

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AHTAPOTTAN ESİNLENİLEREK BİYOMİMETİK YAPIŞTIRICILARIN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**



DOKTORA TEZİ

Murat EROĞLU

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

ŞUBAT 2022

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AHTAPOTTAN ESİNLENİLEREK BİYOMİMETİK YAPIŞTIRICILARIN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**



DOKTORA TEZİ

**Murat EROĞLU
(171080403)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK

ŞUBAT 2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 171080403 numaralı Doktora Öğrencisi "Murat EROĞLU", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "AHTAPOTTAN ESİNLENİLEREK BİYOMİMETİK YAPIŞTIRICILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY**
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Enver OKTAY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Prof. Dr. Süleyman Can KURNAZ
Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şeyma DUMAN
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 04.02.2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 200D002 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Murat EROĞLU

İmzası :

X X X X

Bu yaşıma kadar hiçbir emeğini esirgemeyen ve beni bugünlere getiren aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK'a,

Çalışmalarında büyük emeği geçen kıymetli dostum Öğr. Gör. İbrahim ŞEN'e,

Çalışmamın birçok aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım Öğr. Gör. Sibel TUNA, Öğr. Gör. Olcay SEVERGÜN ve Öğr. Gör. Demet KIZIL' a,

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgmeden her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Şubat 2022

Murat EROĞLU
(Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.2 Ahtapot Vantuzunun Morfolojisi	5
1.3 Ahtapot Vantuzunun Yapışma Mekanizması.....	6
1.4 Minyatürize Yapılardan Oluşan Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcıların Avantajları	9
1.5 Minyatürize Yapılardan Oluşan Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcıların Yapışma Mekanizmaları	14
1.5.1 Açılı sütunsal içbükey yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması	14
1.5.2 Kubbe benzeri çıkıntılı yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması	17
1.5.3 İçbükey yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması.....	20
1.6 Minyatürize Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcıların Üretim Yöntemleri.....	23
1.6.1 Çözücü yöntemiyle üretim	23
1.6.2 Kısmi doldurma tekniğiyle üretim	24
1.6.3 Kopyalama tekniğiyle üretim.....	27
1.7 Minyatürize Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcıların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	30
1.8 Literatür Özeti	32
2. MALZEME VE YÖNTEM	37
2.1 Minyatürize Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcının Üretiminde Kullanılan Kalıbın Üretimi	37
2.2 Minyatürize Ahtapottan Esinlenen Yapıştırıcıların Üretiminde Kullanılan Elastomerler	42
2.3 Üretilen Yapıştırıcıların Morfolojik Karakterizasyonu	43
2.4 Üretilen Yapıştırıcıların Yapışma Testleri	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	47
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ.....	109

KISALTMALAR

CNC	: Sayısal Kontrollü Bilgisayar
DP	: Dental perfore tipi içbükey
Dİ	: Dental iç tipi içbükey
PD	: PDMS dış tipi içbükey
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PET	: Polietilenteraftalat
PMMA	: Polimetilmetakrilat
Pİ	: PDMS iç tipi içbükey
PS	: Polistiren
PU	: Poliüretan
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	: Ultraviyole

SEMBOLLER

mN	: Mikronewton
μm	: Mikrometre
sn	: Saniye
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
cm	: Santimetre
g	: Gram
cm^2	: Santimetrekare
rpm	: Dakikadaki dönüş sayısı
$^{\circ}\text{C}$: Derece santigrat
kPa	: Kilopascal
MPa	: Megapascal
Dev	: Devir sayısı
dk	: Dakika
K	: Kelvin
cm^3	: Santimetreküp
mm^2	: Milimetrekare

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ahtapottan esinlenen minyatürize yapıştırıcılardaki yapıların özellikleri.	31
Çizelge 2.1 : Dow Corning Slygard 184 PDMS'inin bazı fiziksel özellikleri.	42
Çizelge 2.2 : Elite Double 22 elastomerinin bazı fiziksel özellikleri.	43
Çizelge 3.1 : Üretilen yapıların şematik çizimleri ve isimleri.	48



