



# BİYOMİMETİK TABANLI BİR FİLTRE TASARIMI

Yiğit TÜRKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yiğit TÜRKER

19/07/2024

BİYOMİMETİK TABANLI BİR FİLTRE TASARIMI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Yiğit TÜRKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Son yıllarda önemi giderek artan biyomimetik metodolojisi, doğanın insan yaşamına entegrasyonu bağlamında büyük ilgi görmektedir. Biyomimetik, kökeni itibariyle doğayı taklit etmek anlamına gelmekte olup, doğada bulunan strateji ve süreçlerin doğru analiz edilerek günümüz teknolojisi ile birleştirilmesi sonucunda, doğa ile uyum içerisinde insanlığa katkı sağlayabilecek ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Tasarım fikrinin ortaya çıkışında, örümcek ağları ile filtre ve filtrasyon teknolojilerinin birbirine benzer fonksiyonlarla çalıştıkları dikkat çekmiştir. Örümcek ağları, örümceğin beslenmesi için havadaki böceklerin yanı sıra polen, mantar ve toz gibi partikülleri havadan filtreleyerek ayıran yapılardır. Örümcek ağlarının bu filtreleme özelliklerinin endüstride kullanılan filtrelerde partikül tutma amacıyla kullanılabileceği düşüncesi, tasarımın temelini oluşturmuştur. Bu fikir doğrultusunda, örümcek ağından ilham alınarak biyomimetik tabanlı bir filtre tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarım, birbiri ile aynı formda oluşturulan 11 katlı bir yapıdan meydana gelmektedir. Her kat, toplamda 20 adet spiral ve 240 adet radyal iplikten oluşan 150 mikron kalınlığında bir örümcek ağını temsil etmektedir. Katlarda oluşturulan örümcek ağı yapılı elementler bir araya getirilerek bir filtre yapısını oluşturmaktadır. Tek bir kat, filtreleme yapılamayacak kadar büyük boşluklara sahipken, bir araya gelen katlar bu boşlukları yerleşime göre kapatmakta ve partikül tutabilecek hale getirmektedir. Tasarım, üç farklı model şeklinde ortaya çıkmıştır. İlk modelde, radyal iplikler açısız olarak yer değiştirilerek tek kat üzerindeki boşlukların alttan kapatılmasına ve filtreleme işleminin gerçekleştirilmesine olanak tanırken, ikinci modelde spiral ipliklerin konumsal olarak yer değiştirilmesi sonucunda kat boşlukları kapatılmış ve yine filtrelemeye uygun bir yapı elde edilmiştir. Üçüncü modelde ise, bu iki farklı ipliğin hem açısız hem de konum bazlı yer değiştirmesi sağlanarak filtredeki boşlukların iyice daraltılması hedeflenmiştir. Üç farklı model oluşturulduktan sonra, modellerin üretim safhasına geçilmiştir. Üretim, son zamanlarda oldukça popüler hale gelen eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polijet baskı tekniği yardımıyla reçine kullanılarak gerçekleştirilen eklemeli imalat sürecinde, şartlar doğrultusunda üretilebilecek en ince yapılı üretim gerçekleştirilmiştir. Ürüne, tasarım doğrulama kapsamında standartlara uygun deneysel çalışmalar uygulanmış ve doğrulama yapılmıştır. Tasarımın SEM görüntüleri incelenmiş ve kontrolü sağlanmış, deneyler sonucunda partikül tutan filtre temizlenerek tekrar kullanıma uygun hale getirilmiştir. Bu sayede tasarımın sürdürülebilir bir hale getirildiği onaylanmıştır. Örümcek ağı esinlenmeli biyomimetik tabanlı filtre tasarımının filtre endüstrisine elyaf ve kâğıt haricinde düzenli plastik içerikli bir yapı kullanılarak yeni bir soluk getirmesi hedeflenmiştir. Gelecekte doğa dostu ve sürdürülebilir uygulamaların filtre ve filtrasyon sistemlerinin yapımında insanlığın yararına kullanılacağına hiç şüphe yoktur.

Bilim Kodu	:	91451
Anahtar Kelimeler	:	Bilgisayar destekli tasarım ve üretim, biyomimetik, örümcek ağı, filtre, filtrasyon, doğadan esinlenme, eklemeli imalat
Sayfa Adedi	:	113
Danışman	:	Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

# A BIOMIMETIC-BASED FILTER DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Yiğit TÜRKER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

## ABSTRACT

In recent years, the importance of biomimetic methodology has been increasingly recognized, garnering significant interest in the context of integrating nature into human life. Biomimetics, which fundamentally means imitating nature, involves the accurate analysis of strategies and processes found in nature and their integration with contemporary technology to develop products that can contribute to humanity in harmony with nature. The design concept originated from the observation that spider webs and filtration technologies operate with similar functions. Spider webs filter and separate particles such as pollen, fungi, and dust from the air in addition to catching insects for the spider's nourishment. The idea that these filtration properties of spider webs could be utilized in industrial filters for particle retention formed the basis of the design. Based on this idea, a biomimetic-based filter design inspired by spider webs was developed and produced. The design consists of an 11-layer structure, each with the same form. Each layer represents a spider web composed of 20 spiral and 240 radial threads, each 150 microns thick. The spider web-like elements formed in the layers are assembled to create a filter structure. While a single layer has gaps too large for effective filtration, the combined layers close these gaps depending on the arrangement, making particle retention possible. The design emerged in three different models. In the first model, the radial threads are angularly displaced to close the gaps in a single layer from below, enabling filtration. In the second model, the spiral threads are repositioned, closing the layer gaps and again creating a structure suitable for filtration. In the third model, both types of threads are displaced both angularly and positionally to further narrow the gaps in the filter. After creating three different models, the production phase commenced. The production was carried out using the increasingly popular additive manufacturing technology. The finest possible production was achieved using PolyJet printing technology with resin. The product underwent standard-compliant experimental studies for design validation, which confirmed its efficacy. SEM images of the design were examined and controlled, and after testing, the particle-retaining filter was cleaned and made reusable. This confirmed the design's sustainability. The biomimetic-based filter design inspired by spider webs aims to introduce a new approach to the filter industry by using regular plastic structures instead of fibers and paper. There is no doubt that such nature-friendly and sustainable applications will be used for the benefit of humanity in the production of filters and filtration systems in the future.

Science Code : 91451

Key Words : Computer aided design and production, biomimetic, spider web, filter, filtration, nature-inspired, additive manufacturing

Page Number : 113

Supervisor : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesinde ve tezimin son haline gelmesi sürecinde bana ve projeye teknik ve idari açıdan yön vermesi, fikirleri, danıőmanlıęı ve ileri görüőlülüęü sayesinde baőarıma sağladığı katkılar nedeniyle saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK'a teőekkürlerimi sunarım. Danışman hocam ile beraber eklemeli imalat ile tasarımın ürün haline gelmesinde laboratuvar ve cihaz kullanımını konusunda vermiş olduğu destekten dolayı sayın hocam Dr. Oğulcan EREN'e teşekkür ederim. Ayrıca tüm süreçte maddi ve manevi olarak bana tam destek olan sevgili eőim Betül TÜRKER'e özellikle deneysel çalışmalar sürecinde sağlamış olduğu katkılar sebebiyle teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
EŞİTLİKLERİN LİSTESİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	5
2.1. Biyomimetik .....	6
2.2. Örümcek Ağları .....	7
2.2.1. Genel bilgiler.....	7
2.2.2. Ağ mimarisi.....	8
2.2.3. Ağ yapı elemanları.....	8
2.2.4. Ağ ipliği yapısı.....	10
2.2.5. Ağ geometrisi .....	12
2.2.6. Ağ yapım süreci .....	14
2.2.7. Ağın yapışkanlığı .....	15
2.3. Yapay Örümcek Ağı Çalışmaları .....	15
2.3.1. Sanal örümceğin ağı .....	16
2.3.2. Eberhard'ın yapay örümcek ağı .....	17

	<b>Sayfa</b>
2.3.3. Ağlardaki süsler.....	18
2.3.4. Yapay ve gerçek ağ .....	19
2.3.5. Ağın geometrik tasarımı .....	19
2.3.6. Yapay ağın performansı .....	20
2.3.7. İyonik örümcek ağı.....	21
2.3.8. Yüksek dayanım için eklemeli imalat ile örümcek ağı optimizasyonu ....	21
2.3.9. Diğer çalışmalar .....	23
2.4. Örümcek Ağından Esinlenmiş Biyomimetik Tabanlı Çalışmalar.....	23
2.4.1. Örümcek ağından esinlenen güç hattı iletişim modeli.....	23
2.4.2. Örümcek ağından esinlenilmiş dokuma teknikleri .....	24
2.4.3. Taşıt yol ağları için örümcek ağından coğrafi rotalama .....	25
2.4.4. Örümcek ağından esinlenerek üretilen elektronik deri.....	25
2.5. Filtre ve Filtrasyon .....	26
2.5.1. Genel bilgiler.....	26
2.5.2. Filtrelerin tarihçesi.....	26
2.5.3. Partikül filtre çeşitleri .....	28
2.6. Doğada Bulunan Filtre Mekanizmaları.....	31
2.6.1. Mangrov ağaçları .....	31
2.6.2. Böbrekler .....	32
2.6.3. Deniz üzümü .....	33
2.6.4. Süpürücü solucan.....	34
2.6.5. Mavi balina.....	35
2.6.6. İplik likeni .....	35
2.6.7. Kemancı yengeç.....	36

	<b>Sayfa</b>
2.6.8. Kirpik.....	37
2.6.9. Dev manta vatozu .....	38
2.6.10. Çapraz örümcek .....	38
2.7. Biyomimetik Tabanlı Çalışmalar Sonucu Ortaya Çıkan Filtreler .....	40
2.7.1. Eklemeli imalat ile bağırsak villus yapısı taklidi.....	40
2.7.2. Biyomimetik tabanlı su-yağ ayrıştırıcı filtre .....	40
2.7.3. Elektrostatik nano yapıllı ağ tabanlı filtre .....	41
2.7.4. Eklemeli imalat ile çip üstü filtrasyon.....	42
2.7.5. Yaprak damarı biyoesinlenmeli su filtresi .....	43
2.7.6. Biyoesinlenmeli pasif mikro akışlı lob filtrasyon sistemi.....	44
2.7.7. Aloe vera esinlenmeli partikül filtre .....	45
2.7.8. Balenli balina esinlenmeli girdap filtresi.....	46
2.7.9. Balık ağzı yapıllı tıkanmaz filtre.....	47
2.7.10. Çöl böceği esinlenmeli hidrofilik nem yakalayıcı film .....	48
<b>3. TASARIM VE TASARIMIN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİMİ....</b>	<b>51</b>
3.1. Tasarımın Oluşturulması .....	51
3.1.1. Tasarım fikri .....	51
3.1.2. Tasarımın yapısı .....	51
3.1.3. Tasarımın boyutları .....	53
3.1.4. Tasarım modelleri .....	54
3.2. Eklemeli İmalat ile Üretim .....	59
3.2.1. Eklemeli imalat .....	59
3.2.2. Eklemeli imalat işlem adımları .....	60
3.2.3. Eklemeli imalat metotları .....	61

	<b>Sayfa</b>
3.2.4. Kullanılan eklemeli imalat metodu.....	62
3.3. Tasarımın Eklemeli İmalat ile Üretilmesi .....	63
3.3.1. Tasarımın eklemeli imalata hazırlanması .....	63
3.3.2. Eklemeli imalatta kullanılan cihaz.....	65
3.3.3. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler .....	66
3.3.4. Eklemeli imalatla modelin üretilmesi.....	67
3.3.5. İmalat sonrası işlemler.....	68
3.4. Üretilen Tasarım Modelinin İrdelenmesi .....	72
3.4.1. Üretilen ürünün özellikleri ve sınırları .....	72
3.4.2. Üretilen ürünün görüntülenmesi .....	74
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>81</b>
4.1. Deney Standartları.....	81
4.1.1. Tanımlamalar.....	81
4.1.2. Kısıtlamalar .....	82
4.1.3. Gerçekleştirilen testler.....	84
4.2. Deney Düzenegi .....	85
4.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi.....	90
4.4. Deneyin Sonuçları .....	93
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>99</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>107</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>113</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Eklemeli imalat metotları.....	61
Çizelge 3.2. Polimer esaslı ürünlere ait baskı metotları.....	61
Çizelge 3.3. Model numunelerine ait üretim bilgileri .....	67
Çizelge 3.4. SEM mikroskobunda dairenin en dışında ölçülen boşluk mesafeleri .....	79
Çizelge 4.1. Genel koşullar, basınç farkı, kapasite sonuçları .....	94
Çizelge 4.2. Kaydedilen ağırlık ölçüm değerleri ile hesaplanan verim değerleri .....	95
Çizelge 4.3. Temizlenen ve tekrar test edilen filtrelerin verim karşılaştırması .....	97

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Örümcek ipeği türlerine ve yapı elemanlarına şematik bakış.....	10
Şekil 3.1. Eklemeli imalat işlem adımları algoritması.....	60
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	86



## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Çapraz örümcek .....	5
Resim 2.2. Çapraz örümceğin ipek bezleri ve iplikleri .....	7
Resim 2.3. Örümcek ağı bileşenleri. ....	9
Resim 2.4. Örümcek ipeği lifinin önerilen yapısının şematik gösterimi .....	11
Resim 2.5. Referans ağının geometrisi .....	13
Resim 2.6. Küresel ağ örümceğinin MAS ve MIS liflerinin görüntüsü .....	13
Resim 2.7. Örümcek ağının farklı bileşenlerinin SEM mikrografları. ....	14
Resim 2.8. Gerçek ağ ve yapay ağ karşılaştırması.....	16
Resim 2.9. Yapay örümcek ağı.....	17
Resim 2.10. Yapay ağın süsü .....	18
Resim 2.11. Yapay ağın ölçümü.....	19
Resim 2.12. Naylon ve kauçuk yapay ağın yapısı. ....	20
Resim 2.13. İyonik örümcek ağları.....	21
Resim 2.14. Eklemeli imalat ile sentetik örümcek ağı.....	22
Resim 2.15. Tekstil dokuma tipleri .....	24
Resim 2.16. E-Deri cihazı.....	25
Resim 2.17. Mangrov ağaçları .....	32
Resim 2.18. Böbreğin şematik resmi .....	33
Resim 2.19. Deniz üzümü.....	33
Resim 2.20. Süpürücü solucan.....	34
Resim 2.21. Yetişkin mavi balina.....	35
Resim 2.22. İplik likeni.....	36
Resim 2.23. Sahtekâr yengeç .....	37

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.24. Zürafa kirpiği .....	37
Resim 2.25. Dev manta vatozu .....	38
Resim 2.26. Çapraz örümcek .....	39
Resim 2.27. Villus Yapısı.....	40
Resim 2.28. Oluşturulan gözenekli yapı .....	41
Resim 2.29. Örümcek ağı benzeri yapı .....	41
Resim 2.30. Elektro spreyci üretim yöntemi .....	42
Resim 2.31. Eklemeli imalat ile çip üstü filtrasyon .....	43
Resim 2.32. Nano net yapıli filtre .....	44
Resim 2.33. Vatoz esinlenmeli filtre .....	45
Resim 2.34. Aloe vera esinlenmeli partikül filtre .....	45
Resim 2.35. Girdap filtresi çalışma şekli .....	46
Resim 2.36. Balenli balina esinlenmeli girdap filtresi .....	47
Resim 2.37. Balina köpekbalığı D-Tip kaburga .....	47
Resim 2.38. Kaburga benzeri filtre .....	48
Resim 2.39. Çöl böceği sırtındaki hidrofilik film tabakası ve oluşumu .....	49
Resim 3.1. Tek bir katmanın önden görünüşü .....	52
Resim 3.2. Tek bir katmanın önden yakınlaştırılmış görünüşü.....	52
Resim 3.3. Tek bir katmanın önden yakınlaştırılmış görünüşü-2 .....	53
Resim 3.4. Radyus model tasarımının oluşturulması.....	56
Resim 3.5. Spiral model tasarımının oluşturulması .....	57
Resim 3.6. Radyus-spiral model tasarımının oluşturulması .....	58
Resim 3.7. Polijet metodu.....	63
Resim 3.8. ObjetStudio arayüz görüntüsü .....	64

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.9. Modellerin arayüzdeki baskı ön izlemesi .....	64
Resim 3.10. Strasys Objet-30 Prime Cihazı.....	65
Resim 3.11. Strasys RGD-525 model malzemesi özellikleri ve görseli .....	66
Resim 3.12. Alınan ilk model çıktıları .....	67
Resim 3.13. Model çıktısının temizlenmemiş ilk hali .....	68
Resim 3.14. Hava kompresörü.....	69
Resim 3.15. Basınç regülatörü .....	70
Resim 3.16. Teflon hortum .....	70
Resim 3.17. Destek çözdürücü.....	71
Resim 3.18. Kostik kimyasalı .....	71
Resim 3.19. Kullanılan destek temizleme düzeneği .....	72
Resim 3.20. Model ürün çıktıları .....	73
Resim 3.21. ZIESS EVO MA10 SEM mikroskobu.....	74
Resim 3.22. 1 mm ve 200 µm ölçekli radyus model SEM görüntüsü .....	76
Resim 3.23. 1 mm ve 100 µm ölçekli spiral model SEM görüntüsü.....	77
Resim 3.24. 200 µm ölçekli radyus-spiral model SEM görüntüsü .....	78
Resim 4.1. Deney düzeneği .....	87
Resim 4.2. Hava üfleyici.....	88
Resim 4.3. Manometre.....	88
Resim 4.4. Şırınga.....	89
Resim 4.5. Filtre yuvası .....	90
Resim 4.6. Grafit tozu.....	91
Resim 4.7. Kullanılan hassas tartı.....	92
Resim 4.8. Tozun filtreye gönderildiği an.....	93

**Resim**

**Sayfa**

Resim 4.9. Temizlik sonrası SEM görüntüleri..... 96



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>min</b>	Dakika
<b>gr</b>	Gram
<b>kPa</b>	Kilopascal
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>µm</b>	Mikrometre
<b>mg</b>	Miligram
<b>mm</b>	Milimetre
<b>nm</b>	Nanometre
<b>Pa</b>	Pascal
<b>h</b>	Saat
<b>°C</b>	Santigrat Derece

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>CARS</b>	Anti-Vuruşlu Raman Mikroskobu
<b>EPA</b>	Verimli Partikül Yakalayıcı
<b>FDM</b>	Erimiş Biriktirme Modellemesi
<b>HEPA</b>	Yüksek Verimli Partikül Yakalayıcı
<b>ISO</b>	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
<b>MAS</b>	Majör Ampullat Spiral
<b>MIS</b>	Minör Ampullat Spiral
<b>PM</b>	Partikül Madde
<b>PJ</b>	Polijet
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SLA</b>	Stereolitografi
<b>UV</b>	Ultraviyole



## 1. GİRİŞ

Bu çalışma doğada varlığını binlerce yıldır sürdürmüş olan örümceklerin yaşamlarına devam edebilmeleri için geliştirmiş oldukları örümcek ağlarının aslında hava akışı olan bir bölgedeki uçan böcekleri içinde buldukları hava akış ortamından ayırmak için bir diğer deyişle filtrelemek için bu ağları kullanmasını fikri temel olarak hazırlanmıştır. Ön araştırmalar sırasında yavru örümceklerin büyüme sırasında polen ve mantar partiküllerini avlamasının yanında ağların toz kaplandıkları için yapışkan özelliklerinin kaybolması ve örümceğin bu ağı tekrar yapmak zorunda kalması dikkat çekmiştir. Bu bilgi ışığında örümcek ağlarının aslında bir ortamdaki hava akışından partikülleri ayırma işlevi gören filtrelerle benzerlik gösterdikleri ve örümcek ağından esinlenilerek bir filtre tasarımı oluşturulabileceği tezinin üzerinde durulmuştur.

Araştırmada öncelikle örümcek ağlarının öğrenilmesi, yapay örümcek ağı çalışmalarının incelenmesi, örümcek ağını taklit eden çalışmalar, biyomimetik tabanlı örümcek ağı çalışmaları ve biyomimetik tabanlı ağ ve filtre çalışmalarının incelenerek bir yol haritası çıkarılması amaçlanmıştır. Filtre mekanizmaları, partikül filtrelerin özellikleri ve kullanım alanları ile yapay örümcek ağlarının hem kullanım alanlarının hem de üretim metodlarının öğrenilmesi ile literatür çalışmasına katkı sağlanmıştır. Tasarım süreci gerçek örümcek ağlarından örnek alınarak şimdiye kadar üç boyutlu modelleme ve simülasyon programları kullanılarak ortaya çıkartılmış yapay örümcek ağlarından yararlanılarak ilerlemiş ve sonuçta katmanlı ağ yapısı biyomimetik taban kullanılarak tamamlanmıştır. Eklemeli imalat bu noktada örümcek ağının üretilmesi için en uygun olduğu düşünülen ve buna göre seçilen bir üretim teknolojisi olmuştur. Olabildiğince ince ve ağ benzeri bir yapının katmanlı olarak üretilmesinin ve bir örümcek ağı formu ve fonksiyonunun sağlanıyor olması çalışmanın gelmesi düşünülen nokta olarak belirlenmiştir. Tasarım ve üretim süreçleri tamamlandıktan sonra bir dizi filtre verim, kapasite ve basınç farkı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu adımların tamamı biyomimetikğin temel kanunları esas alınarak yürütülmüş ve doğadan esinlenirken doğaya zarar vermeden, doğa kadar verimli, temiz ve yeniden kullanılabilir bir ürün ortaya çıkarmaya çalışılmıştır.

### Problem durumu / Konunun tanımı

Problem yapay ve geri dönüştürülebilir bir filtreleme elemanı tasarımı yapmaktır. Problemi çözüme kavuşturulmak için doğadan ilham alma yoluna gidilmiş ve Biyomimik disiplini içerisinde konu iredelenmiştir. Doğanın binlerce yıldır süregelen adaptasyon veya evriminden örümcek ağları da en iyi halini almış ve av yakalamaya yarayan bir filtre haline dönüşmüştür. Yavru örümceklerin av yerine ağlarına takılan polen ve toz partikülleri ile besleniyor olması örümcek ağlarının taklit edilerek yapay partikül filtresi tasarlama ve üretme yolunun önünü açmıştır. Doğa kadar temiz, verimli ve az enerji sarfiyatlı bir sistem olmadığı göz önüne alınırsa filtreler için örümceklerden ilham alınarak ortaya konacak bir tasarımın ne kadar işe yarar bir tasarım olacağı fikri araştırma çalışmasının kaynağını oluşturmuştur.

### Araştırmanın amacı

Araştırma sonucunda elde edilmek istenen filtre ile doğadan esinlenilerek, doğada avlanma hedefiyle yakalama işlevi gören bir mekanizmanın eklemeli imalat ile üç boyutlu modelleme yöntemi kullanılarak yapay şekilde üretilmesini sağlamaktır. Biyomimetğin amaçları doğrultusunda bu filtre geri dönüştürülebilir olmalıdır. En az doğadaki kadar verimli çalışmalıdır. Farklı birden çok fonksiyonu yerine getirebilmelidir. Bu amaç doğrultusunda örümcek ağları taklit edilerek üretilecek ve bu filtre hem olabildiğince esnek hem de olabildiğince dayanıklı olmalıdır. Ayrıca istendiği zaman aynı örümcek ağlarındaki gibi geri dönüştürülerek kullanılabilinmelidir. Örümcek ağları polen, besin tutma ve avlanma konusunda en iyi filtreleme sistemlerinden birini örnek teşkil etmektedir. Bu nedenle çalışmanın amacı bu sistemin taklit edilmesi ile bir filtre tasarımının ortaya çıkartılmasıdır.

### Araştırmanın önemi

Örümcek ağları form bazında yapay olarak benzerleri üretilebilen bir yapıdır. Ancak bu yapay ağ yapısı üretildiğinde filtre görevi üstlenen bir yapı olarak henüz düşünülmemiştir. Filtre yapısı gereği yakalama ve tutulum işlevlerini yerine getirmesi gereken bir yapı olduğu için katmanlı olmalıdır. Yani tek kat örümcek ağı filtre olmaya yetememektedir. Örümcek ağı hem ipek ve yapışkan olan ağ malzemesi hem topografik yapısı hem de hava akışı yollarına yapılması özellikleriyle avları havadan filtreleyerek yakalama görevini yerine

getirmektedir. Ancak şimdiye kadar yapay olarak üretilen bir örümcek ağı çalışmasında filtreleme özelliğinin üzerinde durulduğu yapılan araştırmalar sırasında görülmemiştir. Çalışmalar genelinde ya örümcek ağının dayanıklılığı ya da esnekliği öğrenilip taklit edilmeye çalışılmıştır. Ya da bu dayanıklılık özelliğinin nasıl ortaya çıktığıyla ilgili çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmada ise ağın fonksiyonu ve formu birlikte taklit edilerek tam da esas amacı olan filtreleme özelliği kullanılmak istenmektedir. Bu çalışmada aynı zamanda eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak ortaya çıkan tasarımın üretilmesini de içerdiğinden yapay örümcek ağı üretimine de farklı bir bakış açısı getirmektedir. Tek seferde katmanlı bir örümcek ağı yapısı çıkartabilme, diğer üretim metotları kullanılarak üretilmeyecek bir ürün oluşturma ve ortaya çıkan ürünün geri dönüştürülebilir olması gibi eklemeli imalat özellikleri çalışmada oldukça önemlidir. Bu çalışma önceden yapılmış eklemeli imalat, örümcek ağı ve filtre çalışmalarını bir araya getirerek biyomimetik metotları ile yeni bir tasarım yaklaşımı ve ürün önermesinden dolayı yenilikçi bir filtre çalışması olarak ifade edilebilir.

#### Varsayımlar / Sayıtlılar

Doğanın ürünleri olan genetik yapılar bu çalışmanın konusu olmayacaktır. Ayrıca ağ ipliği olan ipeğin biyolojik yapısı ve üretimi de değerlendirmeye alınmayacaktır. Yapay ağ, gerçeğine çok yakın bir şekilde tasarlanacak, eklemeli imalat ile katmanlar halinde üretilip birleştirilerek bir filtre yapılacaktır. Filtrenin üzeri sabunlu su ile yıkanarak temizlenmekte, daha sonra basınçlı hava ile kurutularak tekrar kullanıma hazır hale getirilmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile oluşturulduğu için son yıkama işleminden sonra geri dönüşüm işlemi gerçekleştirilebilir bir ürün ortaya çıkmıştır.

#### Sınırlılıklar

Araştırmanın sınırları doğayı taklit etme noktasında kendini belli etmektedir. Doğada bulunan organizmaların çoğu tam olarak doğadaki şekliyle taklit edilememektedir. Bu nedenle olabildiğince gerçek örümcek ağına benzetilmeye çalışılmaktadır. Konu en başta örümcek ağı için kullanılan ipek ağ iplik malzemesine yakın ürünün elde edilememesi ile başlamaktadır. Örümcek ağları 2-15 µm aralığında olduğu için bu incelikte yapay ağın üretilmesi neredeyse imkansızdır. Üretilse bile yapısal ve mekanik özelliklerine yaklaşılamamaktadır. Dayanıklılık ve esneklik konusunda yaklaşma çalışmaları her geçen

gün artmaktadır. Bu noktada eklemeli imalat kullanılırken olabildiğince küçük bir nozul seçilmesine karşın ağ yapısı kadar da ince bir iplik üretilmemektedir. İmalat noktasında ise diğer endüstriyel filtreler gibi düşük maliyetlere üretim söz konusu olmayacaktır. Aynı zamanda üretim eklemeli imalatla yapılacağı için ürünün esnekliği de üretim yapılan malzemenin esnekliği ile doğru orantılıdır. Çalışmada partikül tutma verimi için de doğal bir deney ortamı sağlanamayacağından bu noktada da doğal ağ ile yapay ağ arasındaki farklar ortaya çıkacak ve doğadaki gibi rastgele sonuçlar elde edilemeyecektir.



## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çalışmanın literatür araştırması giriş kısmında verilen sıralama gözetilerek yapılmış ve öncelik örümcek ağlarına verilmiştir. Örümcek ağlarının doğa kaynaklı harika tasarımları, formları ve fonksiyonları incelenerek bir rota oluşturulmuş daha sonra bu rota filtre için gerekli kriterlerle biyomimetik kanunları çerçevesinde birleştirilmiştir. Son olarak benzetme, yapaylaştırma ve yeni ürün tasarımı süreçleri izlenerek çalışma tamamlanmıştır.



Resim 2.1. Çapraz örümcek (Whyte ve Anderson, 2017)

Literatürde yapılan araştırmalar sırasında örümcek ağı benzeri bir filtrenin araştırılması konularına öncelik verilmiştir. Örneğin başlangıçta küresel ağları ile ünlü olan Resim 2.1.'de görülen bahçe örümceği adı verilen çapraz örümcek olarak da bilinen örümcek türlerinin ağları ile ilgilenilmiş ve ağlarla ilgili tüm bilgiler derlenmiştir. Daha sonra bu ağların yapay olarak üretilmesi ya da taklit edilmesi konusu üzerinde durulurken taklit edilme sebepleri de irdelenmiştir. Ardından biyomimetik tabanlı yapılmış örümcek ağı ve filtre çalışmaları geniş çerçevede ele alınmış ve literatür çalışmasına eklenmiştir. Filtreler ve partikül filtreleri özelinde yapılan genel bir araştırmadan sonra da eklemeli imalat ve yöntemleri araştırılmıştır. Son olarak kaplama, yıkama ve geri dönüştürme süreçlerinin ürün üzerinde

kullanılmak istenmesi sonucu bu konu da araştırma çalışması içerisinde kendine yer edinmiştir.

## 2.1. Biyomimetik

Yunanca "bios" (yaşam) ve "mimesis" (taklit) kelimelerinin birleşiminden türeyen biyomimetik terimi, ilk olarak 1950 yılında Amerikalı mühendis Otto Schmidt tarafından tanımlanmıştır. Biyomimetik, doğanın milyonlarca yıllık evrim sürecinde geliştirdiği yapı, süreç ve stratejileri inceleyerek, insanlığın karşılaştığı mühendislik ve tasarım sorunlarına sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler bulmayı amaçlayan disiplinlerarası bir yaklaşımdır. Bu tasarım prensibi, doğadan esinlenerek teknolojik ve mühendislik sorunlarına yaratıcı ve çevre dostu çözümler sunmayı hedefler.

Biyomimetik yaklaşım, enerji verimliliği, malzeme bilimi, mimarlık, tıp gibi çeşitli alanlarda doğanın optimize ettiği çözümleri model alarak, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir uygulamalar geliştirilmesine olanak sağlar. Böylece, doğanın karmaşık ve etkili sistemlerinden öğrenilerek insan yapımı sistemlerin performansı ve dayanıklılığı artırılabilir. Biyomimetik, doğanın yüzyıllar boyunca denediği ve mükemmelleştirdiği doğal süreçlerden ilham aldığından dolayı, insanlık için daha etkili ve verimli çözümler üretme potansiyeline sahiptir (Eggermont, 2007).

Doğa, 3,8 milyar yıllık evrim süreci boyunca hangi stratejilerin etkili olduğunu, hangilerinin uygun olduğunu ve en önemlisi hangilerinin Dünya üzerinde sürdürülebilir olduğunu keşfetmiştir. İnsanların çözmeye çalıştığı pek çok sorun, doğada zaten çözülmüştür. Önemli olan, insanların bu çözümleri bulmak için doğaya yönelmeleridir. Evrimsel süreçte mükemmelleşmiş stratejiler ve mekanizmalar içeren doğa, biyomimetik yaklaşımla değerlendirildiğinde, insanlığın karşılaştığı zorluklara yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, doğanın sunduğu bilgi birikiminden faydalanmak hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için büyük önem taşımaktadır (Benyus, 1997).

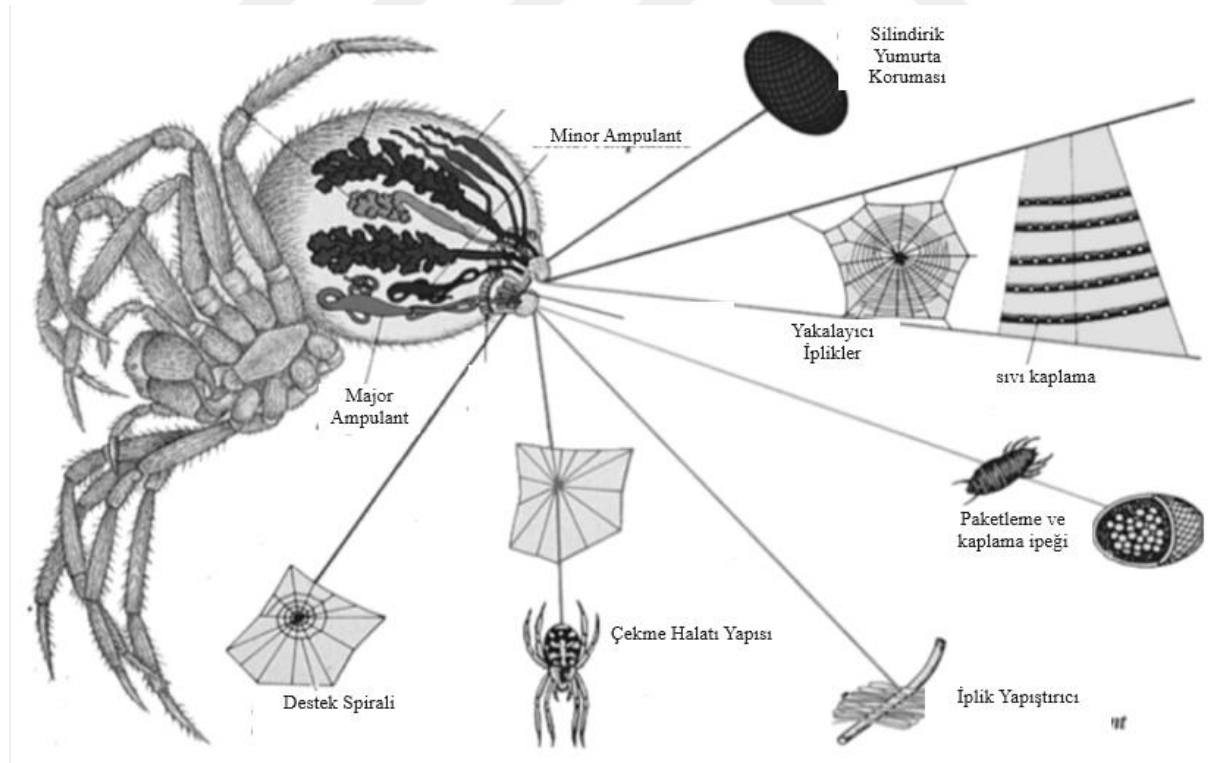
Sonuç olarak biyomimetik, doğanın milyonlarca yıl süren evrimsel süreçler sonucunda geliştirdiği çözümleri mühendislik ve bilim alanlarına uygulayarak yenilikçi çözümler sunan bir disiplindir. Bu alan, doğanın en etkili ve sürdürülebilir stratejilerini model alarak insan

yapımı sistemlerin performansını ve sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Biyomimetik, teknolojik gelişmelerin yanı sıra çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da büyük bir potansiyele sahiptir. Bu yöntem, doğadan ilham alarak hem verimli hem de ekolojik uyumlu çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

## 2.2. Örümcek Ağları

### 2.2.1. Genel bilgiler

Örümcekler basit yaşam halatlarından tüy dökme için barınaklara ve koruyucu yumurta keselerinden avlanmak için oluşturulan ağlara kadar bir dizi yapıyı inşa etmek için ipek kullanan ağ ustalarıdır. Avlanmak için kullanılan küresel ağ dokuma, örümceklerin tek bir evrimsel soyu olan *Orbiculariae*'den gelmektedir. Günümüzde varlığını sürdüren yedi aile, yuvarlak vagon tekerleği şeklinde, mimarisi nedeniyle kolayca tanınan ve bilinen, basmakalıp iki boyutlu küresel ağları üretmektedir (Blackledge, 2011).



Resim 2.2. Çapraz örümceğin ipek bezleri ve iplikleri (Rhisiart, 1994)

Örümcek ağı, Resim 2.2. de görüldüğü gibi av yakalama, karşı cins ile temasa geçme, dost ya da düşmanı erken tespit etme, iklime ya da avcılara karşı koruma sağlama fonksiyonlarına

da sahiptir (Rhisiart,1994). Örümceklerin küresel ağları bahçelerin en genel ve ilgi çekici unsurlarıdır. Açık ara tüm ağ tiplerinin arasından bilim camiası tarafından en çok araştırılanı olarak öne çıkmaktadır. Çünkü küresel ağlar en basit yapılı ağ tipi olarak görülmektedirler. Araştırma çalışmalarının içerdiği deneylerde genel olarak küresel ağları ile ünlü ve çok bulunan çapraz ya da bahçe örümceği olarak da adlandırılan *Araneidae* familyasına bağlı *Araneus Diadematus* örümceği kullanılmaktadır (Vollrath, 1997).

Birçok 2 boyutlu ağ yapan örümcek ailesinin yanında *Araneidae* ailesi ağ yapımına en iyi örnek olarak gösterilmektedir. 0,1 mg ile 0,5 mg arasındaki ağırlıkta iplik kullanarak 30-50 dakikada ağın tamamını kurma kapasitesine sahiptirler. Bu özellikleri ile en hızlı ağ kuran örümcekler olarak da bilinmektedirler (Jyoti, 2018).

