery HR-2 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Reometre cihazı.

2.3.5.1 Statik Test

Birçok akışkan newtonsal olmayan davranış özelliği göstermekte, ve bu nedenle kayma hızına bağlı olarak viskozitelerinde değişiklik gözlemlenmektedir. Kayma gerilimi altında malzeme davranışını anlamak için statik reolojik test uygulanarak malzeme karakterizasyonu yapılabilir. Bu test ile farklı kayma hızlarında viskozite değişiklikleri incelenerek malzemenin davranışı karakterize edilebilir ve hangi reolojik davranışı gösterdiği belirlenir. Statik kayma deneyleri, $0.001s^{-1}$ ile $1000s^{-1}$ kayma hızları aralığında yürütülebilir. Bu tez çalışmasında kayma gerilimi altında sertleşen akışkanın gösterdiği spesifik grafiğin görülmesi beklenmektedir.

2.3.5.2 Dinamik Testler

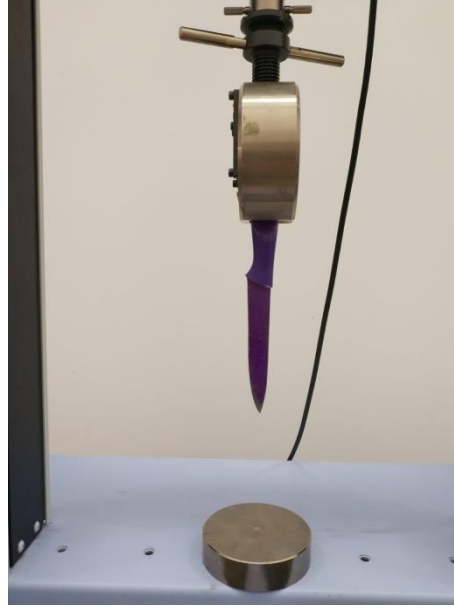
Genlik tarama testi ile gerilim/gerinim, modülüsün sabit kaldığı viskoelastik bölgenin tayini için kullanılmaktadır. Elastik modülüs (G') yapısal bütünlüğü gösteren bir değerdir. Elastik modülüste meydana gelen düşüş yapıdaki bozulmayı ve doğrusal olmayan başlangıç değerini göstermektedir. Bu nedenle malzemeye uygulanan dinamik testlerin sonucu ile uygun gerinim değerleri bulunabilir. Genlik taraması ile bir akışkanın dayanıklılığı ölçülebilmektedir. Malzemenin kararlılığına bağlı olarak dayanıklılığı da değişkenlik göstermektedir. Malzemenin elastik modülü yükseldikçe viskoziteside yükselmektedir. Ayrıca elastik bölge genişledikçe malzemenin kayma gerilimine karşı direncide yükselmektedir.

Frekans testi; numunenin sabit gerinim altında farklı frekanslar altında davranışını gösterir. Frekans zamanın tersi olarak temel alınır ve salınım frekansı değiştirilerek numunenin zamana bağlı viskoelastik karakteri analiz edilir. Bu test malzemenin viskoelastik bölgesinde gerçekleştirilir. Böylece malzemenin yapısal bütünlüğü bozulmadan karakteristik yapısı analiz edilebilmektedir.

2.3.6 Yarı-statik yük testi

Hiyerarşik nano kompozit yapının mekanik dayanımı, bıçak ile uygulanan yarı-statik yük altındaki yer değiştirmesi incelenerek tespit edilmiştir. Bu test NIJ 0115.00 standardı örnek alınarak $0,5mm/dak$ hız ile uygulanmıştır. Test sonucunda uygulanan yüke karşılık malzemedeki oluşan yer değiştirme miktarı incelenmiştir. Bu testin yavaş yapılmasının nedeni hıza duyarlı malzemenin enerji

emme kabiliyetinin hesaplanmasının sağlanmasıdır. Bu testte hiyerarşik nano kompozit yapıya yavaşça bıçak batırılarak KKA ve KKA/GK yapısının etkileri ve bıçak batırmaya karşı gösterilen direnç incelenmektedir. Bu test şekil 2.11 de gösterildiği gibi düz yüzey üzerine konulan malzeme üzerine bıçak ile yarı statik yük uygulanarak yapılmıştır. Bu test İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG-IC çekme-basma cihazı ile yapılmıştır.

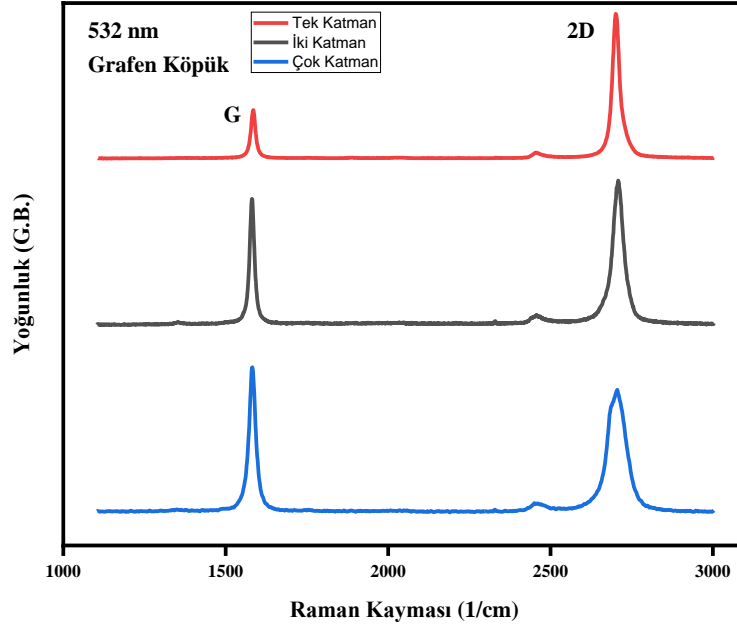


Şekil 2.11. Yarı-statik test düzeneği.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1 Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi

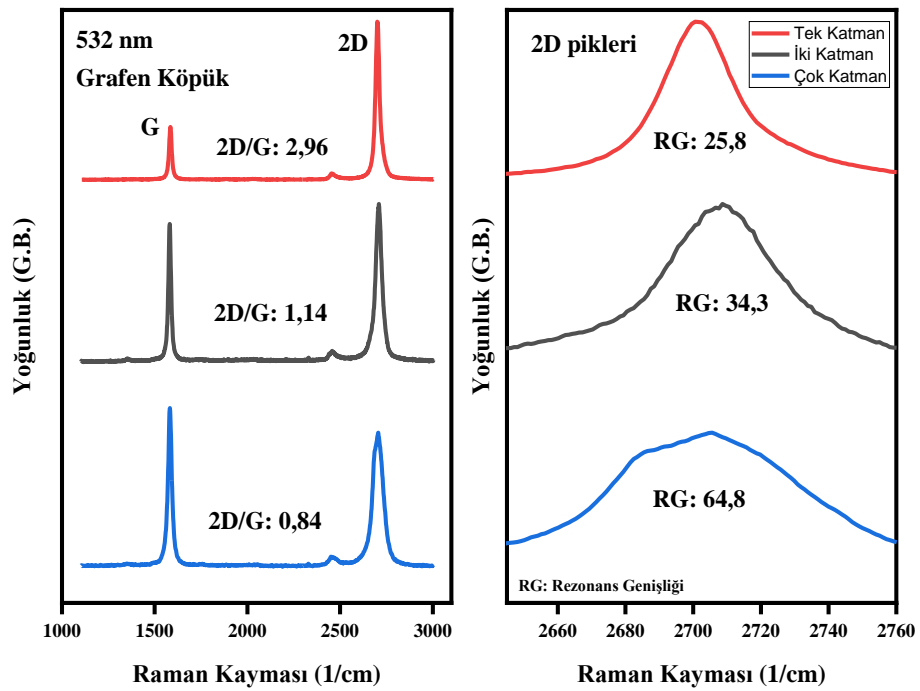
KBB yöntemi ile nikel köpük üzerinde sentezlenmiş grafen tabakalarının karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesinden meydana geldiğini karakterize edebilmek için Raman spektroskopisine başvurulmaktadır. Bölüm 2.4'te bahsedilen sentez parametreleri ile üretilen grafene Raman analizi yapılmıştır. Bu analizin sonucunda, 2D/G oranı veya 2D bandının rezonans genişliği (Full width at half maximum) hesaplanarak grafenin katman sayısı hakkında yorum yapılabilir [143]. Tek bir numunenin farklı bölgelerden alınan Raman spektrumu Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Grafen köpük üzerinde farklı noktalardan alınan Raman spektrumu.

Şekil 3.2'de verilen 2D bantlarının detaylı grafiğinde farklı katman sayıları rezonans genişliği formülü ile hesaplanmıştır. Rezonans genişlikleri üç farklı durum olan tek katmanlı, iki katmanlı ve çok katmanlı yapılar için hesaplanmıştır