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Ahtapot vantuzunun görüntüsü ..	6
Şekil 1.2 : Ahtapot vantuzunun şematik görünümü.	6
Şekil 1.3 : Ahtapot vantuzunun yapışma aşamalarının şematik gösterimi.	8
Şekil 1.4 : Asetabulumun a) içinin boş küre olduğu ve b) içerisinde kubbe benzeri çıkıntının olduğu vantuz modellerinin şematik gösterimleri ..	8
Şekil 1.5 : a) Ticari olarak temin edilebilen yapay büyük ölçekli vantuz. b) Farklı ebatlarda büyük ölçekli vantuzlu ürünler.	9
Şekil 1.6 : Sualtında ahtaptan esinlenen minyatürize bir yapıştırıcı kullanılarak silikon plakanın taşınmasını ve yapıştırıcının ayrılmasını gösteren görüntüler .	10
Şekil 1.7 : a) Üretilen yapıştırıcıların 5 x 5 mm ² lik alanındaki mikroyapıların taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve b) pirinç bloğun sualtında tutulması ve bırakılmasından oluşan döngüye karşılık gelen görüntüler.	11
Şekil 1.8 : a) İçbükey geometride yapılardan oluşan yapıştırıcı ve bu yapıştırıcının b) insan cildine yapışmasını gösteren fotoğraflar.	12
Şekil 1.9 : Üretilen minyatürize vantuzlardan oluşan yapıştırıcının şematik görünümü ve tek bir vantuzun yapışma mekanizması ..	13
Şekil 1.10 : Basınç altında iki dairesel disk arasında sınırlandırılmış sıvı filmin kalınlık azalması.	14
Şekil 1.11 : a) Üretilen mikroyapının şematik görüntüsü; burada H, yükseklik ve R, kolun yarıçapı, T kalınlık, LR kenarın yansıtılmış genişliğidir ve B, kenar açısıdır, b) Tek bir mikroyapının taramalı elektron görüntüsü, c) Mikroyapının sualtı ortamda ayrılmasını gösteren görüntü dizisi .	16
Şekil 1.12 : a) Yavaş hızda (1 µm/s) ve b) hızlı hızda (10 µm/s) geri çekilen mikroyapılar için kontak resimleri ..	17
Şekil 1.13 : Sualtı koşullarda kubbe benzeri yapılara sahip yapıştırıcıların yapışmasının altında yatan mekanizmalar .	19
Şekil 1.14 : Islak yüzey üzerinde bir mikro içbükey yapının ayrıntılı açılma (i) ve geri çekilme (ii) işlemleri sırasındaki şematik ve optik mikroskop görüntüleri	21
Şekil 1.15 : a) İçbükey şekildeki vantuzların eğri uzunluğunu tahmin etmeye yarayan çizim. b) İki paralel yüzey arasındaki sıvı köprü modelinden kaynaklanan kılcal destekli yapışmanın şematik görüntüsü.	21
Şekil 1.16 : Islak yüzey üzerinde birden çok mikro içbükey yapının açılma ve geri çekilme (ii) işlemleri sırasındaki optik mikroskop görüntüleri ..	22
Şekil 1.17 : UV ile kürlenebilen reçinenin PS nanoküre içeren tabakaya uygulanmasının ve ardından nanoboşluklu yapıları üretmek için reçine yüzeyinde aşındırma etkisinin şematik gösterimi .	24
Şekil 1.18 : Çözücüye maruz bırakılmış UV reçine yüzeylerindeki nanoboşlukların (a) kesit ve (b) üstten görünüşlerinin SEM görüntüleri ..	24

Şekil 1.19 : a) Kısmi doldurma tekniği ile perfore yapıların ve bu perfore yapılardan kopyalama yoluyla yapıştırıcıların üretimi, b) Kısmi doldurma tekniğinin detaylı olarak şematik gösterimi, c) Üretilen yapıştırıcının görüntüsü (yaklaşık 3 cm × 3 cm), d) Üretilen yapıştırıcının SEM görüntüsü.	25
Şekil 1.20 : a) Kısmi doldurma tekniği ile içbükey geometride yapıların üretimi, b) Kısmi doldurma tekniğinin detaylı olarak şematik gösterimi, c) Üretilen yapıştırıcının görüntüsü (yaklaşık 3 cm × 3 cm), d) Üretilen yapıştırıcının SEM görüntüsü.	27
Şekil 1.21 : Mikro vantuz dizilerinden oluşan yapışkan plakanın şematik çizimi. ...	28
Şekil 1.22 : Açılı içbükey geometride mikroyapı dizisinin üretim süreci	28
Şekil 1.23 : Üretilen mikroyapı dizisinin tasarım parametreleri ve SEM görüntüleri (Nguyen & Shimoyama, 2019).	29
Şekil 1.24 : (a) (I) iki fotonlu litografi ve (II–IV) kopya kalıplama ile üretim sürecinin gösterimi. (V) Mikro yapıların boyutları. (b) Üretilmiş mikro yapının taramalı elektron mikroskop görüntüsü.	30
Şekil 2.1 : Kare ve altıgen dizilimde deliklerden oluşan kalıp tasarımları.	38
Şekil 2.2 : (a) Delik desenli PMMA kalıbın CNC işleme sürecinin fotoğrafları, (b) CNC işleme ile kalıp üretiminin şematik gösterimi, (c) Bilgisayar destekli tasarım programında tasarlanmış kalıbın çizimi, (d) Üretilen PMMA kalıbın fotoğrafı.	39
Şekil 2.3 : İçbükey şekilli geometrideki elastomerik yapıların üretim aşamalarının şematik gösterimleri.	41
Şekil 2.4 : Fotoğraflarda basma testi aparatlarının bağlı olduğu mekanik test cihazıyla yapılan detaylı üretim prosesi gösterilmektedir. a) Hazırlanan kalıp üstte bulunan basma testi aparatına sabitlendikten sonra elastomer PET filmin üzerine dökülmesi b) Elastomerle kaplanmış PET filmin preslenmesi (~100 kPa). c) Kürleştirme işleminden sonra polimer yapılardan oluşan yapıştırıcının kalıptan ayrılması.	41
Şekil 2.5 : Mekanik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilen yapışma testi.	45
Şekil 2.6 : Mekanik test cihazında numunenin altlığa yapıştırılmasının ve altlıktan ayrılmasının fotoğrafları.	45
Şekil 3.1 : İçbükey şekilli PDMS elastomer yapılara (~ 7 cm x 7 cm) sahip ahtaptan esinlenen yapıştırıcının fotoğrafı. a) İmal edilmiş yapıştırıcının dış bölgesindeki yapıların ve b) iç bölgesindeki yapıların şematik gösterimi.	49
Şekil 3.2 : İçbükey şekilli dental elastomer yapılara (~ 7 cm x 7 cm) sahip ahtaptan esinlenen yapıştırıcının fotoğrafı. a) İmal edilmiş yapıştırıcının dış bölgesindeki yapıların ve b) iç bölgesindeki yapıların şematik gösterimi.	50
Şekil 3.3 : PDMS dış tipi iç bükey yapıların (PD) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.	51
Şekil 3.4 : PDMS iç tipi iç bükey yapıların (Pİ) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.	51
Şekil 3.5 : Dental perfore tipi iç bükey yapıların (DP) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.	52
Şekil 3.6 : Dental iç tipi iç bükey yapıların (Dİ) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.	52
Şekil 3.7 : Üretilen yapıştırıcıların cam yüzey üzerinde ve kuru, sualtı, asidik, bazik ve silikon yağlı ortamlarda yapışma kuvvetleri.	54
Şekil 3.8 : Üretilen yapıştırıcıların vytaflex 20 yüzey üzerinde ve kuru, sualtı, asidik, bazik ve silikon yağlı ortamlarda yapışma kuvvetleri.	54