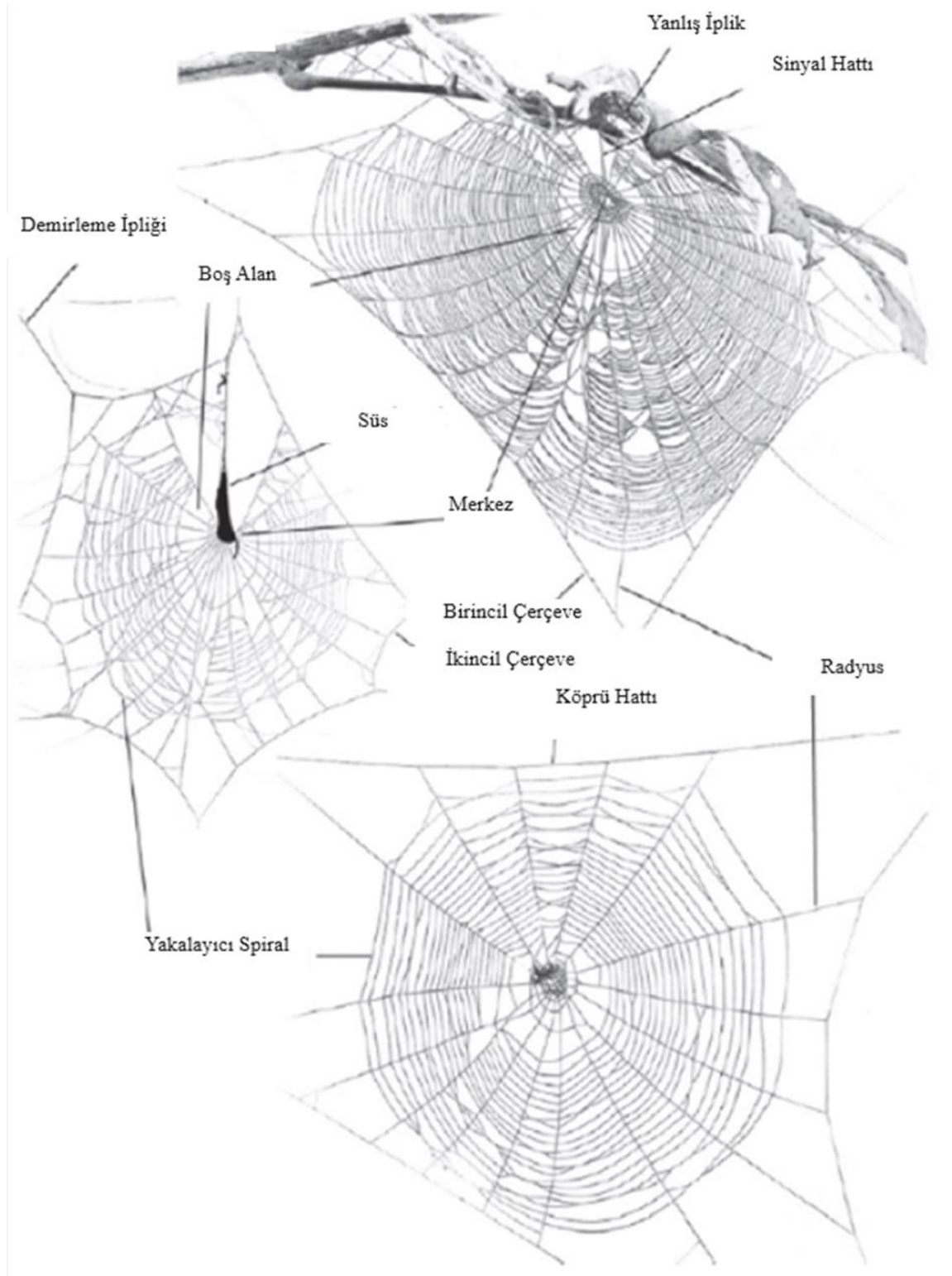
### 2.2.2. Ağ mimarisi

Örümcekler, aynı anda hem yüksek güç ve esneklik hem de kırılabilirlik ve bozulma gösteren gelişmiş av yakalama mimarileri olarak hizmet eden karmaşık ağlar örürler (Qin, 2015). Örümcek ağları oldukça çeşitli mimari yapılar göstermektedir. Bu mimari yapı tipleri av tipi, örümceğin ağırlığı, ortamın yarattığı basınç, iklim koşulları ve bitki örtüsü yapısına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin dış etmenlerden sıcaklık, ipek mekaniklerini ve ağ mühendisliğini etkilediği gibi nem ise visko elastikliği ve yapışkanlığı etkilemektedir. Sıcaklık düşüncü spiral ağların arasındaki mesh sayısı azalmakta ve mesafe artmaktadır. Nem azalınca da yine benzer olarak örümcek ağının alanı küçülmekte, mesh aralıkları azalmaktadır (Vollrath, 1997). Örümcek ağı genel olarak incelendiğinde ağları iletken ve esnese bile stabil hale gelebilen stabil bir yapıdır. Dahası örümcek ağının av yakalamak dışında havada duran partikülleri, polen ve mantar porlarını yakalama becerisi de bulunur (Vollrath, 2013). Avlarını yakalamak için yapışkan, gerilebilir ve yarısaydam ağlar kullanırlar (Jyoti, 2018).

### 2.2.3. Ağ yapı elemanları

Bir küre ağın ana yapısal elemanları Resim 2.3.'de görüldüğü gibi alt tabakaya sabitlenen köprü hattı, doğrudan alt tabakaya ya da ağdaki diğer hatlara bağlanabilen çerçeve şeritleri, radii yani radyus olarak bilinen iskeleti göbekte birbirine bağlayan hatlar ve yapışkan ipekler kullanılarak yapılan çevreden merkeze doğru spiraller çizerek yarıçaplara bağlanan ve

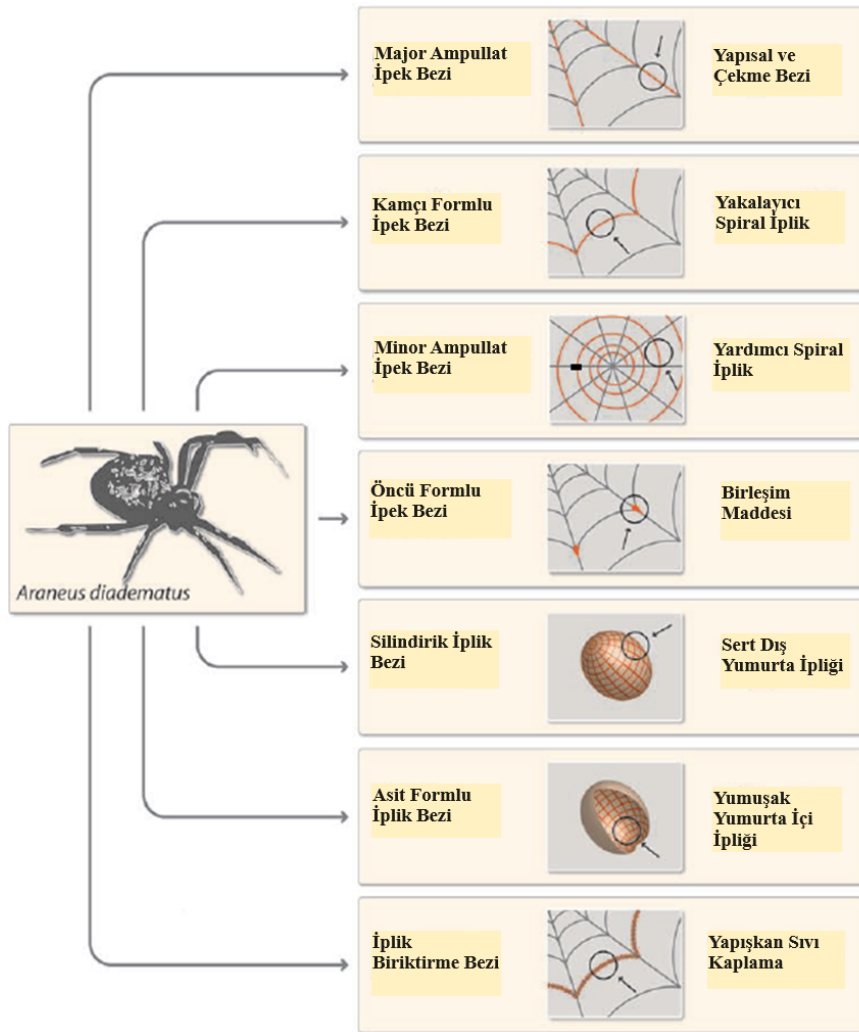
sürekli bir iplik olan yakalama spirali olarak sayılabilir. Ayrıca yapışkan olmayan ve ağ oluşurken ortadan kaldırılan yardımcı ağ iplikleri de yapısal elemanlara ek olarak sayılabilir (Blackledge, 2011).



Resim 2.3. Örümcek ağı bileşenleri (Blackledge, 2011)

### 2.2.4. Ağ ipliği yapısı

Tipik bir daire dokumacı örümcek, ağını yapma aşamasında avları tutan yapışkan dairesel yakalayıcı spiralleri desteklemek üzere hazırladığı iskelesini iki tip ağ ipliği kullanarak kurar. Bunlardan ilki esas radyalleri oluşturan Majör Ampullat ipeği diğeri ise bu ipeğin doğru şekilde kurulabilmesi için gereken destekleyici ve geçici iskeleyi kurmaya yarayan minör ampullat ipeğidir (Römer, 2008).

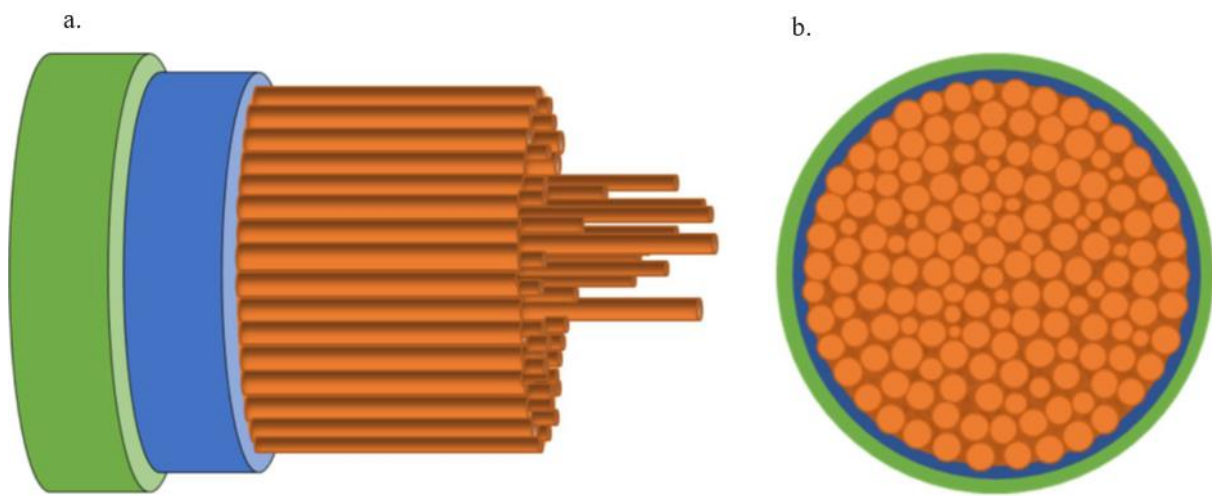


Şekil 2.1. Örümcek ipeği türlerine ve yapı elemanlarına şematik bakış (Römer, 2008)

Destek ipliği ağ kurulduktan sonra Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi örümcek tarafından dönüştürülür. Majör Ampullat ipek ipliği hem radyalleri hem de çekme halatı denilen ve örümceğin tehlikelerden sallanarak kaçmasını sağlayan ipek tipine verilen addır. Minor Ampullat ipeği ise yapışkanlığı ile bilinen ve ağı spiral olarak dönerek kaplayan daha ince yapıya ancak daha esnek ve yapışkan ipek tipidir (Römer, 2008). Radyal majör iplikler için

özellikle dayanıklılık ve sertlik gerekiyken spiral minör iplikler için elastiklik ve yapışma derecesi oldukça önemlidir (Kaplan, 1993). Radyal ağ iplikleri spirallere göre çok daha katı ve güçlüdür (Jyoti, 2018).

Ağda kullanılan Resim 2.4.'te görülen ipek ipliklerinin kesitine bakılacak olursa, ipliklerin ortasında protein çekirdek bulunmaktadır. Bu çekirdek farklı tiplerde protein dizilimlerinin katmanlaşarak birleşmesi ile oluşmaktadır. Çekirdeğin dış katmanında ise çekirdeği çevreleyen lipid tabakası bulunmaktadır (Lachina, 2023).



Resim 2.4. Örümcek ipeği lifinin önerilen yapısının şematik gösterimi a) Fiber yandan olan görünüm, b) fiberin kesiti (Lachina, 2023)

İpekler 30.000'den fazla türde örümcek tipi tarafından üretilmektedir. Toplamda ise 113.000 tür böcek ipek üretme yeteneğine sahiptir. Ayrıca Dünya'da 1000 çeşit de ipek formu mevcuttur. İpek, biyomimetik açıdan taklit edilmeye en uygun yapılardan biridir. Çünkü sağlamdır, esnektir ve çok uzun zamanlar içerisinde sürdürdüğü gelişimini tamamlamış bir doğal üründür. Malzeme biliminin çok farklı amino asit dizilimleriyle bir araya gelmiş bu yapı ile ilgilenmesi kaçınılmazdır. Radyal majör iplikler için özellikle dayanıklılık ve sertlik gerekiyken spiral minör iplikler için elastiklik ve yapışma derecesi oldukça önemlidir (Kaplan, 1993).

Örümcek ipeği diğer ticari ipeklere göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle biyoteknoloji genellikle örümcek ağlarına yönelmiştir. Özellikle glikoprotein yapıştırıcıları, yüzlerce paralel fibrili bir araya getiren protein bant ve en dışı fiber bir kablo

gibi çevreleyen lipid katmanları ile küresel ağ iplikleri başarılı ancak bir hayli karmaşık yapılardır (Vollrath, 2000).

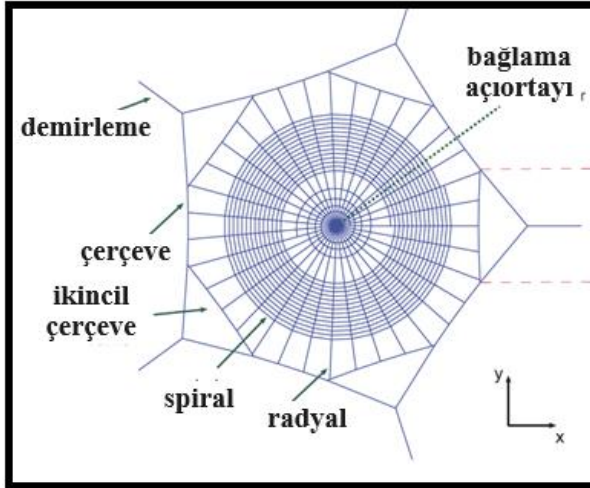
Küresel ağ tipleri geometrik olarak basit titreşim, karmaşık titreşim, plaka, daha fazla ya da daha az boyutlarda geometrik yapı, yapışkan olup olmama durumlarına göre değişkenlik gösterir. Bu adaptif geometrilerin en yaygın ve en çok üzerinde çalışma olanı 2 boyutlu, nokta simetrik, yapışkan olmayan radyal ve yapışkan spiral iplik kullanılarak yapılan basit titreşimli olanıdır. Geometrik simetri yapısı, büyük oranda havanın filtrelenmesi ve havadaki partiküllerin ya da ağların daha kolay yakalanması amacıyla oluşturulmaktadır (Rhisiart, 1994).

Ağın tamamı, topolojisi, geometrik parametreler (örneğin ağ boyutu, iplik çaplarının oranı, iplik uzunlukları vb.) ve ağı oluşturan bireysel ipliklerin mekanik özellikleri arasındaki karmaşık etkileşim dahil olmak üzere entegre bir sistem olarak incelenmelidir. Ağ üretmek, örümcekler için enerji maliyeti yüksek bir işlemdir. Bu sebeple ağları tipik olarak birkaç  $\mu\text{m}$  çapındaki son derece ince ipliklerden oluşmaktadır. Bu iplikler işlevini uzun süreler boyunca görece kadar güçlüdür. Küresel ağlarda spiral minör ipliklerin radyal majör ipliklere oranı 0.1 ile 1 arasında değişmektedir (Qin, 2015). Ayrıca belirtilmelidir ki komşu radyal ağların aralarındaki mesafeler merkez çevresindeki mesafelere göre oldukça yakındır (Lin, 1995).

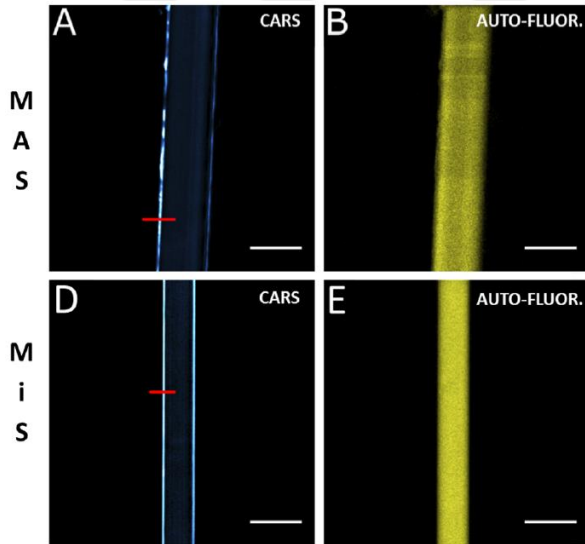
### 2.2.5. Ağ geometrisi

Ağ boyutları 2 cm'den 2 m ye kadar değişkenlik gösterebilmektedir. Bu durum örümceğin vücut boyutuyla doğrudan ilişkilidir (Blackledge, 2011). Ortalama bir ağ alanı aralığı ise 14300  $\text{cm}^2$  ile 32000  $\text{cm}^2$  aralığındadır (Rhisiart, 1994).

Örümcek ağları üzerinde yapılan ölçümler genellikle boyutlara göre değişkenlik göstermektedir. Farklı çalışmalar farklı iplik çap ölçüleri paylaşmaktadır. Örneğin Lachina ve arkadaşları Resim 2.6.'de görüntüsü olan, yaptıkları bir CARS mikroskobu boyut çalışmasına göre majör ampullat ipeğini  $13.8 \pm 1,5 \mu\text{m}$  aralığında ölçülürken minör ampullat ipeğinin kalınlığını  $5,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$  olarak ölçmüştür. Aynı zamanda dış yağ katmanının çok ince  $0,1 \mu\text{m}$  olduğu da bu çalışmada tespit edilmiştir (Lachina, 2023).

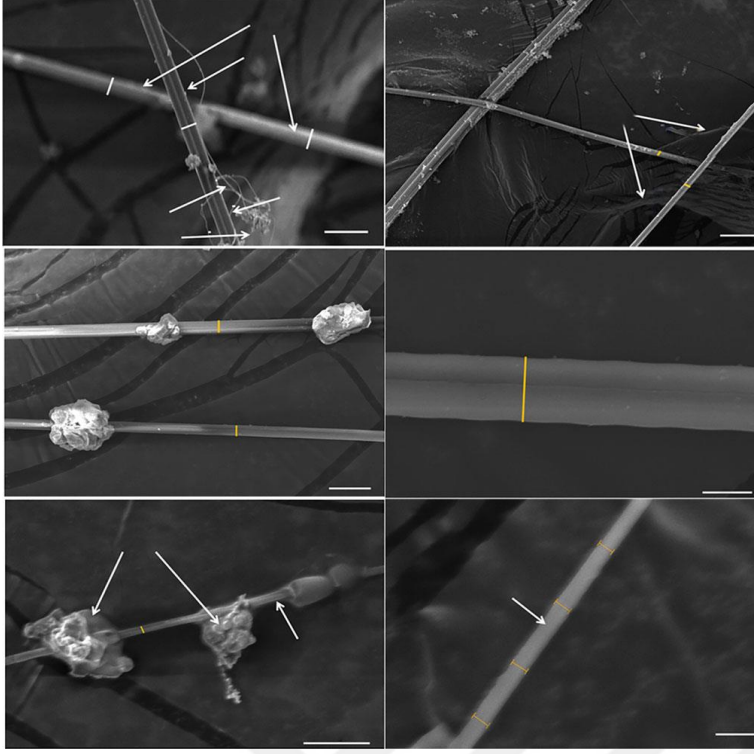


Resim 2.5. Referans ağının geometrisi (Lachina, 2023)



Resim 2.6. Küresel ağ örümceğinin MAS ve MIS liflerinin görüntüsü (CARS Mikroskobu) (Lachina, 2023)

Resim 2.7.'de görüldüğü üzere Jyoti ve arkadaşlarının SEM mikroskobu ile yapmış olduğu birçok farklı ağ için çap boyut ölçümüne göre ise radyal yani majör iplik çapı  $2,67 \mu\text{m}$  ile  $5 \mu\text{m}$  arasında iken spiral iplik çapı  $0,72 \mu\text{m}$  ile  $1,04$  aralığında çıkmıştır. Aynı çalışmada farklı örümcekler kullanıldığı için toplanan örümcekler laboratuvar koşullarında ağlanmaya bırakılmış ve ölçüm için taze olanlardan biri seçilmiştir. Seçilen ağda diğer ağların ortalaması gibi 29 adet spiral ve 24 adet radyal iplik olduğu gözlemlenmiştir. Yani radyallerin birbiri ile yapmış olduğu açı  $360/24=15^\circ$  olarak hesaplanmıştır (Jyoti, 2018).



Resim 2.7. Örümcek ağının farklı bileşenlerinin SEM mikrografları (Jyoti, 2018)

Soler ve arkadaşlarının örümcek ağı geometrisi üzerine çalışmalarında ise  $0.033 m^2$  ile  $0.038 m^2$  arasında ağ boyutları belirlenirken 35 adet radyus ve 30 spiral ağ ipliğinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada majör ampullat ipeğinin boyutu  $15 \mu m$  ve minör ampullat ipeğinin boyutunu  $8 \mu m$  olarak belirtilmiştir (Soler, 2016).

### 2.2.6. Ağ yapım süreci

Örümcekler, ağ için bir alan bulmaktadır. Bulunan bu alan doğrudan ağın boyutlarını oluşturmaktadır. Daha sonra örümcek, ağın kalın iskeletini alana kurma işlemine başlayarak iskeletin içini ince ağ ile dönüş yapacak şekilde doldurarak ağı tamamlar (Vollrath, 1997). Örümcek öncelikle alan, zamanlama, yerellik, ağın kurulup kaldırılma aralığı, adaptasyon, iklim ve diğer dış etmenlerin etkilerine göre seçim yapar. Daha sonra ağın mesh, sıklık ve ağ yoğunluğunun dağılımını belirler. Dış çerçeve ile orta nokta arasına radyal iplikleri yerleştirir. Kendine ağın tam ortasında bir alan belirler. Bu alanı ortada belirlemesinin sebebi ağın her noktasına müdahale edebilmektir. Radyallerin yapımı tamamlandıktan sonra destek iplikleri ile belirli aralıklara spiral ağ benzeri destek ipliklerini yerleştirir. En sonunda da en dıştan başlayarak merkeze doğru spiral iplikleri yerleştirirken bir taraftan da destek ipliklerini toplar. Spiral iplikler örümcekten çıkarken yapışkan ve hidroskopik bileşen

karışımı glikoprotein içeren su bazlı yapışkan sıvı ile kaplanır. Spiraller tamamlandıktan sonra ağın orta noktasına yakın şekilde böceklerin ilgisini çekecek bir süs yapılıır. Bu sayede ağ av yakalamaya hazır hale gelir.

Ağın tasarımı tamamen örümceğin ağ üretme maliyetine bağlıdır. Ne kadar iyi beslenirse o kadar doğru seçilmiş bir ağ oluşturur. Radyal iplikler yakalama ile değil tamamen yapının sağlamlığı ile ilgilidir. Ağ sınırları ve mesh aralıkları küçük avların kaçmaması için yeterince az ve büyük avlar iki noktadan temas ile yakalanabilsin diye yeterince çok olmalıdır (Rhisiart, 1994).

### 2.2.7. Ağın yapışkanlığı

Örümcek ağı ipliği temel olarak üretildiğinde yapışkan olarak üretilmez. Avın ağda kalabilmesi için örümcek özellikle spiral ağları avı ağda tutabilmek için ipliğe örümcekten çıkmadan önce ilave yapıştırıcıyı ekler. Yapışkan içeriği örümcekten örümceğe ve koşuldan koşula değişmektedir.

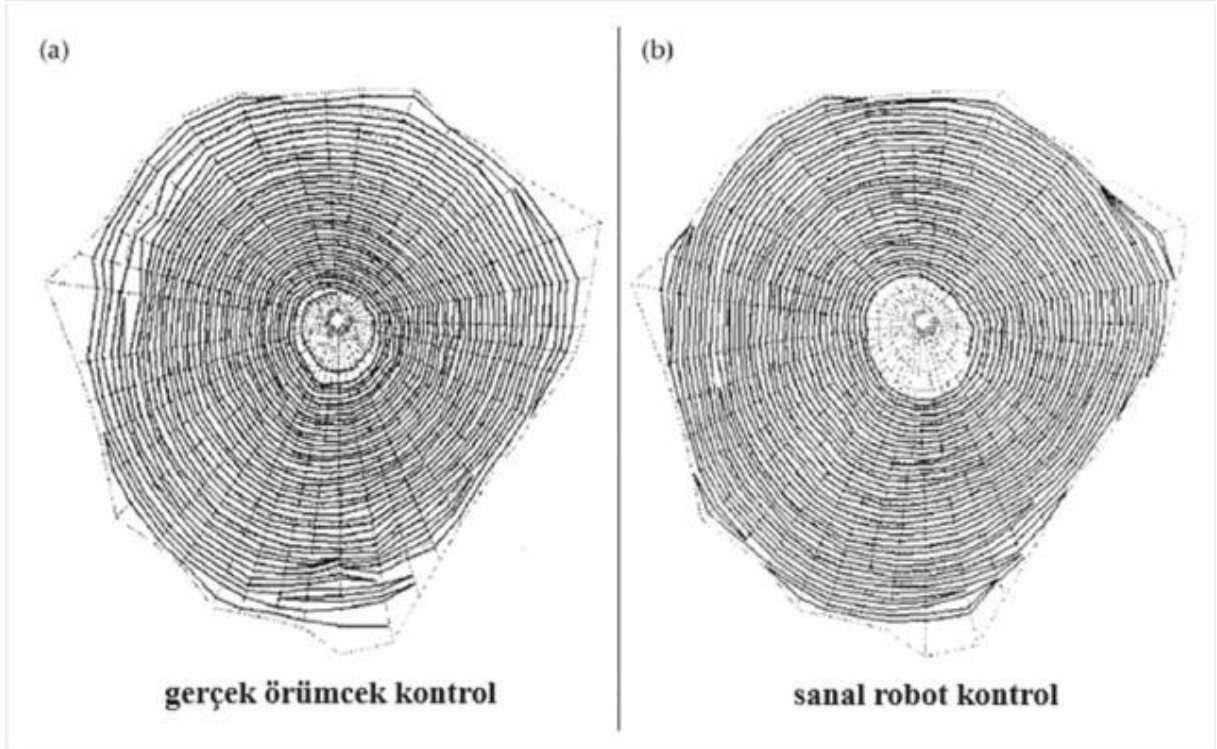
Kullanılan adezif hidroskopik bileşen karışımı glikoprotein içeren su bazlı yapışkan sıvı yapışkan olarak harika işlev sunsa da örümcek için bunun yapımı çok zahmetlidir. Bahçe çapraz örümceklerinde, ipliklere uygulanan yapışkan madde örümceklerin toplama bezlerinde üretilen organik moleküller, tuzlar, yağ asitleri ve glikoproteinlerin sentezi ile ortaya çıkmaktadır. İpek temel olarak ayak parmaklarındaki nano tüyler sayesinde son derece geniş bir yüzey alanının sağlamış olduğu ve geko ayağı benzeri bir yapı ile örümcek ağa yapışmaz ve ağ üzerinde gezebilir. Ağın yapışkanlığı bitince ağ tekrar üretilmelidir (Römer, 2008).

### 2.3. Yapay Örümcek Ağı Çalışmaları

Örümcek ağlarının yapay olarak üretilmesi ağın ne kadar güçlü bir yapı olduğu ve insanlık için ne şekilde kullanılabileceği düşüncesi ile akademik anlamda hep bir araştırma çalışması konusu olmuştur. Şimdiye kadar ağın yapay olarak üretimi için gerçekleştirilen çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

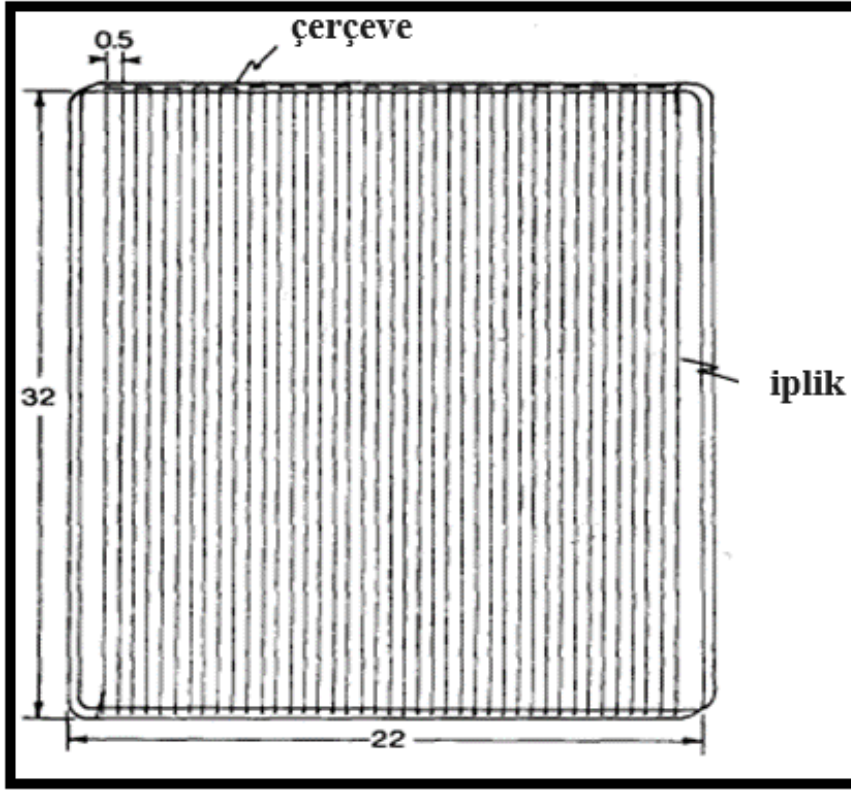
### 2.3.1. Sanal örümceğin ağı

Bu çalışma Fritz Vollrath ve Thimo Krink tarafından gerçekleştirilen ve engelli örümceklerin ağ oluşturma davranışını taklit eden sanal ortamda yaratılan bir örümceğin ağını şekillendirme davranışını incelemektedir. Küre ağ yapımı ile ilgili hipotezlerin doğruluğunu ve tutarlılığını test etmek için kullanılmak istenmiştir. Sanal robotun davranışları robotun sensörleri ve motorlarıyla iletişim kuran davranış kalıplarını denetleyen kural tabanlı bir sistemde uygulanmıştır. Resim 2.8.'de görüldüğü gibi engelli sanal örümceğin ağ yapımının izlenebilmesi için öncelikle normal bir sanal örümceğin ağ yapımı izlenmiştir. Robot girilen girdiler doğrultusunda sanal ortamda bir ağ oluşturmuştur. Normal örümcek ağını oluşturabilmiş ancak engelli örümcek ağını oluştururken başarısız olmuştur. Bacak eksikliğine bağlı girilen sensörler sanal ortamda engelli örümceğin ağ yapmasını sağlayamamıştır. Bu çalışma gerçek olmasa da yapay bir örümcek ağının sanal ortamdaki yansıması olarak kabul edilebilir (Krink, 1999).



Resim 2.8. Gerçek ağ ve yapay ağ karşılaştırması a) Gerçek örümcek tarafından oluşturulan ağ ve b) sanal örümcek robotun simülasyonu çalışması (Krink, 1999)

### 2.3.2. Eberhard'ın yapay örümcek ağı



Resim 2.9. Yapay örümcek ağı (Eberhard, 1977)

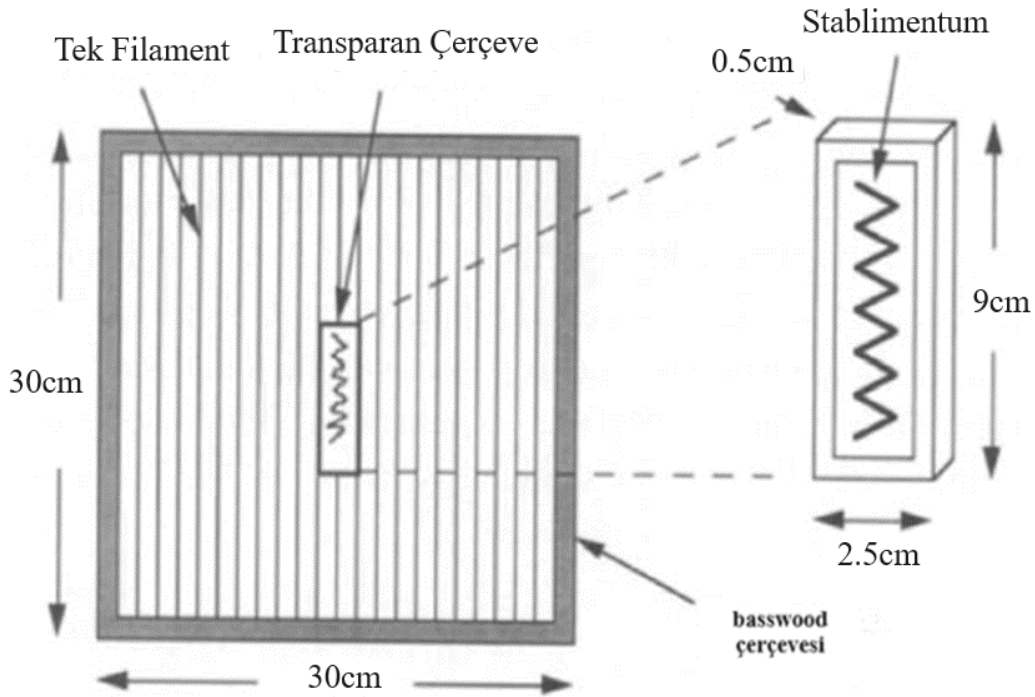
Bu çalışmada örümcek ağı Resim 2.9.'da görüldüğü gibi dikdörtgen bir alüminyum çerçeve içerisindeki bir dizi paralel naylon monofilament çizgiden oluşmaktadır. İplikler inert bir yapıştırıcıyla eşit şekilde kaplanmıştır. Ağ tasarımı sayesinde hava akışını engellemektedir. Çalışmada çalışma sahibi Eberhard, geometrinin ağ üzerindeki etkisinin izlenebilmesinin yanında yapay bir ağın ağ yakalama gücünü de irdelemektedir. Aynı zamanda örümcek ağlarının tasarımlarının daha iyi anlaşılması için gerçekleştirilmiştir.

Yapay ağ kurulup av yakalamak için bir bahçeye bırakılmıştır. Belirli bir süre sonunda ne kadar av yakaladığı gözlemlenmek için incelenmiştir. Ağ yapışkanın yıkanması için önce benzine ve daha sonra deterjanlı su çözeltisine batırılarak en son da su ile durularak temizlenmiştir. Temizlenme işleminden sonra tekrar yapışkan ile kaplanarak testlere devam edilmiştir. Tuzak boyutları da değiştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Tam olarak küresel ağlar gibi olmamasının sebebi ise küresel ağların ipliklerinin ve yapışkanlarının çok daha kuvvetli olmasıdır. Sonuçlara göre ise yapay ağ ipliklerinin çok kalın ve aralıkların da

bunlara oranla geniş olması sebebiyle küçük böceklerin takılmaması, ancak büyük böceklerin yakalanmasını sağlamıştır. Bazı ağların böcek olmamasına rağmen temizlenme sebebi ise ağlara çevrede bulunan partiküllerin yapışması kaynaklıdır (Eberhard, 1977).

### 2.3.3. Ağlardaki süsler

Yapay örümcek ağları üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise örümcekler tarafından eritilerek üretilen ağ süslerinin, böcekleri yakalamaya etkisinin yapay ağlar üzerinde incelendiği bu çalışmadır. I-Min Tso tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada yapay ağlar ıhlamur ağacı çerçevelerden ve yapışkan bir maddeyle kaplanmış ince mono filamentlerden (balık oltası ipliği) yapılmıştır. Resim 2.10.'da görüldüğü gibi mono filamentler çerçeveye 5mm aralıklarla paralel olarak yerleştirilmiş ve bazılarının üzerine gerçek ağlardan alınan süsler yerleştirilirken bazılarının üzerine süsler yerleştirilmemiştir. Mono filamentlerin üzerine berrak ve kokusuz bir yapışkan madde (TangleFoot Bird Repellent) sürülmüştür. Bu madde kuşlara karşı kullanılan bir kuş kovucudur. Su bazlı yapışkan bir maddedir ve kullanılan bölgedeki kuşların tüyelerine yapışarak onların o bölgede kalmalarını engeller.



Resim 2.10. Yapay ağın süsü (Tso, 1998)

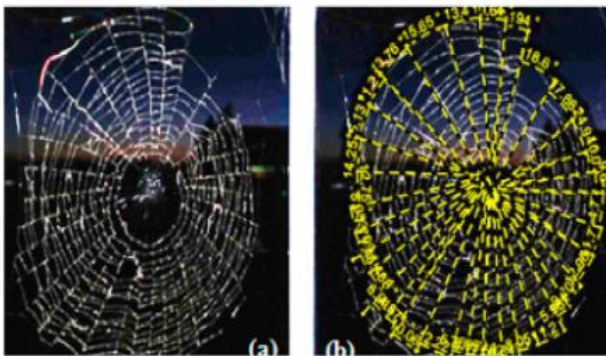
Toplamda 32 adet ağ kullanılmış ve 4 gün sonra elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Teste monofilamentler benzin ve deterjanlı su ile temizlendikten sonra tekrar kaplanarak devam edilmiştir. Çerçeveler iki adet bambu çubuğu ile toprağa sağlanmış. Sonuçta *stablimentum* yani ağ süslerinin bulunduğu ağların av yakalama oranının %41,6 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Tso, 1998).

### 2.3.4. Yapay ve gerçek ağ

Bu çalışmada Castillo ve Eberhad tarafından yapay ağlar ile gerçek ağların farklarının belirlenmesi için birçok yapay ağ üretilmiş ve denenmiştir. Gerçek örümcek ağlarına benzer basit ağların kurulması ile yapay ağların, ağ dokuyucuların beslenebileceği avların ne kadarını yakalayabileceği ve bu avların türlerinin ne olduğu bilgilerinin elde edilmesini amaçlamaktadır. Paralel naylon iplikler konulan basit ağlar kullanılmıştır. Bu iplikler su bazlı yapıştırıcı (Tack Trap) ile kaplanmıştır.

Çimlerin ve yabani otların bulunduğu geniş, açık bir alanın ortasındaki üç metre yükseklik ve yetmiş iki metre enindeki dikey dikenli çitin tamamı boyunca sekiz metre aralıklarla yapay ağlar yerleştirilmiştir. Her sabah yerden bir metre yükseğe kurulmuş ve her gece sonuçlar alınıp yıkanarak yeniden kullanılmıştır. Sonuçta birçok farklı türde ve boyutta böcek avlanmıştır. Avlanan türler gerçek bir örümceğin ağına takılan ve örümceğin beslenmeyi seçtiği türlerle kıyaslanmıştır. Böceklerden örümcek tarafından yenmeyen bir türün %23 oranında ağa takıldığı tespit edilmiştir. Diğer avlar örümcek tarafından tüketilmektedir (Eberhard, 1983).

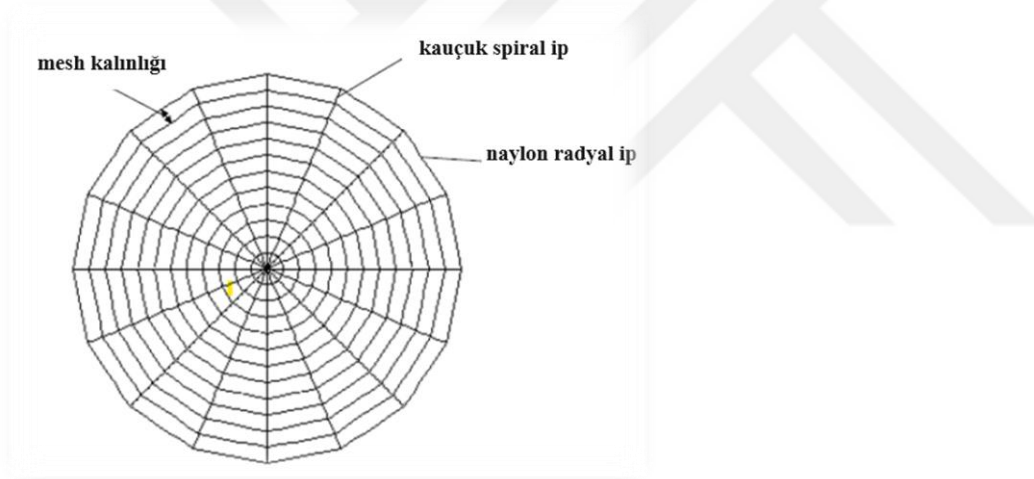
### 2.3.5. Ağın geometrik tasarımı



Resim 2.11. Yapay ağın ölçümü a) ölçülmemiş resim, b) ölçülmüş resim (Regassa, 2021)

Regassa ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada ağ yapısında bulunan spiral ve radyal iplik gibi yapı birimlerinin geometrik özellikleri ve yerleşim şekilleri analiz edilmeye çalışılmıştır. Resim 2.11’ görüldüğü gibi yapay ağın üretilmesi için bir gerçek ağlardan elde edilen bir algoritma kullanılmıştır. Sanal ortamda üretilen bir ağ için MATLAB yazılımı ile spirallerin düğümden düğüme kadarki boyutları ve açıları ile radyallerin merkezle olan yönelim açıları incelenmiştir. Çalışma ile radyal ağların aralıklarının 5 mm ve  $12,7^\circ$  ile yapıldığı gözlenmiştir. Ayrıca ağda bulunan ağların açısal dağılımları simetriktir. Ağ inşası için kullanılan tahmini ağ miktarı ortalama 1250 mm olarak gözlenmiştir. Orta nokta ile ilk spiral arasındaki boşluğun ilk spiralden dışa doğru olandan daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Regassa, 2021).