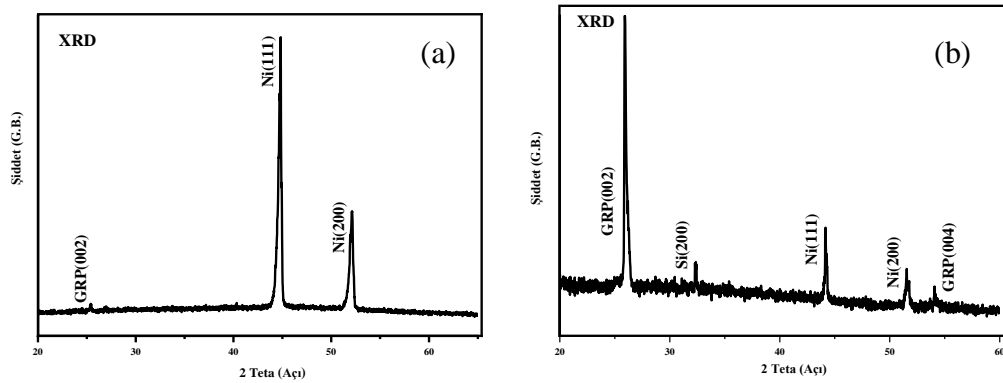
sırası ile; 25,8, 34,3 ve 64,8 [143]. Ayrıca 2D/G oranları ile de sağlama yapılarak yapıların katman sayıları doğrulanmıştır. Sırası ile 2D/G oranları 2,96, 1,14 ve 0,84'tür. Bu sonuçlar, Hao ve arkadaşları ile yaptığı çalışma ile uyumlu sonuçlar göstermektedir. Ayrıca Raman spektroskopisinde D piki görülmemesi katman yapıları farklı olsa da yüksek kristalinite değerine sahip bir kaplama yapıldığının göstergesidir. Yapıda sp^3 hibritleşmesi görülmemesi yapının homojen bir şekilde sp^2 hibritleşmesinden meydana gelen grafen tabakası veya tabakaları ile kaplandığını göstermektedir. Sentezlenen grafenin farklı bölgelerde farklı katman sayıları olmasının başlıca nedeni kullanılan nikel metalinin yüksek karbon çözücülüğü ve köpük yapısıdır. Sentez sırasında kullanılan altlığın köpük yapısında bulunan eğrili ve kıvrımlı yapıda farklı oranlarda karbon atomu birikir bu durum homojen olmayan grafen tabakalarına sebebiyet vermektedir. Ayrıca nikel metali, karbon çözme oranı yüksek olan bir metaldir, sentez sırasında nikel içerisinde çözünen karbonlar hızlı soğutma ile yüzeye difüze olması sağlanarak grafen yapısını oluşturmaktadır. Yüzeyin değişkenlik göstermesi karbon atomlarının farklı hızlarda difüze olmasını ve yüzeyde farklı katman sayısında grafen oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 3.2. Raman spektrumunun 2D bandının detaylı gösterimi.

3.2 Kristal Yapının Belirlenmesi

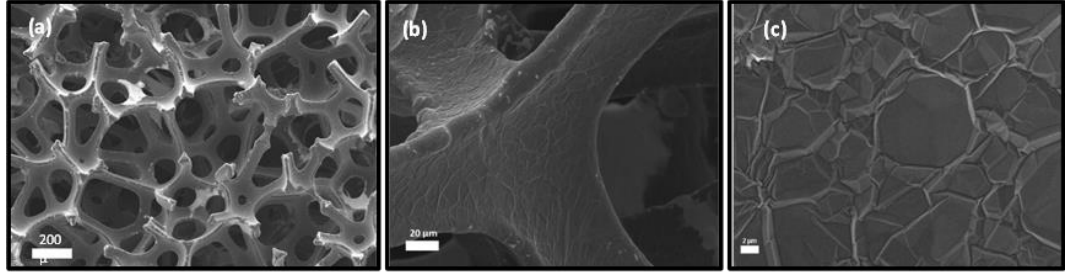
XRD karakterizasyonu sentezlenen Ni/GK ve GK yapılarına uygulanmıştır. Şekil 3.3'te ki XRD grafiği incelendiğinde Ni/GK yapısında 45° ve 52° 'de çok yüksek kristaliniteye sahip nikel (111) ve (200) pikleri görülmektedir. Karbon elementinin karakteristik pikleri olan (002) ve (004) pikleri 26° ve 54° 'de bulunmaktadır. Şekil 3.3-a grafiğinde karbonun 26° (002) karakteristik piki tespit edilmiştir fakat 52° yüksek yoğunluktaki nikel (200) piki nedeniyle karbonun bir diğer piki olan 54° (004) piki görülememektedir. Şekil 3.3-b'de verilmiş olan XRD grafiği transfer işlemi tamamlanmış olan GK'ye aittir. Transfer işlemi Si/SiO₂ altlık üzerine yapılması nedeniyle XRD grafiğinde Si (200) ve (400) pikleri görülmektedir. Ayrıca bu grafikte 54° 'de bulunan karakteristik (004) karbon piki görülmektedir. Transfer işlemi tamamlanmış olmasına rağmen grafikte nikel pikleri görülmektedir. Bu durum nikelin ortamdaki uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Fakat şekil 3.3-a'da verilmiş olan Ni/GK grafiği ile şekil 3.3-b de verilmiş olan GK grafiği karşılaştırıldığında nikel köpük büyük oranda ortamdaki uzaklaştırıldığı hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonucunda yüksek saflık ve kristalinitedeki nikel köpük üzerine grafen kaplandığı şekil 3.3-a da gözükmemektedir. Şekil 3.3-b de gözükürken karbon pikleri yapıda bulunan grafenden gelmektedir, 26° ve 54° 'de bulunan piklerin şeklinin dar ve sivri olması yapının kristalinitesinden kaynaklanmaktadır. Literatür incelendiğinde görülmüştür ki grafenin kristalinitesi düştükçe pikler genişlemekte ve sola doğru bir kayma gözlemlenmektedir [144].



Şekil 3.3. Grafen kaplı nikel köpük (a) ve grafen köpük (b) XRD grafiği.

3.3 Morfolojik Yapının Belirlenmesi

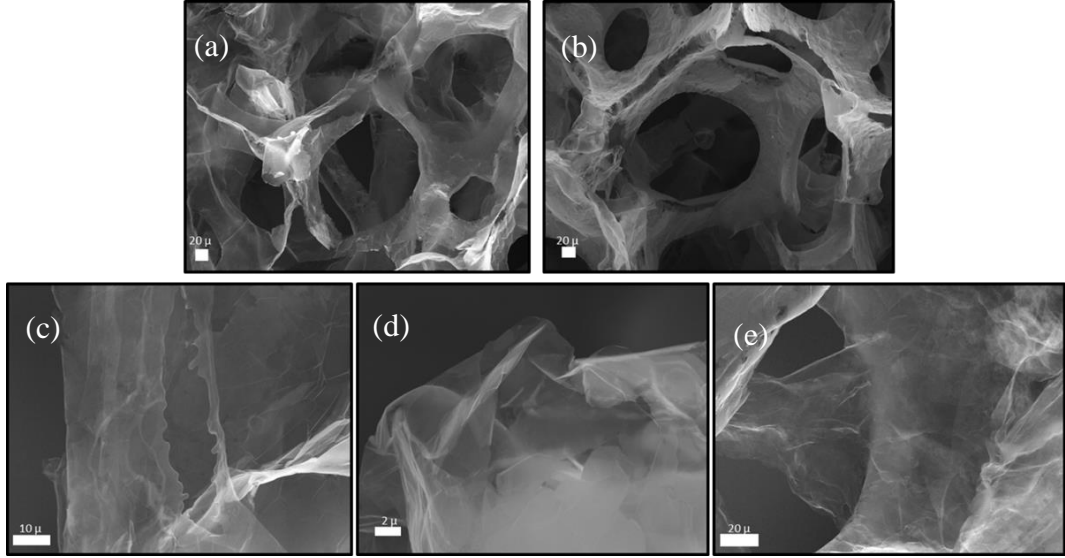
CVD yöntemi ile nikel köpük üzerinde sentezlenmiş grafen tabakasının detaylı morfolojisi SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. SEM için iki farklı numune hazırlanmıştır. Numunelerden biri nikel köpük üzerinde sentezi tamamlanmış olan grafen köpük (Ni/GK), bir diğeri ise nikel köpük üzerinde sentezi tamamlandıktan sonra nikel köpüğün ortamdaki uzaklaştırılarak elde edilmiş olan grafen köpük yapısıdır (GK).



Şekil 3.4. Grafen kaplı nikel köpük yapısının SEM görüntüleri.

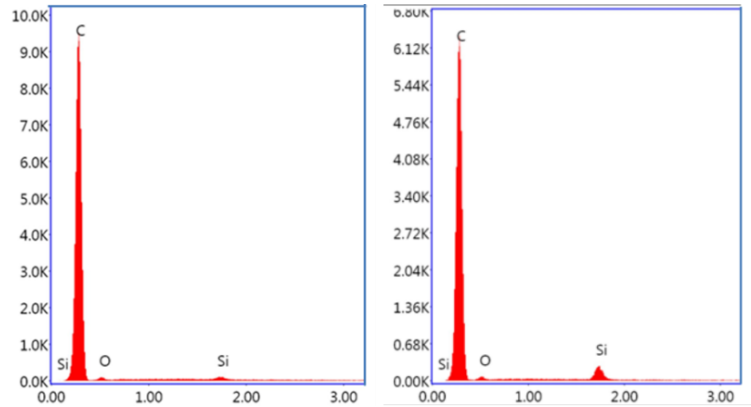
Ni/GK yapısının SEM görüntüleri incelendiğinde tüm yüzeyin homojen olarak grafen film tabakası ile kaplandığı tespit edilmiştir. Şekil 3.4-b de görülen beyaz çizgiler grafenin varlığını kanıtlar niteliktedir. Bu kırışık görüntü grafen ile nikel metali arasındaki ısıl genleşme katsayıları arasında ki farktan dolayı oluşmaktadır. Sentez sırasında soğutma işlemi gerçekleştirildiğinde nikel köpük ve grafenin genleşme katsayısında farklılık olmasından dolayı nikel yüzeyi üzerinde bulunan grafen tabakasında bu şekilde kırışık yapılar gözlenmektedir. Şekil 3.4-c de ise bu kırışık yapıların yakından görünümü verilmiştir.

SEM görüntüsü alınan transfer edilmiş köpük grafenin yüzey morfolojisi Şekil 3.5’de verilmiştir. Farklı bölgelerden alınmış Şekil 3.5-a ve b görselleri birbirine benzer yapısı ile sentezlenmiş olan grafenin homojen yapısını göstermektedir. Ayrıca yapının iskeletini oluşturan nikel köpük ortamdaki uzaklaştırıldığında grafenin şekli bozulmayarak köpük şeklinde kaldığı net bir şekilde gözükmektedir. Şekil 3.5-c, d ve e görselleri de yapının daha yakından alınmış görüntüleridir. Bu görüntüler, yapının çok tabakalı grafit olmadığını, birkaç tabakadan oluşan homojen bir yapıya sahip olduğunu daha ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Grafen tabakasının şeffaflığı sayesinde köpük formundan dolayı arkada kalan kanallar ve gözenekler de belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.5. Grafen köpük yapısının SEM görüntüleri.