Şekil 3.9 : Üretilen numunelerin cam yüzey üzerinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.	56
Şekil 3.9 (devam) : Üretilen numunelerin cam yüzeyi üzerinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri..	57
Şekil 3.10 : Düz PDMS elastomerin ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.	59
Şekil 3.11 : Düz PDMS elastomerin ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.	60
Şekil 3.12 : Düz Dental elastomerin ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.	61
Şekil 3.13 : Düz Dental elastomerin ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.	62
Şekil 3.14 : PD yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	64
Şekil 3.15 : PD yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.	65
Şekil 3.16 : PD yapının ön yük altında Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	66
Şekil 3.17 : PD yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.	67
Şekil 3.18 : Dİ yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	68
Şekil 3.19 : Dİ yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskop görüntüleri.	69
Şekil 3.20 : Dİ yapının ön yük altında Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	70
Şekil 3.21 : Dİ yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.	71
Şekil 3.22 : Pİ yapının ön yük altında ve cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	72
Şekil 3.23 : Pİ yapının ön yük altında ve cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	73
Şekil 3.24 : DP yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.	75
Şekil 3.25 : DP yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.	76

Şekil 3.26 : DP yapının ön yük altında ve Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.....	77
Şekil 3.27 : DP yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.	78
Şekil 3.28 : Pİ yapının ön yük altında ve Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 3.29 : Pİ yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri..	80
Şekil 3.30 : a) Üç boyutlu eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ABS kalıbın ve b) bu kalıptan kopyalanan PDMS esaslı elastomerin stereo mikroskop görüntüleri. .	82
Şekil 3.31 : a) CNC yöntemiyle üretilen 0,85 mm çapında deliklerden oluşan PMMA kalıbın ve b) bu kalıptan kopyalanan PDMS esaslı elastomerin stereo mikroskop görüntüleri.	82
Şekil 3.32 : PDMS iç tipi içbükey (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarında yapışma kuvvetleri.	85
Şekil 3.33 : PDMS iç tipi içbükey (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.....	86
Şekil 3.34 : PDMS iç tipi içbükey yapılı (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.....	87
Şekil 3.35 : PDMS iç tipi içbükey yapılı (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.	88
Şekil 3.36 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri.....	89
Şekil 3.37 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.....	90
Şekil 3.38 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzeylerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.	91
Şekil 3.39 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.	92
Şekil 3.40 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) basma sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri.....	93
Şekil 3.41 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.....	94
Şekil 3.42 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.....	95

- Şekil 3.43** : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri. 96
- Şekil 3.44** : PDMS dış tipi içbükey yapılı (PD) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri..... 97
- Şekil 3.45** : PDMS dış tipi içbükey yapıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri. 98
- Şekil 3.46** : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri..... 99
- Şekil 3.47** : PDMS dış tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri. 100
- Şekil 3.48** : a) Dental iç tipi içbükey yapıların (Dİ), b) PDMS iç tipi içbükey yapıların (Pİ), c) PDMS dış tipi içbükey yapıların (PD) cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarında 100 çevrime kadar yapışma kuvvetleri. 101

AHTAPOTTAN ESİNLENİLEREK BİYOMİMETİK YAPIŞTIRICILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ahtapottan esinlenen minyatürize boyutlarda vantuz benzeri yapılardan oluşan elastomer esaslı ve ıslak ortamda tekrarlı olarak yapışabilen yapıştırıcıların CNC işleme tekniği kullanılarak pratik bir şekilde üretilmesi hedeflenmiştir.

CNC işleme tekniğiyle delik desenli kalıp üretimi gerçekleştirilmiş olup, üretilen kalıp kullanılarak kısmi doldurma tekniğiyle PDMS ve dental esaslı elastomerlerden oluşan vantuz benzeri yapılara sahip yapıştırıcılar elde edilmiştir.

Üretilen yapıştırıcıların morfolojik ve kesit görüntüleri stereo mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Üretilen yapıştırıcıların yapışma testleri mekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapışma testleri sert ve deforme edilebilir altlıkların yüzeyinde kuru ve farklı türdeki ıslak ortamlarda uygulanmıştır. Üretilen yapıştırıcıların ıslak ortam yapışma testleri sistematik bir şekilde değişen önyük hızlarında, basma sürelerinde, geri çekme hızlarında ve önyüklerde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yapıştırıcıların yapıştırıldıkları yüzeyle arasında oluşan temas alanı görüntüleri optik mikroskop ile elde edilmiştir.

Ahtapottan ilham alınarak üretilen PDMS ve dental elastomer esaslı yapıştırıcılar yaklaşık 7 x 7 cm büyüklüğündedir. Dört farklı geometride yapı üretilmiş olup, bu yapıların isimleri sırasıyla PDMS dış tipi içbükey (PD), PDMS iç tipi içbükey (Pİ), dental perforé tipi içbükey (DP) ve dental iç tipi içbükey (Dİ)' dir.

Su altı ortamda en yüksek yapışma mukavemeti hem sert yüzey üzerinde (~ 14 kPa) hem de deforme edilebilir yüzey üzerinde (~ 8.5 kPa) Dİ tipi yapılardan oluşan yapıştırıcı tarafından sergilenmiştir.