### 2.3.6. Yapay ağın performansı

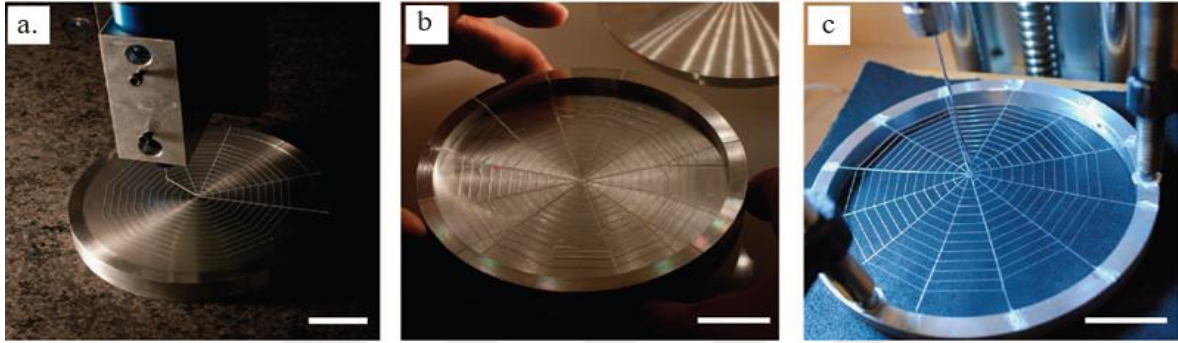


Resim 2.12. Naylon ve kauçuk yapay ağın yapısı (Zheng, 2014)

Zheng ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmanın amacı biyoesinlenmeli bir yapay örümcek ağının dinamik özelliklerini ve toplam enerji değişimini araştırmaktır. Bu çalışmada radyal ve spiral ağ dizilerinin malzeme özelliklerinin yapay örümcek ağının model performansına etkilerinin yanı sıra ağın enerji soğurma ve dağıtma yeteneklerinin tam olarak incelenmesi için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Örümcek ağının doğal frekansı ve toplam enerjisi ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamak için ANSYS yazılımı kullanılarak çeşitli FE modelleri oluşturulmuştur. Resim 2.12.’de görülen modelde gerçek örümcek ipeği ile karşılaştırıldığında benzer malzeme özelliklerine sahip oldukları için sırasıyla radyal ve spiral iplikler yerine yazılıma naylon ve kauçuk malzeme girdileri



güç, düşük yoğunluk ve uyarlanabilirlik ile tasarlanmanın yolları belirlenmeye çalışılmıştır. Son dönemde ortaya çıkan eklemeli imalat teknikleri, doğal ağların işlevi hakkında sistematik ve tekrarlanabilir bir şekilde fikir edinmek için sentetik ağ yapılarını tasarım yoluyla doğrudan üretmeye ve test etmeye yardımcıdır. Eklemeli imalat yöntemleri geometrideki yeni kalıpların üretilmesine gerek kalmadan kolayca değiştirilebilmesi nedeniyle geleneksel üretim yöntemlerine (örneğin döküm, dokuma) göre benzersiz avantajlar sunmaktadır.



Resim 2.14. Eklemeli imalat ile sentetik örümcek ağı a) bir ağın radyal ve spiral iplikleri, alüminyum çerçevenin ve alt tabakanın üstüne bir 3D yazıcı tarafından çıktı, b) sertleşmeden sonra çerçeve ve ağ alt tabakadan çıkarılması, c) Çerçeve ağdaki bir iplik çekme makinesiyle gerilir (Qin, 2015)

Reaktif reçine bazlı malzemeler mevcut tekstil yöntemleriyle imkânsız olmasa da karmaşık ağ yapıları halinde aşırı yavaş şekilde üretilmektedir. Eklemeli imalat baskı yapılarını tanımlamak için kullanılan bilgisayar destekli tasarım programları, ağ mekaniğini incelemek için sıkı bir şekilde bağlanmış bir yaklaşımı mümkün kılmak üzere hesaplamalı modelleri ve optimizasyonun sonuçlarını doğrudan kopyalayabilmektedir. Sentetik polimerlerin çoğu doğal ipeğe eşdeğer bir dayanıklılığa sahip olmasa da çeşitli yükleme koşulları altında doğal ağlarla benzer şekilde deforme olan ağ taklitlerini üretmek için kullanılabilirler. Bu çalışma sentetik elastometrik ağların mekanik davranışlarını ve temel mimari özelliklerini sistematik olarak araştırmaktadır.

Tek bir plastik malzemedен inşa edilen ağlar üzerinde yarı statik yükleme koşullarına odaklanılmıştır. Farklı malzeme kombinasyonları da denenmiştir. Ağ üretilirken ağ yapıları direkt inkjet yani doğrudan püskürtme olarak bilinen mikro ölçekli bir baskı yöntemi ve tekniği kullanılarak dairesel bir destek çevresindeki düz alt tabakalara yazdırılmaktadır. Bu teknik düzgün çaplı silindirik ipliklerin basılmasını sağlamaktadır. Karmaşık geometriye

sahip entegre bir ağ yapısı sağlayan mükemmel şekilde bağlanmış bağlantı noktaları bu teknik sayesinde oluşmaktadır. Elde edilen ağ geometrisi, doğal küre ağlarındakini taklit etmektedir. Radyal iplikler ağın genel yapısını ve spirali desteklemek için ağın ağaçla ya da dış çerçeveye birleşen kısımlarına bağlanmaktadır. İplikler avı yakalamak için sulu tutkalla kaplanarak yapışkan hale getirilmiştir. Sentetik ağlar üretmek için Dow Corning firmasından temin edilen SE 1700 maddesi Luer-Lok markalı şırıngalara yüklenmiş ve 3900 devirde santrifüjlenmiştir (Qin, 2015).

Kabarcıklar giderilsin diye 10 dakika boyunca yüklenen şırıngalar daha sonra toplanmak üzere Aerotech 3 eksenli konumlandırıcıya monte edilen bir yüksek basınç adaptörü ya da nozuluna gönderilmiştir. Filament reçinesi pinomatik olarak sürülmüş ve hareket kontrol yazılımıyla arayüz oluşturan bir basınç kutusu aracılığıyla kontrol edilmiştir. Filament veya iplik çapını tanımlamak için Luer kilitli şırınga uçları kullanılmıştır. Spiral ve radyal filamentler doğrudan iki parçalı alüminyum çerçeveye basılır. Yapışmayı önlemek için çerçevenin orta bölgesi mum üreticilerinin kalıp ayırmak için kullandığı madde ile kaplanmıştır. Her ağ tasarımının yazdırma yolu doğrudan sayılsa simülasyonlar için kullanılan bilgisayar modellerinden oluşturulmuştur. Basılan ağlar 160°C de 30 dakika boyunca kürlenmiştir. Sertleştikten sonra ağlar ve dış çerçeve destekten yavaşça çıkartılmıştır. Bunun sonucunda serbest yayılan ağlar mekanik teste hazır hale gelmiştir (Qin, 2015).

### **2.3.9. Diğer çalışmalar**

Konu kapsamında gerçekleştirilen ve araştırma sonucunda okunarak irdelenen diğer tüm çalışmalarda örümcekler tarafından üretilen ipek ipliği taklit edilmiştir. İpek ipliğinin genetiği ve yapısı ile ilgili yapılan çalışmalar bu tez çalışmasının konusu olmadığı için çalışmaya eklenmemiştir.

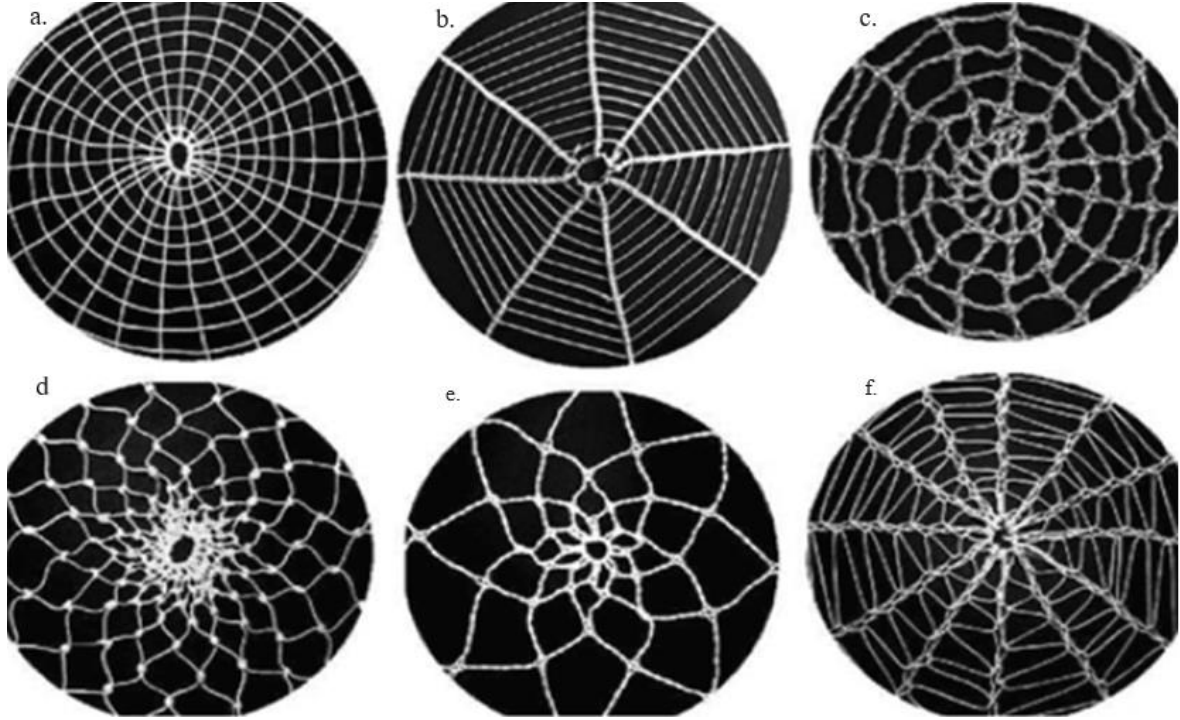
## **2.4. Örümcek Ağından Esinlenmiş Biyomimetik Tabanlı Çalışmalar**

### **2.4.1. Örümcek ağından esinlenen güç hattı iletişim modeli**

Liu Xiao-Shang ve arkadaşları alçak gerilim ağlarında dar bantlı PLC, yani güç hattı iletişiminin güvenilirliğini artırmak için örümcek ağının yapısından ve hasar görmezliğinden

esinlenerek yeni bir PLC ağ modeli ortaya çıkarmıştır. Bu ağ modeli herhangi bir hatta kesilme olsa bile yardımcı yan hatlar sayesinde iletişimin kesilmemesini sağlamayı hedeflemektedir (Sheng, 2011).

#### 2.4.2. Örümcek ağından esinlenilmiş dokuma teknikleri



Resim 2.15. Tekstil dokuma tipleri a) dokuma, b) örme, c) Japon, d) makrome, e) zigzag ve f) atlama (Frontczak-Wasiak, 2011)

Örümcek ağı benzeri yapılar iyi bilinmekte ve pek çok alanda kullanılmaktadır. Tekstil sektörü de bu alanlardan biridir. Tüm ağ yapısı uygulama alanlarında ağların formu aynıdır. Çoğu durumda bu tür ağlar ürünlerdeki benzerlik ile karakterize edilirler. Izebela ve arkadaşları bu çalışmada yapısı örümcek ağı yapısı üzerine modellenen standart küresel ağ tipi yapıya sahip kumaşların üretilmesine yönelik kullanışlılıkları açısından Resim 2.15.'da verilen tekstil teknikleri ve teknolojilerinin incelemesini yapmıştır.

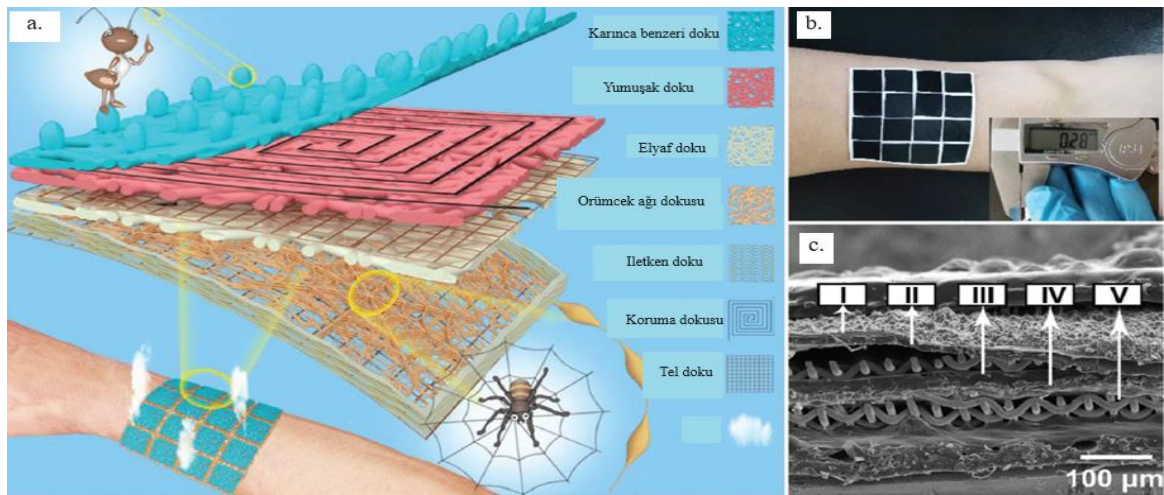
Örümcek ağları tekstilde taklit edilebilmiş ve çok dayanıklı ürünler ortaya çıkmıştır. Birçok farklı teknikte üretilen kumaşlar bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak ağ benzeri, dokuma tekniği, örme tekniği, makrome tekniği, Japon tekniği ve zigzag tekniği verilebilir (Frontczak-Wasiak, 2011).

### 2.4.3. Taşıt yol ağları için örümcek ağından esinlenilmiş coğrafi rotalama

Chen ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, örümceğin izlediği yol esas alınarak yapay olarak örümcek ağı benzeri araç navigasyon rotaları oluşturularak bu rotalar ile en kısa sürede güvenli ve yüksek doğrulukta ulaşmak için yapılmış bir çalışmadır. Örümceklerin ağları üzerinde ilerleyişi sayesinde navigasyon sistemine bir rotalama metodu tanıtılmakta ve bu sayede örümcek ağı taklit edilerek rota çizilmektedir. Sayısal sonuçlara ve gerçek araçlarla yapılan testlere göre hızlı ve kısa yol alınarak ulaşımın sağlandığı onaylanmıştır (Chen, 2022).

### 2.4.4. Örümcek ağından esinlenerek üretilen elektronik deri

Giyilebilir elektronik derinin pratik uygulamaları için çok işlevli, kendi kendine güç sağlayan, biyolojik olarak parçalanabilen, biyolojik açıdan uyumlu ve nefes alabilen malzemelerin aynı anda değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışmada Yue ve diğerleri, basınç, nem sıcaklığın eş zamanlı tespiti için bir Resim 2.16.'de görülen elektrikli nano jeneratör aracılığıyla biyolojik enerjiyi toplayabilen, örümcek ağı ve karınca dokunaçlarından esinlenen yapılara dayalı çok katmanlı bir deri inşa etmiştir. Örümcek ağı taklidi ile oluşturulan katmanın görevi taklit edilen ağın mimari yapısı, iç boncuk-zincir yapısı ve kolajen etkili nanolif bazlı sürtünme malzemesi sayesinde e-cilt yüksek basınç duyarlılığı sergilemektedir. (Yue, 2021).



Resim 2.16. E-Deri cihazı a)  $4 \times 4$  piksellik bir e-derinin şematik gösterimi, b) kola uygun şekilde takılmış 4x4 piksel e-derinin optik fotoğrafı. c) E-deri kesitinin SEM görüntüsü (Yue, 2021)

## 2.5. Filtre ve Filtrasyon

### 2.5.1. Genel bilgiler

İnsanoğlu, sanayileşme sürecinde teknolojik ilerlemelerini hızlı bir şekilde artırmış olmasına rağmen, bu ilerleme özellikle Britanya'da başlayan Sanayi Devrimi ile birlikte küresel çapta çevresel bozulmalara yol açmıştır. Havada, suda ve doğal çevredeki kirlenme, insanlığı endişelendiren ciddi bir mesele haline gelmiştir ve bu durumun kontrol altına alınması için çözümler aranmaya başlanmıştır. Özellikle, canlıların hayatta kalması için kritik öneme sahip olan temiz hava tedariki, ilk başta öncelikli bir endişe olarak kabul edilmiş ve çözüm arayışlarına öncülük etmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak fabrikalar ve üretim tesisleri olmak üzere, daha sonra taşıtlar ve günümüzde evler bile, çeşitli filtreleme ve filtrasyon sistemlerinin uygulanmasıyla kirliliğin kontrol altına alınması amaçlanmıştır. Bu sistemler, çevresel bozulmanın sınırlandırılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuş ve insanların solunum yoluyla kaynaklanan sağlık sorunlarının azaltılmasına yardımcı olmuştur. Dolayısıyla, filtreleme teknolojileri, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Kirletici kaynakları tarafından salındıktan sonra havada asılı kalan ve partikül adı verilen makro ya da mikro büyüklükteki kirleticiler, hava kirliliğine neden olmaktadır. Yağ ve asit gibi sıvı, kükürt gibi katı faz halinde bulunabilen partiküller canlıların vücutlarına solunum vasıtasıyla girer ve bazı solunum rahatsızlıklarına yol açmaktadır. Boyutsal olarak 100 nm boyutuna yakın olan virüsler gibi cansız ya da daha küçük gözle görülemeyen ancak hasta edebilen canlı organizmaların yarattığı etkinin minimum seviyeye indirilmesi için havanın filtrelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İnsan sağlığı ile sınırlı kalmadan hayatımızın her noktasında makineler elektrikli cihazlar, boyanan cisimler, elektronik kartlar, medikal sektöründe tıp için geliştirilen oksijen jeneratörü gibi alanlarda toz taneciklerin sayılan ürünlerin toz ve partiküllerden korunması ve kalitelerinin artırılması amacıyla hava filtreleri kullanılmaktadır (Dinçer, 2016).

### 2.5.2. Filtrelerin tarihçesi

Hava filtrelerinin tarihî seyri, insan sağlığı ve çevresel kaliteye yönelik koruyucu önlemlerin evrimi bağlamında önemli bir role sahiptir. Hava filtrelerinin kökenleri 16. yüzyıla kadar

uzanmaktadır. Bu dönemde, toz, duman ve diğer hava kirleticilerine karşı korunma amacıyla maskeler ve ince kumaştan yapılmış filtreler kullanılmaya başlanmıştır.

Solunum cihazlarının erken prototipleri, 1799'da ortaya çıkmıştır. Ancak, bu erken dönem cihazları, modern solunum cihazlarının karmaşıklığı ve etkinliği bakımından oldukça sınırlıydı. Hava temizleyici cihazlar için ilk resmi patent, 19. yüzyılın ortalarında, Lewis P. Haslett tarafından alınmıştır. Endüstriyel devrimle birlikte hava kirliliği sorunları artmış ve bu durum, daha etkili filtreleme sistemleri üzerinde araştırmaların yoğunlaşmasına yol açmıştır. Maskelerin evrimi de aynı dönemde hız kazanmıştır. 1879'da Hutson Hurd, fincan şeklindeki bir maske için patent almıştır ve bu tasarım, sonraki dönemlerde hafızalarda yer etmiştir. Hava filtrelerinin gelişimi, 1. ve 2. Dünya Savaşları sırasında önemli bir ivme kazanmıştır. Bu dönemlerde, kimyasal silahların yaygın kullanımı, insanları bu tür tehditlere karşı korunmak için daha sofistike filtreleme sistemleri geliştirmeye yönlendirmiştir.

HEPA (Yüksek Verimli Partikül Tutucu) filtreler, 20. yüzyılın ortalarında endüstriyel ve evsel hava filtrasyonunda önemli bir role sahip olmuştur. Bu filtreler, havadaki mikroskobik partikülleri %99,97'ye kadar etkin bir şekilde tutabilme kabiliyetiyle bilinmektedir. Ancak, bu etkin filtrasyon yeteneği, başlangıçta asbest gibi potansiyel sağlık riski taşıyan materyallerin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Asbestin sağlık riskleri ve doğal kaynaklarının sınırlı olması, HEPA filtrelerinin üretiminde kullanılan materyallerin revize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, alternatif malzemelerin araştırılması ve uygulanması bir zorunluluk haline gelmiştir. Elyaf malzemeler ve cam yünü gibi zararsız ve çevre dostu materyaller, asbestin yerini alarak HEPA filtrelerinin daha güvenli ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamıştır. Yeni malzemelerin entegrasyonu, HEPA filtrelerinin performansını olumsuz etkilemeden sağlık ve çevre açısından daha güvenli hale gelmesini sağlamıştır. Bu dönüşüm süreci, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve insan sağlığının korunması konusunda önemli bir adım olmuştur. Alternatif malzemelerin benimsenmesiyle birlikte, HEPA filtrelerinin endüstriyel tesislerden evlere kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu durum, hava kirliliğinin azaltılması ve solunum yolu hastalıklarının önlenmesi açısından önemli bir katkı sağlamıştır. Bu bağlamda, HEPA filtrelerinin evrimi hem akademik hem de uygulamalı çalışmalar açısından önemli bir araştırma konusu olmuştur (Kayaş, 2021).

Evlerde kullanılan ısıtma sistemlerinin yaydığı zararlı partiküllerin kontrolü, çevresel kaliteyi korumak için öncelikli bir endişe olmuştur. Almanya'da geliştirilen bir filtreleme sistemi, bu tür partiküllerin yayılmasını minimize etmek amacıyla hayata geçirilmiştir. Bu sistem, atmosferik kirlilik seviyelerini azaltarak insan sağlığı ve çevre kalitesini koruma hedefiyle tasarlanmıştır. Bu filtreleme sisteminin öncülerinden biri olan Frederick Hammes, başlangıçta iç mekân hava kirliliğini azaltmak için bu teknolojiyi geliştirmiştir. Ancak, daha sonra Hammes, bu teknolojiyi otomotiv sektörüne uygulayarak, özellikle dizel motorlu araçlarda egzoz emisyonlarını kontrol etmek için kullanılan filtrelerin tasarımında önemli bir rol üstlenmiştir. Hammes'in bu teknolojik ilerlemesi, sadece hava kalitesini iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir adım olmuştur. Frederick Hammes'in çalışmaları, endüstriyel ve evsel alanda zararlı emisyonların kontrol edilmesi konusunda etkili bir strateji sunmuştur. Ayrıca, bu filtreleme teknolojisinin yaygınlaşması, çevresel kaliteyi iyileştirme çabalarının küresel düzeyde teşvik edilmesine katkı sağlamıştır. Bu bağlamda, Hammes'in araştırmaları ve geliştirdiği teknolojiler, akademik literatürde ve endüstriyel pratiklerde önemli bir yer edinmiştir.

Günümüzde, HEPA filtrelerin kullanımı geniş kapsamlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Endüstriyel tesislerden ev ortamlarına kadar birçok alanda, hava kalitesini artırmak ve zararlı partikülleri filtrelemek amacıyla HEPA filtrelerin tercih edilmesi yaygındır. Bu filtreler, mikroskobik boyuttaki partikülleri, bazen 0.1 mikron boyutlarına kadar, son derece etkin bir şekilde yakalama kapasitesine sahiptir. Hem endüstriyel hem de evsel kullanımlarda, solunum havasının temizlenmesi ve genel hava kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla HEPA filtrelerin benimsenmesi, hava kirliliği ile mücadelede kritik bir adım olarak kabul edilmektedir. Bu filtreler, havadaki partikülleri etkin bir şekilde gidererek, solunum yolu hastalıkları riskini azaltmakta ve sağlıklı bir yaşam ortamı sağlama çabalarını desteklemektedir. Sonuç olarak, HEPA filtrelerin geniş kullanımı, hava kirliliği ile mücadelede etkili bir strateji olarak tanınmaktadır. Hem akademik araştırmalarda hem de pratik uygulamalarda, HEPA filtrelerin yaygınlaşması, hava kalitesinin korunması ve insan sağlığının iyileştirilmesi açısından önemli bir adımı temsil etmektedir (Güllü, 2023).

### **2.5.3. Partikül filtre çeşitleri**

Kaset filtreler, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin birincil filtreleme aşamasında kritik bir öneme sahiptir. Bu filtreler, çeşitli uygulama alanlarında çok yönlü işlevler

üstlenmektedir. Örneğin, kaba toz ve liflerin etkin bir şekilde tutulması, korozif ortamlarda havanın filtrelenmesi, gres yağı ve kıvılcımların yakalanması gibi görevleri başarıyla yerine getirirler. Ayrıca, yağ buharlarının ayrıştırılması ve boya tutucu olarak kullanımları da yaygındır. Kaset filtreler, ISO 16890 standardına göre Coarse filtre kategorisinde sınıflandırılır ve bu kategoride farklı verimlilik seviyelerinde üretim yapılmaktadır. Bu filtrelerin çeşitli verimlilik seviyeleri, belirli ihtiyaçlara ve uygulamalara göre optimize edilmiştir, bu da onların geniş bir kullanım yelpazesinde etkili olmasını sağlar. Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin performansını ve sürdürülebilirliğini artırmak için kaset filtrelerin doğru seçimi ve kullanımı büyük önem taşımaktadır.

Torba tipi hassas filtreler, merkezi klima sistemlerinin kritik bileşenlerinden biridir ve çeşitli uygulamalarda önemli roller üstlenmektedir. Bu filtreler, konfor klima tesisatlarında son aşama filtreleme olarak kullanılırken, HEPA filtreli sistemlerde HEPA filtreden önceki aşamada yer alır ve böylece HEPA filtrenin ömrünü uzatarak sistemin genel verimliliğini artırır. Endüstriyel tesislerde de yaygın olarak kullanılan bu filtreler, ortam havasının temizlenmesinde büyük katkı sağlar. ISO 16890 standardına göre, torba tipi hassas filtreler farklı verim sınıflarında üretilmektedir. Bu sınıflandırma, filtrelerin farklı partikül boyutlarına karşı etkinliklerini tanımlar ve belirli hava kalitesi gereksinimlerine uygun filtrelerin seçilmesini sağlar. Özellikle 1. partikül sınıfı, en ince partiküllerin tutulmasında yüksek verimlilik sunarak, sağlık ve güvenlik açısından kritik ortamlarda tercih edilmektedir.

Torba tipi hassas filtrelerin doğru seçimi ve kullanımı, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin performansını, enerji verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü olumlu yönde etkiler. Bu nedenle, çeşitli uygulama alanlarında optimum performans elde etmek için bu filtrelerin ISO standartlarına uygun şekilde değerlendirilmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Merkezi klima sistemlerinin temel bir bileşeni olarak, rijit tip hassas filtreler, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin etkin ve verimli çalışmasında önemli bir rol oynarlar. Genellikle konfor klima tesisatlarında son aşama filtreleme için kullanılan bu filtreler, torba filtrelerle karşılaştırıldığında daha kompakt yapılarıyla dikkat çekerler. Bu özelliği sayesinde, daha az yer kaplayarak sistemlerin tasarımı ve kurulumunda avantaj sağlarlar.

Endüstriyel tesislerde de yaygın olarak kullanılan rijit tip hassas filtreler, genellikle mikro cam elyaf veya sentetik malzemelerden üretilirler.

Bu malzemeler, yüksek verimli ve dayanıklı filtreleme sağlayarak, çeşitli endüstriyel ortamlarda uzun süreli performans sergilerler. ISO 16890 standardına uygun olarak üretilen bu filtreler, farklı verim sınıflarında sunulmaktadır. Bu da hava kalitesi gereksinimlerine ve kullanım senaryolarına uygun filtre seçeneklerinin mevcut olmasını sağlar. Farklı verim sınıflarının kullanılması, özellikle hassas ortamlarda, sağlık hizmetleri tesislerinde ve endüstriyel üretim tesislerinde, partikül kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Rijit tip hassas filtrelerin doğru seçimi ve düzenli bakımı, havalandırma sistemlerinin performansını optimize etmek ve iç mekân hava kalitesini iyileştirmek için hayati öneme sahiptir. Etkin bir şekilde kullanılması, işletme maliyetlerini azaltırken, aynı zamanda çalışanların ve tesislerin sağlığını korur.

EPA, yüksek verimli partikül hava (HEPA) filtrelerinin önemli bir bileşenidir ve partikül tutma yeteneğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Tipik olarak, HEPA filtrelerinin üretiminde kullanılan özel filtre medyası, borosilikat mikro elyaflardan oluşur ve genellikle 2 ila 500 nm çapındaki partikülleri etkili bir şekilde tutabilir. Filtre medyasının oluşturulmasında, lif uzunlukları ve oranları titizlikle kontrol edilir ve bu, filtrelerin performansını belirleyen önemli bir faktördür.

Standart bir HEPA filtre medyası oldukça ince bir yapıya sahiptir ve genellikle 0,508 mm (0,020 inç) kalınlığın altındadır. Bu yapı, birkaç yüz elyaf tabakasından oluşur ve bu tabakalar arasında düşük dirençli geçitler oluşturularak filtre medyasının performansı optimize edilir. Bu şekilde, filtre medyası içinde açık boşluklar olsa bile, arkadaki katmanların partiküllerin hareketini etkili bir şekilde engellemesi sağlanır. Bu yapısal özellikler, HEPA filtrelerinin yüksek tutma verimliliğine ve hava kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Bu nedenle, EPA'nın dikkatli bir şekilde tasarlanması ve üretilmesi, havalandırma ve filtreleme sistemlerinin etkinliği ve verimliliği için kritik öneme sahiptir. Aktif karbon filtreler, çeşitli endüstriyel ve evsel uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır ve geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Boya kabinleri, mutfaklar, biyogaz arıtma tesisleri, hava alanları gibi çeşitli alanlarda kullanılmakta olup, çeşitli kirleticilerin giderilmesinde etkili bir rol oynamaktadırlar. Aktif karbon filtreler genellikle kömür, Hindistan cevizi

kabuğu gibi doğal malzemelerden üretilmektedir ve aktive edilmiş karbon üzerine farklı kimyasal maddelerin emdirilmesiyle işlevsellikleri artırılabilir (Havak, 2021).

## **2.6. Doğada Bulunan Filtre Mekanizmaları**

Bu bölümde, doğal dünyadaki çeşitli organizmaların filtreleme konusundaki biyolojik stratejileri ve bu stratejilerin insan yapımı filtreleme sistemlerine ilham verebilecek potansiyeli detaylı bir şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Doğanın sağladığı bu eşsiz mekanizmalar, çevresel kirlilikle mücadele, endüstriyel uygulamalar ve biyo-teknolojik alanlarda etkin bir şekilde kullanılabilir niteliktedir. Bu doğal stratejilerin anlaşılması, insanların çevre dostu ve sürdürülebilir teknolojilere yönelik araştırmalarını yönlendirebilecek önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

### **2.6.1. Mangrov ağaçları**

Mangrovlar, kara ve deniz ekosistemlerinin kesişiminde bulunan özel bir bitki örtüsü türüdür. Tropikal ve denize kıyısı olan bölgelerde, bölgenin deniz ve kara ilişkisinin düzenlenmesinde rol oynamaktadırlar. Mangrov ağaçları Resim 2.17.'de gösterilmiştir. Mangrovlarda ki biyokimyasal ve dinamik süreçler, gelgit ve dalgalardan dolayı su hareketiyle güçlü bir şekilde bağlantılıdır (Massel, 1999).

Deniz kenarlarında yaşayan mangrov ağaçları deniz suyundan emilen tuzu zehrinden ayrıştırarak besine dönüştürmektedir. Kökten alınan tuzlu su yapraktayken tuz iyonları damarın dışına doğru hareket etmektedir. Damar dışında bu iyonları bir doku sarmaktadır (Duke ve Larkum, 2019).

Yaprak, tuz bezi adı verilen bir hücre içermektedir. Bu bezler damar yakınında bulunan tuz iyonlarını emerek suyu geçirmemektedir. Bu sayede biyolojik yapı ile gerekli olan tuz mangrov tarafından bünyeye alınmaktadır (Yuan, 2016).

Mangrov ağaçları sudan tuzun arındırılması sürecini gerçekleştirerek beslenir. Sudan aldığı tuz ile yaşamını sürdürür.

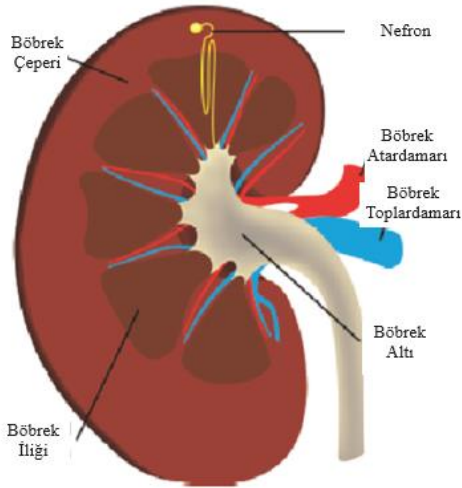


Resim 2.17. Mangrov ağaçları (Massel, 1999)

### 2.6.2. Böbrekler

Memelilerde hayati öneme sahip bir organ olan böbrekler, kanın vücudun ihtiyacı olmayan metabolik artıklardan filtrelenerek arındırılmasını ve kan dolaşımına katılmasına sebep olarak dehidrasyonu engellemektedir. Resim 2.18’de temsili olarak gösterilen böbreklerde, süreç çizgileri diğer bir adıyla nefronlar sayesinde filtrasyon gerçekleşir. Nefronlar, glomerulus ve tubule adı verilen iki farklı yapıdan oluşmaktadır.

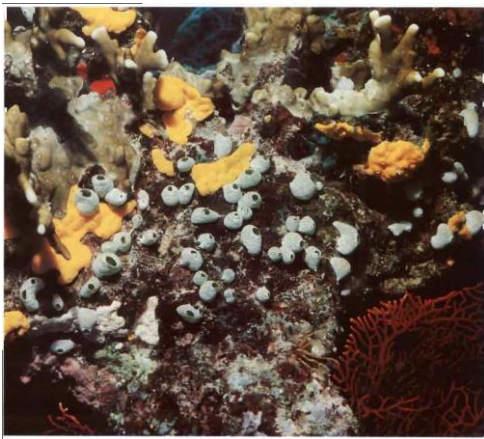
Glomerulus, dairesel olarak düşünülebilen ve kan içeren bir kesedir. Kese çeperleri mineral, su ve atıklar gibi mikro moleküllerin geçmesine izin verir ancak protein gibi makro molekülleri tutar ve kana geri kazandırır. Tubule ise uzunca hatlı yapısı boyunca ilerleyen suyun büyük bir bölümünü ve mineralleri emerek kana gönderir. Atıkları az da olsa su ile üriner sisteme ileterek vücuttan atılmasını sağlar. Bu işlem geçirgen yapıya sahip membranlar sayesinde gerçekleştirir (Zhang, 2013). Sonuçta bir bölüm su içerisindeki atık vücuttan uzaklaştırılmış ve kan filtrelenerek temizlenmiş olur. Eğer bu işlem gerçekleşmezse vücuda gelen suyun büyük bir kısmı vücuttan dışarı atılmak zorunda kalınır.



Resim 2.18. Böbreğin şematik resmi (Zhang, 2013)

### 2.6.3. Deniz üzümü

Deniz üzümleri deniz tabanında yaşayan Ascidian familyasından gelen çoğu birkaç santimetre ya da daha az boyutlarda olan ve ömürleri birkaç yıl olan yumuşak yapılı canlılardır. Bu canlılar suyu filtreleyerek içerisindeki mineraller ve mikroorganizmalar ile beslenmektedir (Maniot ve Laboute, 1991). Dünya genelinde popülasyonları oldukça fazladır. Doğada bulunan filtrasyon sistemlerinden en yaygın olanıdır. Deniz ekosistemi için oldukça gerekli bir canlı türüdür. Resim 2.19’da gösterilen deniz üzümleri ağız sifonlarından suyu alır ve bu suyu daha sonra mukusla kaplı atriyum adı verilen solungaç yarıklarından bir su odasına aktarmaktadır. Bu su odasının içinde, çeşitli enzimler sayesinde besinleri sudan ayırtmaktadır. Daha sonra filtrelenmiş su deniz üzümünün atriyal sifonundan denize geri gönderilmektedir (Li ve Ross, 2022).



Resim 2.19. Deniz üzümü (Ascidian) (Li ve Ross, 2022)

#### 2.6.4. Süpürücü solucan

Halk arasında deniz çiçekleri, tüy tozlayıcıları veya yelpaze solucanları olarak bilinen, süpürücü solucan, boru şeklindeki organlarıyla dikkat çeken omurgasızlardır. Bu organizmalar, branş taçlarının hassas görünümü ve çekici rengi nedeniyle popülerdir (Dávila ve Jiménez, 2017).

Süpürücü solucan denizde yaşayan ve baş bölümündeki taca benzer dokunaçlar sayesinde beslenebilen canlılardır. Resim 2.20.'de uzuvları gösterilen süpürücü solucan, deniz dibinde bir noktaya sabit halde bulunur ve sudaki yararlı maddelerin deniz suyundan filtrelenerek yakalanması ile beslenir. Deniz diplerinde yaşayan ve vücudun büyük bölümünü bir tüp içinde tutan ancak beslenmek ve oksijen almak için baş kısmından taç uzantılarını ya da diğer bir adıyla dokunaçlarını çıkaran süpürücü solucanlar, besin tutulumu sağlayarak hayatta kalmaktadır. Denizdeki bulunan besinleri tüylü uzantıları sayesinde tutarak deniz suyunu ayrıştırmaktadır. Ayrıştırma sırasında tutmuş olduğu besinleri kaygan dokunaç tüyleri ile ağız kısmına götürerek besinleri sindirim sistemine göndermektedir. Plankton ve çeşitli minerallerin tutulumunu sağlayarak hayatta kalmaktadır.



Resim 2.20. Süpürücü solucan (Dávila ve Jiménez, 2017)

### 2.6.5. Mavi balina

Mavi balina, Rorquals olarak da bilinen deniz memelileri grubunu içeren *Balaenopteridae* familyasına ait balenli bir balınadır. Yaygın isimler mavi balina, rorqual, kükürt dibi, büyük mavi balınadır. Resim 2.21.'de çizimi görülen mavi balina dünya üzerinde var olduğu bilinen en büyük hayvandır. Dünya çapında ve tüm okyanuslarda bulunur (Sears ve Perrin, 2009). Balenli ağızlarının üst çene kısmında bulunan keratin plakalardaki saçakları sayesinde balinalar kendilerinden kat kat daha küçük olan kriller ile beslenmektedir. Bu ağız yapısında keratin plakalar yan yana dizilerek üst çeneye yapışık konumda bulunurlar (Nemoto, 1959). Bu sayede balinalar ağızlarını açıp suyu aldıktan sonra 2mm boyutuna kadar geçişi kapatarak suyun dışarı çıkmasına ve krillerin ise içeride kalmasını sağlarlar. Bu sayede kütlelerinin iki katı besini bünyelerine alarak hayatta kalırlar.



Resim 2.21. Yetişkin mavi balina (Sears ve Perrin, 2009)

### 2.6.6. İplik likeni

İplik likeni Latince adıyla *Ephebesolida*, çöllerde silisli kayalarda, nehirlerin, göllerin ve okyanusların yakınlarında kara üzerinde bulunmaktadır. Genellikle bağımsız yaşayan *Stigonema* kolonilerine karışmış halde büyürken görülmektedir (Exeter, 2016).