GK yapısının XRD grafiğinde görülen nikel kalıntılarına farklı bölgelerden alınan SEM/EDS analizinde rastlanmamıştır (Bknz. Şekil 3.3) Bu durum yapı içerisinde bulunan nikel metalinin yüksek oranda uzaklaştırıldığını kanıtlamaktadır. SEM/EDS analizinde yapı içerisinde en yüksek oranda karbon yapısının gözükmesi grafenden kaynaklanmaktadır. Diğer bir element olan Silisyum ise kullanılan altlık malzemesi olan Si/SiO₂'den kaynaklanmaktadır (Şekil 3.6).

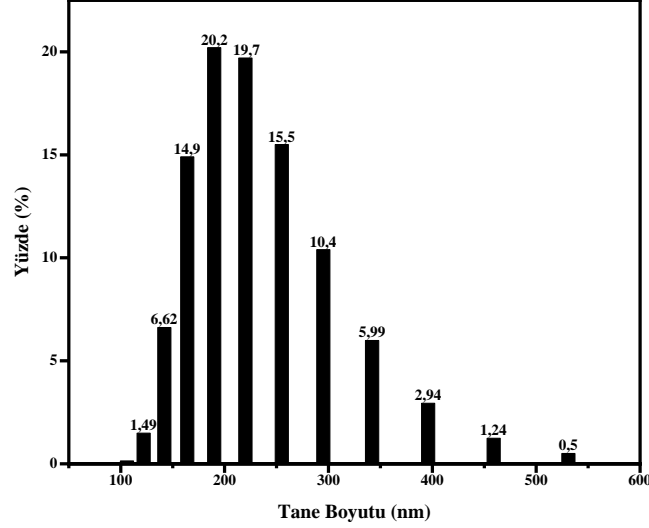


Şekil 3.6. Grafen köpük yapısının EDS analizi.

3.4 Parçacık Boyut Analizi

Silikanın tanecik boyutu KKA sentezini ve özelliklerini direkt etkilemektedir. Tane boyutu küçüldükçe kritik kayma hızında artmaktadır. Bu nedenle silikanın tanecik boyutu deneysel çalışma için büyük önem arz etmektedir. Ticari olarak temin edilen silika nanopartiküllerin parçacık boyutu analizi yapılarak şekil 3.

7’de verilmiştir. Üç farklı ölçüm sonucunda ortalama %20,2 oranında 190 nm ve %19,7 oranında 220 nm boyutlarında yüksek yüzdeli bir dağılım gözlenirken, toplam dağılımın %70’i ise 165 nm ile 255 nm boyutunda genel bir dağılımda olduğu tespit edilen silika nanopartiküller ile KKA sentezi yapılmıştır.



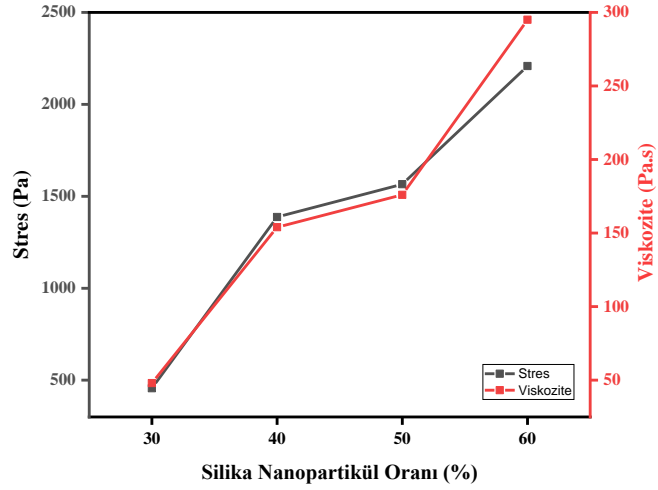
Şekil 3.7. Ticari olarak temin edilen silikanın tane boyut analizi.

3.5 Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

3.5.1 Statik test

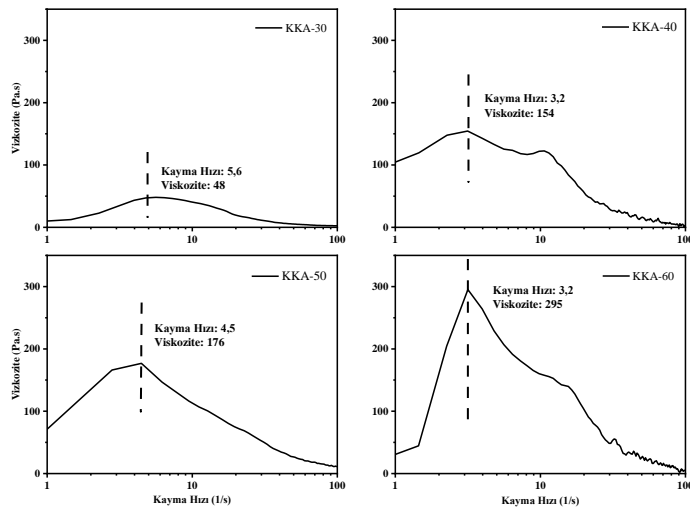
Mekanik ve sonik karıştırma yöntemleri kullanılarak farklı oranlarda silika nanopartikül içeren KKA’lar sentezlenmiştir. Sentezlenen KKA’ların kayma stresi altında viskozite değişimini analiz etmek için statik reolojik testler uygulanmıştır. Bu testin amacı doğrusal olarak artan kayma hızında malzeme üzerinde ki viskozite değişimini incelemektir. Üretilen dört farklı KKA da silika nanopartikülün kütlece oranı arttıkça artan bir viskozite ve stres değerleri gözlenmiştir. Şekil 3.8’de elde edilen değerler doğrultusunda en yüksek stres, viskozite ve en düşük kayma hızına sahip olan KKA-60 (ağırlıkça %60 KKA) isimli numunedir. Viskozite değerinin yüksek olması akışkan malzemenin akmaya göstermiş olduğu kuvveti tanımlamaktadır. Bu tez projesinde yüksek viskozite değerine sahip KKA ile şok emici bir malzeme üretilmi planlanması KKA-60 numunesini ön plana çıkarmaktadır. En az viskozite ve stres değerleri kadar önem arz eden kayma hızı ise yapıya uygulanan kayma stres ile birlikte ne kadar hızla

akışkan yapıdan daha viskoz bir yapıya geçtiğini tanımlamaktadır. Bu değer düşük olması beklenmektedir. KKA'ya herhangi bir stres uygulandığında hemen tepki göstererek katı formuna dönmesi beklenmektedir. Analiz sonucunda KKA-60 isimli numune ile KKA-40 isimli numune bir birlerine yakın değerler göstermiş olsalar bile viskozite ve stres değerlerinde üstün bir sonuç gösteren KKA-60 numunesi diğer numunelerin arasından sıyrılmaktadır.

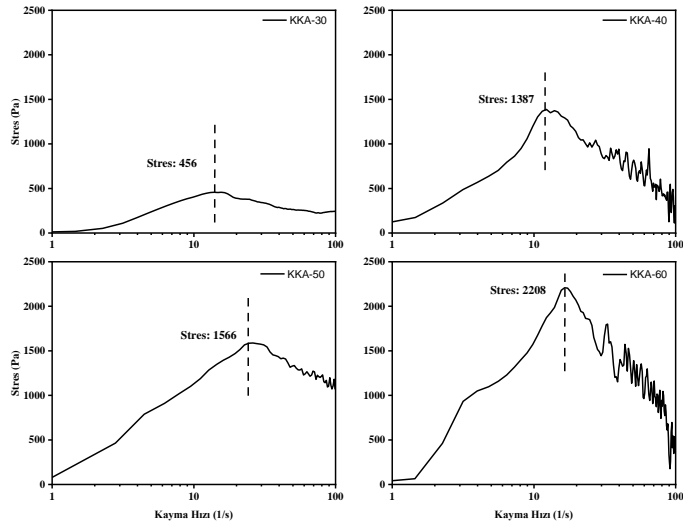


Şekil 3.8. Silika partikül oranı ile artan viskozite ve stres grafiği.

Şekil 3.9 ve şekil 3.10'de elde edilen KKA'ların viskozite ve stres değerleri karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bu grafiklerde sentezlenen tüm yapılar süreksiz kayma kalınlaşması göstermektedir. Kalınlaşmanın ardından kayma geriliminin artmasıyla beraber grafikte sapsmalar görülmüştür.



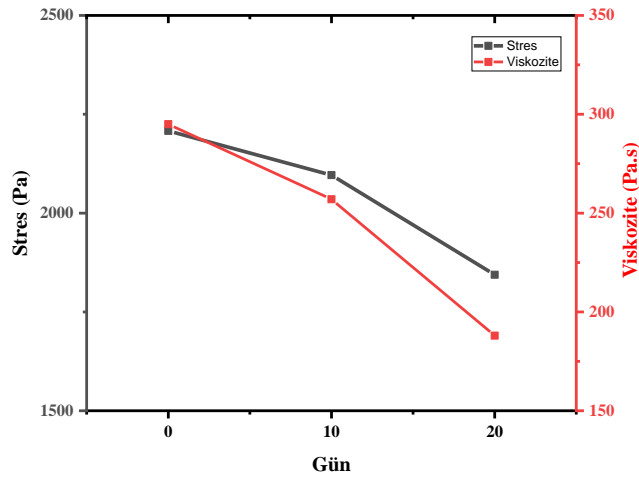
Şekil 3.9. Farklı oranlarda sentezlenen kayma gerilimi altında sertleşen akışkanlarının viskozite sonuçları.



Şekil 3.10. Farklı oranlarda sentezlenen kayma gerilimi altında sertleşen akışkanların stres sonuçları.

Bunun nedeni, yapı içerisinde kayma gerilimi ile beraber bölgesel olarak farklı değerlerde viskozite artışı ile heterojen yapılar oluşmasıdır. Kolloidal çözelti üzerinden stres kaldırıldığında yapı tekrar homojen bir akışkan haline gelmektedir. Bu sayede sentezlenen KKA'lar tekrar tekrar kullanılabilir bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Alınan bu sonuçlar literatürle benzerlik göstermektedir [9, 114, 120, 121, 131, 145].