Islak ortamda gerçekleştirilen sistematik yapışma testleri sonucunda, üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinin artan geri çekme hızlarıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinin değiştirilebilir olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, üretilen yapıştırıcılar düz nesnelerin sualtında bir yerden başka bir yere taşınması için yumuşak robotik tutucu olarak kullanılabilirler.

100 çevrime kadar gerçekleştirilen yapışma testleri sonucunda, üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinde kayda değer bir azalma olmaksızın performanslarını korudukları gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyomimetik, CNC işleme, ahtapottan esinlenen yapıştırıcı, değiştirilebilir yapışma, kısmi doldurma tekniği

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF OCTOPUS-INSPIRED BIOMIMETIC ADHESIVES

SUMMARY

In this thesis work, the aim was to produce an adhesive that exhibits reversible adhesion in underwater consisting of miniaturized octopus-inspired elastomer based sucker like structures by CNC machining.

Hole-patterned mold was produced with CNC machining technique. The adhesives consisting of sucker like structures consisting of PDMS and dental-based elastomers were obtained by partial-filling technique using the hole-patterned mold.

Morphological and cross-sectional images of the adhesives were examined using a stereo microscope. Adhesion tests of the adhesives were carried out with a mechanical test device. Adhesion tests were performed on the surface of hard and deformable substrates in dry and different types of wet environments. In adhesion tests, the adhesives were systematically performed with different preload velocities, preloads, pressing times and retraction velocities to substrates in wet conditions. The images of the contact area between the adhesives and the surface were obtained with an optical microscope.

The octopus-inspired PDMS and dental elastomer based adhesives are approximately 7 x 7 cm in size. Structures in four different geometries were produced, and the names of these structures are PDMS outer type concave (PD), PDMS inner type concave (PI), dental perforated concave (DP) and dental inner type concave (DI).

The highest adhesion strength in underwater conditions was exhibited by the adhesive consisting of DI-type structures both on the hard surface (~14 kPa) and on the deformable surface (~8.5 kPa).

The findings revealed that the adhesion strength of the adhesives increased when the preload increased and also the adhesion strength is independent of the preload velocity and pressing time in wet conditions. Moreover, the adhesion strength further increased with increasing retraction velocities, which indicates that the adhesion strength can be switched by altering the velocities for the adhesives. Therefore, the adhesives can be used as soft robotic grippers to transport flat objects in wet conditions from one place to another.

The adhesives maintained averaged adhesion strength without any notable reduction in adhesion capability even after more than 100 cycles of attachment and detachment.

Keywords: Biomimetic, CNC machining, octopus-inspired adhesive, switchable adhesion, partial filling technique

1. GİRİŞ

Biyolojik yapıştırıcılar, organizmaların veya hayvanların geçici veya kalıcı olarak yüzeylere bağlanmasını sağlarlar. Bunlardan esinlenerek geliştirilen “biyomimetik yapıştırıcılar” birçok mühendislik uygulamasında kullanım alanı bulmuştur. Örneğin, midye, çok güçlü bir geri dönüşümsüz yapışma özelliğine sahiptir (Yu vd., 1999; Yu & Deming, 1998; Zhao & Waite, 2006). Salgıladıkları kimyasal madde sayesinde kendilerini resiflere veya gemilerin gövdesine bağlarlar ve sadece kaba kuvvetle kaldırılabirler. Sümüklü böcek veya ağaç kurbağası gibi diğer hayvanlarda yapışma yeteneklerini sürekli üretilen salgılara borçludurlar (D. K. Barnes, 2002; W. Barnes, 1999; Beutel & Gorb, 2001; Emerson & Diehl, 1980; Ernst, 1973; Gorb & Scherge, 2000; Green, 1981; HANNA vd., 1991; Nachtigall, 2013; Scherge vd., 2001). Bunlardan esinlenerek üretilen yapıştırıcılar plastik, cam, metal ve biyolojik materyaller dahil olmak üzere birçok yüzey türüne hücre ve dokuların eklenmesinde kullanılmaktadır (Bandara vd., 2013). Doğada bulunan diğer bir yapıştırma sistemi “kuru” yapışmadır. Çeşitli böcekler, örümcekler ve kertenkeleler, van der Waals kuvvetlerinin etkin olduğu kılı yapıştırma sistemleri geliştirmiştir (Autumn vd., 2000, 2002; Autumn & Peattie, 2002; Huber vd., 2005). Van der Waals kuvvetlerinin fiziksel doğası gereği, bu hayvanlar neredeyse yüzey kimyasından veya pürüzlülüğünden bağımsız olarak hemen hemen her türlü yüzeye yapışabilirler. Salgıların yokluğu, yapıştıkları yüzeylerde neredeyse hiçbir kirlilik bırakmadan ayrılabilen “temiz” bir yapışma sistemine neden olur. Biyomimetik kuru yapıştırıcılar sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle günlük ihtiyaçlarda dahil olmak üzere uzay ve havacılık, yarıiletken, biyomedikal ve robotik gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır (Eisenhaure & Kim, 2017). Ancak, bu yapıştırıcılar, kuru yüzeyler gibi ıslak yüzeylere her zaman yapışamazlar. Doğadaki bazı organizmalar bu problemi ıslak yapıştırıcılar kullanarak çözer. Ahtapot en iyi örneklerden biri olup, vantuzlarını kullanarak emme yoluyla kendini hızlı bir şekilde hareket ettirmesine izin verecek şekilde ıslak yüzeylere bağlayabilir. Son zamanlarda, ahtapot vantuzları kuru, ıslak ve

pürüzlü yüzeylere karşı güçlü, tekrarlı ve temiz yapışma performansları nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Kier & Smith, 1990, 2002).