Resim 2.22.'de gösterilen iplik likeni ipliksi dalları ve mantar partnerleri sayesinde denizden gelen ve sis içerisinde yoğunlaşan suyu absorbe ederek çölde yakıcı sıcakta su bulabilmekte ve hayatta kalabilmektedir. Namib Çölü gibi deniz kıyısında bulunan yerlerde bulunmaktadır. Diğer çöllere göre daha çok nem olmaktadır. Denizden gelen ve çöldeki kum tepe ve çukurlarında dalgalanarak ilerleyen sis bulutu iplik likeni üzerindeyken karmaşık

ipliksi yapı sayesinde sis bulutu içerisindeki nem yoğunlaşarak dallarda kalmaktadır. İplik likeninin ortak yaşadığı partneri olan özel bir mantar türü sayesinde su emilmekte ve bu sayede iplik likeni suyu absorbe ederek hayatta kalmaktadır.



Resim 2.22. İplik Likeni (Exeter, 2016)

### 2.6.7. Kemancı yengeç

Resim 2.23'te bir resmi bulunan kemancı yengeçler hareket gösterileri sayesinde isimlerini erkeklerinin dişileri etkilerken kullandığı pençe sallama hareketlerinden almıştır. Ancak bu özellikten ayrı olarak beslenme şekilleri de oldukça önemlidir. Kemancı yengeçler su kenarlarında bulunan çamur su karışımından ağızdaki filtreyi kullanarak tuz ve mineralleri ayrıştıran ve bu şekilde beslenen canlılardır (Zeil ve Hemmi, 2005).

Su kenarlarında çamurların biriktirdiği tortudan beslenen yengeç, tortuyu direkt ağızına götürmektedir. 3 ayrı filtreden oluşan ağız yapısı kaşığa benzemektedir. Ağızın en dış katmanı tortudaki suyun geçişini önlemektedir. Yararlı bileşenlerin ağızdan düşmemesini sağlamaktadır. İkinci kısım ise tamamen kaşık biçimindedir ve şekli veren katmandır. Bu kısım kumun ve atıkların seçici biyolojik yapı sayesinde yararlı besinlerden ayrışmasını sağlamaktadır. Bu yapı fırça benzeri bir yapıdır ve kıllarla kaplıdır. Bu kıllar kumu tutarken atıkların geçişini engellemektedir. Son bölümde ise yararlı besinlerin emilimi gerçekleştirilmektedir. Kemancı yengeçler tuz ve mineral dağılımını önemli ölçüde ayarlayarak doğaya hizmet vermektedir (Hoffman, 1984).



Resim 2.23. Kemancı yengeç (Zeil ve Hemmi, 2005)

### 2.6.8. Kirpik

Memeli kirpikleri doğal seçim sonucu oluşmuştur ve yönü, uzunluğu, miktarı ve diğer parametreleri seleksiyon özelinde değişmektedir. Kirpikler, hayvanların yaşam ortamına uyum sağlamasına yardımcı olan filtreler ya da güneşlikler olarak da bilinmektedirler (Zou, 2019).

Kirpik, tüm memelilerde göz koruması için bulunmaktadır. Hassas bir yapı olan gözün polenler ve toz gibi etmenleri taşıyan güçlü rüzgarlara karşı korunmasını sağlamaktadır. Hava akımına dik doğrultuda paralel yerleşmiş ve gerektiğinde kapatılarak birbirlerine kenetlenen kirpikler ani hava hareketlerinde, güçlü akışı kesme görevini bir dalgakıran gibi gerçekleştirmektedir. Gözün altında ve üstünde bulunarak 360 derece koruma sağlayan kirpikler gerekli durumda kenetlenerek ya da birbirine yapışarak toz ve polenlerin göze girmesini de engellemektedir (Armador, 2015).



Resim 2.24. Zürafa kirpiği (Armador, 2015)

### 2.6.9. Dev manta vatozu

Manta vatozları dünyadaki en büyük kanat yüzgeçli balıklardır. Tropikal bölgelerde dünya çapında dağılım gösteren ve planktonla beslenen deniz canlıları arasında yer alır (Jaine, 2012). Dev manta vatozu, denizde bulunan planktonlarca zengin suyu ağzına çok miktarda alarak planktonları sudan ayırtmakta ve filtrelemektedir. Daha sonra yüzgeçleri sayesinde kalan planktonlardan ayrılmış suyu geri denize göndermektedir (Divi, 2018). Kullandığı filtresi membranlı biyolojik bir yapıdır. Planktonlar içeren su partiküllerden daha küçük porlu membrandan geçerken planktonları bu kısımda bırakmaktadır. Ancak filtrelerde genel bir sorun olan tıkanma sorunu bu vatozda bulunmamaktadır. Resim 2.25.'de görseli bulunan manta vatozu yaprak benzeri loblarında yiyecek parçacıklarını sektirerek filtreden uzaklaştırmaktadır. Su loblardan doğrudan geçerken parçacıklar loblara çarparak içerde başka noktalara dağılmaktadır. Bu sayede porlardan geçmeye çalışan küçük planktonlar bile içerde kalmaktadır (Miller, 2017).



Resim 2.25. Dev manta vatozu (Miller, 2017)

### 2.6.10. Çapraz örümcek

Bahçe örümceği olarak da bilinen çapraz örümcek, ağ yapan örümcekler sınıfında bulunan ve ağı en dayanıklı olan örümceklerden biridir. Avlanmak ve besin bulmak için akış olan bir noktaya ağını kurmaktadır. Bu ağ hava akışında etkilenmez ve aynı zamanda uçan böcekleri çeken bir renk yapısına sahiptir (Ortega ve Jimenez, 2013). Örümceklerin filtreleme işlemi

için kullanmış oldukları yapıya örümcek ağı denilmektedir. Çapraz bahçe örümceği küresel ağ yapan örümcek türüdür. Havada ya da hava akışında bulunan uçan böcekleri, sinekleri, arıları ağı sayesinde filtreleyerek kendine besin olarak kullanmaktadır. Canlılarla beraber toz ve partikülleri, polen ve mantarları da taşıma gibi görevler yerine getirmektedir (Vollrath, 1999). Örümcek ağının en bilinen çeşidi, radyal denilen merkezden dış çepere doğru uzanan destek yarıçaplarına yapıştırılmış ana hatlardan ve avı yakalamak için kullanılan yapışkan yapısal ipek spirallerden oluşan daire, küre veya tekerlek benzeri ağıdır. Bunları yapan örümceklere genel olarak küre dokumacı adı verilir ve genellikle *Tetragnathidae* veya *Araneidae* familyasında bulunurlar (Whyte ve Anderson, 2017).

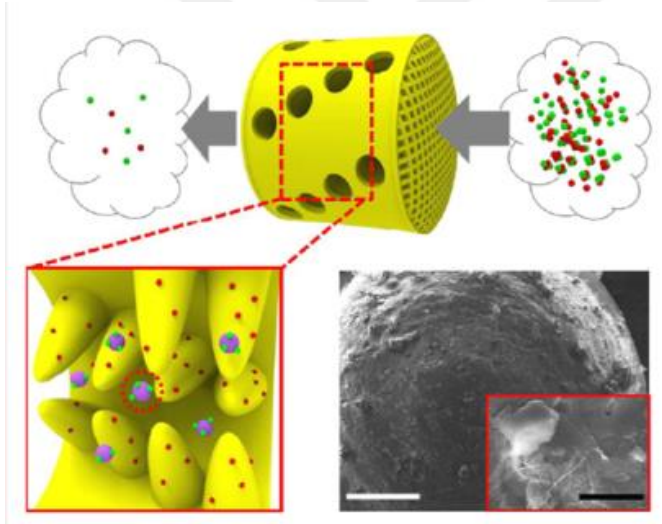


Resim 2.26. Çapraz örümcek (Whyte ve Anderson, 2017)

## 2.7. Biyomimetik Tabanlı Çalışmaları Sonucu Ortaya Çıkan Filtreler

### 2.7.1. Eklemeli imalat ile bağırsak villus yapısı taklidi

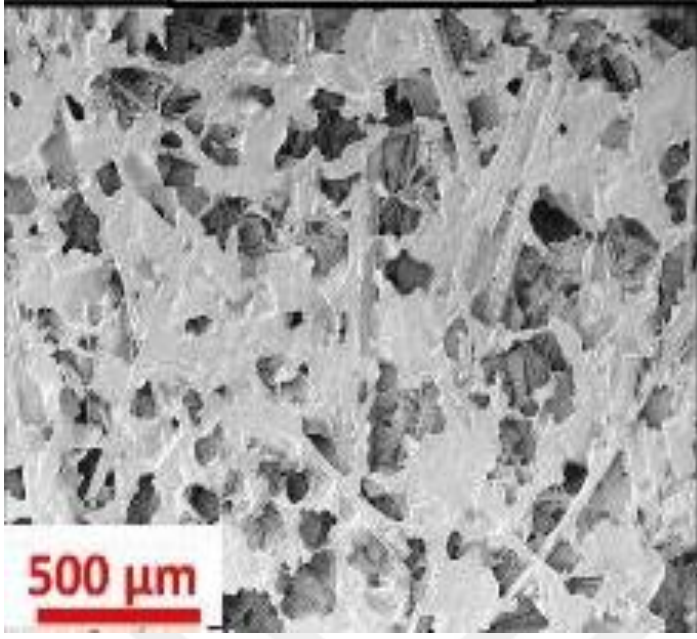
Eklemeli imalat ile üretilen bir biyomimetik villus yapısı, toz filtreleri için kullanılmıştır. Bu çalışmada Yoon ve diğerleri eklemeli imalat ile üretilen bağırsak villus yapısını taklit etmiştir. Yapının yüzey alanı, düzlemsel yapıya kıyasla yaklaşık %300 artırılmıştır. Çeşitli boyutlardaki toz parçacıkları verimli bir şekilde adsorbe edilmektedir. Kolayca yeniden kullanılabilir ve yıkama sonrasında %41 filtreleme verimliliğinin hiç azalmadığı deneysel olarak doğrulanmıştır. Resim 2.27.'de görülen maksimum yüzey alanına sahip biyomimetik tabanlı villus yapısının çevre dostu bir toz adsorpsiyon sistemi ve aynı zamanda bir nano jeneratör olarak kullanımının başarılı bir şekilde doğrulanması sağlanmıştır (Yoon, 2019).



Resim 2.27. Villus yapısı (Yoon, 2019)

### 2.7.2. Biyomimetik tabanlı su-yağ ayrıştırıcı filtre

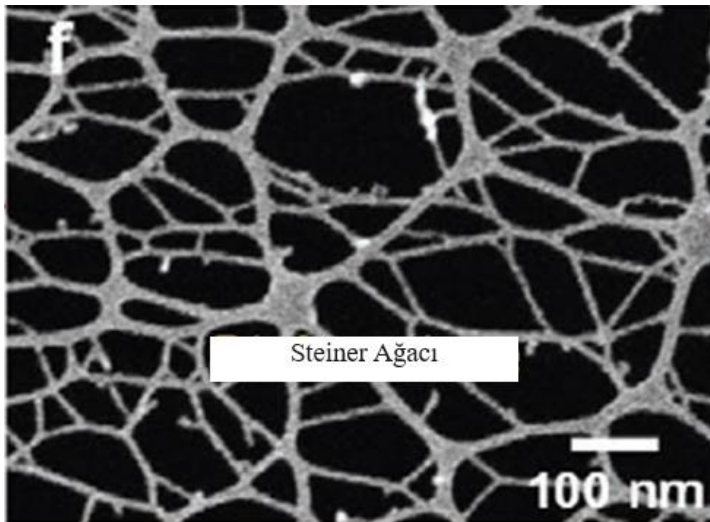
Bu çalışmada, şeker kamışı küspesi mikro partiküllerinin farklı kimyasal bileşenlerle birleştirilmesiyle, adsorbanlar için bileşenler arasında yapışma sağlayan kimyasal ve mekanik stabilite kazandıran bir biyomimetik filtre elde edilmiştir. SEM görüntüleri filtrelerin gözenekli ve yapışkan bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Filtre, sulu ortamda, 25 °C'de malzeme veya şekil kaybı olmadan 24 saat boyunca bozulmadan kalmıştır. Filtreler suda 30 dakika sonra çözülmüştür. Yağ ve su karışımından %100 yağ tutma özelliği göstermiştir (Furtado, 2022).



Resim 2.28. Oluşturulan Gözenekli Yapı (Furtado, 2022)

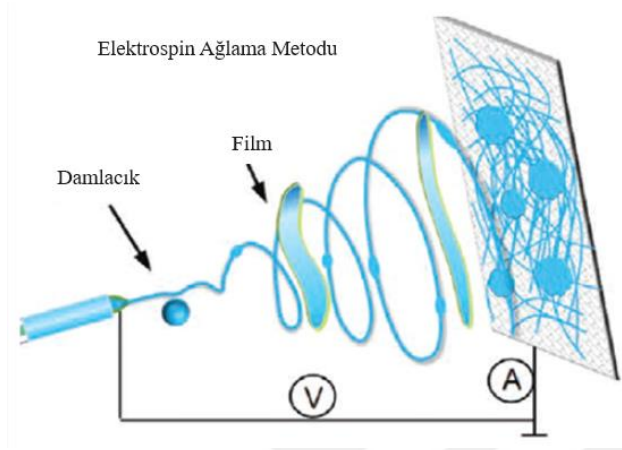
### 2.7.3. Elektrostatik nano yapılı ağ tabanlı filtre

Bu çalışmada, yenilikçi elektro sprej tekniğini kullanarak görsel olarak örümcek ağına benzetilen nanofiber ağlardan oluşan hava filtreleri hazırlamak için yeni bir strateji türü rapor edilmiştir. Strateji kullanılarak oluşan ürünün özelliği, nano ölçekli fiberlerin (10-40 nm), sürekli olarak oluşturulabilmesi ve arzu edilen nano yapısal ve ayarlanabilir toplu özelliklere sahip 2 boyutlu ağ mimarileri halinde birleştirilebilmesidir (Zhang, 2022).



Resim 2.29. Örümcek ağı benzeri yapı (Zhang, 2022)

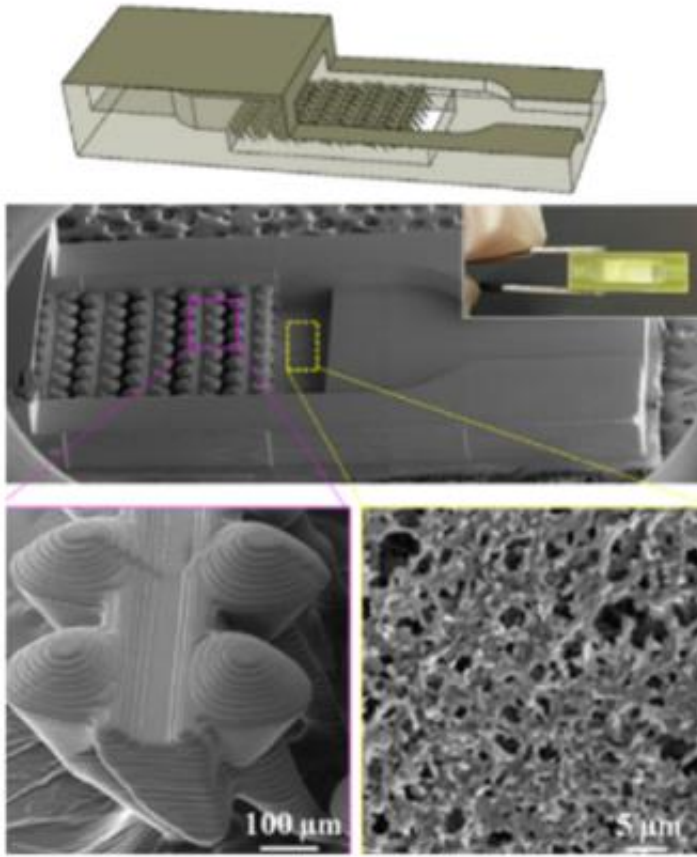
Oluşturulan yöntem ile bir filtre üretilmiştir. Oluşturulan metot kısaca belirli bir yükseklikten serbestçe erimiş polimerlerin rastgele üst üste gelmesi ile oluşan katmanın filtre kâğıdı olarak kullanılabilmesi öne sürmektedir. Resim 2.30.'da gösterildiği gibi elektro spray teknolojisi kullanılarak üst üste gelen yapılar örümcek ağına benzetildiği için örümcek ağı esinlenmeli denilmiştir.



Resim 2.30. Elektro spray üretim yöntemi (Zhang, 2022)

#### 2.7.4. Eklemeli imalat ile çip üstü filtrasyon

Membran teknolojisindeki ilerlemeler sürekli olarak yeni malzemeler ve çok işlevli yapılar sağlamaktadır. Ancak membranın mikroakışkan cihazlara dahil edilmesi zor bir işlemdir. Bu çalışmada, mikro stereolitografi kullanılarak, ekstra montaj gerektirmeden yapı-membran arayüzünde kendi kendine sızdırmazlık özelliğine sahip, balık solungaç” yapısına entegre çip üzeri membran cihazı üretilmiştir. Resim 2.31’de membran şematik olarak verilmiştir. Filtrasyon işlemi sırasında yapı-sıvı-kirletici madde etkileşimlerinin yerinde görselleştirilmesinden de anlaşılacağı üzere, uygulanan yaklaşım, hidrodinamik manipülasyon yoluyla kirletici madde parçacıklarını veya damlacıklarını "sektirebilen" akvaryum besleme mekanizmasını başarıyla temizler. Plastik mikro parçacıklar ve emülsifiye edilmiş yağ damlacıkları gibi iki yaygın atık su arıtma senaryosu ile karşılaştırıldığında üretilen filtreleme cihazı, ticari membranlı cihazlara kıyasla yüksek akışlı filtreleme için 3 kat daha uzun dayanıklılık sergilemektedir (Li, 2022).



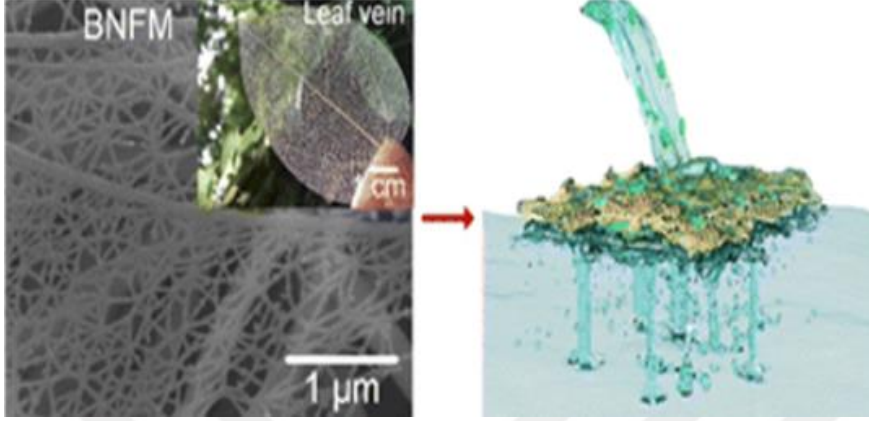
Resim 2.31. Eklemeli imalat ile çip üstü filtrasyon (Li, 2022)

### 2.7.5. Yaprak damarı biyoesinlenmeli su filtresi

Bu çalışmada, yaprak damarlarından esinlenerek biyomimetik tabanlı kendiliğinden oluşan nano net yapılı yenilikçi bir nanofiber membran inşa edilmiştir. Yöntem olarak solventsiz indüklenen faz inversiyonu adı verilen bir yöntem izlenmiştir. Çözücülerin seçilerek, yüzey aktif maddenin bu seçilen çözücüye ilave edilmesi yöntemi ile faz ayırma işleminin düzenlenmesi sağlanır. Bu sayede çapı 38 nm nano ölçekli kendiliğinden bir araya gelerek birleşen bir nano net oluşur. Özellikle patojen mikroplarla kontamine olmuş tatlı suyun, verimli bir şekilde arındırılması hedeflenmiştir.

Mevcut su arıtma teknolojilerinin yoğun kimyasallar içermesi ve bazı bakteri türleri için doğrulanamamış olması gibi etkenlerin yanında yüksek enerji tüketimi bu çalışmanın ortaya çıkmasının yolunu açmıştır. Tang ve arkadaşlarının çalışması sonucunda ortaya yaklaşık 0,18 µm kadar küçük gözenek boyutu ile %93,8 hidrofilik olma gibi bir oran çıkmaktadır. %99,8

gibi yüksek temizleme oranının yanında  $0,3 \mu\text{m}$  çapındaki parçacıkların geçişini engelleyen çok kuvvetli bir filtre çıkmıştır (Tang, 2023).

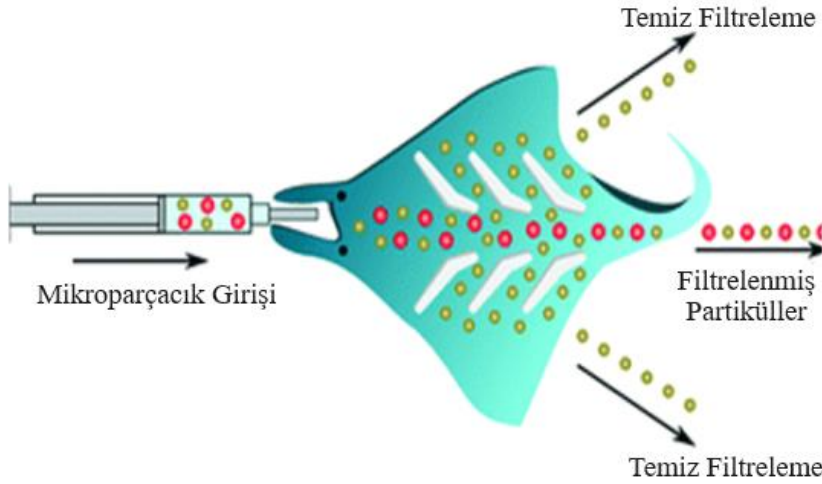


Resim 2.32. Nano net yapılı filtre (Tang, 2023)

### 2.7.6. Biyoesinlenmeli pasif mikro akışlı lob filtrasyon sistemi

Boyutlara bağlı mikro akışkan filtreleme sistemlerinde en sık ortaya çıkan sorunlardan biri tıkanmadır. Bu tıkanma filtrelerin yüksek verimli şekilde sürekli çalışmasına engel olur. Clark ve San-Miguel tarafından yapılan bu çalışmada iki farklı manta vatozu türünün filtre sistemleri taklit edilerek iki farklı mikro akışkan lob filtresi geliştirilmiştir. Filtre mekanizmasında kullanılan çipler sayesinde iki filtre lobu  $10 \mu\text{m}$  ila  $30 \mu\text{m}$  parçacıkların filtrelenmesini sağlamaktadır.

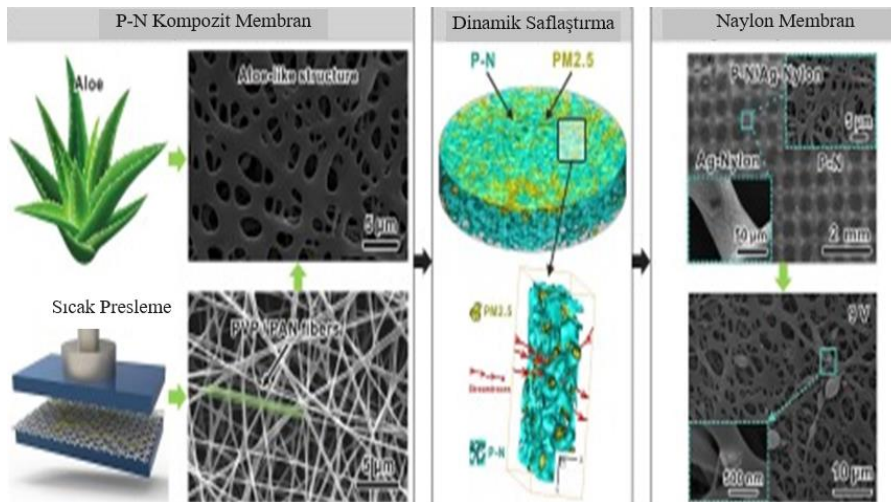
Verimin ölçülmesi için giriş akış hızları irdelenmiştir. Filtrasyon verimliliğinin sıvı akış hızı ile birlikte arttığı bilinmektedir. Çalışmada  $20 \text{ ml/dk}$  akış hızlarında %99 partikül tutma verim değerine erişilmiştir. Ortaya çıkan filtreler ANSYS Fluent yazılımında analiz edilmiş ve karmaşık hız profilleri ortaya çıkmıştır. Biyolojik sistemlerin taklit edildiği bu uygulamada manta vatozu taklit edilmiş ve yüksek verim değerleri elde edilmiştir (Clark ve San-Miguel, 2021).



Resim 2.33. Vatoz esinlenmeli filtre (Clark ve San-Miguel, 2021)

### 2.7.7. Aloe vera esinlenmeli partikül filtre

Bu çalışmada Ma ve arkadaşları aloe vera yapraklarının yüzey yapısından esinlenerek çok katmanlı, gözenekli ağ yapısına sahip bir nano fiber kompozit membranı tasarlamış ve bunu sıcak presleme metodu eşliğinde elektro spin yoluyla üretmiştir. Ortaya yüksek verimli bir partikül filtre çıkmıştır. PM 2.5 için inceleme hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak analiz edilmiştir. Yapısında kullanılan maddeler sayesinde filtrenin adsorpsiyon kapasitesinin artırılması için elektrostatik etkileşimlerden de yardım alınabilmektedir. 9 V kadar bir voltaj ile %99,49 verimle çalışan ve sadece 35 Pa basınç düşüşüne sahip bir filtre oluşmuştur. Doğanın aloe vera yapraklarındaki filtreleme dokunuşu taklit edilerek ortaya bu filtre çıkartılmıştır (Ma, 2019).

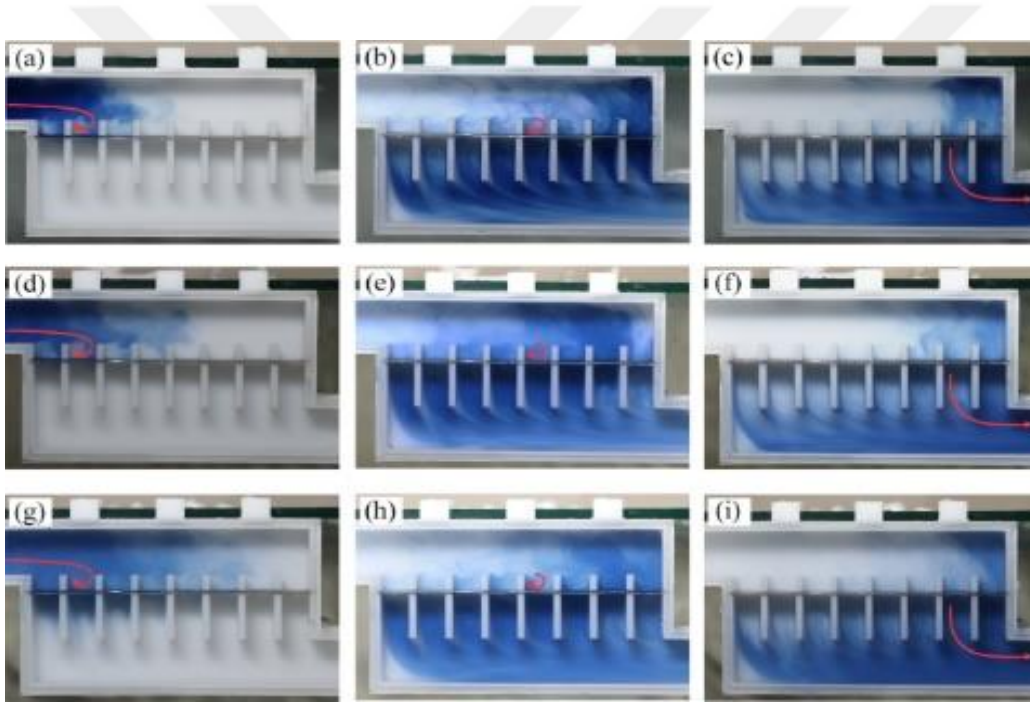


Resim 2.34. Aloe vera esinlenmeli partikül filtre (Ma, 2019)

### 2.7.8. Balenli balina esinlenmeli girdap filtresi

Filtrelerdeki en büyük sorunlardan biri tıkanmadır. Ancak filtre kullanarak beslenen organizmalarda bu durum görülmez. Bu çalışmada Zhu ve arkadaşları balenli mavi balinalarda bulunan balenli paralel kanalların biyotik taklidi yoluyla eklemeli imalat metodu kullanılarak Resim 2.35’de görüldüğü gibi yenilikçi bir filtre üretimi gerçekleştirmiştir.

Doğrulama işlemi için bir deney düzeneği kurulmuş ve bu deney düzeneği için biyotik filtre, pompa, akışkan darbe doğrultucu ve su tankı kullanılmıştır. Filtrede bulunan oluk yapısının yakınında sıvı ayrılması meydana geldiği ve girdapların oluştuğu görülmüştür (Zhu, 2022).



Resim 2.35. Girdap filtresi çalışma şekli (Zhu, 2022)

Eğer filtrede girdap kontrollü filtreleme mekanizması bulunuyorsa parçacıklar oluk önünde değil de kenarlarında birikme eğilimi göstermektedir. Bu durum filtrenin tıkanmasını önlemektedir. Akış hızının artışıyla beraber girdaplar artar ve tıkanıklık daha yüksek verimle engellenir. Doğadan esinlenen bu tasarım için çok yönlü uygulama alanı olduğu düşünülmektedir (Zhu, 2022).



Resim 2.36. Balenli balina esinlenmeli girdap filtresi (Zhu, 2022)

### 2.7.9. Balık ağız yapılı tıkanmaz filtre

Süt ürünleri, bira gibi endüstriyel gıda ürünleri üretilirken çapraz akış filtrelemesi sırasında ortaya tıkanma sorunu çıkar. Bu soruna çözüm olarak doğada bir karşılık bulunmaktadır. Balina köpekbalıkları ya da japon balıkları gibi askıda kalarak beslenen balıklar ağız filtreleri tıkanmadan besinleri tutabilmektedir. Balıkların ağızlarında Resim 2.37.'de görülen d-tipi kaburgalar sayesinde ağız içinde girdap oluşur ve küçük parçacıklar da dahil olmak üzere tüm tıkanıklık bu yapı yardımıyla kolaylıkla giderilir. Çapraz akışlı bu filtreleme yöntemi endüstride kullanılmak üzere modellenmiştir (Sanderson, 2016).



Resim 2.37. Balina köpekbalığı D-Tip kaburga (Sanderson, 2016)

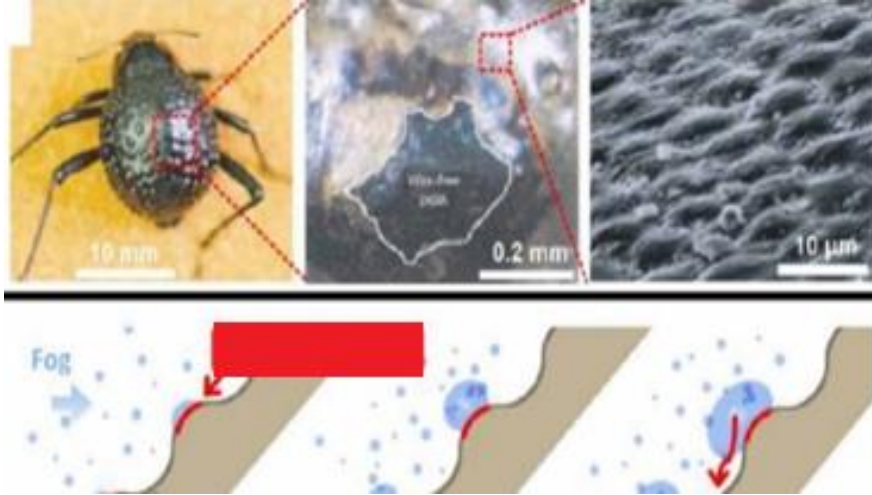
Model akademik çalışma tamamlanınca bir filtre olarak tasarıma aktarılmış ve üretilmiştir. Sonuçta Resim 2.38.'de görülen doğadan örnek alınarak üretilmiş bir filtre ile endüstriyel akışkanlarda ortaya çıkan partikül tıkanması sorunu ortadan kaldırılmış ve daha iyi performans elde eden bir filtre üretilmiştir.



Resim 2.38. Kaburga benzeri filtre (Sanderson, 2016)

#### **2.7.10. Çöl böceği esinlenmeli hidrofilik nem yakalayıcı film**

Kurak bölgelerde nemden ve çöken sisten suyun toplanması hayatsal açıdan oldukça ilgi çekicidir. Özellikle Namib Çölü'nde bulunan çöl böceklerinin su toplama kapasitesi suyun nasıl toplanabileceği ve nasıl taklit edilip bu metodun kullanılabilceği noktasında yardımcı olmuştur. Bu çalışmada suyu yakalamak için aynı Namib çöl böceklerindeki gibi bir süperhidrofilik ya da süperhidrofobik hibrit selüloz filmi geliştirmek için çalışmıştır. TiO<sub>2</sub> nanopartikülleri suyun yakalanması için hidrofilik bölge görebildiği bilgisinden yola çıkılmıştır. TiO<sub>2</sub> ile kaplanmış yüzeyler su damlacıklarının toplanıp yuvarlanmasını sağlayan hidrofobik bir alan gibi davranmaktadır. Toplam verim 1,1 mg/cm<sup>2</sup>.sa olarak izlenmiştir. Bu çalışma ile yüzeyde güvenli su toplama cihazlarının inşası için gelecekteki çalışmalara bir öncülük etmektedir (Xu, 2018).



Resim 2.39. Çöl böceğinin sırtındaki hidrofilik film tabakası ve oluşumu (Xu, 2018)

Filtre ve filtrasyon sistemleri, doğanın korunması ve insan sağlığı açısından oldukça önemli bir konumdadır. Sanayileşme ve teknolojinin hayatımıza getirdiği kirlilik, çevre ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek ve daha temiz bir yaşam sağlamak için filtrasyon sistemlerinin geliştirilmesi hayati öneme sahiptir. Doğaya zarar vermeden onu korumak, doğanın kendi yöntemlerini kullanarak mümkündür. Doğa, milyonlarca yıl boyunca kendi filtrasyon mekanizmalarını geliştirmiştir ve bu doğal sistemlerin bilimsel olarak incelenmesi, yeni ve faydalı tasarımların ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Biyomimetik, doğayı taklit etmenin yanı sıra, doğayı koruma amacını da taşır. Bu bilim dalı, doğanın tasarımlarından ilham alarak, çevre dostu ve etkili çözümler geliştirmeyi hedefler. Doğanın filtreleme yöntemleri, biyomimetik araştırmaların temelini oluşturur ve bu araştırmalar, doğayı koruma düşüncesiyle harmanlanarak daha yenilikçi ve sürdürülebilir filtrasyon sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlar. Bu anlayışla geliştirilen filtreler, doğanın kendini temizleme ve yenileme süreçlerini taklit ederek hem çevresel kirliliği azaltır hem de ekosistemlerin sağlığını korur. Doğanın mucizevi filtreleme yetenekleri, modern teknolojilere ilham kaynağı olurken, aynı zamanda daha sürdürülebilir bir geleceğin de kapılarını aralamaktadır.

Biyomimetik prensiplerle tasarlanan bu filtreler, sadece teknik açıdan değil, etik ve ekolojik açıdan da büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, doğayı taklit eden ve onu korumayı amaçlayan filtrasyon sistemlerinin geliştirilmesi hem günümüz hem de gelecek nesiller için

kritik bir rol oynamaktadır. İncelenen doğal ve yapay filtreler de göstermektedir ki doğanın taklit edilmesi ve günümüz teknolojisiyle harmanlanarak ortaya yeni filtrasyon sistemlerinin çıkması olağandır. Bu örnekler gibi başka filtre sistemlerindeki gelişmeler, diğer doğal sistemlerin incelenmesi ile katlanarak artacaktır. Önemli olan doğanın taklit edilmesi ve ondan öğrenilenlerin doğayı koruyarak kullanılmasıdır.



### **3. FİLTRE TASARIMI VE TASARIMIN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİMİ**

#### **3.1. Tasarımın Oluşturulması**

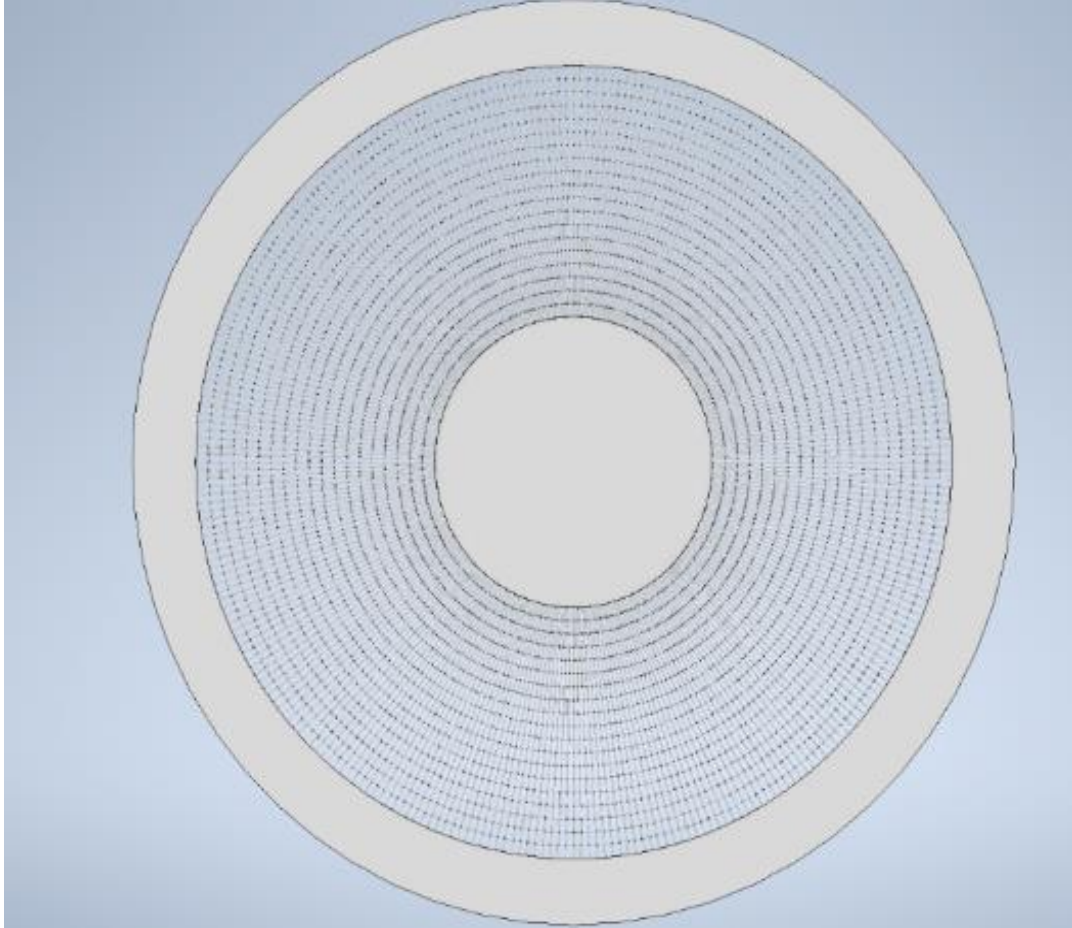
##### **3.1.1. Tasarım fikri**

Tasarım fikri ilk olarak örümcek ağlarının formlarının ve fonksiyonlarının incelenmesiyle ortaya çıkarılmıştır. Örümcek ağları havayı filtreleme özellikleri ile örümceklere av yakalama imkânı sunan yapılardır. Yavru örümceklerin ağlarına takılan toz, polen ve mantarları besin olarak tüketmesi tasarımda ilham alınan noktadır. Biyomimetik metodolojisinin temel kanunu olan doğadan ilham alarak doğayı taklit etme durumu göz önüne alınarak örümceklerin bu toz ve polen gibi küçük parçacıkları tutabiliyor olması bu tasarımın ortaya çıkmasındaki en büyük etkidir. Doğanın bu stratejisi bir partikül filtre için taklit edilmiş ve tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarım biyomimetik tasarım metodolojisi kullanılarak örümcek ağlarının hem form hem de fonksiyonun aynı anda taklit edilmesi stratejisine dayanmaktadır.