Stabilizasyon, genlik ve frekans testleri; en yüksek stres ve viskozite ile düşük kayma hızı değerine sahip olan KKA-60 numunesine uygulanmıştır. Stabilizasyon testleri, on günlük periyotlar ile yapılarak numunenin stabilizasyonu hakkında bir çalışma geliştirilmiştir. Tekrarlanan statik testler sonucunda KKA-60 numunesinin kayma hızında bir değişiklik gözlenmemiştir. İlk on gün içerisinde viskozite değerinde %14, stres değerinde ise %17'lik bir azalma gözlemlenmiştir. İkinci on gün sonunda yapılan statik test sonucuna göre viskozite değerinde %36, stres değerinde ise %18 lik bir azalma görülmektedir. Viskozite değerinde yüksek oranda düşüş olmasının sebebi kolloidal çözelti içerisinde bulunan silika nanopartiküllerinin zamanla dibe çökmesi ile açıklanabilir (Şekil 3.11).

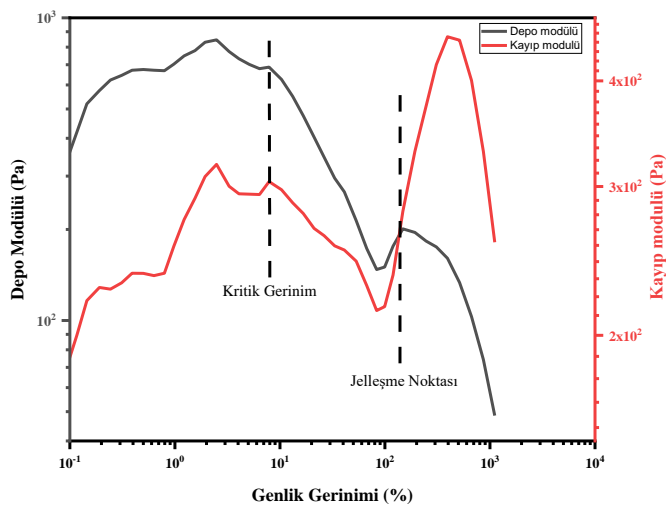


Şekil 3.11. KKA-60 isimli numunenin stabilizasyon test sonuçları.

3.5.2 Dinamik test

3.5.2.1 Genlik tarama testi

Mekanik karıştırma yöntemi ile üretilen ve statik testleri tamamlanan numuneler arasından seçilen KKA-60 isimli numuneye genlik testi uygulanarak kayıp modülü ve depo modülü hesaplanmıştır. Bu verilerden faydalanılarak malzemenin kritik gerinim değeri ve jelleşme noktası gibi karakteristik özellikleri tespit edilmiştir. Grafikte görülen %0,1 ve %8 genlik gerinimi değerleri arasında malzemenin doğrusal viskoelastik bölgesi gözlemlenmiştir fakat bu bölgede doğrusal bir profil gözlenmemektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. KKA-60 isimli numunenin genlik testi.

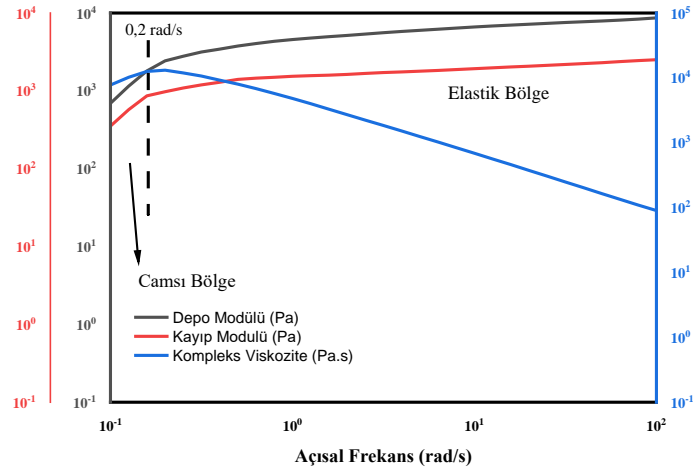
Doğrusal viskoelastik bölgede grafiğin doğrusal olmamasının nedeni malzemede meydana gelebilecek toplaklaşma veya homojen bir karışım olmaması olduğu düşünülebilir. Malzeme %8 genlikte kritik gerinim değerine ulaşmıştır. Bu değerden sonra depo modülünde ve kayıp modülünde azalma gözlemlenmiştir. Kritik gerinim noktasına kadar olan bölgede malzemeye uygulanan gerinim kuvveti geri iletilerek yapıyı bozmamaktadır. Kayıp modülü ve depo modülü'nün kesişme noktası jelleşme noktası olarak tanımlanmaktadır ve %141 genlikte malzemenin bu noktaya ulaşmaktadır. Bu bölgede malzemenin iç yapısı bozulmaya başlamaktadır. Jelleşme noktasında sonra grafiğin devam eden bölgesi, deformasyon bölgesi olarak isimlendirilir bu bölgede kayıp modülü artan ve depo modülü ise azalan bir profil göstermiştir.

3.5.2.2 Frekans Testi

Statik testler sonucunda seçilmiş olan KKA-60 numunesine uygulanan frekans testi, yapının kompleks viskozite değerinin hesaplanmasını göstermektedir. Yapılan karakterizasyon sonucunda kayıp modülü ile depo modülünde görülen artarak başlayan profil kompleks viskozite değerini de arttırmaktadır.

$$\eta = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (3.1)$$

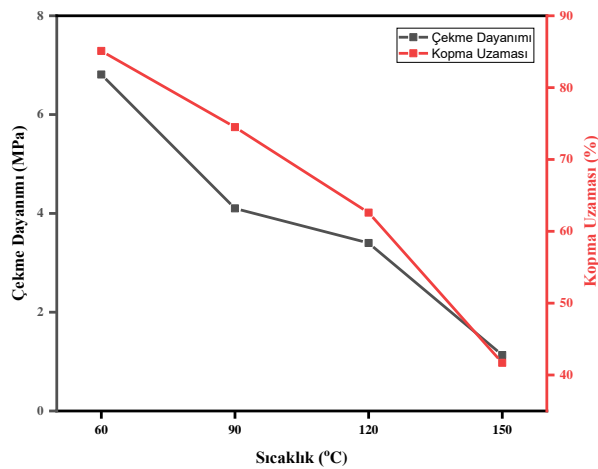
Formülde belirtildiği gibi G' (depo modülü) ve G'' (kayıp modülü) arttığında η (kompleks viskozite) değerinde bir artış gözlemlenmektedir. Fakat 0.2 rad/s değerinden sonra yapıda geçiş gözlemlenmektedir, bu düşük frekans değerinden sonra malzeme etkiye tepki olarak cevap vermeye başlamaktadır. Elastik plato bölgeye (rubbery plateau) geçiş yapıldıktan sonra ve analizin sonuna kadar olan frekanslarda malzeme uygulanan etkiye karşı tepki vererek çalışmasını bozulmadan sürdürmektedir. Malzeme bu bölgeye kadar olan frekans yoğunluğunda çalışabilir fakat malzemeye uygulanan kayma frekansı artıça malzemede bozulmalar oluşarak yapı tamamen değişim gösterebilir (şekil 3.13).



Şekil 3.13. KKA-60 isimli numunenin frekans testi

3.6 Çekme Testi

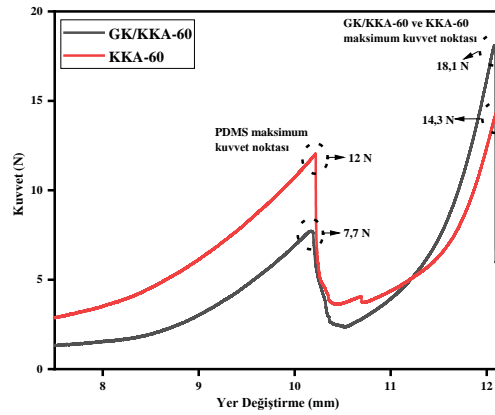
Bu tez projesinde üretilmesi planlanan nano kompozit malzemenin son parçası olan PDMS üretilen diğer yapıları bir arada tutmaktadır. Ön görülen esnek bir yapının oluşması için PDMS'in en esnek formunun kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle farklı sıcaklık parametrelerin de sentezlenen PDMS malzemesine çekme testleri uygulanarak en yüksek yer değiştirme ve stres parametrelerinin elde edildiği parametre olan 60 °C olan küreleşme sıcaklığı seçilmiştir. PDMS'in 60 °C de daha esnek olmasının sebebi içerisine koyulan kür kimyasalının artan sıcaklıkla ana malzeme olan PDMS'i daha sert ve kırılğan bir yapıya çevirmesidir. Bu durum çekme testi sonucunda da görülmektedir.



Şekil 3.14. Farklı sıcaklıklarda sentezlenen Polidimetilsiloksana uygulanan çekme testleri.

3.7 Bıçak Batırma Testi

Bu test, tez çalışması süresince üretilmesi hedeflenmiş olan hiyerarşik nano kompozit yapılara uygulanmıştır. Bu test için hazırlanan numuneler PDMS ile lamine edilmiş olan KKA-60 yapısı ve PDMS ile lamine edilmiş olan KKA-60 ve grafen köpük yapılarına uygulanmıştır. Bu doğrultuda, şekil 3.15'te ilk olarak PDMS ile lamine edilmiş olan KKA-60 yapısının yarı-statik test sonuçları bulunmaktadır. Yavaşça batırılan bıçak ilk önce PDMS ile temas ederek PDMS yapısının maksimum kuvvet değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.15. PDMS ile lamine edilen KKA-60 ve GK/KKA-60 numunelerinin yarı-statik bıçak batırma testi.