Ahtapotlarda yapışma, vantuzların temas ettikleri yüzeye aralarında sızdırmaz bir conta oluşması ve daha sonra vantuzun iç bölgesinde basıncın negatife düşmesiyle vakum kuvvetinin meydana gelmesi yoluyla hedef yüzeyin materyalinden bağımsız olarak bu yüzeye tutunmasıyla gerçekleşir (Autumn vd., 2006). Ticari ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaları için yapışma kabiliyeti elde etmek üzere ahtapot vantuzlarının yapışma mekanizmasından esinlenerek birçok büyük ölçekli yapay vantuz üretilmiştir (Baik vd., 2017; Bandara vd., 2013; B. N. J. Persson, 2007). Bununla birlikte, literatürde bildirilen ahtaptan esinlenen yapıştırıcı sistemleri, büyük ölçekli yapay vantuzların içindeki basıncı azaltmak için yapıştırma işlemi sırasında ek bir vakum sistemi ve güç kaynakları gerektirir (Lee vd., 2016; Tramacere, Pugno, vd., 2015; Tramacere vd., 2013). Ayrıca, bu tür yapay vantuzlara yapışma kuvvetinin kontrol edilmesi vasıtasıyla sualtında değiştirilebilirlik özelliği kazandırmada yaşanan sıkıntılar günümüzde de devam etmektedir. Büyük ölçekli yapay vantuzların doğasında bulunan bir başka sorun da bunların yalnızca düz şekilli bir hedef yüzey üzerinde kullanılabilmesidir. Bununla birlikte, çoğu insan vücudu dokusunda ve yarasında milimetre/mikrometre ölçeğinde tümsekler, eğriler ve köşeler bulunur (Chen & Yang, 2017). Bu sorunlara ek olarak, ıslak bir ortamda, sıvı yağlama nedeniyle büyük ölçekli yapay vantuzlar ile ıslak yüzey arasındaki sürtünme büyük ölçüde azalır ve bu da vantuzların kesme yönünde çekme kuvveti altında kaymasına neden olur (Tramacere, Follador, vd., 2015).

Büyük ölçekli yapay vantuzlarda görülen sorunların çözümü için minyatürize vantuzlara sahip yapay yapıştırıcılar geliştirilmiştir. Örneğin, minyatürize vantuzlardan oluşan yapıştırıcıların kesme yönünde uygulanan kuvvet karşısında kaymaya karşı gösterdikleri direnç Vinh ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada kanıtlanmıştır. Bu etkinin kanıtlanması için mikroboyutlarda vantuz benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcı geliştirmişlerdir. Aynı presleme basıncı altında üretilen yapıların boyutunu küçültürük, vantuz dizisi ile ıslak bir yüzey arasında hapsedilen sıvı filmin kalınlığının daha hızlı azaldığını göstermişlerdir. Sonuç olarak, temas bölgesindeki sıvı film incelmış ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısı artmıştır. Bu sonuç, yapıştırıcı üzerindeki vantuz boyutunun minyatürize edilmesiyle kayma yönünde yapışma kuvvetinin arttığını göstermektedir.

Büyük ölçekli vantuzların aksine minyatürize boyutlarda vantuz benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcılar yapışma işlemi için ek bir vakum sistemi veya güç kaynağı gerektirmezler. Yapılan çalışmalarda minyatürize vantuzlardan oluşan yapıştırıcıların dik yönde yaklaşık olarak insan parmağının hafifçe bastırmasına karşılık gelen bir yükü hedef yüzeye bastırılmasıyla yüksek yapışma kuvvetlerinin elde edildiği gözlenmiştir. Örneğin, Baik ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada kubbe benzeri çıkıntılı vantuzlardan oluşan minyatürize yapıştırıcı kuru ve sualtı ortamda pürüzsüz silikon yüzey üzerinde 50-100 kPa aralığında yapışma kuvveti sergilemiştir. Son yıllarda yapılan bir diğer çalışmada, açılı içbükey vantuzlardan oluşan minyatürize yapıştırıcının kuru ve sualtı ortamda cam yüzey üzerinde 1 Mpa değerinde oldukça yüksek bir yapışma kuvveti ürettiği bildirilmiştir.

Ayrıca, minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcılar düz yüzeylerin yanısıra milimetre/mikrometre ölçeğinde tümsekler, eğriler ve köşeler bulunan çoğu insan vücudu dokusunda ve yarasında başarılı bir şekilde yapışma göstermişlerdir. Baik ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada ahtapottan esinlenen minyatürize yapıştırıcıların cilt veya yara üzerine uygulandığında faydalı olabileceğini bildirmişlerdir. Pürüzlü yapıdaki insan cildi üzerindeki yapışmanın simüle edilmesi amacıyla antiseptik bir çözeltiliye emdirilmiş yapıştırıcı mikro ölçekli pürüzlülüklerle sahip olan domuz derisi üzerine normal yönde bastırılmışlardır. Daha sonra, bu yapıştırıcının normal ve sıyırma yönlerinde yapışma kuvvetleri ölçülmüştür. Belirtilen yapıştırıcı normal yönde çekildiğinde 30 kPa değerinde güçlü bir yapışma kuvveti sergilemiş olup, sıyırma yönünde çekildiğinde çok düşük bir kuvvetle (0.5 kPa) sökülebilmektedir. Ahtapottan esinlenen antiseptik emdirilmiş yapıştırıcılar insan cildi benzeri bir yüzeye güçlü yapışmaları ve bu yüzeyden kolay sökülebilmeleri nedeniyle yara üzerinde kullanılabilirliği düşünülmekte olup, bu nedenle kısmen yara iyileşmesine yardımcı olabileceklerdir.