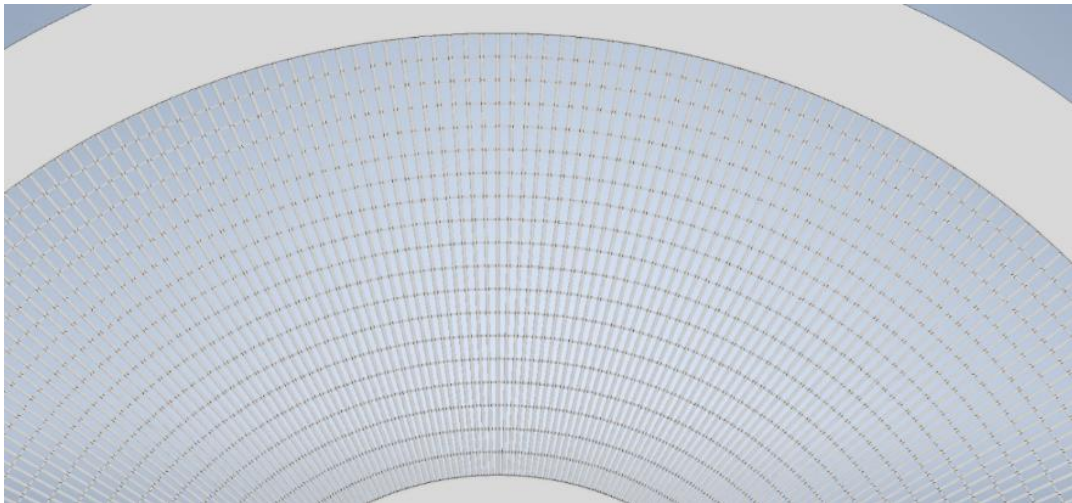
##### **3.1.2. Tasarımın yapısı**

Tasarım, yapısı gereği örümcek ağına benzetilerek oluşturulmuştur. Üzerinde örümcek ağlarında bulunan radyal ve spiral ipliklerin oluşturmuş olduğu küresel ağ yapısı formu bulunmaktadır. Ancak tasarım bir filtre olduğundan dolayı örümcek ağlarındaki gibi seyrek yerleşim yerine daha sık yerleşim yapılarak form geliştirilmiştir. Sık yerleşim örümcek ağında bulunan iplik parçalarının oransal olarak sayısının ve boyutunun artırılması ile elde edilmiştir. Standart bir örümcek ağındaki düzensizlikler ortadan kaldırılmış ve Resim 3.1'de görülen tam düzenli halde dairesel bir form elde edilmiştir. Tasarım, Autodesk INVENTOR® Professional 2024 programında katı model haline getirilmiş ve imalata hazırlanmıştır. Farklı üç model üzerinde durulan tasarımda radyal ipliklerin sık olduğu bir model, spiral ipliklerin sık olduğu bir modelin yanında son olarak da her iki iplik türünün de sık olduğu bir model oluşturulmuştur. Dairesel bir formda oluşturulan bu tasarımda ipliklerin arasında bulunan boşluk miktarları orta bölgeden dış bölgeye gidilince artmaktadır. Aynı örümcek ağlarının formlarında da bulunan bu ortadan dışa doğru seyrelme dairesel yapıdan kaynaklanmaktadır. Bu durumda ipliklerin sık yerleştirilmesi orta kısımdaki ipliklerin

birbirine temas halinde olmasının temel nedenidir. İpliklerin birbirine yapışık olduğu bu kısımda filtreleme gerçekleşemeyeceğinden tasarımda dairesel formun orta kısmı doldurulmuş ve yapının dayanımının artırılması hedeflenmiştir.

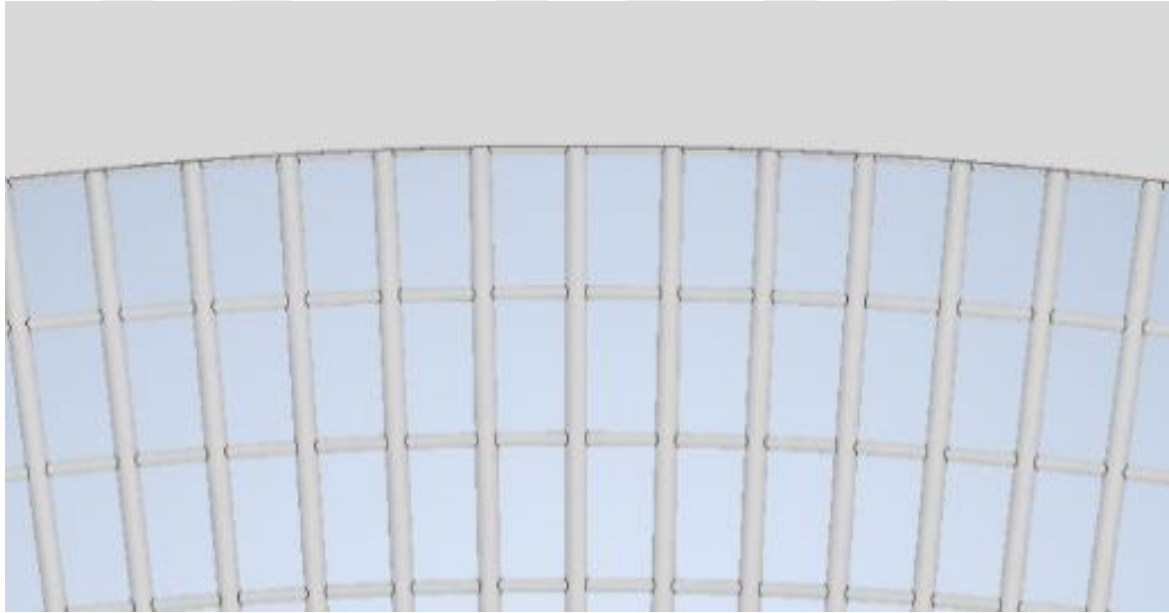


Resim 3.1. Tek bir katmanın önden görünüşü



Resim 3.2. Tek bir katmanın önden yakınlaştırılmış görünüşü

Örümceklerin fonksiyonları gelen av ya da parçacıkların diğer tarafa geçmemesi ve tekrar kullanılabilir olması olarak düşünülmektedir. Bu tasarım kullanıldıktan sonra suyla yıkanıp basınçlı hava yardımı ile içindeki su ile karışmış toz parçacıkların üzerinden arındırılması esasıyla temizlenmektedir. Temizlenen ve kurutulan tasarım tekrar kullanıma hazır hale gelmektedir. Üretim sırasında kullanılan yöntem parçanın polimer esaslı bir reçine kullanarak oluşturulmasını gerektirdiği için yapısında kullanılan malzemeler özel malzemelerdir. Tasarımın ince ve kırılğan yapısı nedeniyle aynı bir örümcek ağı gibi kolaylıkla hasar görebilmektedir. Yüksek basınç ve sıcaklık altında zarar görmesi oldukça muhtemeldir. Bununla beraber kaba bir filtrenin gerektirdiği tüm özellikleri üzerinde barındırmaktadır.



Resim 3.3. Tek bir katmanın önden yakınlaştırılmış görünüşü-2

### 3.1.3. Tasarımın boyutları

Gerçek bir örümcek ağına göre gerçek radyus ipliklerin ortalama boyutu olan 15  $\mu\text{m}$  boyutunun 10 kat ve gerçek spiral ipliklerinin ortalama boyutu olan 8  $\mu\text{m}$  boyutunun ise 12.5 kat büyütülerek gerçeğe göre daha kalın ipliklerle hazırlanmış olan tasarım, birbirinin üstüne yapıştırılmış 0,15 mm kalınlığındaki 11 kat ağ formundan oluşmaktadır. Toplamda 0,165 mm olan kalınlık filtrenin sağlamlığı için kullanılmıştır. Ortası çapı 22 mm olan içi dolu bir daire ile kaplanmış ve en dış kısmı filtreyi toplamda 60 mm çapında bir daire haline getirene kadar doldurularak sağlamlaştırılmıştır. Tasarım bu haliyle en çok 160  $\mu\text{m}$  en az 20  $\mu\text{m}$

boşluklara sahip olarak hava akışının da rahatlıkla üzerinden geçmesine izin vermekte, öni ve arkasında basınç farkı oluşmamasını sağlamaktadır.

Katmanlı yapı aynı zamanda ön katmanda bulunan boşlukların kapatılması amacını da taşımaktadır. İlk katmanda bulunan boşluk kısmı ikinci katmanda açısız olarak döndürülerek kapatılmış ve bu yapı devam eden her bir katmanda sürdürülmüştür. 11 kat olunca tüm boşluklar minimum seviyede doldurulmuş ve tasarım nihai halini almıştır. Tasarımın neden daha ince ve daha küçük formda olmadığı sorusunun cevabı ise mevcut teknoloji ve imkanlar ile elde edilebilen en ince iplik kalınlığının 100 µm sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Radyal iplikler işlenirken 150 µm, spiral iplikler işlenirken 100 µm kalınlığının altına inilememektedir. Tasarımın bu şekilde yapılması durumunda üretimin gerçekleştirilmesi istenen eklemeli imalat metodu yetersiz kalacak ve metodu uygulayacak olan makinenin nozul kalınlığı istenen ölçüyü vermeyecektir. Bu nedenle bu tasarım bir kaba filtre olarak düşünülmüş ve ona göre hazırlanmıştır.

Üretimde yaşanabilecek sorunlar, ilgili cihazlar, metodolojiler ve malzemeler detaylıca araştırılarak öğrenilmiş ve tasarım bu araştırmalar neticesinde ortaya çıkmıştır. Tasarım toplam 1,65 mm kalınlığında 60 mm çapında ortası ve dış katmanı tamamen doldurulmuş malzemeden oluşan 10 mm kalınlığındaki çeperlerle sarılı şekilde oluşturulmuştur. İçindeki ipliklerden içten dışa doğrultuda olup iskeletin ana kolonları ona radyaller 150 µm iç kısımdaki radyal bağlantılarını sağlayan spiraller ise 100 µm olarak boyutlandırılmıştır. Tek katmanda içten dışa tam olarak 20 adet spiral iplik sırası bulunmaktayken aynı zamanda 240 adet radyal iplik yan yana sıralanarak bir daireyi oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir.

#### **3.1.4. Tasarım modelleri**

Tasarım toplamda 3 farklı modele sahiptir. Her bir tek katmanda aynı form kullanılarak sadece yerleşim açıları ve noktaları değiştirilerek farklı tip modeller elde edilmiştir. Farklı modellerin amacı yapılan çalışma neticesinde deneysel olarak hava geçirgenliği, basınç farkı, verim ve kapasite hesaplarının yerleşim ve açığa göre ne kadar değişiklik göstereceğini belirlemek ve buna göre aralarındaki en ideal modele karar verebilmektir.

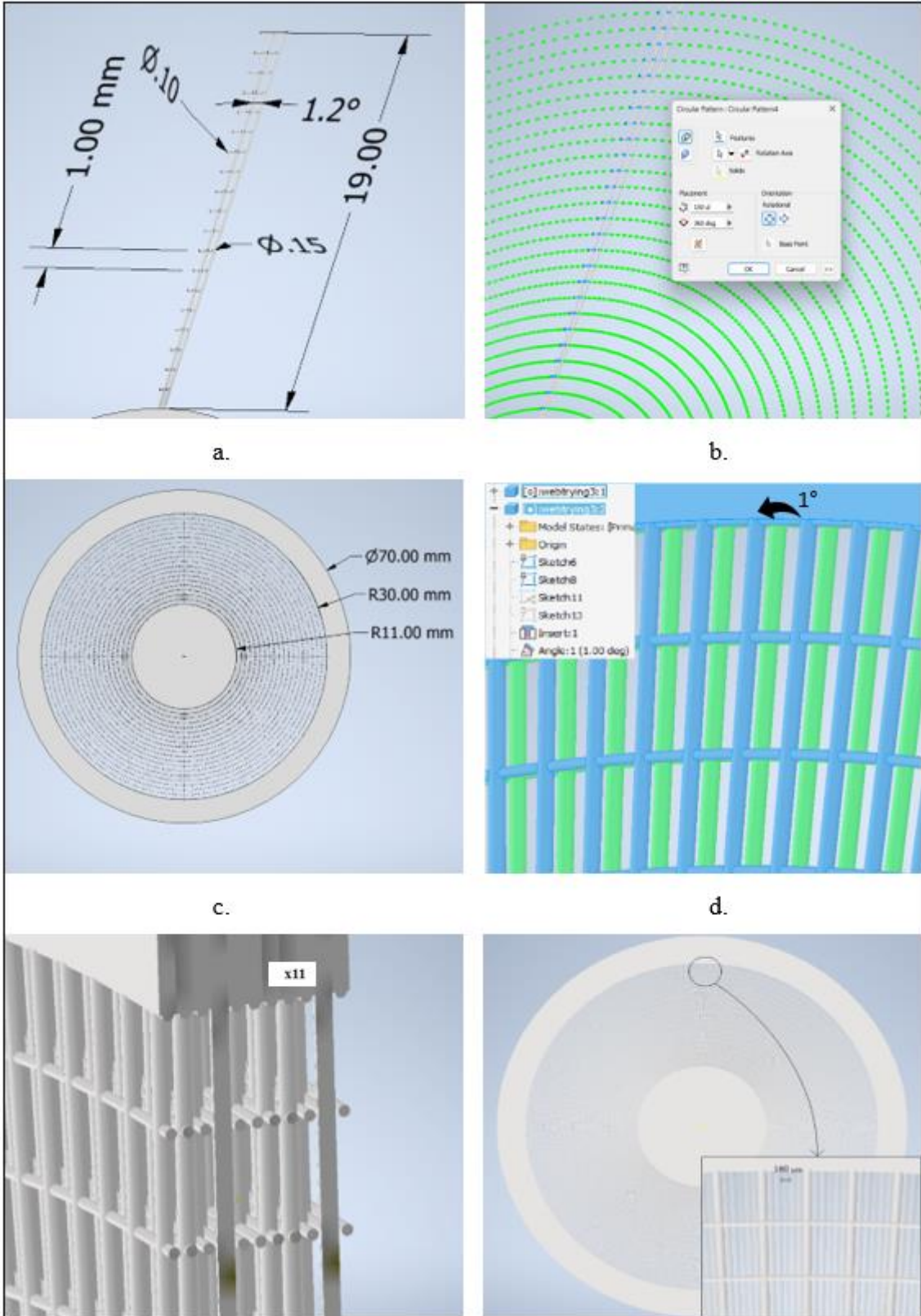
Modellerden ilki ortadan dışa doğru uzanan radyus ipliklerinin katmanların orta nokta sabit olacak şekilde birbirlerine göre açısız olarak daire merkezine göre 1,2° yer değiştirilerek

toplamda  $2,4^\circ$  açı oluşturacak şekilde 2 radyus ipliğinin merkeze göre  $360^\circ$  açığı 150 adet dönen dairesel çoklanması sonucunda ulaşılmıştır. 11 katın birbirine göre merkez referansı ile öne ve arkaya doğru yapmış olduğu 1 derecelik açılar sayesinde ilk model olan radyus modeli oluşmuştur. Radyus açıları değişirken spiral konumları sabit kalarak birbiri üzerine yerleşmiştir. Katman tasarımlarında her model için aynı kalıp kullanılmıştır. Tasarımın oluşturulması görselleri Resim 3.4'te verilmiştir.

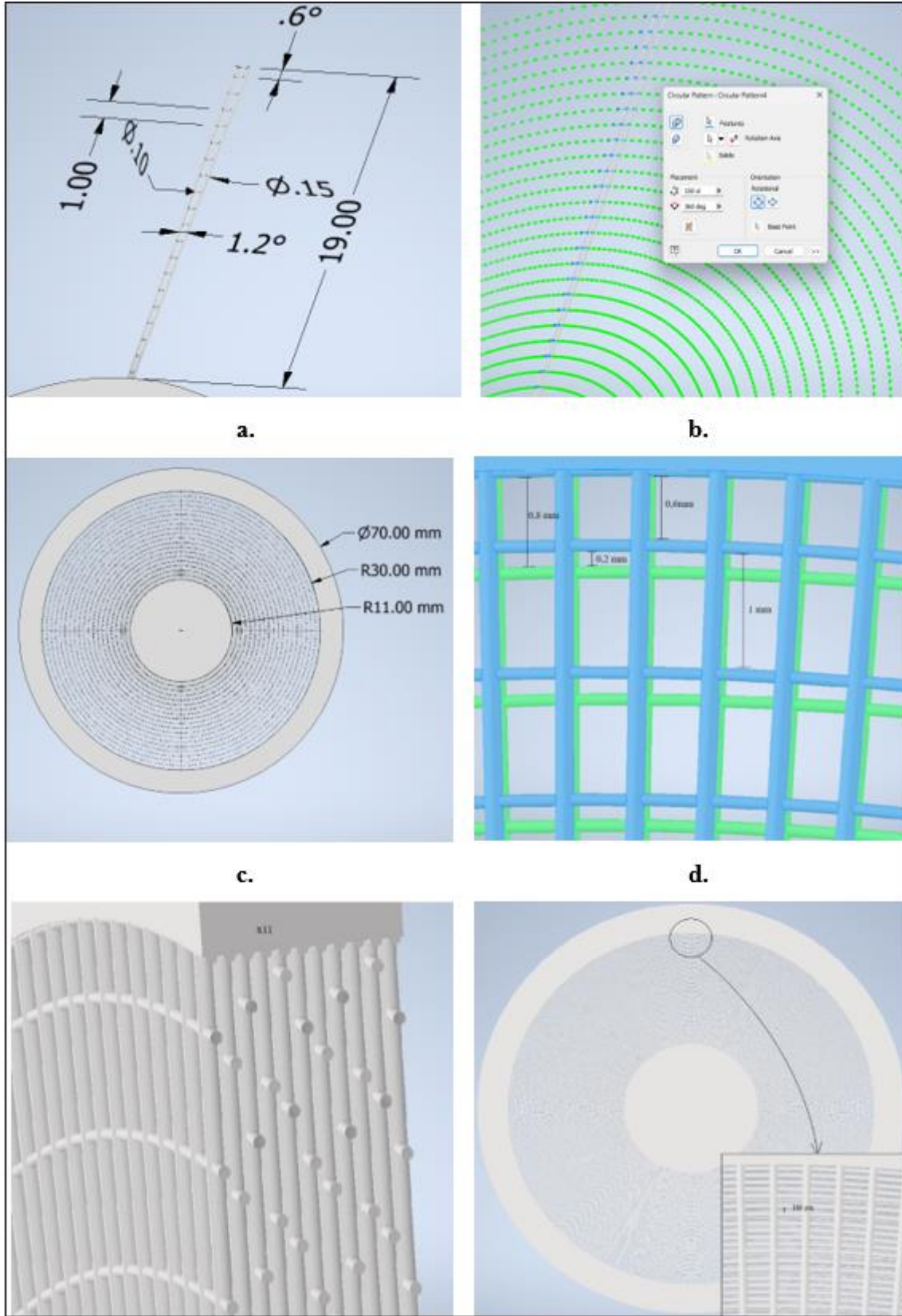
İkinci modelde ise Resim 3.5'te gösterildiği gibi radyus iplikler her katmanda sabit bir şekilde en alt katmana kadar ilerlerken spiral ipliklerin konumları 2 mm geri ve 2 mm ileri olacak şekilde tasarlanan 5 farklı katmanın alt alta eklenmesi ile oluşturulmuştur. En üstteki katmana ait ilk dış spiral iplik, daire çeperinden 0.6 mm içeride tutulmuş ve buna göre 1 mm aralıklarla diğer spiral iplikler katman üzerine eklenmiştir. Diğer katmanlardaki spiral ipliklerde de yer değiştirilerek ve boşluklar alt katmanlar sayesinde kapatılarak spiral model ortaya çıkmıştır.

Son modelde Resim 3.6'da gösterildiği gibi hem radyus iplikler açısız olarak hareket ettirilmiş hem de spiral iplikler yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hem açısız olarak hem de yerleşim yeri olarak en çok boşluk kapatan model, radyus-spiral model olarak isimlendirilmiştir. Teorik açıdan boşluk kapatması sebebiyle en ideal modelin radyus-spiral model olabileceği değerlendirilmektedir. Katmanların iplikleri arasındaki boşluklar modellerde maksimum 160  $\mu\text{m}$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Bahsi geçen değerler dairenin en dış kısmından alınan kesitler ile katı model üzerinde teorik olarak belirlenmiştir. Kesit görüntüleri Resim 3.4., Resim 3.5. ve Resim 3.6'da verilmiştir.

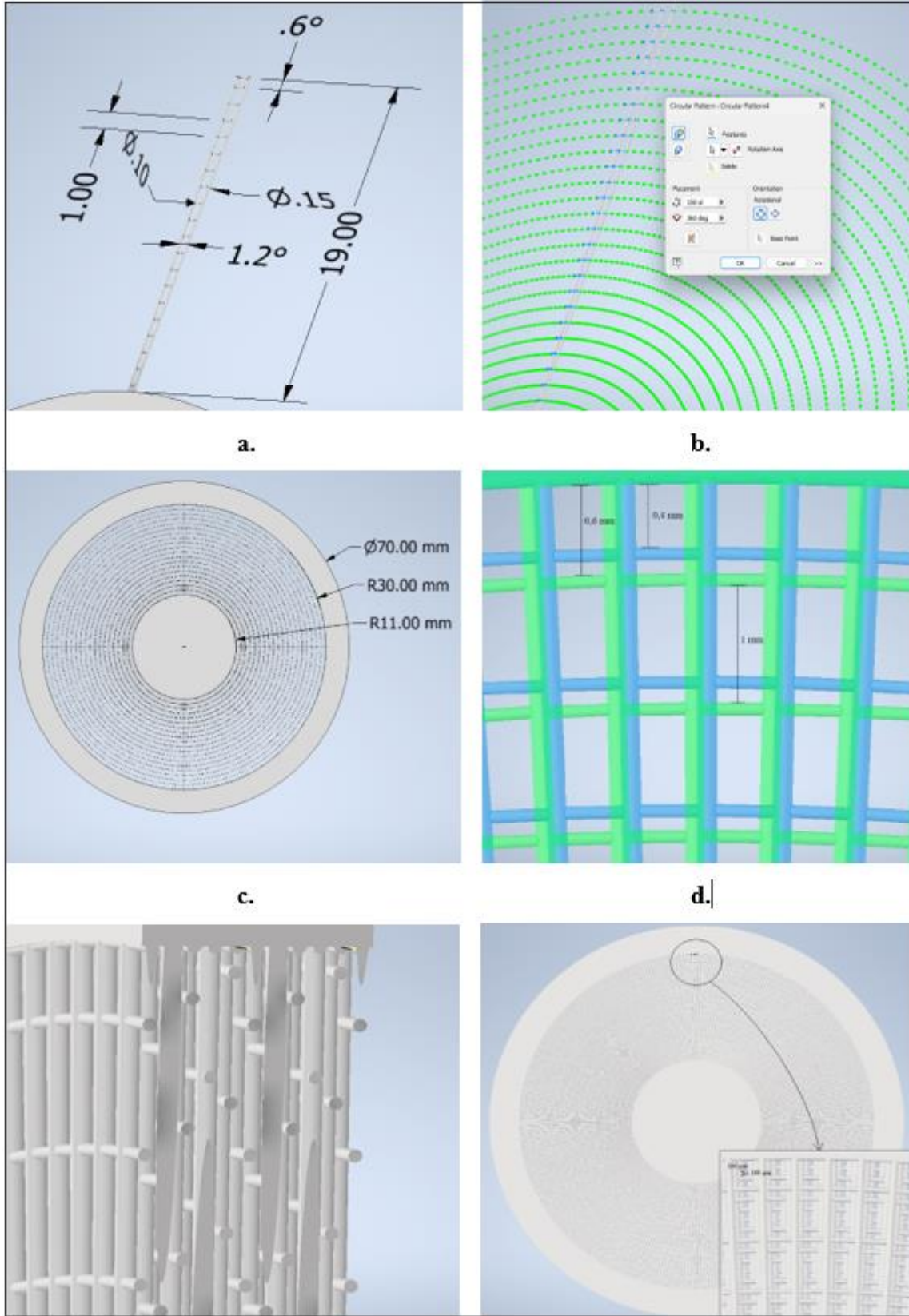
Radyusların açısız, spirallerin ise konum tabanlı yer değiştirmeleri modellerin arasındaki farkı oluşturmaktadır. Birbirleri arasında çok büyük farklar olmasa da yine de tasarımsal fiziki farklılıkların az da olsa özelliklere ve deney sonuçlarına etki edeceği düşünülmektedir. Aşağıda hem radyus hem spiral hem de radyus-spiral modellerin bilgisayar destekli tasarım programı görüntüleri hem önden hem de açılı ve yakından kolaylıkla görülebilecek şekilde görüntülenmiştir. Bu görüntüler INVENTOR® programından ekran görüntüsü alınarak elde edilmiştir.



Resim 3.4. Radyus model tasarımının oluşturulması a) tek radyus ipliğinin oluşturulması, b) radyus ipliğin dönele çoklanması, c) radyus tek kat modeli, d) katların bir araya getirilmesi, e) radyus model kesit görüntüsü, f) radyus model boşluk görüntüsü



Resim 3.5. Spiral model tasarımının oluşturulması a) tek spiral ipliğinin oluşturulması, b) spiral ipliğin dönele çoklanması, c) spiral tek kat modeli, d) katların bir araya getirilmesi, e) spiral model kesit görüntüsü, f) spiral model boşluk görüntüsü



Resim 3.6. Radyus-spiral model tasarımının oluşturulması a) tek radyus- spiral ipliğinin oluşturulması, b) radyus-spiral ipliğin dönel çoklanması, c) radyus-spiral tek kat modeli, d) katların bir araya getirilmesi, e) radyus-spiral modeline ait kesit görüntüsü, f) radyus-spiral model boşluk görüntüsü

## 3.2. Eklemeli İmalat ile Üretim

### 3.2.1. Eklemeli imalat

Eklemeli imalat son zamanların en popüler üretim metotlarından biridir. Gerek geleneksel yöntemlere göre talaşlı imalat yöntemlerinin yapamadığı işleri yapması gerekse ustalık gerektirmeden işlem yapılabiliyor olması eklemeli imalatın en önde gelen avantajlarından biridir.

Eklemeli imalat teknolojisi, birçok farklı teknolojiyi bünyesinde barındıran ve dijital ortamda tasarlanmış objelerin eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak fiziksel objelere dönüştürülmesine olanak tanıyan yenilikçi ve pratik bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalatın temel prensibi olan katmanlı imalat, CNC frezeleme ve tornalama gibi bilgisayar destekli üretim süreçlerinin dayandığı talaşlı imalat yönteminin tersidir. Talaşlı imalat, üç boyutlu bir nesne, bir malzeme bloğundan parçaların kesilerek uzaklaştırılmasıyla elde edilirken, eklemeli imalat yönteminde, tasarlanan üç boyutlu nesne, art arda oluşturulan malzeme katmanlarının birleştirilmesiyle elde edilir. Bu nedenle, eklemeli imalat yöntemi ile üç boyutlu objeler daha az malzeme kullanılarak üretilmektedir.

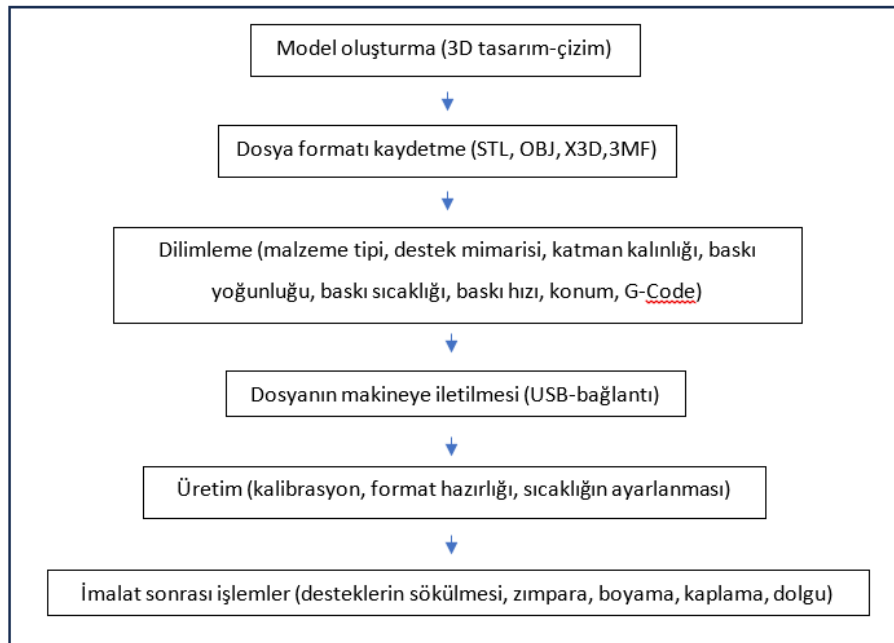
Eklemeli imalat, üretim süreçlerini dönüştürerek birçok alanda devrim niteliğinde değişiklikler getirmiştir. Eklemeli imalat, üretim hattı kurulumu veya kalıp tasarımı gibi süreçlerin olmaması ve tasarımın doğrudan imalata alınabilmesi nedeniyle, özellikle prototipleme ve düşük hacimli üretim süreçlerinde büyük avantajlar sunmaktadır. Bu teknoloji, mühendislik ve tasarım alanlarında hızlı ve etkili çözümler sağlamaktadır. Yüksek geometrik doğruluk ve çözünürlükte üç boyutlu imalat yapabilme yeteneğine sahip ev tipi masaüstü eklemeli imalat makinelerinin geliştirilmesi, eklemeli imalatın sağladığı bu avantajlar sayesinde, bu teknolojinin diğer imalat yöntemleri arasında öne çıkmasına katkıda bulunmuştur. Eklemeli imalatın sunduğu üretim esnekliği, serbest form yüzeylere sahip objelerin üretiminde büyük avantaj sağlamaktadır. Bu teknoloji, kişiselleştirilmiş üretim süreçlerine olanak tanıyarak, özel tasarımların ve bireysel ihtiyaçlara yönelik ürünlerin hızlı ve etkili bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır (Sürmen, 2019).

Ancak, eklemeli imalat yönteminin sunduğu tüm avantajlara rağmen, bu yöntem seri üretim için ekonomik olmaması, üretilebilecek parçaların boyutlarının yazıcının kapasitesiyle

sınırlı kalması ve üretim hızının düşük olması gibi nedenlerle kullanım alanlarında kısıtlamalar yaşamaktadır. Ayrıca, eklemeli imalatta kullanılan malzeme çeşitliliği de sınırlıdır. Bununla birlikte, her geçen gün farklı malzemelerin kullanılmasına olanak tanıyan yeni yöntemler ve teknolojiler geliştirilmektedir. Günümüzde, birçok plastik, metal, kompozit ve organik malzeme çeşidi, eklemeli imalatta kullanılabilir. Bu alandaki araştırmalar ve yenilikler, eklemeli imalat teknolojisinin daha geniş bir malzeme yelpazesi ve daha yüksek üretim hızları ile kullanımını mümkün kılacak şekilde ilerlemektedir. Bu gelişmeler, eklemeli imalatın gelecekteki potansiyelini daha da artırmakta ve çeşitli endüstrilerdeki uygulama alanlarını genişletmektedir. Eklemeli imalatın hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük bir öneme sahip olduğu ve üretim süreçlerinde önemli bir dönüşüm sağladığı anlaşılmaktadır.

### 3.2.2. Eklemeli imalat işlem adımları

Eklemeli imalat ile üretim yapılabilmesi için bir üretim prosesi gerekmektedir. Proses bilgisayar destekli tasarımdan başlayarak ürün elde etme noktasına ilerlemektedir. Bu aşamalar tüm eklemeli imalat adımlarında kullanılan adımlardır. Üretime hazırlığı, üretimi ve üretim sonrası işlemlerin bir sıralamasını içermektedir. Adımların basit algoritması aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1. Eklemeli imalat işlem adımları algoritması

### 3.2.3. Eklemeli imalat metotları

Eklemeli imalatta kullanılan birçok metot bulunmaktadır. Metal, alaşım ya da plastik esaslı malzemeler kullanılabilir. Malzeme, istenen ürün kalitesi ve ürünün kullanım amacına göre bir metot seçilim yapılmaktadır. Bu metotlardan en bilindikleri aşağıdaki tablodaki gibi özetlenebilir.

Çizelge 3.1. Eklemeli İmalat Metotları

Teknoloji	Malzeme	Kürleme metodu	Kategori	Yöntem	Polimer tipi
FDM	Termoplastik	Termal Enerji	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	Sıvı
SLA	Foto polimer- Seramik	Lazer-UV Işını	Reçine Polimer	Foto polimerizasyon	Sıvı
DLP	Foto polimer- Seramik	UV Projeksiyon	Reçine Polimer	Foto polimerizasyon	Sıvı
PJ	Foto polimer- Wax	UV Işını	Reçine Polimer	Malzeme Püskürtme	Sıvı
SLS	Poliamid Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	Eritme	Toz Yataklı Eritme	Eritme
SLM	Metal Tozu Seramik	Yüksek Güçlü Lazer Işını	Eritme	Toz Yataklı Eritme	Eritme
EBM	Metal Tozu Seramik	Elektron Işını	Eritme	Toz Yataklı Eritme	Eritme
LENS	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını	Eritme	Enerji Biriktirme	Eritme
BJ	Metal Tozu – Seramik - Kum	Termal Enerji	Yapıştırma	Yapıştırıcı Püskürtme	Eritme
LOM	Plastik-Kâğıt- Metal Sac-Seramik	Lazer Işını	Yapıştırma	Sac Laminasyon	Yapıştırma

Eklemeli imalatta birçok farklı metot olmasına karşın bu çalışmada üretilecek ürün plastik esaslı bir ürün olduğundan dolayı metal esaslı üretim yöntemleri bu çalışmanın kapsamına alınmamıştır. Plastik esaslı foto polimer, seramik, termoplastik poliamid ve wax ile üretim yapılan yöntemler ve bu yöntemlere ait kısa bilgiler aşağıdaki tablodaki gibidir.

Çizelge 3.2. Polimer esaslı ürünlere ait baskı metotları

FDM	SLA	DLP	PJ
Düşük Maliyet	Yüksek Maliyet	Yüksek Maliyet	Yüksek Maliyet
Yüksek Mukavemet	Normal Mukavemet	Normal Mukavemet	Yüksek Mukavemet
Düşük Çözünürlük	Yüksek Çözünürlük	Projeksiyon Esaslı Çözünürlük	Yüksek Çözünürlük
Kötü Yüzey	Kaliteli Yüzey	Kaliteli Yüzey	Kaliteli Yüzey
Yavaş Baskı	Hızlı Baskı	Yüksek Baskı Hızı	Hızlı Baskı

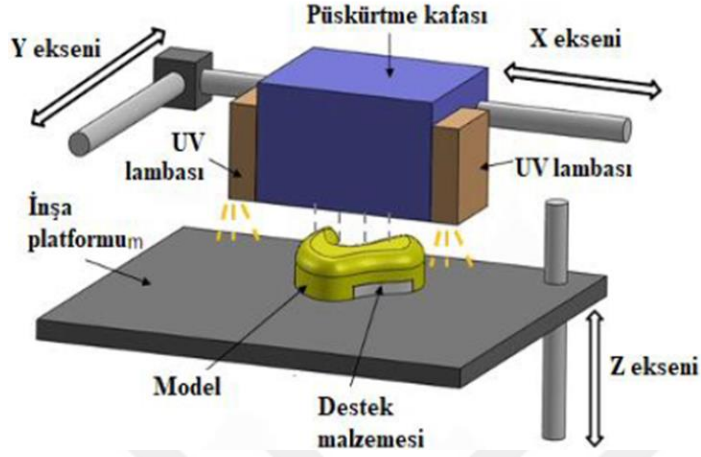
### 3.2.4. Kullanılan eklemeli imalat metodu

Bu çalışmada üretilmek istenen filtre ürünü oldukça ince hatları olan ve kırılğan bir yapıya sahiptir. İçerisinde 100 µm kalınlığında olan spiral ve 150 µm kalınlığında olan radyus ipliklerinin bulunması bu parçanın üretilebilirliğini oldukça zorlaştırmaktadır. Parçanın doğru bir şekilde üretilebilmesi için bu kalınlığı sağlayabilecek bir yöntem gerekmektedir. Bu kalınlığı en doğru sağlayıp en kaliteli ürünü en yüksek mukavemetle verebilecek yöntem olarak PJ (polijet) olarak bilinen çoklu reçine püskürtme metodu kullanılmıştır.

Foto polimer reçine malzemesi ile eklemeli imalat ile üretimde kullanılan bir diğer ileri eklemeli imalat teknolojisi, çoklu püskürtme yöntemidir. Bu teknoloji, inkjet teknolojisi prensiplerine dayanmaktadır ve doğrudan püskürtme mantığıyla çalışır. Çoklu püskürtme teknolojisi, sadece renkli parçalar üretmekle kalmaz, aynı zamanda aynı anda birden fazla malzeme basabilme kabiliyetine sahip olan üstün ve hızlı bir baskı yöntemidir. Bu özellik, basılan nesnenin belirli kısımlarının sert veya yumuşak olarak ayarlanabilmesini sağlar, böylece tek bir parça üzerinde farklı mekanik özelliklere sahip bölgeler elde edilebilir. Bu, özellikle karmaşık yapı ve çok işlevli parçaların üretiminde büyük bir avantaj sunar (Wong, 2012). Pürüzsüz yüzeyli ve detaylı geometrilere sahip parçaların üretiminde ideal olan bu teknoloji, mürekkep püskürtmeli iki boyutlu yazıcıların baskı sistemi ile SLA (Stereolithography) baskı teknolojisinin birleşimi olarak düşünülebilir. Foto polimer reçine, basım tablasına püskürtülürken UV ışını kullanılarak kütleme işlemi gerçekleştirilir. Kütleme işlemi, reçinenin anında sertleşmesini sağlar ve bu sayede katman ilerleyerek nihai parçanın oluşumu sağlanır. Her yeni katman, önceki katmanın üzerine eklenir, böylece ürün adım adım inşa edilir.

Polijet teknolojisi olarak da bilinen bu yöntem, aynı anda farklı malzemelerin kullanımına olanak tanır. Bu, sadece parçaların çeşitli renklerde üretilmesini değil, aynı zamanda farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin tek bir baskıda birleştirilmesini mümkün kılar. Örneğin, bir nesnenin bir kısmı sert ve dayanıklı bir malzemedir, diğer kısmı ise esnek ve yumuşak bir malzemedir yapılabılır. Bu çok malzemeli üretim kabiliyeti, ürün tasarımında ve fonksiyonelliğinde büyük esneklik sağlar (Adamidis, 2018). Polijet teknolojisinin sunduğu bir diğer önemli avantaj, destek yapılarını kolayca temizlenebilir, hatta su ile çözülebilen formda hazırlayabilmesidir. Destek yapılar, karmaşık geometrilere sahip parçaların baskısı sırasında gerekli olan geçici yapılar olup, parçanın tamamlanmasının

ardından temizlenmeleri gerekmektedir. Bu teknolojide, destek kısımlarının temizlenmesi zahmetsizdir ve temizleme işlemi sonunda yüzeylerde iz oluşmaz. Bu durum hem zaman tasarrufu sağlar hem de nihai ürünün kalitesini artırır.



Resim 3.7. Polijet metodu (Udroiu ve Braga, 2017)

Bu yöntem sayesinde modelden ayrı destek malzemesi kullanılmıştır. Bu durum destek malzemesinin alınması noktasında çok önemlidir. Zira küçük ipliklerin arasında bulunan boşluklar da küçüktür. Küçük boşluklar arasından destek malzemesinin alınması için bu destek malzemesinin çözünebilir bir malzeme olması ürünün ortaya çıkmasında hayati öneme sahiptir. Ayrıca polijet metodu oldukça hızlı baskı yaparak kaliteli ürünü çabuk bir şekilde üretmektedir.