Bu değerler sadece KKA-60 içeren PDMS için 12 N iken KKA-60 ve grafen köpük içeren PDMS için bu değer 7,7 N ölçülmüştür. Bunun nedeni PDMS yapısında oluşan milimetrik kalınlık farklılıklarından veya lamine edilen sıvı miktarındaki ufak değişiklikler olduğu düşünülmektedir. PDMS yapısı içerisine sadece KKA-60 lamine edilerek elde edilen numune bıçak batırma testi sırasında KKA-60'ın maksimum kuvvet değeri 14,3 N tespit edilirken, yapı içerisine grafen eklenen numunenin (GK/KKA-60) maksimum kuvvet değeri %26,5 artarak 18,1 N değerine ulaşmıştır. Kolloidal yapıdaki KKA, grafen köpük kanalları içerisine girerek silika nanopartiküllerin daha düzenli ve yoğun bir yapı oluşturulması sağlanmıştır, yarı-statik kuvvet altında grafen köpük kanalları içerisinde bulunan KKA daha yüksek bir viskozite değerine ulaşmıştır. Bu sayede, lamine edilen GK/KKA-60 nano kompozit yapı ile sadece KKA-60 kullanılarak lamine edilen nano kompozit yapısına karşılaştırıldığında maksimum kuvvet değerinde %26,5'lik bir artış gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez projesinin sonucunda farklı yapılar başarılı bir şekilde sentezlenerek şok absorbe edebilen nano yapılı kompozit bir malzeme üretilmiştir. Bu kompozit malzemenin ilk adımı olarak, KBB yöntemi ile alttaş olarak kullanılan nikel yüzeyinin tamamı kaplanarak geniş yüzey alanına sahip grafenin sentezi yapılmıştır. GK yapısının uygunluğu; Raman, SEM, XRD gibi farklı karakterizasyon yöntemleri ile test edilerek tespit edilmiştir. Raman spektroskopisinde, farklı bölgelerde alınan sonuçlarda grafen tabakasının farklı katman sayılarında tüm yüzeyi kapladığı tespit edilmiştir. Altlık olarak nikel köpük kullanılması bu durumun başlıca nedenlerinden biridir. SEM analizinde alınan görüntüler nikel metalinin ortamda uzaklaştırılmasına rağmen GK yapısının bozulmadan köpük formunda kaldığını göstermektedir. Ayrıca SEM/EDS sonuçlarında yapı içerisinde sadece karbon ve altlık olarak kullanılan Si/SiO₂'ye ait pikler bulunmaktadır. Diğer bir analiz olan XRD sonuçlarında, grafene ait grafitik pikler olması gerektiği gibi 24° ve 56°'de görülmüştür. Ayrıca transfer işlemi tamamlanan GK yapısına yapılan XRD analizinde nikel piklerine de rastlanmıştır. SEM/EDS yapılan bölgede nikel bulunmasa da yapı içerisinde bir miktar nikel metalinin artık olarak bulunduğu tespit edilmiştir, Ni/GK ve GK yapılarına ait XRD sonuçları karşılaştırıldığında nikelin büyük oranda ortamdan uzaklaştırıldığı hesaplanmıştır.

Bir diğer ürün olan KKA için uzun süren parametre çalışmaları yapılmıştır. Dört farklı oranda sentezi tamamlanan KKA numunelerinden KKA-60 isimli numunenin statik reoloji test sonuçları en yüksek viskozite ve stres değerleri olan 295 Pa.s ve 2208 Pa ulaşmıştır. Kayma hızı da diğer numunelere göre en küçük değer olan 3.1 s⁻¹'dir. Statik test sonuçlarının devamında bu numuneye on gün ara ile stabilizasyon testleri yapılarak oda koşullarında saklanması durumunda yapı içerisinde oluşabilecek değişiklikler hesaplanmıştır ve on günlük süreçlerde viskozite ve stres değerlerinde sırası ile ortalama %20 ve %17'lik düşüşler

saptanmıştır. KKA-60 numunesine ayrıca genlik ve frekans testleri yapılmıştır. Genlik testi sonucunda %0,1 ve %8 genlik değerleri arasındaki bölgede malzemeye uygulanan gerinim kuvveti geri iletilerek yapıyı bozmamaktadır. Frekans testi sonucunda ise doğrusal bölgede kayıp ve depo modülü ile beraber kompleks viskozite değerinin arttığı görülmüştür. Doğrusal bölgeden sonra kauçuksu bölgeye geçiş ise 0,2 rad/s'de görülmüştür.

Bu tez çalışmasının son ürünü olan PDMS sentezlenen diğer iki yapıyı içine hapsederek akışkan bir malzeme olan KKA'nın el ile tutulmasını ayrıca istenilen bölgeye kolayca entegre edilebilmesini sağlayacaktır. Farklı sıcaklıklarda kürleştirilen PDMS için en uygun parametrenin 60°C olduğu çekme testi sonucunda görülmüştür. Bu test sonuçlarına göre en yüksek kopma uzama değeri ve çekme dayanımı gösteren PDMS yapısı ile GK ve KKA yapıları lamine edilmiştir.

PDMS ile lamine edilen hiyerarşik kompozit yapılara yarı-statik hız ile bıçak batırma testi uygulanmıştır. Bu test KKA-60 içeren PDMS ve KKA-60 ile grafen köpük içeren PDMS hiyerarşik nano kompozit yapılara uygulanmıştır. Test sonucunda grafen köpük ve KKA-60 içeren yapının dayanımı diğer bir yapı olan ve sadece KKA-60 içeren hiyerarşik nano kompozite göre %26,5 artış göstererek 18,1 N değerine ulaşmıştır.

Bu tez projesinde üretilen nano yapıli kompozit malzeme belli bir seviyede şok absorbe edebilecek seviye de tasarlanmış olsa da geliştirilmeye açık bir yapısı vardır. Belirli hızlarla gelen bıçak, ok gibi saldırılara karşı dayanımı test edilerek tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu yapı üst üste katmanlı halde lamine edilerek geliştirilmesi veya grafen köpük transfer edilmeden nikel metalinde mukavemtinde faydalanılarak ateşleyici silahlardan gelebilecek bıçak veya mermi gibi daha yüksek hızlara sahip hasar verici etkenlere karşı dayanım göstermesi gelecek planların arasındadır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Gay D, Hoa S. V, and Tsai S. W, Composite materials: Design and applications. London, CRC Press; 2002.
- [2] Twardowski T. E, Introduction to nanocomposite materials: properties, processing, characterization, Destech, vol. 46, no. 01. 2008.
- [3] Sun L, Gibson R. F, Gordaninejad F, and Suhr J, “Energy absorption capability of nanocomposites: A review,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 14, pp. 2392–2409, 2009,
- [4] Cavallaro P. V, “Soft Body Armor: An Overview of Materials , Manufacturing , Testing , and Ballistic Impact Dynamics Naval Undersea Warfare Center Division,” *NUWC-NPT Tech. Rep. 12*, vol. 12, no. August, pp. 1–22, 2011.
- [5] Decker M. J, Halbach C. J, Nam C. H, Wagner N. J, and Wetzel E. D, “Stab resistance of shear thickening fluid (STF) -treated fabrics,” *Composite Science and Technology* vol. 67, pp. 565–578, 2007.
- [6] Dupont R. E. and Barbara S, “Liquid armor: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids,” *IFAI 4th Int. Conf. on Safety and Protective Fabrics*, 2015.
- [7] Hazell P. J, *Materials, Theory, and Design*. London, CRC Press; 2016.
- [8] Hasanzadeh M, and Mottaghitalab V, “The Role of Shear-Thickening Fluids (STFs) in Ballistic and Stab-Resistance Improvement of Flexible Armor,” *ASM International*; 2013.
- [9] Hassan T. A, Rangari V. K, and Jeelani S, “Synthesis , processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 12, pp. 2892–2899, 2010.

- [10] Kang T. J, Kim C. Y, and Hong K. H, “Rheological Behavior of Concentrated Silica Suspension and Its Application to Soft Armor,” Wiley, vol. 124, no. May 2011, pp. 1534–1541, 2012.
- [11] Brown, E, Forman N. A, Orellana, C. S, 'Generality of shear thickening in dense suspensions'; *Nature materials*, 9(3), 220-224; 2010.
- [12] Novoselov K. S, Colombo L, Gellert P. R, “A roadmap for graphene,” *Nature*, vol. 490, no. 7419, pp. 192–200, 2012.
- [13] Novoselov K. S, “Electric field in atomically thin carbon films,” *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, 2004.
- [14] Gao Y, Cao T, Cellini F, Berger C, De Heer W. A, and Tosatti E, “Ultrahard carbon film from epitaxial two-layer graphene,” *Nat. Nanotechnol.*, 2017.
- [15] Johnston I. D, McCluskey D. K, Tan C. K. L, and Tracey M. C, “Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 24, no. 3, 2014.
- [16] Torres, L. E. F., Roche, S., & Charlier, J. C.. *Introduction to graphene-based nanomaterials: from electronic structure to quantum transport*. Cambridge University Press. 2020.
- [17] Peschel, G.. *Carbon-carbon bonds: hybridization*. 5(5). 2011.
- [18] Terrones M, “Graphene and graphite nanoribbons: Morphology, properties, synthesis, defects and applications,” *Nano Today*, vol. 5, no. 4, pp. 351–372, 2010.
- [19] Tiwari S. K, Kumar V, Huczko A, Oraon R, Adhikari A. D, and Nayak G. C, “Magical Allotropes of Carbon: Prospects and Applications,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 41, no. 4, pp. 257–317, 2016.
- [20] Smalley R. E, “Discovering the fullerenes,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 69, no. 3, pp. 723–730, 1997, doi: 10.1103/revmodphys.69.723.

- [21] Kademani B, Kalyane V, and Kumar V, "Scientometric portrait of Nobel laureate Harold W. Kroto," *SRELS J. Inf. Manag.*, vol. 39, no. 4, pp. 409–434, 2002.
- [22] Ahmad S, "Carbon nanostructures fullerenes and carbon nanotubes," *IETE Tech. Rev.*, vol. 16, no. 3–4, pp. 297–310, 1999.
- [23] Ebert L, "Science of fullerenes and carbon nanotubes By M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. C. Eklund, Academic Press, 1996, 965 pages. Carbon N. Y., vol. 35, no. 3, pp. 437–438, 1997.
- [24] Iijima, S.. "Helical microtubules of graphitic carbon." *Nature*, 354(6348), 56-58; 1991.
- [25] Saito R and Fujita M, "Electronic structure of graphene tubules based on C_{60} ," *Physical Review B*, vol. 46, no. 3, pp. 1804–1811, 1992.
- [26] Bethune D. S, Kiang C. H, De Vries M. S, Gorman G, Savoy R, Vazquez J, Beyers R, "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls." *Nature*, 363(6430), 605-607; 1993.
- [27] Iijima, S., & Ichihashi, T. "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter." *Nature*, 363(6430), 603-605; 1993.
- [28] Hamada, N., Sawada, S. I., & Oshiyama, A. "New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules." *Physical review letters*, 68(10), 1579. 1992.
- [29] Venema L. C, Wildo J. W. G, and Dekker C, "Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes"; *Nature*, vol. 584, no. 10, pp. 1996–1999, 1998.
- [30] Odom T. W. and Huang J, "Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes"; *Nature*, vol. 391, no. January, pp. 1997–1999, 1998.
- [31] Hod O. and Scuseria G. E, "Electromechanical properties of suspended graphene nanoribbons," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 2619–2622, 2009.