Bunlara ek olarak, literatürde ahtapottan esinlenen yapıştırıcıların sualtı ortamda değiştirilebilirlik özelliğe sahip olduğunu gösteren bir çalışmada bulunmaktadır. Bu çalışmada, Wang ve diğ. (2020) yumuşak robotik uygulamalarda kullanılmak üzere sualtı koşullarda değiştirilebilir yapışma için mikron mertebesinde vantuz benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcıların potansiyelini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde, ürettikleri minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcıların geri çekme hızlarını değiştirdiklerinde yapışma kuvvetinin değiştiğini ve bu sayede değiştirilebilirlik

özelliği kazandıklarını raporlamışlardır. Bu nedenle, bu tür yapıştırıcılar katı nesnelere sualtında taşınması için yüksek potansiyel sergilerler.

Literatürde, minyatürize ahtapottan esinlenen yapıştırıcıların üretim prosesleri üç gruba ayrılmaktadır. Bu prosesler sırasıyla çözücü, kısmi doldurma ve kopyalama tekniği olarak adlandırılmaktadırlar. Litografik işlemler dizisinden oluşan çözücü metodu, polistiren (PS) nanoküreciklerden oluşan bir tabaka üzerinde UV reçinenin kaplanmasına ve akabinde bu reçinenin çeşitli çözücülerle işleme tabi tutularak vakum etkisiyle yapışma sağlayabilen nanoboşlukların üretimine dayanır. Kısmi doldurma tekniği, çözücü metodundan farklı olarak fotolitografik bir teknik kullanılarak delikli bir kalıp üretimini ve üretilen bu kalıbın belli bir yük vasıtasıyla bir yüzey üzerine yayılmış durumdaki sıvı fazdaki elastomere bastırılması yoluyla kalıp deliğine elastomerin kısmi olarak doldurularak vantuz benzeri yapıların geliştirilmesi süreçlerini kapsamaktadır. Kopyalama tekniğinde de kısmi doldurma tekniğinde olduğu gibi fotolitografik bir yöntemle kalıp üretimi gerçekleştirilir. Fakat, bu teknikte farklı olarak kalıp üzerinde delikler yerine üretilecek vantuz benzeri yapının şeklinde boşluklar oluşturulur. İstenen şekilde boşluklu kalıp üretiminden sonra, sıvı formdaki elastomer ilgili boşluklara dökülür ve akabinde kürleştikten sonra kalıptan ayrılarak vantuz benzeri yapışma özelliğine sahip yapılar kopyalanır.

Bilgimiz dahilinde, minyatürize boyutlarda ahtapot vantuzu benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcıların üretimi için fotolitografik bir proses sonucu elastomerik malzemeye doğrudan yapışma özelliği kazandırılmış ya da fotolitografi yöntemiyle kalıp üretilip, bu kalıp vasıtasıyla vantuz benzeri yapılar geliştirilmiştir. Litografik teknikler sayesinde yüksek hassasiyette üretim yapılabilir. Bununla birlikte, bu teknikler çok aşamalı, zaman alıcı, pahalı ve çevre dostu olmayan prosesler ve malzemeler gerektirir. Bu yüzden, uygun maliyetli, kolay ve seri üretilebilir bir yöntemle minyatürize yapılardan oluşan ahtapottan esinlenen bir yapıştırıcı geliştirmek oldukça cazip hale gelmiştir.

CNC (Sayısal kontrollü bilgisayar) işleme belirli bir dizilime ve boyuta sahip deliklerin belirli bir malzeme üzerine işlenmesinde oldukça hızlı bir tekniktir. Ayrıca, bu teknik doğrudan işleme prosesi olması sebebiyle, çevre dostu olmayan (geliştirici, asidik sıvılar ve fotorezist ör.) ve yüksek maliyetli ekipmanlar ve temiz oda gibi sofistike ortam koşulları gerektirmemektedir. Daha da önemlisi, bu teknik tam olarak otomatiktir ve otomotiv, uçak ve gemi sanayileri başta olmak üzere

birçok sektörde endüstriyel boyutlarda parça ve kalıp üretimi için yaygın olarak tercih edilmektedir. Her ne kadar hassasiyet litografik tekniklerden daha düşük olsa da, son zamanlarda talaşlı işlemenin hassasiyeti artmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

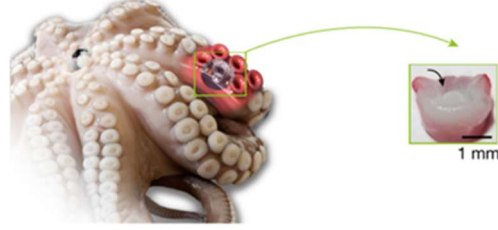
Bu tez çalışmasının amacı, ahtapottan esinlenen minyatürize boyutlarda vantuz benzeri yapılardan oluşan ve sualtında tekrarlı olarak yapışabilen elastomer esaslı yapıştırıcıları CNC işleme tekniğini kullanarak üretmektir. Bu kapsamda, ilk olarak CNC işleme yöntemiyle polimetilmetakrilat (PMMA) malzemeden oluşan plaka üzerine belli bir dizilimde ve boyutlarda delikler işlenmiştir. Daha sonra, işlenen delik desenli plaka kullanılarak iki farklı elastomerik polimere kısmi doldurma tekniğiyle vantuz benzeri geometriler kazandırılmaya çalışılmıştır. Elastomer olarak polidimetilsiloksan (PDMS) ve dental uygulamalarda aktif olarak kullanılan bir polimer (Elite Double 20) kullanılmıştır. Üretilen yapıştırıcıların kuru ve sualtı ortamlarda yapışma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda;

- 1) CNC işleme yöntemiyle geliştirilen kalıplar kullanılarak üretilen ahtapottan esinlenen yapıştırıcıların yapışma özellikleri,
- 2) PDMS ve dental esaslı elastomerler kullanılarak geliştirilen ahtapottan esinlenen yapıştırıcıların yapışma özellikleri arasındaki farklar belirlenmiştir.