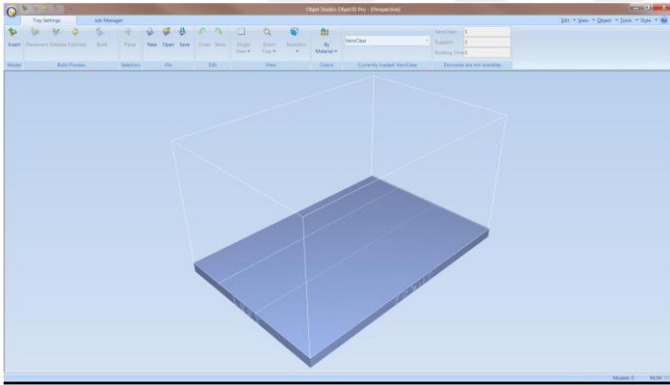
### 3.3. Tasarımın Eklemeli İmalat ile Üretilmesi

#### 3.3.1. Tasarımın eklemeli imalata hazırlanması

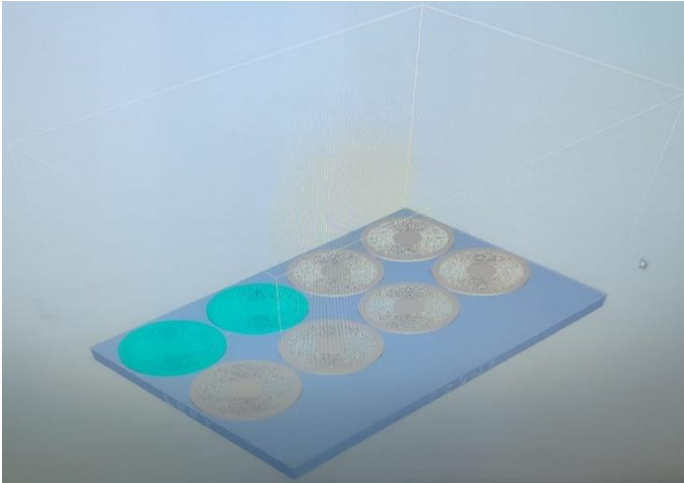
Tasarım öncelikle biyomimetik metodolojisi ile düşünülerek fikren ortaya çıkartıldıktan sonraki süreçte üç boyutlu tasarım programı INVENTOR® ile modellenmiştir. Toplamda üç farklı model halinde gerçekleştirilen tasarım STL formatında kaydedilerek dilimleyici programda hazırlanmak üzere farklı kaydedilmiştir. USB bellek ile yazıcı ile birlikte çalışan bilgisayara transfer edilmiştir. Dilimleyici olarak kullanılacak olan makinenin arayüzü ile çalışabilen üretici firmaya ait ObjetStudio® isimli bir arayüz kullanılmıştır. Bu arayüz üzerinden öncelikle destek yerleşimi ve dilimleme operasyonu yapılmıştır. Tabla üzerindeki yerleşim belirlenmiş ve daha sonra doğrulama ve değerlendirme işlemi yapılmıştır. Değerlendirme sırasında belirli bir ağ yapısı üzerinden baskı noktasında sorun yaşanabilecek

noktalar arayüz tarafından belirtmiştir. Değerlendirme sonucuna göre sorunlu olduğu öğrenilen noktalar MaterialiseMagics® yazılımında incelenerek düzeltilmiş ve tekrar arayüze gönderilmiştir. Yazıcının baskı kalitesi ayarlanmıştır.

Kalite, üründe oldukça ince kısımlar olduğu için yüksek seçilmiştir. Ayrıca katman kalınlığı da bu kalite seçiminde otomatik olarak seçilmektedir. Kalite düştükçe katman kalınlığı artmaktadır. Daha sonra modeller için model malzemesi ve destek malzemesi belirtilmiş, tabla sıcaklığı ve nozul sıcaklıkları ayarlanmıştır. Doğrulama ve değerlendirme işleminden hemen sonra ürünün yüzey kalitesinin parlak ya da mat olması özellikleri burada ayarlanmıştır. Daha sonra arayüze hesaplama yaptırılmıştır. Hesaplama sırasında ne kadar malzeme kullanılacağı, baskının ne kadar sürede tamamlanacağı gibi bilgileri belirtilmektedir. Sorunsuz olduğu onaylanan ve hesapları arayüzde tamamlanan modeller bu şekilde baskıya hazır hale gelmiştir.



Resim 3.8. ObjetStudio arayüz görüntüsü



Resim 3.9. Modellerin arayüzdeki baskı ön izlemesi

### 3.3.2. Eklemeli imalatta kullanılan cihaz

Eklemeli imalat sürecinde polijet eklemeli imalat operasyonunun gerçekleştirecek olan yazıcı cihaz Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Bölümü, Tersine Mühendislik ve Hızlı Prototipleme Laboratuvarı'nda bulunan STRASYS marka OBJET30 Prime cihazıdır. Bu cihaz katman kalınlığını 16 µm ye kadar inceltebilmektedir. Bu durumda üretilmek istenen modelin kaliteli şekilde elde edilmesine imkân vermektedir. Oldukça hassas bir cihaz olan OBJET30 bu kadar ince baskı alabilen az sayıdaki cihazdan biridir. Bu sebeple kullanmak için tercih edilmiştir.

Strasys markası tarafından üretilen ve Resim 3.10.'da gösterilen OBJET30 Prime cihazı yine Strasys markasına ait arayüzde modelleri hazır hale getirerek baskı sürecini devam ettirmektedir. Cihaz reçine model ve destek malzemesini 20 adet nozuldan altta bulunan tabla üzerine katmanlı bir şekilde püskürtmektedir. Püskürtülen malzeme üzerine ultraviyole ışık vererek kürlenme işlemi yapmaktadır. Malzemeler yenilenmeden önce bir temizlik işlemi gerektiren yazıcı nozulları ve tablası, üzerine izopropil alkol püskürtülen bir bez ile özenle temizlenmiştir. Model ve destek malzemesi eklenen ve daha sonrasında da temizlenen cihaza kalibrasyon işlemi yaptırılmış ve baskıya hazır hale getirilmiştir. Eklemeli imalatı gerçekleştirecek olan bu cihaz, içerisinde kullanılan malzemelerin oldukça ince basılmasını sağlamaktadır.



Resim 3.10. Stratsys Objet-30 Prime cihazı

### 3.3.3. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler

Eklemeli imalatta model malzemesi olarak aşağıda görüntüde verilen Strasys üretimi RGD-525 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme yüksek sıcaklık dayanımlı ve mukavemeti yüksek bir malzemedir. Üzerinde herhangi bir şekilde destek malzemesi izi barındırmayan ve imalat sonrası işlemlerin de rahatlıkla uygulanabildiği istenen model özelinde hızlı bir şekilde katılaştıran ve belirli bir seviyede destek çözücü olarak kullanılan kostik isimli kimyasal uygulansa bile bozulmayan özel bir malzemedir. Ayrıca Resim 3.11.'de malzeme özellikleri verilmektedir.

	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL
Tensile Strength	D-638-03	MPa	70-80	psi	10,000-11,500
Elongation at Break	D-638-05	%	10-15	%	10-15
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	3200-3500	psi	465,000-510,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	110-130	psi	16,000-19,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	3100-3500	psi	450,000-510,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	63-67	°F	145-163
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	75-80	°F	167-176
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	55-57	°F	131-135
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	14-16	ft lb/inch	0.262-0.300
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.2-1.4	%	1.2-1.4
Tg	DMA, E-	°C	62-65	°F	144-149
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	87-88	Scale D	87-88
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	78-83	Scale M	78-83
Polymerized Density	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1.17-1.18		
Ash Content	USP281	%	0.38-0.42	%	0.38-0.42

©2016 Strasys Ltd. All Rights Reserved.

**stratasys**



Resim 3.11. Strasys RGD-525 model malzemesi özellikleri ve görseli (Strasys RGD-525 MSDS, 2016)

Destek malzemesi olarak ise yine Strasys markasına ait SupportSUP705 kodlu destek malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme su ile seyreltilmiş kostik kimyasalı ile yaklaşık 40°C sıcaklıkta temas ettiğinde yaklaşık 1 saat içerisinde çözünerek model üzerinden alınabilmektedir. Malzemelerin her ikisi de Strasys makine arayüzünde değişim için özel prosedürler ile değiştirilmiş ve baskıya hazır hale getirilmiştir. Belirtilen kurallara uyularak işlemler gerçekleştirilmiştir.

### 3.3.4. Eklemeli imalatla modelin üretilmesi

Hazırlıkları tamamlanan cihaz ve model imalata hazır hale gelmiştir. Numunelerin üretimi ile ilgili bilgiler Çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Baskı sırasında çarpılma, bozulma ya da erime gibi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Destek malzemelerinin tam istendiği gibi olduğundan emin olunmuştur.

Çizelge 3.3. Model numunelerine ait üretim bilgileri

Model adı	Kullanılan model malzemesi (gr.)	Kullanılan destek malzemesi (gr.)	Üretim süresi (dk)	Üretim adeti
Radyus	60	30	40	6
Spiral	51	30	38	6
Radyus-Spiral	42	30	43	6

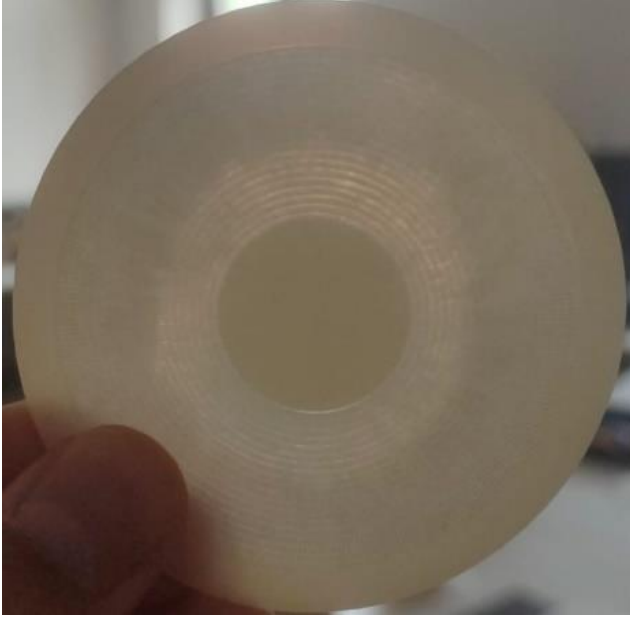
Ürünler cihazdan özel bir spatül yardımı ile kaldırılmış özenle imalat sonrası işleme alınmaya hazırlanmıştır. Her baskı sonrasında izopropil alkol ile tabla ve nozullar temizlenmiştir. Baskı sırasında cihazda beyaz UV ışın kullanılmıştır. Baskıdan hemen sonra yumuşak olan malzemeler 4 saat içerisinde oldukça sert bir hale gelmiştir. Baskıdan çıkan tüm ürünlere imalat sonrası işlemler uygulanmış ve bu şekilde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Baskıdan ilk çıkan ürünler Resim 3.12. de gösterilmiştir.



Resim 3.12. Alınan ilk model çıktıları

### 3.3.5. İmalat sonrası işlemler

Modeller üretildikten sonra üstlerinde ve içlerinde oldukça çok miktarda destek malzemesi görülmüştür. Destek malzemesinin model üzerinden alınması oldukça önemlidir. Zira model ince boşluklara ve ince ipliklere sahip olduğu için oldukça hassas davranılması gerekmektedir. Ayrıca ince ipliklerin alttan desteklenmesi gerekliliği küçük boşlukların tamamen destek malzemesi ile doldurulmasına neden olmuştur. Destek malzemesinin sökülmesi işlemi oldukça zahmetli bir işlemdir. Olabildiğince yavaş ve malzeme özelliklerine uyulacak şekilde destek malzemesinin alınması sağlanmıştır.



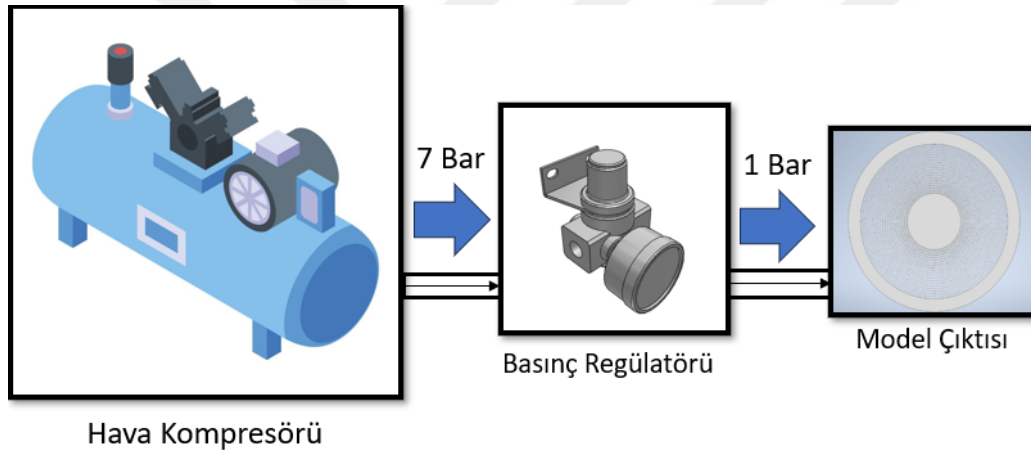
Resim 3.13. Model çıktısının temizlenmemiş ilk hali

Öncelikle modellerin alt ve üstünde kaba destek katmanı spatula ve el yardımı ile alınmıştır. Bu kaba destek tabla ile model arasındaki platformu oluşturmaktadır. Aynı zamanda desteğin tam olarak modeli sarmasını kolaylaştırmaktadır. Desteğin kaba kısmı alındıktan sonra ilk görülen destek dolgular içerisinde bulunan en üst katman olmuştur. Bu katmanda iplikler net bir şekilde görülse de iç kısmı destek nedeniyle kapalı görünmektedir.

İlk denemede iç kısmın temizliğinde öncelikle kimyasal karıştırılmayan ılık su denenmiştir. Destekte yumuşama izlenmiş ancak destekler temizlenememiştir. Hatta daha da kötü sonuç vermiş ve iç kısımdaki model yayılarak boşlukların tamamen dolmasına neden olmuştur. İkinci denemede yumuşayan kısımlar iğne gibi ince uçlu cisimlerle dışarı çıkartılmaya

çalışılmış ancak boşlukların oldukça dar olması bu yöntemin de işe yaramamasına neden olmuştur.

Üçüncü denemede malzemenin üreticisinin de önerdiği şekilde kostik kimyasalının yaklaşık 40°C sıcak suya ilave edilmesiyle oluşturulan karışım içerisine atılan modeller, 1 saat sonrasında dışarı alındığında destek malzemesinde gözle görünür şekilde erime izlenmiştir. Ancak buna rağmen boşluklar dar olduğu ve yüzeyden tahliye edilemediği için bir miktar destek malzemesinin yine model içinde kaldığı görülmüştür. Son olarak kostikte bekletilen modele basınçlı hava tutularak destek malzemesi alınması fikri üzerine yoğunlaşmıştır. Basınçlı hava ile temizleme metodu kullanılan ekipman ve malzemelerle birlikte bu kısımda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 3.2. Basınçlı hava düzeneği şeması

### Hava kompresörü

Havayı sıkıştırarak 7 bar basınçlı hava üreten hava kompresörüdür.



Resim 3.14. Hava kompresörü

### Basınç regülatörü

Kompresörden gelen basınçlı havanın basıncının azaltılmasını sağlayan, üzerine manometre bulunduran basınç düzenleyicisidir.



Resim 3.15. Basınç regülatörü

### Teflon Hortum

Havayı taşıyan, sıcaklık ve basınç dayanımlı 6mm iç çap ölçüsünde hortumdur.



Resim 3.16. Teflon Hortum

### Destek temizleme istasyonu (sıvı ısıtıcı)

Kostik-su karışımının 40 derece sıcaklıkta sabit tutularak bekletildiği ünedir.



Resim 3.17. Destek çözdürücü

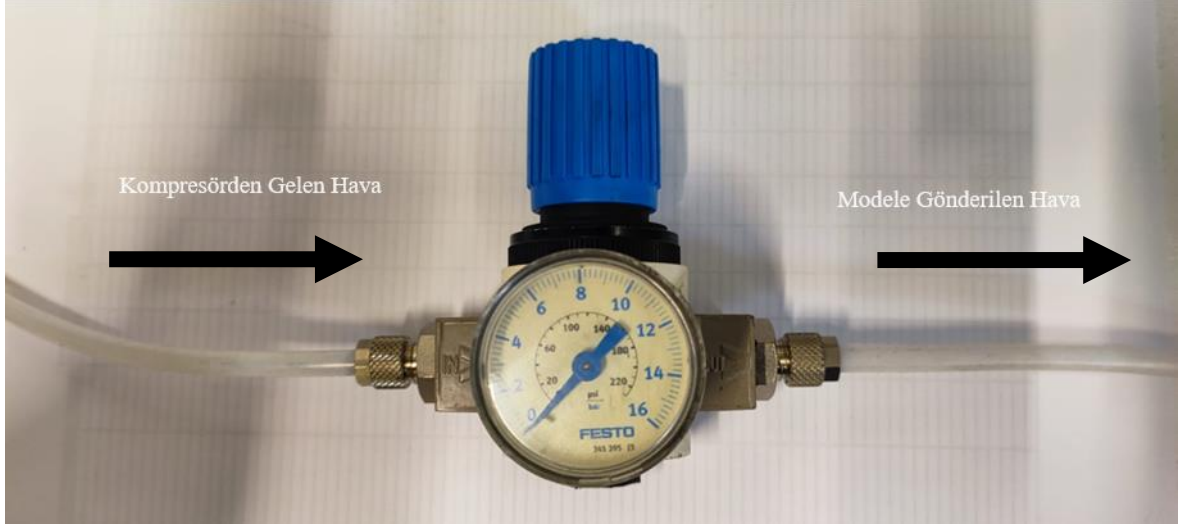
### Kostik kimyasalı

Destek malzemesinin çözünmesini sağlayan sodyum hidroksit içerikli kimyasal malzemedir.



Resim 3.18. Kostik kimyasalı

7 bar basınçlı hava üreten bir kompresörün hava hattından alınan ve bir manometreli basınç regülatörü ile 1 bar seviyesine ölçülerek indirilen hava, kostik-su karışımında bekletilen modellerin üzerine dikkatli bir şekilde tutulduğunda iç ve dış kısımlarındaki destek malzemesini modelden kolaylıkla çıkartabildiği görülmüştür. 1 bar basınca ayarlanan basınçlı hava model üzerine tutularak destek malzemesinin büyük bir bölümü çıkartılmıştır. Hava 6 mm iç çapa sahip hortum ile Resim 3.19. da görüldüğü gibi model üzerine gönderilmiştir. Destek malzemesinin üst üste bindiği ya da karmaşık bir yapıda bulunduğu kısımlarda 1 bar hava desteğin çıkartılması için yeterli olmamıştır. Bu kısımlar için hava, regülatör vasıtasıyla 2 bar seviyesine getirilerek model üzerine gönderilmiştir. 2 bar seviyesinde hava ile temas eden model üzerinde bulunan destek malzemesi modelden ayıklanarak model temiz bir hale getirilmiştir. Üzerine hava gönderilen modellerdeki hava akışında herhangi bir sorun olmaması modellerin temizlendiğini göstermiştir.



Resim 3.19. Kullanılan destek temizleme düzeneği

2 bar üzeri basınçlarda malzemede deformasyon gözlemlenmiştir. Doğrudan 2 bar basınç gönderilen modellerde az da olsa deformasyon gözlemlenirken 1 bar seviyesinde hava sonrasında 2 bar basınçlı hava gönderilen modellerde herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiş ve model tamamen temizlenmiştir.

Ayrıca temizleme işlemleri sırasında  $40^{\circ}$  C üzerindeki sıcaklıklarda malzeme üzerinde çarpılma ve modelde sıcaklığa bağlı eğilme gözlemlenmiştir. Eğilen modeller destek temizleme işleminden sonra  $60^{\circ}$  C sıcaklığa sahip bir yüzey ile temas ettirilerek ve üzerlerine sıcak haldeyken ağırlık konularak düz bir hale getirilebilmektedir. Yapılan bu işlem sırasında modelde herhangi bir deformasyon izlenmemiştir. Modellerin düz bir şekilde kalması filtre yuvasına yerleştirilme açısından oldukça önemlidir ve dikkat edilmesi gereken bir husustur.

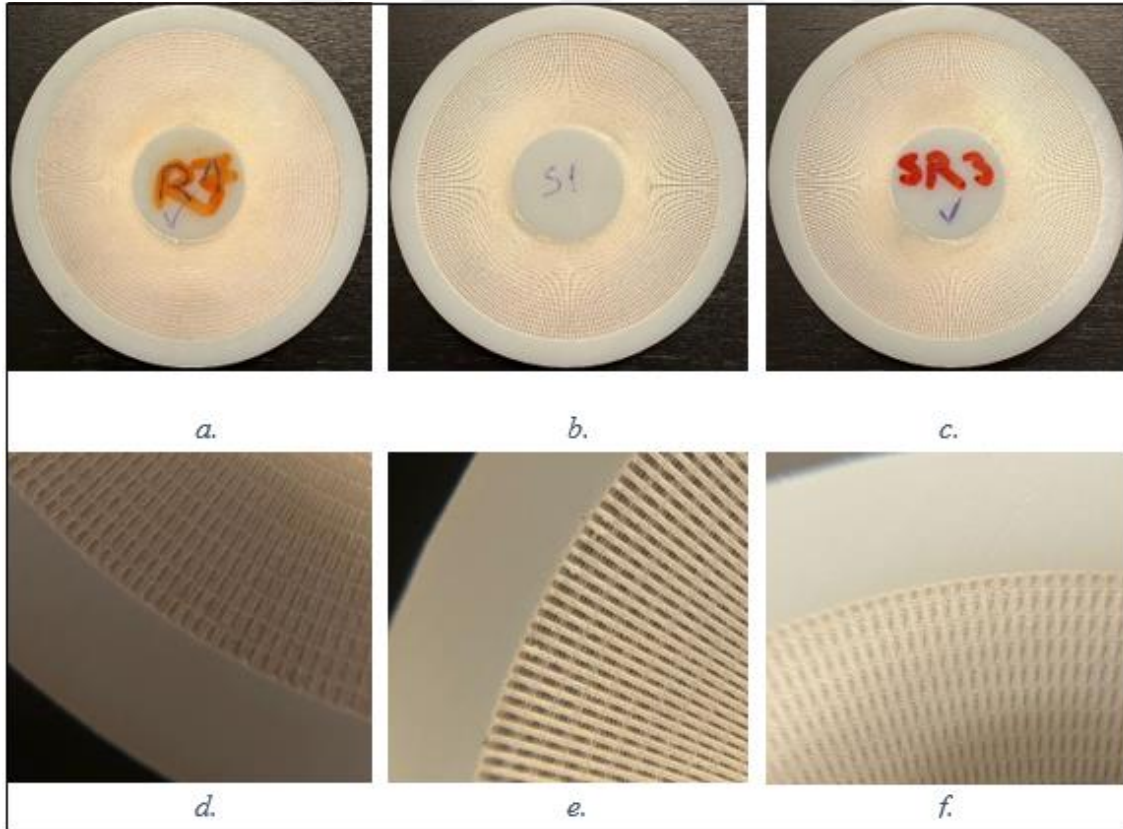
### 3.4. Üretilen Tasarım Modelinin İrdelenmesi

#### 3.4.1. Üretilen ürünün özellikleri ve sınırları

Üretimi ve imalat sonrası işlemleri tamamlanarak kullanıma hazır hale getirilen modeller işlemler sonrası kurutularak partikül ile temasa hazır hale getirildikten sonra ortaya çıkan ürünler deformasyon ve destek durumları yönünden kontrol edilmiştir. Ürünlerin deformasyona uğramadan ve içerisinde destek malzeme kalmadan temizlenebildiği görülmüştür. Ayrıca üzerine hava gönderilen ürünlerde hava geçirgenliği açısından bir sorun yaşanmamıştır. Üretimi yapılan modeller daha sonra test edilmek üzere bir bez içerisine

alınarak hava geçirmeyen bir kutu içerisinde muhafaza edilmiştir. Ortaya çıkan ürünün boşluk genişlikleri maksimum 120  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu da 120  $\mu\text{m}$  üzerinde partikül boyutuna sahip olan toz parçacıklarının filtre üzerinde kalması ya da filtreden geçememesi anlamına gelmektedir. Ürün kapasite ve verim değerleri deneysel çalışmalarla test edilmiştir.

Üretilen ürün toplamda 1,65 mm kalınlığı ile oldukça kırılgan bir yapıdadır. Dayanımları oldukça düşük olan modeller kuvvet uygulandığı durumda kolaylıkla kırılabilir. Sıcaklık dayanımları da oldukça düşük olan ürünlerin kimyasal dayanımları diğer iki ölçüte göre bir nebze daha iyi durumdadır. İmalat ve imalat sonrası işlemler neticesinde numunelerin Resim 3.20’de görüldüğü gibi tasarıma ve teknik resimlere oldukça yakın bir şekilde üretildiği görülmüştür. Filtreler içine yerleşecekleri yuvaya kolaylıkla takılıp çıkarılabilmektedir. Numunelere ait sem görüntüleri de alınmıştır. Bir sonraki bölümde SEM görüntülerine ait detaylar paylaşılmıştır.



Resim 3.20. Model ürün çıktıları a) radyus model ürününün çıktısı, b) spiral model ürününün çıktısı, c) radyus-spiral model ürününün çıktısı, d) radyus yakın çekim, e) spiral yakın çekim, f) radyus-spiral yakın çekim

### 3.4.2. Üretilen ürünün görüntülenmesi

Tasarlanan ve üretimi tamamlanan model kontrol işlemlerinden sonra SEM mikroskopunda görüntülenerek incelenmiştir. Görüntüleme Resim 3.21.'de gösterilen ZEISS firması tarafından üretilen EVO MA10 modeli SEM mikroskopu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroskop plastik içerikli bir ürün olsa da model ürün çıktısını görüntüleme yeteneğine sahiptir. Gönderilen ışın çeşidi diğer SEM cihazlarından ayrılmaktadır.

Eski tip cihazlarla karşılaştırıldığında görüntü alırken gönderilen ışının plastiğe göre ayarlanması sayesinde modellerden net görüntüler alınmıştır. Mikroskoptan yüksek hassasiyetli 100 µm, 200 µm ve 1 mm ölçeğinde görüntüler alınmıştır. Görüntülerde tasarım ayrıntıları kolaylıkla seçilmiştir.

Modellerden alınan küçük kesitler altın kaplama metodu kullanılarak kaplanmış ve filtrenin dış kısmına doğru olan bölümden görüntü alınmak suretiyle inceleme gerçekleştirilmiştir. Kaplamanın amacı SEM mikroskopunun çalışma şekline kaynaklanmaktadır. Numune üzerine gönderilen ışının geri dönmesi sonucu görüntü alan mikroskopun ışınının geri gelebilmesi için metal bir yüzeye çarpıp geri gelmesi gerekmektedir. Bu nedenle numuneler kaplanarak görüntülere ulaşılmıştır. 3 farklı modelden kesilerek alınan numune parçalarına ait görüntüler aşağıdaki gibidir.



Resim 3.21. ZIESS EVO MA10 SEM mikroskopu

### Radyus model SEM görüntüsü

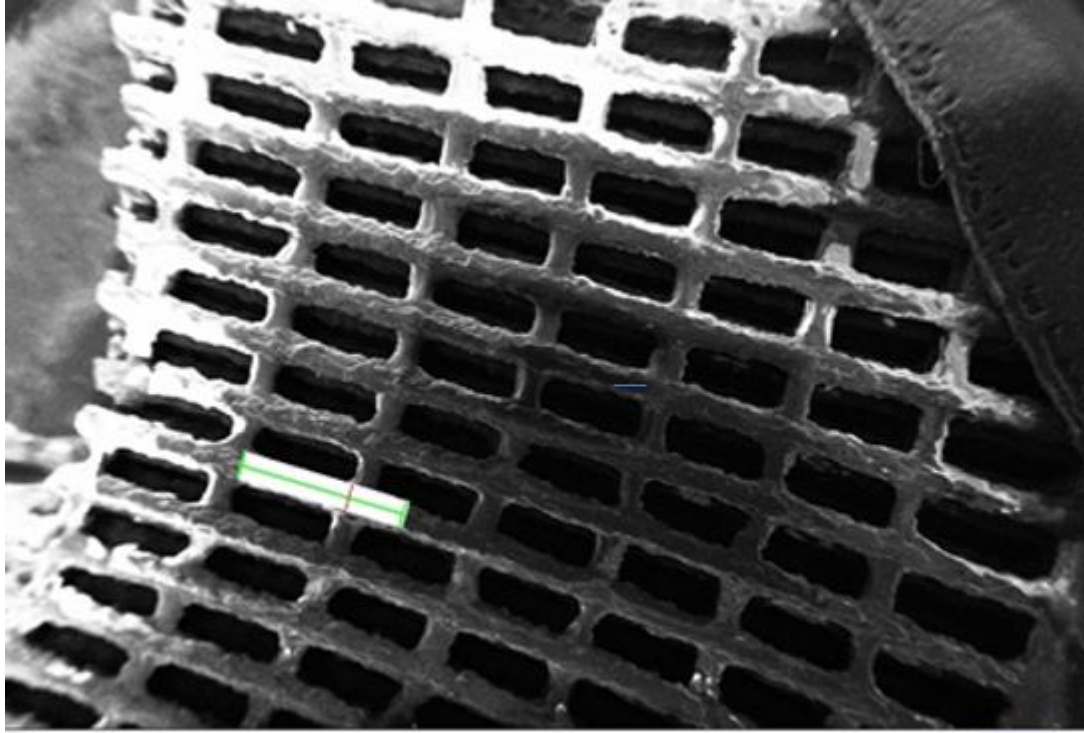
Radyus model ürünün Resim 3.22. üzerinde gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde çok net bir üst katman ve onun altında aynı tasarım görselindeki gibi alt katmanlar ortaya çıkmaktadır. En üst katmanın alt tabakasında açısız olarak merkez sabit tutularak üst katmana göre hareket ettirilmiş olduğu görülmektedir. Spiral iplikler arasında ölçülen boyutların dairenin en dış kısmında 700 µm boyutunda olması ve radyal iplikler arasında alınan ölçümlere göre boşluk aralıklarının dairenin en dış kısmında 160 µm olması en dış katmanda havanın geçişini kolaylaştırmak ve partikül tutulumunu artırmak adına istenen bir durumdur. Filtreleme radyus ipliklerde gerçekleşecektir.

### Spiral model SEM görüntüsü

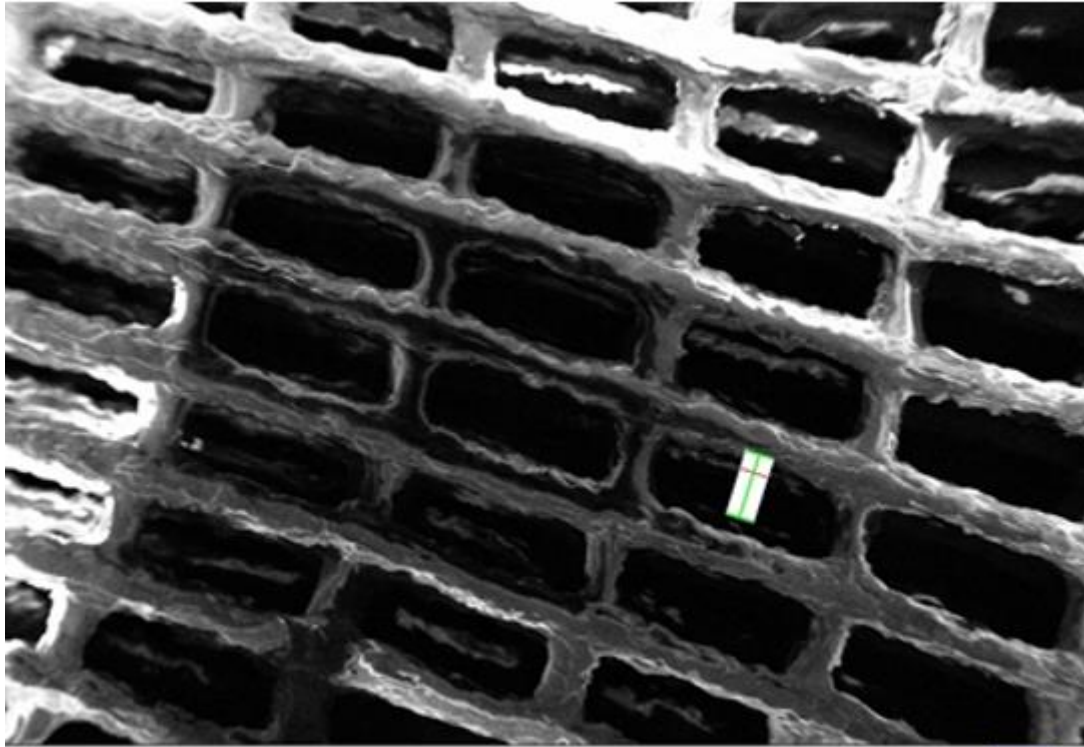
Spiral model ürünün Resim 3.23'te SEM görüntüleri incelendiğinde üst katmanın yanında alt katmanlar da model tipine uygun olarak görüntülenmiştir. En üst katmanındaki spiral iplikler alt tabakalara doğru paralel olarak yer değiştirmektedir. Spiraller arasında ölçülen boyutların dairenin en dış kısmında 160 µm olması en dış katmanda hava geçirgenliği ve partikül tutulumu adına istenen bir durumdur. Yüzey özellikleri ve yapı örümcek ağının özelliklerini göstermektedir. Filtreleme spiral ipliklerde gerçekleşecektir.

### Radyus-spiral model SEM görüntüsü

Radyus-spiral modelinin Resim 3.24'te SEM görüntüleri incelendiğinde, üst katmanın yanı sıra alt katmanların da model tipine uygun olarak belirgin şekilde görüldüğü tespit edilmiştir. Görüntülerde, tam olarak net olmamakla birlikte, radyus tip ipliklerin spiral iplikler arasında yer aldığı gözlemlenmiştir. Üst katmandaki paralel spiral ipliklerin alt tabakalara doğru paralel bir yer değişimi gösterdiği anlaşılmıştır. Ölçülen iplik aralık boyutlarının filtre dairesinin en dış kısmında hem radyal iplikler arasında hem de spiral iplikler arasında 160 µm olduğu görülmüştür. Bu durum, dairenin en dış kısmında hava geçirgenliği ve partikül tutulumu için istenen bir yapısal özellik olarak değerlendirilmiştir. Filtreleme işleminin paralel iplikler ve radyus iplikler aracılığıyla gerçekleşeceği tespit edilmiştir.



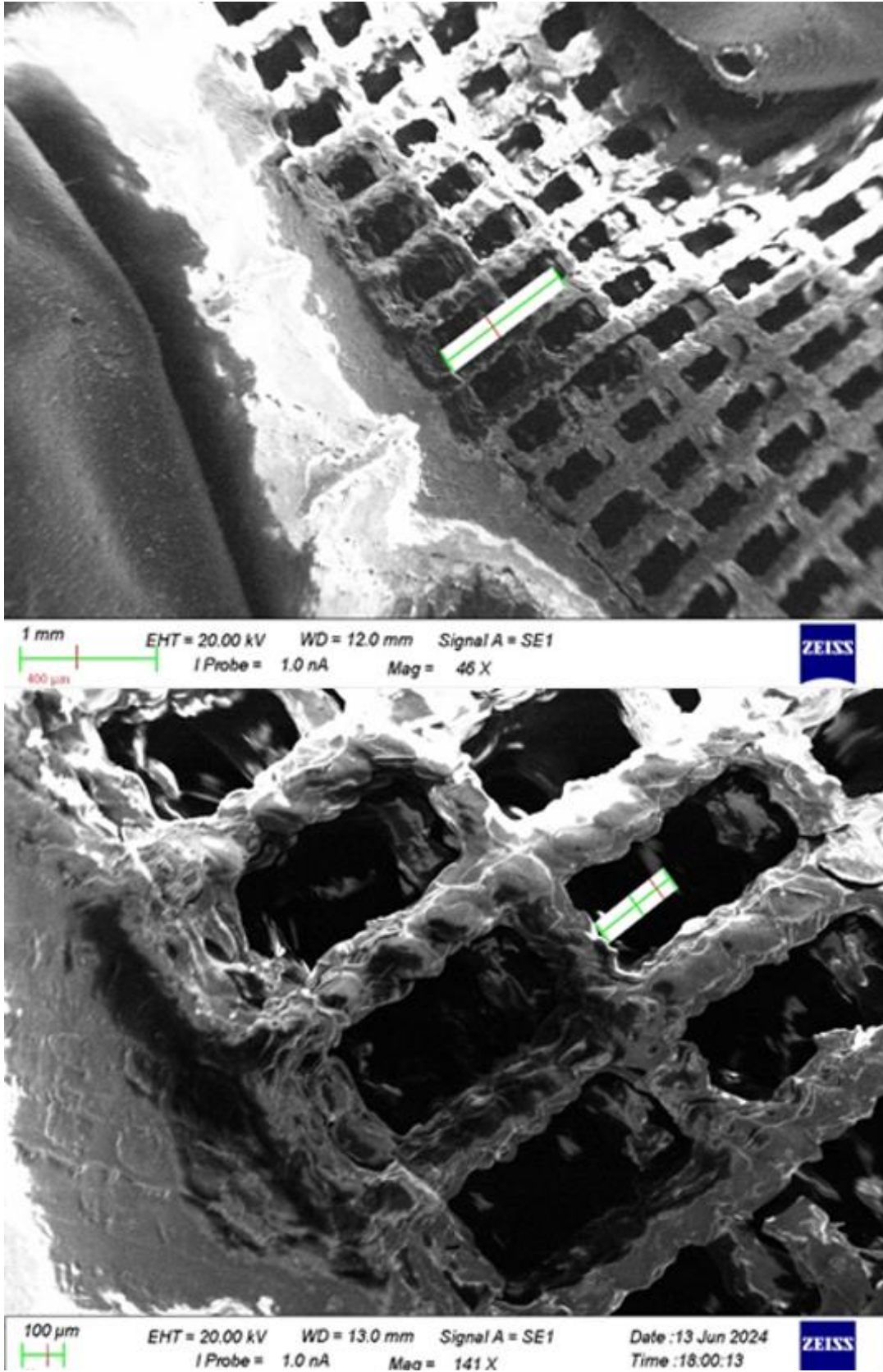
1 mm EHT = 20.00 kV WD = 12.0 mm Signal A = SE1  
700  $\mu$ m I Probe = 1.0 nA Mag = 46 X



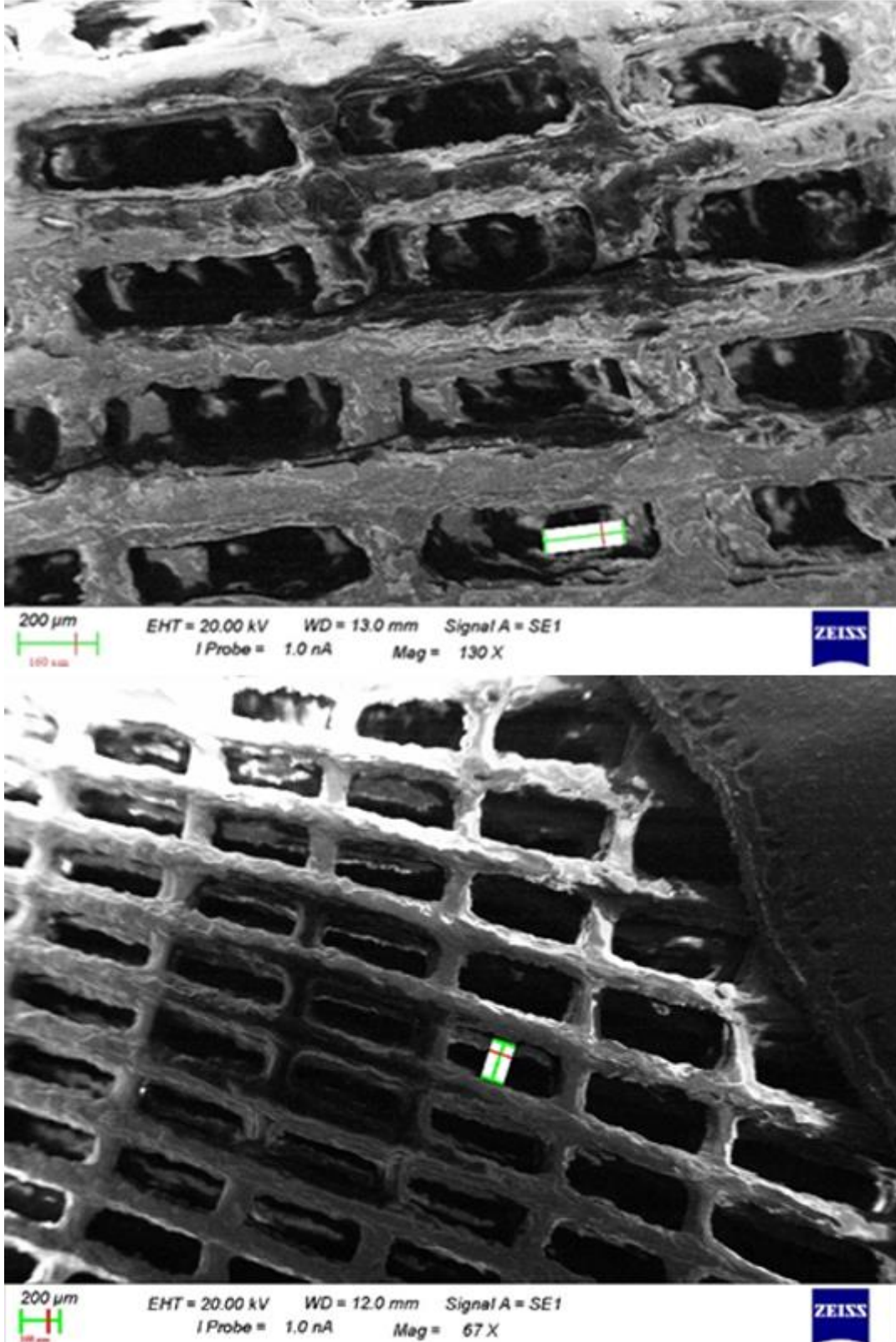
200  $\mu$ m EHT = 20.00 kV WD = 12.0 mm Signal A = SE1  
160  $\mu$ m I Probe = 1.0 nA Mag = 89 X



Resim 3.22. 1 mm ve 200  $\mu$ m ölçekli radyus model SEM görüntüsü



Resim 3.23. 1 mm ve 100 µm ölçekli spiral model SEM görüntüsü



Resim 3.24. 200 µm ölçekli radyus-spiral model SEM görüntüsü

Yukarıdaki resimlere ait boyutların bulunduğu tablo Çizelge 3.4.'te verilmiştir. Görüntülerin neden alındığına dair açıklama ise tablodan hemen sonra anlatılmıştır.