- [32] Lee C, Wei X, Kysar J. W, and Hone J, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science*, vol. 321, no. 5887, pp. 385–388, 2008.
- [33] Kharisov B. I, Kharissova O. V, Kharisov B. I, and Kharissova O. V, "Conventional Carbon Allotropes," *Carbon Allotropes Met. Chem. Prop. Appl.*, pp. 9–33, 2019.
- [34] Frank O, Tsoukleri O, Parthenio G, "Compression behavior of single-layer graphenes," *ACS Nano*, vol. 4, no. 6, pp. 3131–3138, 2010.
- [35] Gao Y. and Hao P., "Mechanical properties of monolayer graphene under tensile and compressive loading," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 41, no. 8, pp. 1561–1566, 2009.
- [36] Hansora, D. P, and Mishra, S.; "Graphene Nanomaterials: Fabrication, Properties, and Applications." CRC press, 2017.
- [37] Liang J," "Molecular-level dispersion of graphene into poly(vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 14, pp. 2297–2302, 2009.
- [38] Xu Z. and Gao C, "In situ polymerization approach to graphene-reinforced nylon-6 composites," *Macromolecules*, vol. 43, no. 16, pp. 6716–6723, 2010.
- [39] Cai D, Yusoh K, and Song M, "The mechanical properties and morphology of a graphite oxide nanoplatelet/polyurethane composite," *Nanotechnology*, vol. 20, no. 8, 2009.
- [40] Nguyen D. A, Lee Y. R., Raghu A. V, Jeong H. M, Shin C. M, and Kim B. K., "Morphological and physical properties of a thermoplastic polyurethane reinforced with functionalized graphene sheet," *Polym. Int.*, vol. 58, no. 4, pp. 412–417, 2009.
- [41] Raghu A. V, Lee Y. R, Jeong H. M, and Shin C. M., "Preparation and physical properties of waterborne polyurethane/ functionalized graphene sheet nanocomposites," *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 209, no. 24, pp. 2487–2493, 2008.

- [42] Rafiee, M. A.. Graphene-based composite materials. New York, USA: Rensselaer Polytechnic Institute; 2011.
- [43] Yavari F, Rafiee M. A., Rafiee J, Yu Z. Z, and Koratkar N, “Dramatic increase in fatigue life in hierarchical graphene composites,” ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 2, no. 10, pp. 2738–2743, 2010.
- [44] Fang M, Zhang Z, Li J, Zhang H., Lu H, and Yang Y, “Constructing hierarchically structured interphases for strong and tough epoxy nanocomposites by amine-rich graphene surfaces,” J. Mater. Chem., vol. 20, no. 43, pp. 9635–9643, 2010.
- [45] Rafiee M. A, Rafiee J, Wang Z, Song H, Yu Z. Z, and Koratkar N, “Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content,” ACS Nano, vol. 3, no. 12, pp. 3884–3890, 2009.
- [46] Singh V, Joung D, Zhai L, Das S, Khondaker S. I, and Seal S, “Graphene based materials: Past, present and future,” Prog. Mater. Sci., vol. 56, no. 8, pp. 1178–1271, 2011.
- [47] Yue H. Y, “ZnO nanowire arrays on 3D hierarchical graphene foam: Biomarker detection of parkinson’s disease,” ACS Nano, vol. 8, no. 2, pp. 1639–1646, 2014.
- [48] Pollard B. "Growing graphene via chemical vapor deposition." Department of Physics, Pomona College, 2011.
- [49] Chen Z, Ren W, Gao L, Liu B, Pei S, and Cheng H. M, “Three-dimensional flexible and conductive interconnected graphene networks grown by chemical vapour deposition,” Nat. Mater., vol. 10, no. 6, pp. 424–428, 2011.
- [50] Fuhrer M. S, Lau C. N, and MacDonald A. H, “Graphene: Materially Better Carbon,” MRS Bull., vol. 35, no. 4, pp. 289–295, 2010.
- [51] Prasher R, “Graphene spreads the heat,” Science, vol. 328, no. 5975, pp. 185–186, 2010.

- [52] Balandin A. A, "Superior thermal conductivity of single-layer graphene," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 902–907, 2008.
- [53] Koh Y. K, Bae M. H, Cahill D. G, and Pop E, "Heat conduction across monolayer and few-layer graphenes," *Nano Lett.*, vol. 10, no. 11, pp. 4363–4368, 2010.
- [54] Nair R. R, "Fine structure constant defines visual transparency of graphene," *Science*, vol. 320, no. 5881, p. 1308, 2008.
- [55] Mak K. F, Sfeir M. Y, Wu Y, Lui C. H, Misewich J. A, and Heinz T. F, "Measurement of the optical conductivity of graphene." *Physical review letters*, 101(19), 196405; 2008.
- [56] Aliofkhaezrai M, Ali N, Milne W. I, Ozkan C. S, Mitura S, and Gervasoni J. L, *Graphene science handbook: Nanostructure and atomic arrangement*. CRC Press, 2016.
- [57] Rao C. N. R, Sood A. K, K. S. Subrahmanyam, and Govindaraj A, "Graphene: The new two-dimensional nanomaterial," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 48, no. 42, pp. 7752–7777, 2009.
- [58] Chen X, Zhang L, and Chen S, "Large area CVD growth of graphene," *Synth. Met.*, vol. 210, no. December, pp. 95–108, 2015.
- [59] Muñoz R. and Gómez-Aleixandre C, "Review of CVD synthesis of graphene," *Chem. Vap. Depos.*, vol. 19, no. 10–12, pp. 297–322, 2013.
- [60] De Heer W. A, "Epitaxial graphene," *Solid State Commun.*, vol. 143, no. 1–2, pp. 92–100, 2007.
- [61] A. K. Geim, "Graphene: status and prospects." *Science*, 324(5934), 1530-1534, 2009.
- [62] A. K. Geim, "Graphene prehistory." *Physica Scripta*, 014003, 2012.
- [63] Geim A. K. and Novoselov K. S, "The rise of graphene," *Nat. Mater.*, vol. 6, no. 3, pp. 183–191, 2007.
- [64] Kedzierski J, "Epitaxial graphene transistors on SiC substrates," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 55, no. 8, pp. 2078–2085, 2008.

- [65] Zheng Q. and Kim J. K, "Graphene for Transparent Conductors," Graphene Transparent Conduct., 2015.
- [66] Tedesco J. L, "Morphology characterization of argon-mediated epitaxial graphene on C-face SiC," Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 22, pp. 1–12, 2010.
- [67] Chung D. D. L, "Exfoliation of graphite," J. Mater. Sci., vol. 22, no. 12, pp. 4190–4198, 1987.
- [68] Inagaki M, "Applications of graphite intercalation compounds," J. Mater. Res., vol. 4, no. 6, pp. 1560–1568, 1989.
- [69] Chen G, "Preparation and characterization of graphite nanosheets from ultrasonic powdering technique," Carbon N. Y., vol. 42, no. 4, pp. 753–759, 2004.
- [70] Chen X. H, "Generation of curved or closed-shell carbon nanostructures by ball-milling of graphite," J. Cryst. Growth, vol. 218, no. 1, pp. 57–61, 2000.
- [71] Wu Y. H, Yu T, and Shen Z. X, "Two-dimensional carbon nanostructures: Fundamental properties, synthesis, characterization, and potential applications," J. Appl. Phys., vol. 108, no. 7, pp. 1–38, 2010.
- [72] Kobayashi T, "Production of a 100-m-long high-quality graphene transparent conductive film by roll-to-roll chemical vapor deposition and transfer process," Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 2, pp. 1–6, 2013.
- [73] Mattevi C, Kim H, and Chhowalla M, "A review of chemical vapour deposition of graphene on copper," J. Mater. Chem., vol. 21, no. 10, pp. 3324–3334, 2011.
- [74] Irgens, F, "Rheology and non-newtonian fluids." New York: Springer International Publishing, 2014.
- [75] Boersma W. H, Laven J, and Stein H. N, "Shear thickening (dilatancy) in concentrated dispersions," AIChE J., vol. 36, no. 3, pp. 321–332, 1990.

- [76] Boersma W. H, Laven J, and Stein H. N, "Viscoelastic properties of concentrated shear-thickening dispersions," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 149, no. 1, pp. 10–22, 1992.
- [77] Doraiswamy D.. "The origins of rheology: a short historical excursion." *Rheology Bulletin*, 71(1), 1-9, 2002.
- [78] Petford, N, "Rheology of granitic magmas during ascent and emplacement." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), 399-427, 2003.
- [79] Griffiths, R. W, "The dynamics of lava flows." *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), 477-518, 2000.
- [80] Chhabra, R. P.. *Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids.* CRC press, 2006.
- [81] Nguyen, Q. D., & Boger, D. V, "Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions." *Rheologica Acta*, 24(4), 427-437, 1985.
- [82] Freundlich, H, and Juliusburger, F, "Thixotropy, influenced by the orientation of anisometric particles in sols and suspensions." *Transactions of the Faraday Society*, 31, 920-921, 1935.
- [83] Chhabra, R. P, "Non-Newtonian fluids: an introduction." In *Rheology of complex fluids* (pp. 3-34). New York, Springer, 2010.
- [84] Keller D. S, and Keller D. V, "An investigation of the shear thickening and antithixotropic behavior of concentrated coal–water dispersions," *J. Rheol.* (N. Y. N. Y)., vol. 34, no. 8, pp. 1267–1291, 1990.
- [85] Pradipasena P, & Rha C, "Pseudoplastic and rheopectic properties of a globular protein (β -lactoglobulin) solution" 1. *Journal of Texture Studies*, 8(3), 311-325, 1977.
- [86] Boger, D. V, "Demonstration of upper and lower Newtonian fluid behaviour in a pseudoplastic fluid." *Nature*, 265(5590), 126-128, 1977.