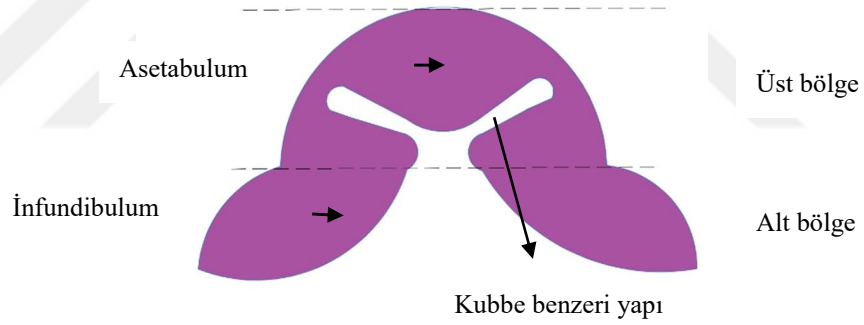
1.2 Ahtapot Vantuzunun Morfolojisi

Ahtapotlar, yüzeylere gövdelerini sabitlemek, nesnelere tutmak ve manipüle etmek gibi çok çeşitli işlevleri (Packard vd., 1988) gerçekleştirmek için vantuzlarını kullanırlar (Kuba vd., 2006). Şekil 1.1, bir ahtapotun kolları üzerindeki vantuz kümelerini göstermektedir. Vantuzlar aslında bir tür kassal hidrostat olup (Kier & Smith, 1990, 1985), dış kaslar vasıtasıyla kollara bağlanan kas yapılarının üç boyutlu bir dizide düzenlenmesiyle meydana gelirler. Kasların içerisinde bulunan fiberli yapılar vantuz iskelet benzeri destek ve hareket için kuvvet sağlar (Kier & Smith, 1990). Vantuzun açıkta kalan disk benzeri bölümü (alt kısım) infundibulum olarak adlandırılırken kubbeli yapıdan oluşan bölgenin dahil olduğu üst kısım ise asetabulum olarak adlandırılır. Hem iç hem de dış yüzeyde ince bir bağ dokusu tabakası tüm vantuzu kapsamaktadır. Asetabulum bölgesi bir dizi çapraz bağ dokusu

tabakasından oluşur. İfundibulum, derin kıvrımlı ve gevşek bir epitel ile çevrelenmiş olup (Kier & Smith, 2002), dış yüzeyi kitin tabakasıyla kaplıdır (Packard vd., 1988). Kitin tabaka bir dizi radyal oluk ve çıkıntıya sahiptir. Oluklu bölgeler dış adı verilen mikrometre mertebesindeki yapılardan meydana gelir. Şekil 1.2’de ahtapot vantuzunun morfolojik yapısı şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 1.1 : Ahtapot vantuzunun görüntüsü (Baik vd., 2017).



Şekil 1.2 : Ahtapot vantuzunun şematik görünümü.

1.3 Ahtapot Vantuzunun Yapışma Mekanizması

Literatürde anlatıldığı gibi, morfolojik incelemeler ve ultrasonografik kayıt sonuçlarına göre ahtapot vantuzunun sızdırmazlık ve vakumlama yoluyla yapıştığı bilinmektedir (Şekil 1.3). Asetabulum ve infundibulum bölümleri arasındaki boşluğun kubbe benzeri çıkıntı sayesinde kapatılmasıyla infundibulum kısmı tamamen düzleşir (Şekil 1.3i) ve daha sonra vantuz konfigürasyonunun korunması yoluyla da yapışma gerçekleşir (Şekil 1.3ii-iii).

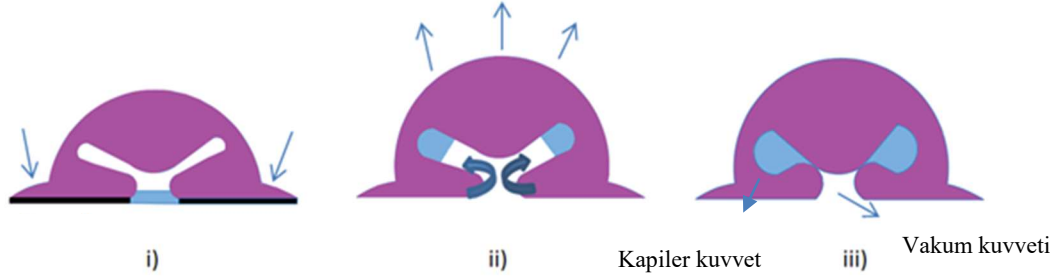
Kier ve Smith'in (Kier & Smith, 2002) modelinde iddia edildiği gibi, yapışma sürecinin ilk aşamasında esnek yapıda olan infundibulum, şeklini yüzeye bağlı olarak değiştirebilir ve böylece suyun içeri girmesini önleyen sızdırmaz bir conta gibi davranabilir. Kassal hidrostat sisteminde hacminin sabit kalması gerektiği için yapışma kuvvetini en üst düzeye çıkarmak istendiğinde infundibular radyal kaslar kasılarak yapışma yüzeyini arttırırken infundibulumun kalınlığını azaltır (Şekil 1.3i).