Çizelge 3.4. SEM mikroskobu ile dairenin en dışında ölçülen boşluk mesafeleri

Model	Radyuslar arası mesafe ( $\mu\text{m}$ )	Spiraller arası mesafe ( $\mu\text{m}$ )
Radyus	160	700
Spiral	400	160
Radyus-spiral	160	160

Çizelge 3.4, daire şeklinde olan katmanlı filtrenin en dış kısmındaki boşlukların arasındaki mesafeye ait SEM mikroskobunda ölçülen boşluk mesafelerini belirtmektedir. Tablodaki boyutlar, görüntüler üzerinde cihaz tarafından otomatik olarak verilen referans ölçüleri bire bir ölçekte oranlanarak belirlenmiştir. Bu durum görseller üzerinde de görülebilmektedir. Görüntülerde ölçülen boşluk mesafeleri, yani radyus ya da spiral iplikler arasındaki mesafeler,  $160 \mu\text{m}$  boyutundan büyük olan partikülleri tutmak için  $160 \mu\text{m}$  mesafesinden daha az olmamalıdır. Radyus ya da spiral iplikler arasındaki boşluklardan herhangi biri bu değeri karşılayabiliyorsa, üretilen filtre tüm boşluklarda bu ve daha büyük boyuttaki partikülleri de tutabilir anlamına gelmektedir.

Hava geçirgenliği noktasında bir sınırlandırma bulunmamakla beraber daire merkezi çevresinde bulunan çok dar noktalarındaki boşluklarda hava geçirgenliğinin de iyi olmayacağı düşünülmektedir. Bu noktada iddia edilen ve bu iddiaya göre ulaşılmak istenen bir boşluk ölçüsü bulunmamaktadır. Boşlukların mesafeleri, en az tutulmak istenen partikül miktarı kadar olması gerektiği için  $160 \mu\text{m}$  olarak seçilmiş ve tasarımın çıktısında boyutsal olarak görülmek istendiği için SEM mikroskobu ile incelenmiştir. Mikroskop üzerinde gerçekleştirilen incelemenin sebebi hem bu durumun hem de eklemeli imalat ile üretim sürecinde kullanılan destek malzemelerinin tasarım üzerinden tam olarak alınıp alınmadığının kontrolünü yapmaktır. Tasarıma ait doğrulama çalışmaları deneysel çalışmalar neticesinde gerçekleştirilmiştir.

Görüntülerin özellikle en dış katmandan alınması filtre üzerindeki en büyük boşluk mesafelerinin en dış kısımda olmasından dolayıdır. Daire merkezinin dar boşluk mesafelerinden daire dışındaki geniş boşluk mesafelerine doğru gidildiğinde boşluk mesafelerinin büyümesi, örümcek ağı formlu tasarım sebebiyle ortaya çıkmıştır. Daire merkezi çevresinde bu kadar büyük boşluklar bulunmamaktadır.

Tasarımı ve üretimi yapılan ve daha sonra da kontrol edilip durumu görüntülerle kaydedilen model tasarımları için doğrulama çalışmaları kapsamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Deney Standartları

İçten yanmalı motorlar ve kompresörler için giriş havası temizleme ekipmanı standardı ISO 5001-2020 kodu ile tanımlanmıştır. Bu standart sayesinde filtreler test edilir ve makinelerde kullanıma uygunlukları kontrol edilir. Bu standart genellikle otomotiv ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan içten yanmalı motorlar ve kompresörlerde kullanılan endüstriyel makinelerin hava filtreleri için geçerlidir. Standartta uyum sağlanması için gereken filtre materyali, test standartları, test ekipmanları, uygun tolerans aralıkları, yapılması gereken ölçümlere ait tüm tanımlamalar, şartlar ve test prosedürü aşağıda verilmiştir.

#### 4.1.1. Tanımlamalar

Tanımlamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır:

- Statik basınç ölçümü, gözlemlenen hava akış hızında bir kanaldaki basınç kanalı duvarında açılan bir deliğe veya deliklere bir manometre bağlanarak ölçülür.
- Hava filtresi ya da hava temizleyici, motorun içine çekilirken emme havasında asılı kalan parçacıkları temizleyen cihazdır.
- Filtre elementi, filtre malzemesi ve taşıma çerçevesinden oluşan hava filtresinin değiştirilebilir parçasıdır.
- İkincil element, belirli türde birincil element arızası ya da tamir durumunda motora toza karşı koruma sağlamak amacıyla ana elemanın aşağı akışına takılan hava temizleme elemanıdır.
- Test edilen birim, ya tek bir hava temizleme elemanı ya da komple bir hava temizleme tertibatıdır.
- Tek kademeli hava temizleyici ayrı bir ön temizleyici içermeyen hava temizleyicidir.
- Çok kademeli hava temizleyici, iki veya daha fazla aşamadan oluşan hava filtresidir. İlk eleman genellikle bir ön temizleyicidir. Ön temizleyici ardından bir ya da daha fazla filtre elemanı gelmektedir.
- Ön temizleyici, filtre elementine ulaşmadan önce test tozunun bir kısmını çıkarmak için genellikle atalet veya merkezkaç araçları kullanan cihazdır.

- Test hava akışı, birim zamanda hava filtresi çıkışından çekilen hava miktarının ölçüsüdür.
- Not: Akış hızı standart koşullara göre düzeltilmiş dakika başına metreküp cinsinden ifade edilir. (m<sup>3</sup>/dk.)
- Anma hava akışı, kullanıcı veya üretici tarafından belirlenen akış hızıdır. Test hava akışı olarak kullanılabilen akıştır.
- Temizlenmiş hava akışı, bir ön temizleyiciden toplanan tozu uzaklaştırmak için kullanılan hava miktarının ölçüsüdür.

#### 4.1.2. Kısıtlamalar

Kısıtlamalar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.:

- Statik basınç, test edilen ünitenin hemen aşağısında ölçülen basınçtır.
- Diferansiyel basınç, test edilen ünitenin hemen yukarı ve aşağısından ölçülen statik basınç farkıdır.
- Basınç kaybı, basınç düşümü ya da fark basınç, gözlemlenen hava akış hızında bir hava temizleyicinin neden olduğu enerji kaybının ölçüsüdür.
- Mutlak filtre, test edilen filtre ünitesini geçen kirleticilerin tutulduğu filtredir.
- Verim, hava filtresinin kirletici madde kütlesini belirten test koşulları altında kirletici giderme yeteneğidir.
- Test sonuç durumu, gerçekleşen testin sonuç koşulunu ihtiva etmektedir.
- Tanımlamalar yanında ölçüm doğruluğunun nasıl olması gerektiği anlatılmaktadır. Bu açıklamalar bir testin terminal sonucunu belirlenmiş ve mutabakata varılmış sonuçlarıdır. Diferansiyel basınç buna örnektir. Testin doğruluğunun kabul edilmesi için belirtilen akışın sabit olması ve %2 tolerans aralığını geçmemesi gerekmektedir. Genellikle diferansiyel basıncın 10 kPa'ya kadar olan basınç okumaları için 25 Pa dahilinde, daha yüksek basınçlar için %1 tolerans aralığında olması beklenmektedir. Ortam sıcaklığının gerçek değerinin 0,5°C toleransında olması, ortam basıncının %2 toleransında olması ve relatif nemin de %2 toleransında olması gerekmektedir. Ayrıca kütle ölçümlerinin 0.1 gr. dahilinde ölçülmesi gerekmektedir.
- Test malzemeleri ve test koşulları aşağıdaki gibi düzenlenmelidir.
- Test tozu, kaba olarak ISO 12103-1, A4 toz standardına uygun olarak kullanılmalıdır. Kullanılan toz ISO 12103 standart kataloğunda bulunmalıdır. Test tozu topaklanmaya

karşın mutlaka test öncesinde karıştırılmalıdır. Filtre materyali standartlarına göre kaba yani 80 µm ve daha üstü parçacıkları tutabilmelidir. Deney düzeneği dik konumlandırılmalıdır. Deneyde akış aşağıdan yukarıya doğru olmalıdır. Akış aşağıdan yukarıya olmalıdır. Akış hızı 0,8 m/s geçmemelidir.

- Mutlak filtre ortamı verimliliğinin doğrulanması için iki mutlak filtre art arda konularak bir filtrenin verimlilik testi yapılır. Filtre verimliliği testi kütle ölçümleri ile sonuç vermektedir.

Aşağıdaki denklem, filtre verimliliğini ihtiva eden matematiksel ifadedir.

$$E_a = \left[ \frac{\Delta m_A}{\Delta m_A + \Delta m_B} \right] * 100$$

- $E_a$ , verim değerini ihtiva etmektedir.
- $\Delta m_A$ , akış üstü filtre ağırlığı toplamını,
- $\Delta m_B$  akış altı filtre ağırlığı toplamını ifade etmektedir.
- Mutlak filtre verimliliği, kendisine sunulan kirletici madde için minimum %99 olmalıdır.
- Deney ölçümleri tolerans değeri dahilinde olan hassas tartıda yapılmalıdır.
- Testlerde hava akışı sınırlama ya da fark basınç testi, verimlilik testi ve kapasite testi olmak üzere, ölçümü yapılan 3 farklı test bulunmaktadır.
- Test düzeneğine hava 1 bar gönderilmelidir. Toz besleyici enjektörle toz beslemesi yapılmalı ve bu değer 1 bar üstünde olmalıdır. Test için toz besleyiciye önceden tartılmış miktarda test tozu konulmalıdır. Toz besleme sistemi ve zamanlayıcı aynı anda başlatılmalıdır. 5 dakika aralıklarla toz beslemesi yapılmalı ve 30 dakika boyunca toz artışı kaydedilmelidir. Toz besleyici ile enjektör arasında toz süspansiyonunu korumaya uygun boyutta bir toz aktarma borusu kullanılmalıdır. Fark basınç ölçümü için hem filtre önüne hem de arkasına manometre konulmalıdır. Tozun besleme kanalında ve odasında birikmesinin önüne geçilmelidir. Toz kaçağı olmaması için tüm kanallara dikkatli bir şekilde sızdırmazlık uygulaması yapılmalıdır. Hava debisinin ölçülebildiği bir sistem kullanılmalıdır. Havanın sisteme gönderilmesi için hava üretici ya da bir üfleç kullanılmalıdır.

### 4.1.3. Gerçekleştirilen testler

Gerçekleştirilen testler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

#### Basınç farkı testi

Bu testin amacı, önceden belirlenmiş koşullar altında hava geçtiğinde teste tabi tutulan ünite boyunca ortaya çıkacak kısıtlama/fark basıncı/basınç kaybını belirlemektir. Hava akışı kısıtlaması veya diferansiyel basınç, temiz bir filtre elemanı veya elemanları ile, nominal hava akışının %50 ila %150'si arasında eşit aralıklı beş hava akışında veya kullanıcı ile imalatçı arasında anlaşmaya varıldığı şekilde ölçülür. Bu test dahilinde ortam sıcaklığının, barometrik basıncın ve ortam relatif neminin ölçülmesi gerekmektedir.

#### Verim testi

Bu testin amacı test edilen birimin tutma yeteneklerini belirlemektir. Bu test sabit veya değişken hava akışıyla ve kaba toz ile gerçekleştirilmelidir. Test sırasında 10 gr. kirletici belirlenen eşit aralıklarla hatta beslenerek kullanılır. Bu kullanım standarda göre uygulanan 3 test tipinden biridir.

Verim testi prosedüründe gerçekleştirilmesi gereken adımlar sırasıyla aşağıdaki gibi olmalıdır:

1.  $1 \text{ gr/m}^3$  hava toz konsantrasyonu arasında olacak şekilde besleme tozu hızı ayarlanmalıdır.
2. Test altındaki ünite standarda göre koşullandırılmalıdır. Boş filtre tartılarak kaydedilmelidir.
3. Test düzeneği test standartlarına göre kurulmalıdır.
4. Sıcaklık, atmosfer basıncı ve relatif nem ölçülüp kaydedilmelidir.
5. Belirtilen test tozu uygun bir test kabında tartılmalıdır. Beslenen tozun tahmini kapasitenin %125 'i kadar olduğundan emin olunmalıdır. Tartım 0,1 gr. hassasiyet ile kaydedilmelidir.
6. Hava akışı başlatılmalıdır. Akış sabitlendikten sonra fark basınç değeri ölçülerek kaydedilmelidir.

7. Toz besleyici toz haznesine yüklenmeli ve besleme hızı hesaplanan konsantrasyona göre ayarlanmalıdır.
8. Belirlenen zaman aralıklarına göre fark basınç ölçümü alınmalıdır.
9. İstenen sonuç koşulu elde edilene kadar teste durmadan devam edilmelidir.
10. Test durdurulmadan hemen önce fark basınç ölçülmelidir.
11. Sıcaklık, barometrik basınç ve relatif nem düzenek durdurulurken de ölçülmelidir.
12. Filtreye temas etmemiş deney düzeneği duvarlarına yapışmış ya da üfleç altında kalmış atıl toz dikkatli bir şekilde alınıp tartılmalıdır.
13. Çıkışta biriken ve mutlak filtre arkasındaki tozun toplanması en başta ölçülen toplam toz ağırlığından çıkarılır. Bu toz verim hesabına dahil edilmeyen toz miktarını belirler.
14. Test edilen ünite toz kaybı olmadan dikkatlice çıkartılmalıdır. Çıkartılan filtre hassas tartıda tartılır. Boş filtre ağırlığı ile ölçülen filtre ağırlığı ile bu ölçülen filtre arasındaki fark filtrenin kapasitesini oluşturmaktadır.
15. İkinci filtre de dikkatlice çıkartılarak tartılmalıdır. Verim hesabı için bu ağırlık ile birinci filtre arasındaki ağırlık toplamı paydayı oluştururken birinci filtre ağırlığı pay olacak şekilde bölme işlemi yapılır ve yüzdelik değer alınarak verim değeri elde edilmiş olur.

### Kapasite testi

Kapasite testi için elementin tutma kapasitesinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Filtre üzerine tutulabileceği tahmin edilenden 2 katı fazla toz gönderilir ve elementin üzerinde tutabileceği maksimum toz miktarı maksimum kapasiteyi ifade eder.

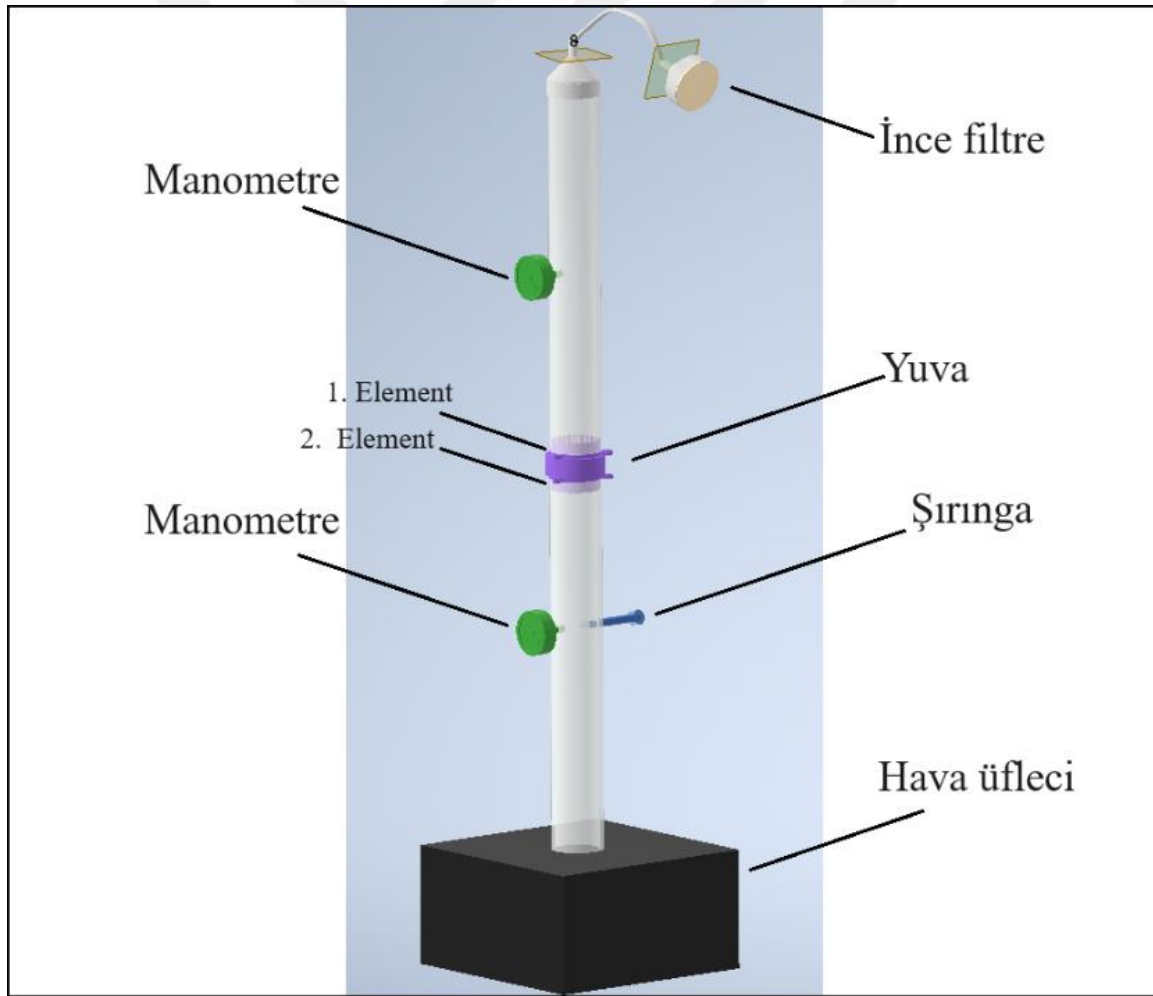
## **4.2. Deney Düzeneği**

Çalışmanın doğrulanması için gerekli olan deney düzeneği yukarıda belirtilen standartlara göre hazırlanmış olup yerleşimi de aynı standart üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği yerleşim şeması Şekil 4.1.'de görüldüğü gibidir.

Deney düzeneğinde bir adet hava üfleç, bir adet şırınga, iki adet manometre, 2 adet elementi üzerinde bulundurabilecek, hava geçirecek ve sızdırmaz yapıya sahip bir yuva, 2 adet filtre elementi, şeffaf mika borular ve en son kısımda tozun tutulabildiği 5µm partikül tutabilen ince filtre bulunmaktadır.

Deney düzeneği dikey şekilde konumlandırılmıştır. En alttan yukarıya doğru şırıngadan gönderilen partikülün hava ile gönderilerek yukarıdaki filtre elementiyile temas etmesi ve bu sayede filtrenin tutulup yapıp yapmayacağını görölmesini sağlayan bir deney düzeneğidir. Manometreler ne kadar basınç farkı oluşacağını tespiti için kullanılmaktadır. En sondaki ince filtre ise ince ya da filtreden geçen partiküllerin dış ortama atılmasını engellemek için kullanılmıştır. Toplamda 2 adet element kullanılmasının sebebi ise verim testi için iki element ihtiyacının olmasıdır.

Bu deney düzeneği sayesinde yukarıda standart olarak anlatılan 3 farklı deney türü de gerçekleştirilmiştir. Şematik resmin altında gerçek deney düzeneği bulunmaktadır. Tüm deneyler bu düzenekte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Resim 4.1. Deney düzeneği

### Hava üfleyici

Rebellish marka ve  $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$  hava üreten bu havayı da yaklaşık  $0,1 \text{ bar}$  basınç ile yukarıdaki filtreye gönderen hava üfleyici deney düzeneğinin en altında bulunmaktadır. Hava üfleyici, deney düzeneğinin en altına strafor ile sabitlenerek yerleştirilmiştir. Sabitlendiği platform hava emiş ve hava basma bölgelerinden delinerek yerine yerleştirilmiştir. 6 farklı kademe ile çalışan bu hava üfleyicinin en son seviyesinde  $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$  hava debisi izlenmektedir. Üreticinin sunduğu değerin bu değerin olması sebebiyle deney düzeneğinde hava debisi bu değerin kabul edilmiştir. Deneyle ilgili standartta hava debisinin maksimum  $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$  olması gerektiği belirtilmiştir. Basınç için ilgili standartta verilen değere göre ise bir sınırlama bulunmadığı gibi  $0,1 \text{ bar}$  ve altında basınç farkının maksimum  $25 \text{ Pa}$  olması gerektiği yazılmaktadır. Hava üfleyici deney düzeneği için uyum sağladığından dolayı tercih edilmiştir.



Resim 4.2. Hava üfleyici

### Manometre

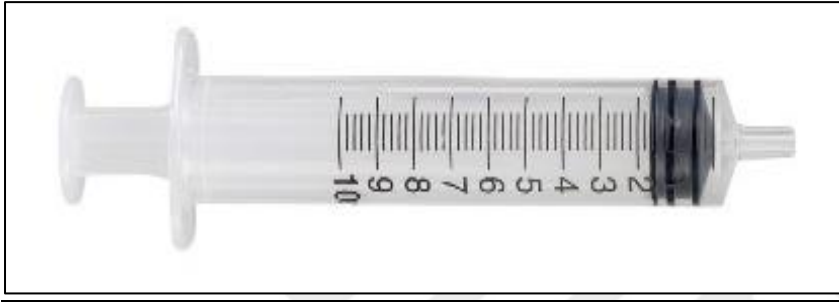


Resim 4.3. Manometre

Hat üstünde filtre önüne ve arkasına yerleştirilen Pakkens marka manometreler 0-1 bar aralığında değer okumakla beraber fark basınç testinin gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır. Basınç aralığının 0-1 bar olmasının sebebi 0,1 bar gibi küçük basınçların okunmak istenmesidir.

## Şırınga

Deney düzeneğinde filtrelerin tutması için hava ile gönderilecek olan partikülün doğru bir şekilde filtre öncesi hattına enjekte edilebilmesi için şırınga kullanılmaktadır. Hem basıncın deney standartlarında anlatıldığı gibi yenilebilmesi hem de partiküllerin dışarı taşmadan ya da takılı kalmadan düzeneğe ve bu sayede de filtreye gidebilmesi için hassas şırınga kullanılmıştır. Şırınganın uç kısmı doğrudan mika ile birleştirilerek sızdırmazlık önlemi alınırken arka kısımda ise conta ile sızdırmazlık sağlanmaktadır.

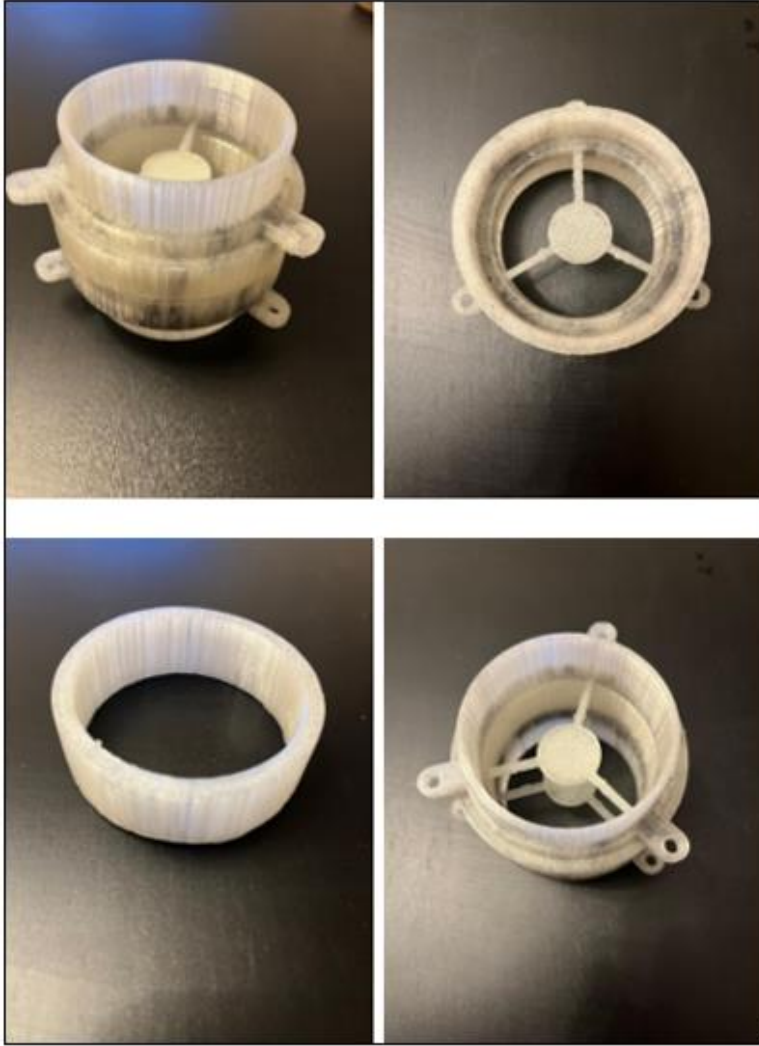


Resim 4.4. Şırınga

## Filtre yuvası

Üretimi yapılan model oturacağı yuva filtrenin kullanımı için özel olarak filtre boyutları referans alınarak tasarlanmıştır. Bu tasarım da Creality Sermoon D3 PRO marka FDM cihazı aracılığıyla PLA filament kullanılarak eklemeli imalat ile üretilmiştir. İki ürünü arka arkaya gelecek şekilde ortasında bir bilezik ile tutabilen bu yuva ayrı 3 parçadan oluşmaktadır.

Ortada bulunan bilezik iki kapak arasına konulan filtrelerin sıkıştırılması için kapaklara sıkı geçme bir şekilde takılabilmektedir. Filtreler iki kapağın bilezikle arasında sıkıştırılarak bulunmaktadır. Kapaklarda bulunan bağlantı delikleri sayesinde cıvata somun bağlantısı kullanılarak yuva kapakları birleştirilmiştir. Cıvata somun bağlantısının haricinde bilezik üzerine teflon bant sarılarak sızdırmazlık sağlanmış ve gönderilen havanın ya da granülün dışarı çıkması engellenmiştir. Kapakların dış kısımları mika borunun iç çap ölçüsüne göre sıkı geçme bağlantı yapılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede yine teflon bant kullanılarak sızdırmazlık sağlanmış ve aynı zamanda bağlantı gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.5. Filtre yuvası

### İnce filtre

Deney düzeneğinin son elemanı ise deney düzeneğinde kullanılan parçacıklardan geçme ihtimali olan filtre gözeneklerinden daha küçük ve ortama salınması istenmeyenlerin tutulmasını sağlayan 10  $\mu m$  boyutundaki parçacıklara kadar tutulum gösteren ince filtre kullanılmıştır. Olası kirliliğin önlenmesi sebebiyle düzeneğin tamamlanması için kullanılmıştır.

### **4.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi**

Deney düzeneği kapalı ortamda kurulduktan sonra deney ortamı hazırlanmaya başlanmıştır. Deney ortamında sıcaklık belirtildiği gibi 25 °C ve nem %30 olarak ölçülmüştür. Ortam

havalandırması uygun şekilde ayarlanmış numunelerin konulacağı özel vakumlu kaplar hazırlanmıştır. Test sonrası ağırlık ölçümleri için hassas tartı deney ortamında hazır halde tutulmuştur. Ölçümlerin kayıt altına alınabilmesi için tablo hazırlanmış ve ölçülen değerler tek tek kaydedilmiştir.



Resim 4.6. Grafit tozu

Deneyde 80-160  $\mu\text{m}$  aralığında boyutlarda bulunan grafit tozu kullanılmıştır. Parçacık aralığı deney standartlarında belirtildiği gibi 80  $\mu\text{m}$  üzerinde seçilmiştir. Test standardında önerilen A4 kaba tozu Arizona Çölü'nden toplanan toz ve kum parçacıklarından oluşmaktadır. Deneyde kullanılan grafit tozu A4 test tozu yerine kullanılmıştır.

Öncelikle tüm numuneler tek tek hassas terazide tartılmış ve boş ağırlıkları kaydedilmiştir. Ölçümlerin tamamının yapıldığı hassas tartı yanda görülen maksimum 200 gr. ağırlığı yüzdelik hassasiyetle ölçen bir hassas tartıdır. Deney düzeneğine deney numunelerden ilki olan radyus filtreden iki adet arka arkaya bağlanmıştır.

Bağlantı yapılırken teflon bant ve civata-somun bağlantısı kullanılmış ve sızdırmazlığın sağlandığından emin olunmuştur. Kontrol için hava üfleci çalıştırılmış ve kaçak spreyi ile hat bağlantıları kontrol edilmiştir. Herhangi bir kaçağı olmadığı görülen deney düzeneği hava üfleci son kademedeyken 0,65  $\text{m}^3/\text{h}$  debi seviyesinde çalıştırılmıştır. Daha sonra üfleç kapatılarak şırınga içerisine 1 gr. grafit tozu eklenmiş ve deney gerçekleşmeye hazır hale gelmiştir.



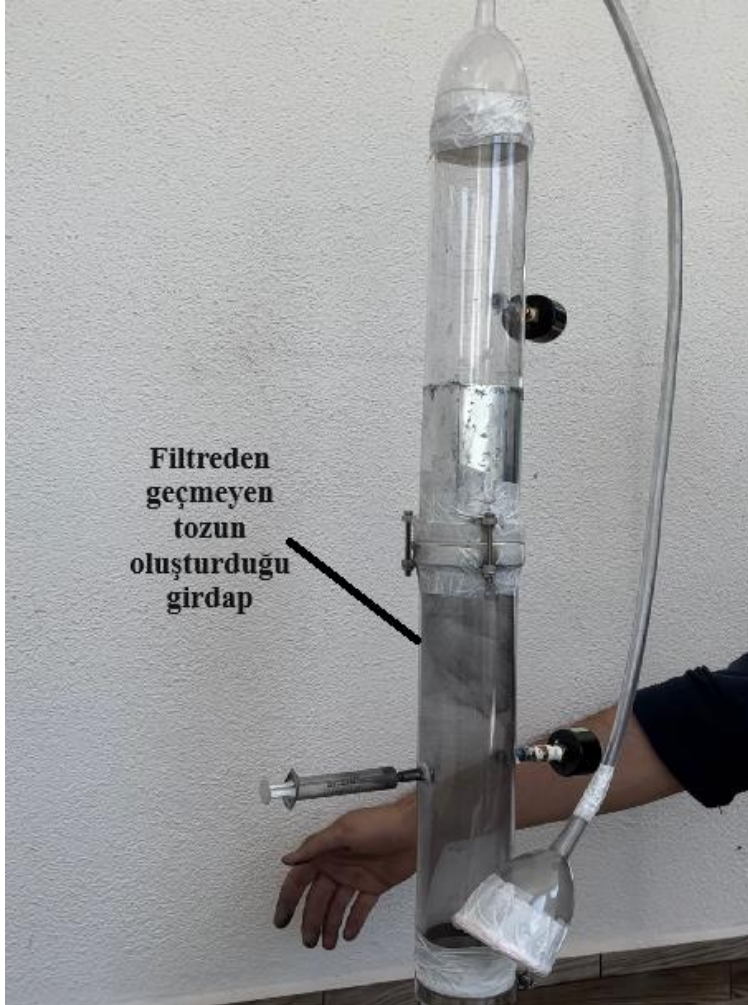
Resim 4.7. Kullanılan hassas tartı

Deney öncelikle fark basınç testi ile başlamıştır. Fark basınç testinde her iki manometrede 0,05 bar basınç okunmuş ve manometrenin farkı gösteremeyeceği kadar küçük bir basınç farkı olduğundan fark basıncın olmadığı gözlemlenmiştir.

İkinci olarak verim testi yapılmıştır. Öncelikle hassas tartı ile şırınganın darası alınmış ve daha sonra 1 gr. grafit şırınga içerisine konulmuş ve tekrar tartılmıştır. Son kademedeki çalışan hava üflecinin ürettiği 0,65 m<sup>3</sup>/h debiyeye sahip havanın üzerine grafit tozu yavaşça gönderilmiştir. 5'er dakika aralıklarla toplamda 30 dakika boyunca toz gönderilmiştir. Hava grafit tozunu akışla beraber yukarıda bulunan filtreye taşımıştır. Deney tüm grafit tozu hava akışına gönderilene kadar devam etmiştir bu işlem yaklaşık 5 dakika sürmüştür. Grafit tozu bittikten sonra düzenek 5 dakika daha çalıştırılmış ve stabil bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Resim 4.8'de görüldüğü üzere tozun ilk gönderildiği anda gözle görülür şekilde filtre altında bulunan boru içerisinde yoğun grafit tozu görülürken filtre üstünde hiç toz görülmemiştir. Test durdurulduktan sonra hem ilk filtre hem ikinci filtre tartılmıştır. Sonuçlar kaydedilmiştir.

Filtre tartımı sonucunda ilk filtre üzerinden alınan ağırlık değeri sayesinde filtrenin üzerinde tutabileceği toz miktarı yani kapasitesi de belirlenmiştir. Kapasite ortalama 0,1 gr. olarak belirlenmiştir. Radyus model testinin ilki tamamlanmış ve 2 adet numune tartılmış ve özel hava geçirmez kaba yerleştirilmiştir. Daha sonra test edilmesi düşünülen iki radyus

numunesi daha bağlanmış ve onlara da aynı şekilde test uygulanmıştır. Radyus testleri bittikten sonra sırasıyla spiral ve radyus-spiral modellere de test uygulanmıştır. Tüm değerler kayıt altına alınarak tabloya aktarılmıştır. Testler sonunda numuneler yuvadan dikkatlice alınarak herhangi bir hava akışıyla temas ettirilmeden doğrudan tartıya alınmış ve tartıya alındıktan sonra hava almayan kutularda hiç hareket ettirilmeden bekletilmiştir.