- [87] Graessley, W. W, "The entanglement concept in polymer rheology. In The entanglement concept in polymer rheology." Springer, (pp. 1-179), Berlin, Heidelberg, 1974.
- [88] Larson, R. G "The structure and rheology of complex fluids" (Vol. 150). New York: Oxford university press, 1999.
- [89] Morrison, F. A, "Understanding rheology." USA, Oxford University Press, 2001.
- [90] Witten T. A, and Pincus P. A, "Structured fluids: polymers, colloids, surfactants." Oxford University Press on Demand, (2004).
- [91] Curran S. J, Hayes R. E, Afacan A, Williams, M. C, & Tanguy P. A, "Properties of carbopol solutions as models for yield-stress fluids." Journal of food science, 67(1), 176-180, 2002.
- [92] Andrade E. N. D. C. and Fox J. W, "The mechanism of dilatancy," Proc. Phys. Soc. Sect. B, vol. 62, no. 8, pp. 483–500, 1949.
- [93] Metzner A. B. and Whitlock M, "Flow Behavior of Concentrated (Dilatant) Suspensions," Trans. Soc. Rheol., vol. 2, no. 1, pp. 239–254, 1958.
- [94] Hatzikiriakos S. G. and Vlassopoulos D, "Brownian dynamics simulations of shear-thickening in dilute polymer solutions," Rheol. Acta, vol. 35, no. 3, pp. 274–287, 1996.
- [95] Bagley E. B. and Dintzis F. R, "Advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids," Rheol. Ser., vol. 8, pp. 63–86, 1999.
- [96] Wagner N. J. and Brady J. F, "Shear thickening in colloidal dispersions," Phys. Today, vol. 62, no. 10, pp. 27–32, 2009.
- [97] Wang L, Tiu C, and Liu T. J, "Effects of nonionic surfactant and associative thickener on the rheology of polyacrylamide in aqueous glycerol solutions," Colloid Polym. Sci., vol. 274, no. 2, pp. 138–144, 1996.
- [98] Melrose J. R, Van Vliet J. H, and Ball R. C, "Continuous shear thickening and colloid surfaces," Phys. Rev. Lett., vol. 77, 4660–4663, 1996.

- [99] Lin N. Y. C, "Hydrodynamic and Contact Contributions to Continuous Shear Thickening in Colloidal Suspensions," vol. 228304, no. November, pp. 1–5, 2015.
- [100] Barnes, H. A, "Shear thickening in suspension of non-aggregating solid particles dispersed in Newtonian liquid: a review." *Journal of Rheology*, 33, 29-33, 1989.
- [101] Yıldız S, "Synthesis and rheological behavior of shear thickening fluids (STFs) for liquid armor applications" (Master's thesis, Izmir Institute of Technology), 2013.
- [102] Hoffman, R. L, "Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions." II. Theory and experimental tests. *Journal of Colloid and Interface Science*, 46(3), 491-506, (1974).
- [103] Frith W. J, Haene P, Buscall R, and Mewis J, "Shear thickening in model suspensions of sterically stabilized particles," *J. Rheol. (N. Y. N. Y).*, vol. 40, no. 4, pp. 531–548, 1996.
- [104] Bender J. and Wagner N. J, "Reversible shear thickening in monodisperse and bidisperse colloidal dispersions," *J. Rheol. (N. Y. N. Y).*, vol. 40, no. 5, pp. 899–916, 1996.
- [105] Laun H. M, "Rheological and small angle neutron scattering investigation of shear-induced particle structures of concentrated polymer dispersions submitted to plane Poiseuille and Couette flow a)," *J. Rheol. (N. Y. N. Y).*, vol. 36, no. 4, pp. 743–787, 1992.
- [106] Bossis G. and Brady J. F, "The rheology of Brownian suspensions," *J. Chem. Phys.*, vol. 91, no. 3, pp. 1866–1874, 1989.
- [107] Barnes H. A, Hutton J. F, and Walters K "An introduction to rheology (Vol. 3)." Elsevier, 1989.
- [108] Maranzano B. J. and Wagner N. J, "The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions," *J. Chem. Phys.*, vol. 114, no. 23, p. 10514, 2001.

- [109] Kalman D. P, Schein J. B, Houghton J. M, Laufer C. H. N, Wetzel E. D, and Wagner N. J, "Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications," Int. SAMPE Symp. Exhib., vol. 52, no. January 2007.
- [110] Wetzel E. D, Lee Y. S, Egres R. G, Kirkwood K. M, Kirkwood J. E, and Wagner N. J, "The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Kevlar Composites." In AIP conference proceedings (Vol. 712, No. 1, pp. 288-293). American Institute of Physics, 2004.
- [111] Zhang X. Z, Li W. H, and Gong X. L, "The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of anSTF-filled damper," Smart Mater. Struct., vol. 17, no. 3, 2008.
- [112] Genovese D. B, "Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites," Adv. Colloid Interface Sci., vol. 171–172, pp. 1–16, 2012.
- [113] Briscoe B, Luckham P, and Zhu S, "Pressure influences upon shear thickening of poly(acrylamide) solutions," Rheol. Acta, vol. 38, no. 3, pp. 224–234, 1999.
- [114] Srivastava A, Majumdar A, and Butola B. S, "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid," Mater. Sci. Eng. A, vol. 529, pp. 224–229, 2011.
- [115] Majumdar A, Butola B. S, and Srivastava A, "Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid," J. Mater., vol. 54, pp. 295–300, 2014.
- [116] Lomakin E. V, Mossakovsky P. A, Bragov A. M, Lomunov A. K, Konstantinov A. Y, Kolotnikov M. E, and Vakshtein M. S. "Investigation of impact resistance of multilayered woven composite barrier impregnated with the shear thickening fluid." Archive of applied mechanics, 81(12), 2007-2020, 2011.

- [117] Egres R. G. and Wagner N. J, “The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition,” *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 49, no. 3, pp. 719–746, 2005.
- [118] Ghosh A, Chauhan I, Majumdar A, and Singh B, “Influence of cellulose nanofibers on the rheological behavior of silica-based shear-thickening fluid,” *Cellulose*, 2017.
- [119] Khodadadi A, Liaghat G. H, Sabet A. R, "Experimental and numerical analysis of penetration into Kevlar fabric impregnated with shear thickening fluid." *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(3), 392-407, 2018.
- [120] Majumdar A, Laha A, Bhattacharjee D, and Biswas I, “Tuning the Structure of 3D Woven Aramid Fabrics Reinforced with Shear Thickening Fluid for Developing Soft Body Armour,” *Compos. Struct.*, 2017.
- [121] Tan Z, “Dynamic response of shear thickening fluid reinforced with SiC nanowires under high strain rates Dynamic response of shear thickening fluid reinforced with SiC nanowires under high strain rates,” vol. 031902, 2017.
- [122] Asija N, Chouhan H, Gebremeskel S. A, and Bhatnagar N, “Thin-Walled Structures Impact response of Shear Thickening Fluid (STF) treated ultra high molecular weight poly ethylene composites – study of the effect of STF treatment method,” *Thin Walled Struct.*, no. December 2016, pp. 1–10, 2017.
- [123] Haro E. E, Odeshi A. G, and Szpunar J. A, “International Journal of Impact Engineering The energy absorption behavior of hybrid composite laminates containing nano-fillers under ballistic impact,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 96, pp. 11–22, 2016.
- [124] Gürgen S, Li W, and Kuşhan M. C, "The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives." *Materials & Design*, 104, 312-319, 2016.

- [125] Majumdar A, and Laha A, "Effects of fabric construction and shear thickening fluid on yarn pull-out from high-performance fabrics." *Textile Research Journal*, 86(19), 2056-2066, 2016.
- [126] Baharvandi H. R, Alebooyeh M, Alizadeh M, Khaksari P, and Kordani N, "Effect of silica weight fraction on rheological and quasi-static puncture characteristics of shear thickening fluid-treated Twaron® composite." *Journal of Industrial Textiles*, 46(2), 473-494, 2016.
- [127] Haro E. E, Szpunar J. A, and Odeshi A. G, "Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 54-65, 2016.
- [128] Haris A, Lee H. P, Tay T. E, and Tan V. B. C, "Shear thickening fluid impregnated ballistic fabric composites for shock wave mitigation." *International Journal of Impact Engineering*, 80, 143-151, 2015.
- [129] Petel O. E, Ouellet S, Loiseau J, Frost D. L, and Higgins A. J, "A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction." *International Journal of Impact Engineering*, 85, 83-96, 2015.
- [130] Majumdar A, Butola B. S, and Srivastava A, "An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 148–153, 2013.
- [131] Yu K, Cao H, Qian K, Jiang L, and Li H, "Synthesis and stab resistance of shear thickening fluid (STF) impregnated glass fabric composites." *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, (2012).
- [132] Mahfuz H, "Enhanced stab resistance of armor composites with functionalized silica nanoparticles Enhanced stab resistance of armor composites with functionalized silica nanoparticles," vol. 064307, no. 2009, 2012.