Resim 4.8. Tozun filtreye gönderildiği an

#### 4.4. Deney Sonuçları

Testlerde her bir numuneden yuvada 1 adet ön 1 adet arkada kullanılmak üzere test başına aynı numuneden 2 adet kullanılmıştır. Tek tip numunenin testinden de doğruluğu artırmak adına iki kez yapılmıştır. Toplamda 6 test yapılmıştır. 3 farklı numune olduğu için toplamda

12 adet numune teste alınmıştır. Genel test koşulları, basınç farkı ve kapasite test sonuçları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.1 Genel koşullar, basınç farkı, kapasite sonuçları

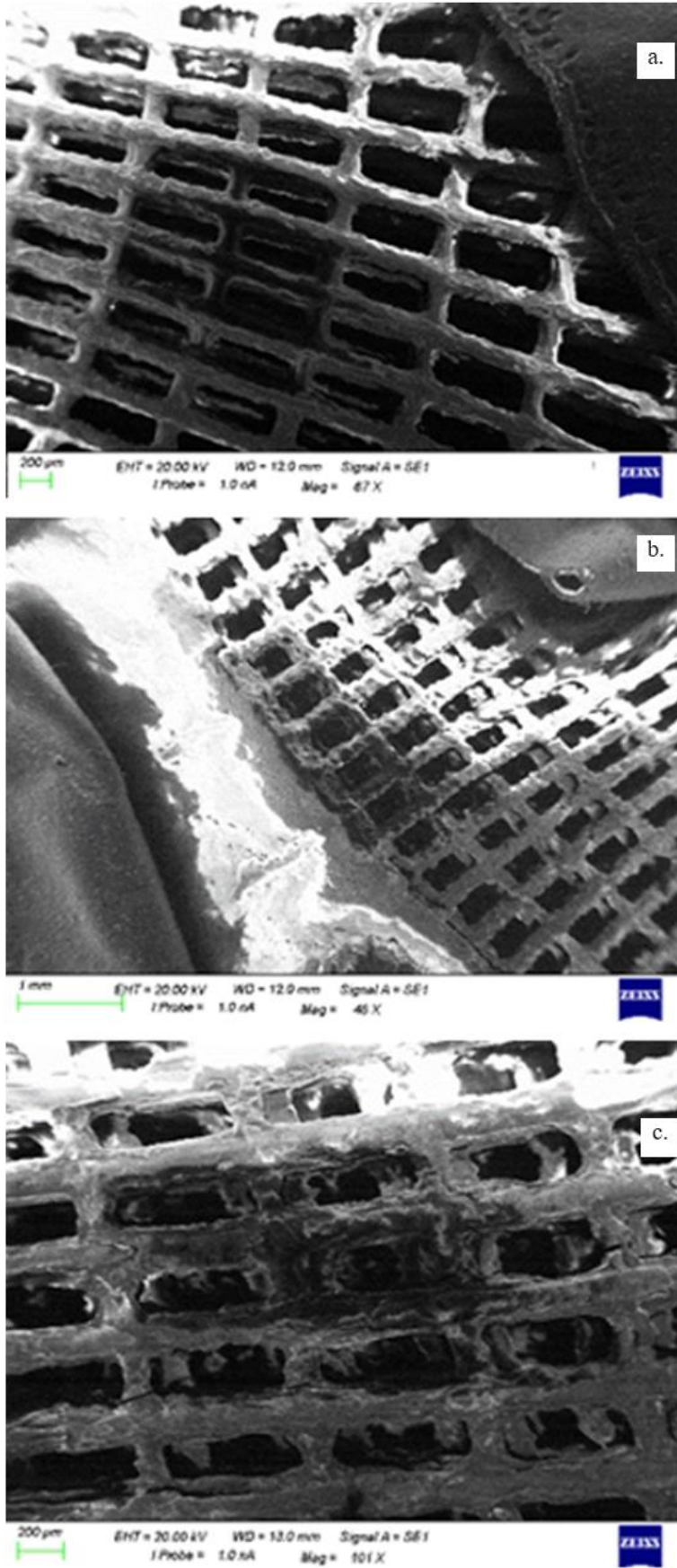
Test No	Numune No	Numune Model	Konum	Hava Akışı (m <sup>3</sup> /h)	Alt Basınç (bar)	Üst Basınç (bar)	Gönderilen Toz Miktarı (gr)	Kapasite (gr)
1	1	Radyus	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	2	Radyus	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
2	3	Radyus	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	4	Radyus	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
3	5	Spiral	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	6	Spiral	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
4	7	Spiral	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	8	Spiral	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
5	9	Radyus-Spiral	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	10	Radyus-Spiral	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
6	11	Radyus-Spiral	Birincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1
	12	Radyus-Spiral	İkincil	0,65	0,5	0,5	1	0,1

Gerçekleştirilen test sonrasında her numune için 3 ağırlık ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. 3 farklı ölçüm alınmasının sebebi oluşabilecek ölçüm hatalarının önüne geçmek ve daha kesin sonuçlar ile verim hesaplamasının önünü açmaktır. Sırayla birincil ve ikincil numuneler hemen test sonrasında tartılmıştır. Ağırlık ölçümleri tabloda yerine yazılarak hesap aşamasına hazırlanmıştır. Yapılan ölçümlere ait ortalama değerler aritmetik ortalama metodu ile hesaplanmıştır. Öncelikle birincil filtrelerin granül dolu hallerinin ağırlık ölçüm ortalamasından boş hallerinin ağırlık ölçüm ortalamaları çıkartılarak ne kadar granülün filtrede asılı kaldığı hesaplanmıştır. Daha sonra ikincil filtrelerin dolu ve boş hallerinin ortalama farkı alınarak kaydedilmiştir. Buna göre birincil filtreden geçerek ikincil filtreye takılan granüllerin ağırlık hesapları yapılmıştır. Bu iki ağırlıktan birincil olandaki fark verim denkleminin pay kısmına ve birincil ile ikincil farkların toplamı paydaya yazıldığında ortaya çıkan oran verim değerini vermektedir. Elde edilen fark değerleri verim denkleminde yerine yerleştirilerek hesaplamalar yapılmış ve verim değerleri kaydedilmiştir. Kayıt altına alınan verim değerleri tabloda ilgili kısma konumlandırılmıştır. Verim değerlerinin sonuçları sonuç bölümünde irdelenecektir. Ağırlık ölçüm sonuçları, ortalama farklar ve verim değerlerini içeren tablo aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.2 Kaydedilen ağırlık ölçüm değerleri ile hesaplanan verim değerleri

Test No	Numune No	Numune Model	Konum	Filtre Boş Ağırlık (gr)			Filtre Dolu Ağırlık (gr)			Ortalama Fark	Verim (%)
				Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3	Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3		
1	1	Radyus	Birincil	4,41	4,42	4,41	4,51	4,51	4,51	0,0966	93,55
	2	Radyus	İkincil	4,48	4,47	4,48	4,48	4,48	4,49	0,0066	
2	3	Radyus	Birincil	4,45	4,46	4,45	4,55	4,56	4,56	0,1033	93,94
	4	Radyus	İkincil	4,43	4,42	4,43	4,43	4,43	4,44	0,0066	
3	5	Spiral	Birincil	4,83	4,84	4,84	4,93	4,94	4,94	0,1000	90,91
	6	Spiral	İkincil	4,51	4,51	4,51	4,52	4,52	4,52	0,0100	
4	7	Spiral	Birincil	4,73	4,74	4,73	4,83	4,83	4,83	0,0966	90,63
	8	Spiral	İkincil	4,61	4,61	4,61	4,62	4,62	4,62	0,0100	
5	9	Radyus-Spiral	Birincil	4,50	4,50	4,50	4,59	4,60	4,60	0,0966	96,67
	10	Radyus-Spiral	İkincil	4,44	4,44	4,44	4,45	4,44	4,44	0,0033	
6	11	Radyus-Spiral	Birincil	4,56	4,57	4,56	4,66	4,66	4,65	0,0933	96,55
	12	Radyus-Spiral	İkincil	4,53	4,52	4,52	4,53	4,52	4,53	0,0033	

Deneyle tamandıktan sonra deney düzeneğinin sonunda bulunan ve filtre tarafından tutulamayan partiküllerin tutulması için deney düzeneğine yerleştirilen ince filtre incelendiğinde filtre üzerinde herhangi bir toz parçacığının olmadığı yani tüm partiküllerin iki filtre üzerinde asılı kaldığı ya da filtre üzerinden geçemediği görülmüştür. Filtre kapasitesinden fazla miktarda filtre üzerine gönderilen tozun ise filtrenin alt kısmında hava üflecinin hava çıkış kısmı üzerindeki kapakta kaldığı ya da mika boru üzerinde yapıştığı gözlemlenmiştir. Her test öncesinde borulara ve üflece temizlik işlemi uygulanmıştır. Toplamda 12 gr. test tozu kullanılarak gerçekleştirilen testlerde her bir test sırasında toplam 1 gr. toz kullanılmıştır. Verim değerleri, standartlarda verilen verim denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplar tamamen standart test için gerçekleştirilen verim hesaplamaları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonrasında dolu olan filtrelerden bazıları temizleme işlemine tabi tutulmuş ve temiz hallerinin de SEM görüntüsü alınmıştır. Son olarak filtrenin deneyler sırasında kullanılanlarından bazılarında temizleme işlemi uygulanmıştır. Temizleme işlemi sabunlu su ile temizlenerek normal su ile durulanması ile gerçekleşmiştir. Yıkanan filtreler basınçlı hava ile temizleme prosesi uygulanarak içindeki sudan arındırıldıktan sonra tekrar kullanılabilir bir hale gelmiştir. Tekrar kullanılabilir olan bu filtreler sürdürülebilirlik noktasında çalışmaya katkı sağlamaktadır.



Resim 4.9. Temizlik sonrası SEM görüntüleri a) radyus, b) radyus-spiral c) spiral modellerin SEM görüntüleri

Çizelge 4.3. Temizlenen ve tekrar test edilen filtrelerin verim karşılaştırması

Durum	Test No	Numune Model	Konum	Filtre Boş Ağırlık (gr.)			Filtre Dolu Ağırlık (gr.)			Ortalama Fark	Verim (%)
				Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3	Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3		
Üretilen	1	Radyus	Birincil	4,45	4,46	4,45	4,55	4,56	4,56	0,1033	93,94
		Radyus	İkincil	4,43	4,42	4,43	4,43	4,43	4,44	0,0066	
Temizlenen	2	Radyus	Birincil	4,42	4,43	4,42	4,52	4,52	4,51	0,0933	93,30
		Radyus	İkincil	4,50	4,49	4,50	4,50	4,50	4,51	0,0067	
Üretilen	3	Spiral	Birincil	4,83	4,84	4,84	4,93	4,94	4,94	0,1000	90,91
		Spiral	İkincil	4,51	4,51	4,51	4,52	4,52	4,52	0,0100	
Temizlenen	4	Spiral	Birincil	4,71	4,71	4,71	4,80	4,80	4,80	0,09	90,00
		Spiral	İkincil	4,63	4,63	4,63	4,64	4,64	4,64	0,01	
Üretilen	5	Radyus-Spiral	Birincil	4,50	4,50	4,50	4,59	4,60	4,60	0,0966	96,67
		Radyus-Spiral	İkincil	4,44	4,44	4,44	4,45	4,44	4,44	0,0033	
Temizlenen	6	Radyus-Spiral	Birincil	4,50	4,51	4,51	4,58	4,59	4,59	0,08	96,03
		Radyus-Spiral	İkincil	4,46	4,46	4,46	4,47	4,46	4,46	0,0033	

Sürdürülebilirliğin doğrulanması adına su ve sabun ile temizlenen ve daha sonrasında basınçlı hava ile kurutulan filtrelere tekrar verim testi uygulanmıştır. Test sonuçları Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Çizelgede, filtre modellerine ait üretimden hemen sonra gerçekleşen verim test sonuçları ile aynı filtrelerin temizlendikten sonraki verim test sonuçları kıyaslanmıştır.

Burada elde edilen değerlere göre önemsiz sayılabilecek bir verim düşüşünün yanında sonuçlar yüzdeler olarak ilk üretilen numunelerin test sonuçlarıyla oldukça yakındır. Örneğin radyus model filtrenin üretim gerçekleşikten yapılan test neticesinde elde edilen verim değeri %93,94 hesaplanırken, temizlenip kurutulduktan sonra elde edilen verim değeri %93,30 hesaplanmıştır. Filtrenin temizleme sonrası da sürdürülebilir olarak kullanılabilirdiği bu şekilde kanıtlanmıştır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile, biyomimetik tasarım metodolojisiyle yola çıkılarak, örümcek ağının taklit edilmesi yoluyla biyomimetik tabanlı filtre tasarımı geliştirilmiştir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen filtre, standartlara uygun bir şekilde kurgulanan deney düzeneğinde filtrenin performansını, dayanıklılığını ve etkinliğini çeşitli koşullar altında değerlendirmek amacıyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, tasarım doğrulama işlemi yapılmıştır. Bu süreçte, filtreleme verimliliği, filtre kapasitesi ve filtrenin oluşturduğu basınç farkı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmış, dikkate alınan parametrelere göre gerçekleştirilen deney sonuçları standartta belirtilen ilgili denklem ve tolerans aralıklarına göre incelenmiştir. Bu kapsamlı test ve doğrulama süreci, biyomimetik tabanlı filtre tasarımının hem teorik hem de pratik açıdan geçerliliğini ve etkinliğini ortaya koymuş, literatürdeki mevcut bilgi birikimine katkı sağlamıştır.

Üretilen filtreler SEM mikroskopunda boyutsal açıdan incelenmiştir. Kontrolün sebebi istenen filtre verimi noktasında hava geçirgenliği ve partikül tutulumu için gerekli boşluk değerlerine ulaşıp ulaşılmadığının öğrenilmek istenmesidir. Tasarımın ilk aşamasında, biyomimetik yöntemler ve kuralların yanı sıra doğanın araştırma ve geliştirme metodolojileri incelenmiş, doğanın taklit edilmesi sürecinde ortaya çıkan stratejiler ve hikayelerden esinlenilmiştir. Bu süreçte, doğal sistemlerin karmaşık yapıları, işleyiş mekanizmaları ve adaptasyon süreçleri analiz edilmiştir. Biyomimetik kurallar gereği, doğayı taklit ederken doğayı koruyan, doğa ile uyum içerisinde çalışan, onu kirletmeden ve bozmadan faydalı teknolojilerin ortaya çıkarılmasını sağlamak, biyomimetik metodolojinin uygulanmasında büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, doğadaki sürdürülebilirlik ilkeleri, enerji verimliliği, malzeme döngüsü ve atık yönetimi gibi konular incelenmiş ve bu prensiplerin mühendislik tasarımlarına entegrasyonu hedeflenmiştir.

Biyomimetik tasarımın amacı, yalnızca doğanın form ve yapısını kopyalamak değil, aynı zamanda doğanın işleyiş prensiplerini anlayarak sürdürülebilir ve çevre dostu teknolojiler geliştirmektir. Bu yaklaşım, teknolojik yeniliklerin doğaya zarar vermeden, aksine doğayı koruyarak ve ondan öğrenerek geliştirilmesini sağlamaktadır.

Biyomimetik metodoloji, çevresel etkileri en aza indiren, ekosistemlerle uyumlu ve uzun vadeli sürdürülebilir çözümler sunan tasarımlar ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, araştırma ve geliştirme süreçlerinde disiplinler arası iş birlikleri ve doğa bilimleri ile mühendislik bilimlerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır.

Biyomimetik tasarım süreçlerinde, doğanın sunduğu eşsiz stratejilerden ve hikayelerden ilham alarak sürdürülebilir ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi kritik bir rol oynamaktadır. Bu metodoloji, doğanın korunması ve insanlığın teknolojik ilerlemesinin bir arada mümkün olabileceğini gösteren önemli bir yaklaşımdır. Ayrıca, biyomimetik tasarım uygulamalarının, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik sağlama potansiyeli, akademik ve endüstriyel araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda, biyomimetik prensiplerin mühendislik ve tasarım süreçlerine entegrasyonu, gelecekteki teknolojik gelişmeler için umut vadeden bir alan olarak değerlendirilmektedir.

Biyomimetik metodolojisiyle geliştirilen ve örümcek ağlarının taklit edildiği bir tasarım fikri, başlangıç noktası itibarıyla oldukça heyecan verici bulunmuş ve stratejik olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, örümcek ağlarının doğa tarafından üretilmiş bir filtre olarak işlev gördüğü gerçeği fark edilmiştir. Bu anlayış doğrultusunda, filtreler ve örümcek ağları detaylı bir şekilde araştırılmış ve bu iki yapının ortak noktaları incelenmeye başlanmıştır. Kapsamlı araştırmalar sonucunda, filtre ve örümcek ağı yapılarının hem form hem de fonksiyon açısından yüksek oranda örtüştüğü tespit edilmiştir. Bu örtüşme, akademik ve endüstriyel açıdan çalışmaya uygun görülmüş ve bu alanda ortak çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmalar, biyomimetik prensiplerin mühendislik ve tasarım süreçlerine entegrasyonu açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Böylece, doğanın sunduğu çözümlerden ilham alınarak, sürdürülebilir ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır.

Çalışmalar sırasında, öncelikle örümcek ağlarının yapısı incelenmiş ve tarih boyunca insanlar tarafından oluşturulmaya çalışılan yapay örümcek ağı yapıları analiz edilmiştir. Çalışmaların incelenmesi sonucunda, biyomimetik tabanlı filtre tasarımının özgün bir çalışma olacağı anlaşılmıştır. Bu tasarımın, mevcut teknolojilere kıyasla daha etkili ve verimli olabileceği, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağlayabileceği öngörülmüştür. Ayrıca, örümcek ağlarının mikro ve nano ölçekli

yapılarının, partikül yakalama ve filtrasyon süreçlerinde yüksek performans sunabileceği belirlenmiştir.

Üç boyutlu tasarım programı olan INVENTOR® yazılımı kullanılarak biyomimetik tabanlı filtre tasarımı katı model olarak tasarlanmıştır. Tasarımda örümcek ağlarının yapısı taklit edilmiş örümcek ağlarında bulunan radyal ve spiral iplikler daha sık bir şekilde konumlandırılarak ideal ve standart bir hale getirilmiştir. Örümcek ağları büyük böcekleri ya çok az miktarda polen ve toz parçacıklarını yakalayabilirken tasarım sonucunda ortaya çıkan model çok daha fazla miktarlarda toz ve böcek yakalama potansiyeline sahip endüstriyel bir filtre ortaya çıkmıştır.

Tasarım aynı zamanda örümcek ağları gibi sürdürülebilir bir kullanım imkânı sunabilmesi adına buna yönelik bir üretim metodolojisinin kullanımını hedeflemiştir. Tasarım birbirinin aynı formda oluşturulan 11 katlı bir yapıdan meydana gelmektedir. Her kat toplamda 20 adet spiral ve 240 adet radyal iplikten oluşan bir örümcek ağını temsil etmektedir. Katlarda oluşturulan örümcek ağı yapılı elementler bir araya getirilerek bir filtre yapısını oluşturmaktadır. Tek bir kat filtreleme yapılamayacak kadar büyük boşluklara sahipken bir araya gelen katlar bu boşlukları yerleşime göre kapatabilmekte ve partikül tutabilecek hale getirmektedir.

Toplamda üç farklı model şeklinde ortaya çıkan tasarımın birinde radyus iplikler açısız olarak yer değiştirerek tek kat üzerindeki boşlukların alttan kapatılmasına ve filtreleme işleminin gerçekleştirilmesine olanak tanırken diğer bir modelde ise spiral ipliklerin konumsal olarak yer değiştirilmesi sonucunda kat boşlukları kapatılmış ve yine filtrelemeye uygun bir yapı elde edilmiştir. Son modelde ise bu iki farklı ipliğin hem açısız hem de konum bazlı yer değiştirmesi sağlanarak filtre deki boşlukların iyice daraltılması hedeflenmiştir.

Üretimi tamamlanan tasarım modelleri için doğrulama işlemleri kapsamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu noktada deneysel çalışmaların yapılabilmesi için filtre standartlarına uygun şekilde kurulmuş deney düzeneği ve standartları sağlayan bir deney prosedürü uygulanmıştır. Deney düzeneği uygun bir şekilde kurularak testler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ürüne ait tasarım doğrulama çalışmaları da tamamlanmıştır. Deneyler sonucunda görülmüştür ki üretilen 3 farklı model birbirine göre kapasite ya da basınç farkı noktasında herhangi bir üstünlük sağlamamıştır. Modellerin hepsi çok bariz

basınç farkı oluşturmayacak şekilde boşluklara ve hava geçirgenliğine sahiptir. Hava geçirgenliği ve fark basınç noktasında modellerin hepsi başarılı olmuş, standartları karşılamıştır. Kapasite noktasında ise filtreler gönderilen toz miktarına göre tahmin edilen tutma kapasitesinden çok küçük bir farkla daha az çıkmıştır.

Verim testi sonucunda ise elde edilen verim sonuçları incelenince görülmüştür ki spiral-radyus model diğer modellere göre %96 ile en yüksek filtre verim değerine sahiptir. Diğer modellerden daha az boşluğa sahip olan bu filtre üzerine gelen toz partiküllerini tutma konusunda daha başarılı olmuştur. Birincil filtrede tutulamayan ve ikincil filtre üzerine giden partikül miktarı çok çok daha az olduğu için verim değerleri diğer modellere oranla daha yüksek çıkmıştır. Bu modelden sonra sırasıyla radyus filtre %93 verimle ikinci sırada yer alırken en kötü sonucu %91 verimle spiral filtre göstermiştir. Bu sonuçların sebebi radyus filtrede açılabilir olarak yer değişikliği yapılarak kapatılan boşluk alanının konum esaslı yer değişmiş spiral ipliklerine oranla daha fazla boşluk kapatmış olmasından kaynaklanmaktadır. Üç modelin de sonuçları %90 üzeri verim verdiği için filtrelerin doğrulaması da yapılmıştır. Üretilen üç modelden en başarılı olan radyus-spiral model daha ince yapılı radyal ve spiral iplik üretimi yapabilecek makinelerle üretilmesi durumunda daha sık bir ağ ve daha küçük boşluklarla yüksek verim değerleri verebilecek duruma gelecektir.

Biyomimetik tasarım metodolojisi kullanılarak geliştirilen örümcek ağı esinlenmeli filtre, doğadan ilham alması, çevre dostu olması ve doğal yaşam döngüsü ile günümüz filtreleme teknolojisinin doğaya uyumunu sağlamak amacıyla önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu filtre, akademik ve ticari açıdan gelecek vadeden bir çalışma olarak, son dönemlerde yaygınlaşan eklemeli imalat gibi modern üretim yöntemlerini kullanarak, yıllar boyunca lif, kumaş, kâğıt gibi organik malzemelerin düzensiz yapıları yerine düzenli bir yapı sunmaktadır. Düzenli ve düzeni ayarlanabilir bir filtre formu kullanıyor olması bir filtre için çok büyük bir avantajdır. Çünkü bu sayede istenen partiküller istenen şekillerde durdurulabilir bir hale gelmektedir. Bu çalışmanın eklemeli imalat teknolojisi sayesinde plastikten geri dönüştürülebilir ve yıkanabilir filtrelerin üretiminin yolunu açacağı düşünülmektedir.

Son dönemlerde istenen doğa dostu ürünler üretme noktasında ise doğayı taklit eden ve doğanın yöntemlerini kullanan bir ürün olması çalışmanın kirlenici yaratmadan geri dönüştürülebilir bir filtre olarak avantajlı olduğu bir başka özelliktir.

Çalışmanın en önemli özelliklerinden biri, sürdürülebilir olmasıdır. Filtrenin kullanımı sonrasında sabunlu suyla yıkanarak ve basınçlı hava ile kurutularak içinde biriken suyun alınması, filtrelerin tekrar kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır. Bu özellik, filtrelerin uzun ömürlü olmasını ve atık miktarını minimize etmesini sağlamaktadır. Önceki bölümde sunulan SEM mikroskobu görüntüleri, temizlik sonrası filtrelerin doğa dostu bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Örümcek ağı esinlenmeli filtre tasarımı, doğal örümcek ağlarının ince yapısal özelliklerini taklit ederek, filtrenin mükemmel filtreleme performansı sunmasına olanak tanır. Bu yaklaşım, doğadan ilham alarak teknolojinin doğayla uyumlu hale getirilmesini ve sürdürülebilirlik ilkelerine uygun ürünlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu nedenle, biyomimetik tabanlı filtre tasarımı, gelecekte çevre dostu ve etkili filtreleme çözümlerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Endüstride kullanılan filtreleme ürünlerine nazaran ideal bir örümcek ağı formunda üretilmesi örümcek ağı yapısının vermiş olduğu her boyutta tutulum sağlayabilme özelliği, yine örümcek ağlarında bulunan sürdürülebilirlik özelliği, hava hatlarında ve akış bölgelerinde kaba partiküllerin olduğu bölgelerde kullanılabilirlik gibi özellikler bu çalışmanın öne çıkan özellikleri olarak düşünülebilir.

Basınç farkına neden olmadan havanın geçişinin rahat bir şekilde yapıldığı filtrede basınç farkının olmaması hava hattı için enerji kaybının olmaması anlamına geldiği enerjinin israf olmaması noktasında da faydalı bir çalışma olarak nitelendirilebilir.

Avantajlı olduğu konular ile birlikte çalışmanın dezavantajlı olduğu birkaç konu da bulunmaktadır. Doğanın kuralları çerçevesinde tasarlanan ve üretilen bu ürün, malzeme fiyatları göz önüne alındığında ticari bir ürün olamayacak kadar maliyetlidir. Endüstriyel filtrelerde üretilen ürün maliyetleri ile kıyaslandığında bu filtrelerin malzeme maliyetleri çok yüksektir. Ayrıca eklemeli imalat sonrası işlemlerin de hem zor olması hem fazla işgücü istemesi sebebiyle üretim noktasında zorluklar yaratacaktır. Üretimi yapan makinelerin de oldukça pahalı olması ürünün ticarileşmesi noktasında zorluk yaşatacaktır. Aynı zamanda hem ucuz hem de günlük hayatımızda sürekli kullanılan kâğıt ve lifli filtreler %99 dan daha yüksek değerlere daha düşük mikronluk boşluklar kullanarak sahip olmaktadır.

Teknoloji gelişirken şu anda eklemeli imalat ile belki de kullanılabilir en küçük nozullar kullanılarak üretilen bu filtre gelecekte eklemeli imalat ile üretim sırasında kullanılabilir daha küçük nozulların geliştirilmesi ile daha küçük boyutlara ve daha yüksek verim değerlerine gelecektir. Bu noktada bu çalışma doğa dostu biyomimetik tabanlı filtrelerin eklemeli imalatla üretimi noktasında bir öncül niteliğindedir.

Verim değerlerine bakıldığında filtre %96 gibi bir değer elde edilmiş olsa da yine de %99 verim değerinin üzerine çıkamamıştır. Bu durum eklemeli imalat teknolojisi kaynaklıdır. Verim değerlerinin daha yükselmesi için daha ince ve daha sık iplikli filtreler üretilmelidir. Ancak üretimi gerçekleştirecek eklemeli imalat cihazları bu kadar ince iplikleri üretememektedir. Bu çalışmada hem kaba iplikleri olan hem de boşlukları daha geniş filtreler üretilmiştir. Bu filtrelerin boşluklarından geçebilen partiküller verim değerini düşürmektedir. Gelecekte daha sıkı üretilen filtreler daha yüksek partikül tutma verimine sahip olabilecektir. Gelecekte yapılacak filtre ve kumaş dokusu tasarımlarına öncü olabilecek bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Sonuçta tüm süreç göz önüne alındığında ortaya çıkan biyomimetik tabanlı filtre ürünü başarılı bir tasarım ürünü olmuştur. Tasarımında, üretiminde, testlerinde ve kullanım noktasında hiçbir sorun ile karşılaşmadan süreci tamamlanmıştır. Gelecekteki filtrelere ışık tutacağı düşünülen bir çalışma olarak günümüz teknolojisinin doğa ile birleştirilmesi açısından oldukça önemli bir çalışma olarak literatüre geçecektir. Örümcek ağları gibi yapılarının filtrelere uyarlanması düşüncesi ile yeni filtre fikirlerinin ortaya çıkması noktasında öncü olması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasıyla ilgili geleceğe yönelik bir perspektif sunmak ve bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara önerilerde bulunmak gerekirse, mezuniyet tezlerinden zengin makalelere kadar birçok farklı ilerleme yolu önerilebilir. İmalat metodu ve tasarım yöntemleri değiştirilerek farklı sonuçlara ve verim değerlerine erişmek mümkündür.

Bu çalışmanın daha sonraki aşamalarda başka tür eklemeli imalat metotları ile denenebileceği önerilebilir. Örneğin bir mezuniyet çalışması olarak SLA metodu ile ince bir lazer kullanılarak ve daha hassas üretime imkân tanıyabilen bir malzeme ile çalışmada daha az destek malzeme kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Daha uygun maliyetlere

ulaşılarak belki daha ticari çıktılar elde edilebilir. Destek malzemesinin azaltılması sıklığın artırılmasına ve daha ince yapılı ay ortaya çıkartmaya sebep olacaktır.

Aynı şekilde SLS eklemeli imalat metodunun da denenmesi destek malzeme kullanılmayacağından mutlaka denenmesi gereken bir yöntem olarak düşünülmektedir. Bu çalışmanın en zor kısmı olan hatta bu bölümde karşılaşılan sorunların çözümü için yeni temizleme metotlarının bulunması ile sonuçlanan destek malzemenin temizlenmesi süreci destek malzemesinin kullanılmaması durumunda hem daha ince hem de daha sık bir örümcek ağı oluşumunu sağlayacaktır.

Metotlar değiştirilebildiği gibi aynı metot kullanılarak farklı ve yine Strasys markası tarafından üretilen başka bir model ve destek çiftinin kullanımının da çıktı sonuçları farklı olacaktır. Destek malzemesi olarak daha kolay çözünebilen ancak daha maliyetli malzemelerin kullanılabilmesi ve bu sayede daha ince ipliklerin üretildiği bir filtre ağı ortaya çıkabileceği düşünülmektedir.

Form yerine fonksiyon değiştirilerek farklı alanlarda kullanılmak üzere filtreye elektrostatik bir özellik kazandırmak ve daha uzun ömürlü olmasını sağlamak da mümkün olacaktır. Örneğin aynı ürünün metal içerikli bir malzeme ile üretimi yolu da önerilebilecek bir yöntemdir. Elektrikle yüklenmiş ve elektrostatik özellik kazandırılacak filtreler ortamda bulunan kömür ya da metal tozunun rastgele ağı yapışması yerine negatif yükü yüklenerek pozitif yüklü parçacıkları doğrudan kendine çekecektir. Bu da tamamen başka bir tasarımın ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Üzerinde düşünülerek daha birçok farklı öneri sunulabilir. Ancak bu noktada önemli olanın biyomimetik tabanlı tasarım kavramı kapsamında doğa dostu ve sürdürülebilir çalışmalar yapmak olduğunun altı çizilmelidir. Doğayı ilham alan her çalışmanın insanlığın yararına olacağı gerçeği unutulmamalıdır.



## KAYNAKLAR

- Adamidis, O., Alber, S., Anastasopoulos, I. (2018). *Investigation into 3D printing of granular media*. Physical Modelling in Geotechnics, Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, London, 113-118.
- Amador, G. J., Mao, W., DeMercurio, P., Montero, C., Clewis J., Alexeev, A. (2015). Eyelasher Divert Airflow to Protect the Eye. *Social Interface*, 12(105), 201-294.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. (89. Baskı) New York: HarperCollins, 183.
- Blackledge, T. A., Kuntner, M., Agnarsson, I. (2011). The Form and Function of Spider Orb Webs: Evolution from Silk to Ecosystems. *Advances in Insect Physiology*, 41(11), 175-262.
- Chen, C., Liu, L., Qiu, T., Yang, K. (2023). An Artificial Spider-Web-Based Geographic Routing in Heterogeneous Vehicular Networks. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(5), 1604-1620.
- Clark A.S., San-Miguel, A. (2021). A Bioinspired Passive Microfluidic Lobe Filtration System. *Lab Chip*, 21(11), 3762-3774.
- Dávila-Jiménez, Y., Tovar-Hernández, M.A., Simões, N. (2017). The Social Feather Duster Worm. *Marine Biology Research*, 8(7), 137-138.
- Dinçer, K., Önal, G., Akdemir, A., Selbes, M. (2016). Elektro-Eğirme Yöntemiyle Nanofiber Tabakalı Hava Filtresi Üretimi ve Karakterizasyonu, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi* 4(4), 271-283.
- Divi, R. V., Strother, J. A., Rubahn, H. G., Paig-Tran, M. (2018). Manta Rays Feed Using Ricochet Separation, A Novel Nonclogging Filtration Mechanism. *Sci Adventure*. 2018 4(9), 95-133.
- Duke, N.C., Larkum, W.A. (2019). Mangroves and Seagrasses. *Great Bareer Reef*, 20(8), 219-228.
- Eberhard, W. G. (1977). Artificial spider webs. *Bulletin Arachnol Sociaety*, 4(3), 126-127.
- Eberhard, W. G. Castillo, J. A. (1983). Use of Artificial Webs to Determine Prey Available to Orb Weaving Spiders. *Ecological Archives*, 64(11), 1655-1658.
- Eggermont M. (2007). Biomimetics as problem-solving, creativity and innovation tool. *Schulich School Papers of Engineering*, 45(9), 43-45.
- Exeter, R.L., Glade, C., Loring, S., (2016). Rare Lichens of Oregon. *Papers of Land Management*, 150(6), 195-206.
- Frontczak-Wasiak, I., Snycerski, M., Ciesielska, I. (2008). Textile Structures Modeled on a Spider's Net. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 16(5), 54-58.

- Furtado, L. M., Novaes, S. D., Petria, D. F. S. (2022). Biomimetic Filter for Removal of Organic Pollutants and Oil/Water Separation. *Workshop do Mestrado Profissional*, 41(7) 13-17.
- Güllü, G. (2023). *İç Ortam Hava Kalitesi İyileştirme Cihazları, Performansları, Tarihsel Gelişimi ve Geleceği*, İç Hava Kalitesi Sempozyumu. Ankara, 121.
- Hoffman, J.A., Katz, J., Bertness, M.D. (1984). Fiddler Crab Deposit-Feeding and Meiofaunal Abundance in Salt Marsh Habitats. *Maritial Biology*, 82(5), 161-174.
- Jaine, F.R.A., Couturier, L.I.E., Weeks, S.J., Dong, X., Townsend, K.A., Bennett, B.N., Fiora, K., Richardson, A.J. (2012). When Giants Turn Up: Sighting Trends, Environmental Influences and Habitat Use of the Manta Ray *Manta Alfredi* at a Coral Reef. *Plos One*, 7(10), 146-170.
- Jyoti, J., Kumar, A., Lakhani, P., Kumar, N., Bushan, B. (2018). Structural properties and their influence on the prey retention in the spider web. *Royal Society*, 377(2138) 55-63.
- Kaplan, D., Adams, W. W., Farmer, B., Viney, C. (1993). Silk: Biology, Structure, Properties, and Genetics. *Advanced Silk Polymers*, 544(1), 2-16.
- Kayaş, A. General Filter Havak; MMO. (2021, Şub). Pandemi Sürecinde Filtrelerin Önemi. *Mühendis ve Makina*, 144-149.
- Krink, T., Vollrath, F. (1999). A virtual robot to model the use of regenerated legs in a web-building spider. *Animal Behaviour*, 57(1), 223-232.
- Lachina, I., Fiutowski, J., Rubahn, H. G., Vollrath, F., Jonathan R. B. (2023). Nanoscale imaging of major and minor ampullate silk from the orb-web spider *Nephila Madagascariensis*. *Scientific Reports*, 13 66-95.
- Lee, Y., Song, W. J., Jung, Y., Yoo, H., Kim M. Y., Kim H. Y., Sun, J. Y. (2020). Ionic spiderwebs. *Science Robotics*, 5(44), 13-41.
- Lin, L. H., Edmonds, D. T., Vollrath, F. (1995). Structural engineering of an orb-spider's web. *Nature*, 373, 146-148.
- Li, H., Raza, A., Yuan, S., Almarzooq, F., Fang, N. X., Zhang T.J. (2023). Biomimetic on-chip filtration enabled by direct micro-3D printing on membrane. *Scientific Reports*, 12(8178), 45-90.
- Li, Y., Ross, R., Ross C. (2022). A Novel Approach to Bio-Friendly Microplastic Extraction with Ascidians. *Journal of Student Research*, 10(4), 34-61.
- Ma, M., Du, D., Yu, C., Wang, J., Wang, Z. (2019). Bioinspired PM2.5 Filter: An AgNWs Reinforced PAN/PVP Composite Membrane with The Porous and Multilayered Network Structure. *Applied Surface Science*, 644(158) ,8-14.

- Massel, S.R., Furukawa, K., Brinkman, R.M. (1999). Surface Wave Propagation in Mangrove Forests. *Fluid Dynamics Research*, 24(19), 219-249.
- Miller, M.H., Klimovich, C. (2017). Report to National Marine Fisheries Service, *Office of Protected Resources*, 17(11), 128-148.
- Monniot, C., Monniot, F., Laboute P. (1991) Coral Reef Ascidians of New Caledonia. *Papers About Ascidians*, 45(6), 144-173.
- Nemoto, T. (1959). Food of Baleen Whales with Reference to Whale Movements. *Scientific Report of the Whales Research Institute*, 14, 149-290.
- Ortega-Jimenez, V. M., Dudley, R. (2013). Spiderweb deformation induced by electrostatically charged insects. *Scientific Reports*, 3(2108). 25-48.
- Qin, Z., Compton, B. G., Lewis, J. A., Buehler, M. J. (2015). Structural Optimization Of 3D-printed Synthetic Spider Webs for High Strength. *Nature Communications*, 6(7038), 99-114.
- Regassa, Y., Lemu, H. G., Sirabizuh, B., Rahimeto, S. (2021). Studies on the Geometrical Design of Spider Webs for Reinforced Composite Structures. *Composite Science*, 5(2), 57-58.
- Rhisiart, A., Vollrath, F. (1994). Design features of the orb web of the spider, *Araneus diadematus*. *Behavioral Ecology*, 5(3), 280-287.
- Romer, L., Scheibel, T. (2008). The elaborate structure of spider silk. *Fibrous, Proteins Scheibel T. Austin Landes Bioscience*, 20(8), 121-129.
- Sanderson, S.L., Roberts, E., Lineburg, J., Brooks, H. (2016). Fish Mouths as Engineering Structures for Vortical Cross-Step Filtration. *Nature Communications* 7(11092), 148-175.
- Sears, R., Perrin, W.F., (2009). Blue Whale: *Balaenoptera Musculus*. *Encyclopedia of Marine Mammals*, 8(2), 120-124.
- Sheng, L. X., Liang, Z., Yan, Z., Dian-Guo, X. (2011). *Performance analysis of power line communication network model based on spider web*. 8th International Conference on Power Electronics, Jeju, 953-959.
- Soler, A., Zaera, R. (2016). The secondary frame in spider orb webs: the detail that makes the difference. *Scientific Reports*, 6(31265). 382-406.
- Sürmen, H.K. (2019). Eklemeli İmalat: Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 11-29.
- Tang, N., Zhang, S., You, J., Yin, X., Ding, B. (2023). Leaf Vein-Biomimetic Nanofibrous Membrane with Self-Assembled Nanonet for Surface Filtration of Water Contaminants. *Environmental Science*, 10(2), 1030-1039.

- Tso, I. M. (1998). Isolated Spider Web Stabillmentum Attracts Insects Behaviour. *Paper of Insects in Japan*, 135(3), 311-319.
- Udroiu, R., ve Braga, I. C. (2017). *Polyjet technology applications for rapid tooling*, MATEC Conferences, London, 112-114.
- Vollrath, F., Downes, M., Krackow, S. (1997). Design Variability in Web Geometry of an Orb-Weaving Spider. *Physiology & Behavior*, 62(4), 735-743.
- Vollrath, F. (1999). Biology Of Spider Silk. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24, 81–88.
- Vollrath, F., (2000). Strength and structure of spiders' silks. *Reviews in Molecular Biotechnology*, 74(2), 67-83.
- Vollrath, F., Edmonds D. (2013). Consequences of electrical conductivity. *Orb spider's capture web*, 100(3), 1163–1169.
- Whyte, R., Anderson, G. (2017). A Field Guide to Spiders of Australia. *Csiro Publishing*, 465
- Wong, K. V. ve Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *Mechanical Engineering*, 8, 15-42.
- Xu, C., Feng, R., Song, F., Wang, X.L., Wang, Y.Z. (2018). Desert Beetle-Inspired Superhydrophilic / Superhydrophobic Patterned Cellulose Film with Efficient Water Collection and Antibacterial Performance. *Sustainable Chemical Engineering*, 6(11), 14679–14684.
- Yoon, H. J., Kim, D. H., Seung, W., Khan, U., Kim T. Y., Kim T., Kim S. W. (2019). 3D-printed biomimetic-villus structure with maximized surface area for triboelectric nanogenerator and dust filter. *Nano Energy*, 63, 169-183.
- Yuan, F., Leng, B., Wang, B. Lee, S. V. (2016). Progress in Studying Salt Secretion from the Salt Glands in Recretohalophytes: How Do Plants Secrete Salt. *Front. Plant Physiology*, 7 49-63.
- Yue, O., Wang, X., Liu, X., Hou, M., Zheng M., Wang, Y., Cui, B. (2021). Spider-Web and Ant-Tentacle Doubly Bio-Inspired Multifunctional Self-Powered Electronic Skin with Hierarchical Nanostructure. *Advanced Science*, 8(15), 201-209.
- Zhang, J., Rusinek, H., Chandarana, H., Lee, S. V. (2013). Functional MRI of the kidneys. *Magnificent. Resonation of Imaging*, 37(4), 282-293.
- Zhang, S., Liu, H., Tang, N., Zhou, S., Yu J., Ding B., Kim S. W. (2020). Spider-Web-Inspired PM0.3 Filters Based on Self-Sustained Electrostatic Nanostructured Networks. *Advanced Materials*, 32(49). 58-83.

- Zeil, J., Hemmi, J.M. (2005). The Visual Ecology of Fiddler Crabs. *Journal of Comparative Philosophy*, 192(13) 1–25.
- Zheng, L., Behrooz, M., Li, R., Wang, X., Gordaninejad, F. (2014). Performance of a bio-inspired spider web. *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, 9057(90), 653-674.
- Zhu, Y., Hu, D., Guo, Y., Ding, H., Yang, G. (2022). Bio-inspired Filter Design Based on Vortex Control Mechanism of Parallel Groove Structure. *Bio-Inspired Designs* 20, 338–348.
- Zou, S., Zha, J., Xiao, J., Dong, X., Chen, X.D. (2019). How Eyelashes Can Protect the Eye Through Inhibiting Ocular Water Evaporation: A Chemical Engineering Perspective. *Journal of Rich Society Interface*, 16(2), 93-100.







*Gazili olmak ayrıcalıktır...*