- [133] Rosen B. A, Laufer C. N, Kalman D. P, Wetzel E. D, and Wagner N. J, "Multi-threat performance of kaolin-based shear thickening fluid (STF)-treated fabrics." *Proceedings of SAMPE*, 3(7), 2007.
- [134] Cable A, "AEROSIL® R 972 Hydrophobic fumed silica", 2019.
- [135] Iyer S. S, Zhang Z. P, Kellogg G. E, and Karnes H. T, "Evaluation of deuterium isotope effects in normal-phase LC-MS-MS separations using a molecular modeling approach," *J. Chromatogr. Sci.*, vol. 42, no. 7, pp. 383–387, 2004.
- [136] Pancera S. M, Itri R, and Petri D. F. S, "The effect of poly(ethylene glycol) on the activity, structural conformation and stability of yeast hexokinase," *Prog. Colloid Polym. Sci.*, vol. 128, pp. 178–183, 2004.
- [137] Gölander C. G, Herron J. N, Lim K, Properties of immobilized PEG films and the interaction with proteins. In *Poly (ethylene glycol) Chemistry* (pp. 221-245). Springer, 1992.
- [138] Trinsoutrot P, Vergnes H, and Caussat B, "Three dimensional graphene synthesis on nickel foam by chemical vapor deposition from ethylene," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 179, no. 1, pp. 12–16, 2014.
- [139] Min B. H, Kim D. W, Kim K. H, Choi H. O, Jang S. W, and Jung H. T, "Bulk scale growth of CVD graphene on Ni nanowire foams for a highly dense and elastic 3D conducting electrode," *Carbon N. Y.*, vol. 80, no. 1, pp. 446–452, 2014.
- [140] Jiang W, Xin H, and Li W, "Microcellular 3D graphene foam via chemical vapor deposition of electroless plated nickel foam templates," *Mater. Lett.*, vol. 162, pp. 105–109, 2016.
- [141] Malard L. M, Pimenta M. A, Dresselhaus G, and Dresselhaus M. S, "Raman spectroscopy in graphene," *Phys. Rep.*, vol. 473, no. 5–6, pp. 51–87, 2009.

- [142] Pimenta M. A, Dresselhaus G, Dresselhaus M. S, Cançado L. G, Jorio A, and Saito R, “Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 11, pp. 1276–1291, 2007.
- [143] Hao Y, “Probing layer number and stacking order of few-layer graphene by Raman Spectroscopy,” *Small*, vol. 6, no. 2, pp. 195–200, 2010.
- [144] Siburian R, Sihotang H, Lumban R. S, Supeno M, and Simanjuntak C, “New route to synthesise of graphene nano sheets,” *Orient. J. Chem.*, vol. 34, no. 1, pp. 182–187, 2018.
- [145] Hassan T. A, Rangari V. K, and Jeelani S, “Ultrasonics Sonochemistry Sonochemical synthesis and rheological properties of shear thickening silica dispersions,” *Ultrason. - Sonochemistry*, vol. 17, no. 5, pp. 947–952, 2010.

8. ÖZGEÇMİŞ

Çağlar ERDEM

Adres: 2171 sokak Mustafa Kemal Paşa caddesi no:22 Yelki

Güzelbahçe/İZMİR, TÜRKİYE

Telefon: +90 532 657 00

E-mail: caglarerdem5@gmail.com



EĞİTİM

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

Yüksek Lisans, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı (Yatay Geçiş)

2019-Devam ediyor

Danışman: Doç. Dr. Fethullah GÜNEŞ

Çalışma Alanı: Karbon nanomalzemeler, Nanoteknoloji, 2D malzemeler

GNO: 3.75

Tez Projesi: Grafen Köpük / SiO₂ Katkılı Şok Emici Nanokompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

Yüksek Lisans, Nanobilim ve Nanoteknoloji

2017-2019

Danışman: Doç. Dr. Fethullah GÜNEŞ

Çalışma Alanı: Karbon nanomalzemeler, Nanoteknoloji, 2D malzemeler

GNO: 3.75

Tez Projesi: Grafen Köpük / SiO₂ Katkılı Şok Emici Nanokompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

Lisans, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

2012-2017

GNO: 2.43/4.0

Bitirme Tezi: *Graphene Growth on Copper Wire with Chemical Vapor Deposition for Electrical Applications*

İŞ VE ARAŞTIRMA DENEYİMİ

Tübitak Projeleri

2018-2020

- **Grafen Köpük/ Alfa- Fe₂O₃ Hiyerarşik Nanokompozit Glikoz Biyosensörlerin Geliştirilmesi** (3501 Kariyer Geliştirme Programı - Proje No: 118M621) – Yüksek Lisans Bursiyeri
- **Kayma Gerilimi Altında Sertleşen Jel İçeren Grafen Köpük ile Şok Emici Nano-Kompozit Malzeme Üretimi** (2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı Proje No: 1649B021804502)

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

2016-2020

- *Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile 2 Boyutlu Grafen Sentezleme*
- *Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile 3 Boyutlu Grafen Sentezleme*
- *Kayma Gerilimi Altında Sertleşen Jel Üretimi*
- *Hidrotermal yöntem ile Metal Oksit Nanotel Sentezleme*

Kalite Kontrol Departmanı, EgeKrom End.Ekip.Ltd.Şti.

Eylül 2016-Ocak 2017

(3. Staj)

- *Malzeme girdisi ve çıktısı kontrolü.*
- *AutoCad ile ürün hazırlanması.*
- *Raporlama.*
- *Kaynaklama çalışması.*

Üretim Departmanı, Egepen Deceuninck

Temmuz 2016-Eylül 2016

(2. Staj)

- *Ekstrüzyon ile PVC üretimi.*
- *Üretilen PVC'nin karakterizasyon testleri*

(1. Staj)

- *Alüminyumun Kokil Yöntemi ile Dökümü*
- *Alüminyum Karakterizasyon testleri.*

BECERİ VE DENEYİM

Sentezleme ve Proses: *CVD, PECVD, Hidrotermal yöntem, Nanofabrikasyon, Grafen sentezi, Grafen Transferi, Metal Oksit Nanotel Sentezi, Döküm, Kaynak, Polimer Sentezi.*

Malzeme Karakterizasyonu: Metal, kompozit ve nanomalzemelerin test numunelerinin hazırlanması; Raman spektroskopisi, FTIR/ATR, XRD, SEM, AFM, DHC, UV- Vis spektroskopisi; Çeşitli mekanik testler; Çekme, Basma, Bükme, Sertlik, Nano-batırma.

Bilgisayar Becerisi: AutoCAD, SolidWorks, Origin, MS Office

Diller: Türkçe (anadil); İngilizce

Sınavlar: Yök-Dil (Yabancı Dil Sınavı): 76,250; ALES: 72,643

AKTİVİTELER

- *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Öğrenci Temsilcisi (2012-2017)*
- *Genç Mucitler Topluluğu Kurucu Başkanlığı (2015-2017)*

BİLDİRİLER

- *Ç. ERDEM, F. GÜNEŞ, Graphene Foam with Shear Thickening Fluid as a Shock Absorbing Composite Material, 15th Nanoscience & Nanotechnology Conference, 03 Kasım 2019, 06 Kasım 2019*
- *Ç. ERDEM, F. GÜNEŞ, The Investigation of Mechanical Properties of Graphene Foam/PDMS Composite Structures, Sözlü Sunum, 3. International Students Science Congress, 03 Mayıs 2019, 04 Mayıs 2019*
- *Z. G. MORÇİMEN, Ş. TAŞDEMİR, Ç. ERDEM, F. GÜNEŞ & A. ŞENDEMİR, Investigation Of The Adherence And Poliferation Characteristics Of Sh-sy5y Neuron Model Cells On 3d Graphene Foam Surfaces, Poster Sunumu, 15th International Conference On Nanosciences & Nanotechnologies, 03 Temmuz 2018, 06 Temmuz 2018.*

- Z. G. MORÇİMEN, Ş. TAŞDEMİR, Ç. ERDEM, F. GÜNEŞ & A. ŞENDEMİR, *Investigation Of The Adherence And Poliferation Characteristics Of Sh-sy5y Neuron Model Cells On 2d Graphene Film Layers, Poster Sunumu, The Second International Biomedical Engineering Congress, 24 Mayıs 2018, 27 Mayıs 2018.*
- Ç. ERDEM, B. BEŞLİ, M. ÇETİN, A. AYKAÇ, M. EROL, E. ÇULCULAR & F. GÜNEŞ, *2d Graphene Based Composite With Polyethylene Glycol, Sözlü Sunum, 2. International Students Science Congress, 04 Mayıs 2018, 05 Mayıs 2018.*
- B. BEŞLİ, Ç. ERDEM, E. ŞAHİN, M. EROL, F. GÜNEŞ & A. AYKAÇ, *The Synthesis Of Graphene Sheets Decorated With Au Nanoparticles, Sözlü Sunum, 2. International Students Science Congress, 04 Mayıs 2018, 05 Mayıs 2018.*
- Ç. ERDEM, G. ERSÜ, F. GÜNEŞ, M. PALANDÖKEN, A. AYKAÇ & M. EROL, *Enhancement Of Electrical Properties Via Graphene Coating On Copper Wires, Sözlü Sunum, The Internatinonal Conference On Materials Science Mechanical And Automation Engineerings And Technology, 10 Nisan 2018, 12 Nisan 2018.*
- B. BEŞLİ, Ç. ERDEM, I. DOĞAN, E. S. TURGUT, A. AYKAÇ, M. EROL & F. GÜNEŞ, *Synthesis Of Zno Nanowires On 3d Graphene Foam Via Hydrothermal Method, Sözlü Sunum, The Internatinonal Conference On Materials Science Mechanical And Automation Engineerings And Technology, 10 Nisan 2018, 12 Nisan 2018.*
- Ç. ERDEM, G. ERSÜ, F. GÜNEŞ, M. PALANDÖKEN, A. AYKAÇ, M. EROL & M. CAN, *Graphene Synthesis On Copper Wire Via Chemical Vapor Deposition For Electrical Applications, Poster Sunumu, The 4th International Symposium On Pharmaceutical And Biomedical Sciences, 17 Mart 2018, 17 Mart 2018.*
- Ç. ERDEM, G. ERSÜ, F. GÜNEŞ & U. MALAYOĞLU, *3-d Graphene Synthesis With Chemical Vapor Deposition On Nickel Foam, Poster Sunumu, 13th Nanoscience & Nanotechnology Conference, 22 Ekim 2017, 25 Ekim 2017*

YAYINLAR

- Morçimen, Z. G., Taşdemir, Ş., Erdem, Ç., Güneş, F., & Şendemir, A. (2019). *Investigation of the Adherence and Proliferation Characteristics of SH-SY5Y Neuron Model Cells on Graphene Foam Surfaces. Materials Today: Proceedings, 19, 40-46.*