Bu ilk aşamada, vantuzun içindeki suyun dışarıdaki sudan izole edilmesine rağmen, basınç farkı yoktur. Kier ve Smith [7,8] tarafından açıklandığı gibi sızdırmazlığın oluşturulmasından sonra asetabular kasların kasılması sebebiyle sular vantuzun içerisinde gerdirilir (Şekil 1.3ii). Su yüksek bulk modülüne sahip olduğu için genleşmeye karşı dirençlidir ve bu yüzden ortamdaki basınç azaltılarak gerilim dengelenmeye çalışılır. Sonuç olarak, infundibulum-yüzey arayüzeyinde su azaltılır ve vantuzun yapışması gerçekleşir. Buna ek olarak ultrason kayıtları, yapışma sırasında kubbe benzeri çıkıntının vantuzun iç duvarlarıyla temas halinde olduğunu ve çıkıntı etrafındaki boşlukta girdap oluşturulduğunu göstermektedir (Şekil 1.3ii).

Meridyenel kaslar, asetabular bölgenin üst kısmından aşağıya doğru uzadıkları için kasıldıklarında kubbe benzeri çıkıntının iç duvarlara temas etmesini sağlayarak iki bölge arasındaki bağlantının kesilmesine sebep olur. Bu aşamada, birbirinden ayrılmış iki adet yalıtımlı su bölmesi oluşturulur: Birincisi asetabular bölümün içerisinde, diğeri ise infundibulumun iç bölgesinde bulunur. Ayrılma gerçekleştiğinde asetabular radyal kasların hala büzölmüş olduğu ve basınçların iki bölmede eşit ve hala harici basınçtan düşük olduğu varsayılmaktadır. Yapışma sürecinin son aşamasında (Şekil 1.3iii), asetabular kaslar büzüşmeyi durdurmaktadır. Bu nedenle, asetabular bölgedeki basıncın arttığını ancak aradaki bölgenin kapanması sebebiyle infundibular bölgede basıncın değişmediği bilinmektedir. Bunun ışığında, kubbe benzeri bölge, infundibular bölmedeki suyun kohezyon kuvveti nedeniyle vantuzun iç duvarlarının üst kısmıyla teması korur.

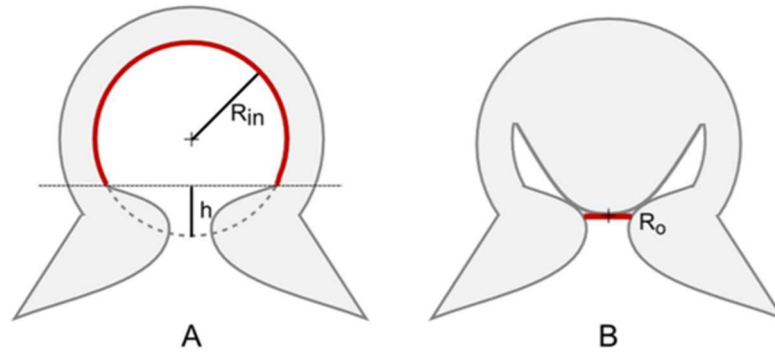
Bu aşamada kaslarda kasılma gerçekleşmez. Serbest konumda geri dönmeye meyilli olan asetabular dokuların elastik kuvveti yukarı bölgede oluşan kohezyon kuvvetini dengeler. Bu olay suyun arayüzünde oluşan vakumu korur (Şekil 1.3iii). Bu yüzden, yapışma işleminin başlangıcında suyu infundibular bölmenin içinden çıkarmak ve vantuzun iç duvarları ile kubbe benzeri çıkıntının arasındaki teması başlatmak için radyal kaslar etkin olarak çalışır. Bu nedenle, kubbe benzeri yapının elastikliği uzun

süre boyunca vakum etkisinin kaybolmasını engeller (Tramacere vd., 2013, 2011). Yapışma sürecine dahil olan kuvvetlerin tahmin edilmesiyle geliştirilen model daha da desteklenmiştir.



Şekil 1.3 : Ahtapot vantuzunun yapışma aşamalarının şematik gösterimi.

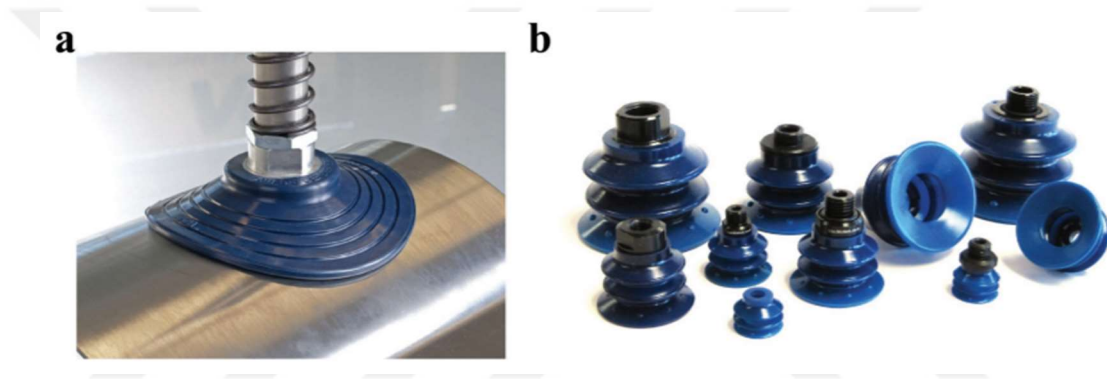
Asetabulum içi boş küresel bir yapı olarak düşünüldüğünde, vakum etkisini sağlamaktan sorumlu kasların etki yüzeyi (asetabular radyal kaslar) $3\pi R^2$ in değerine eşittir (Şekil 1.4A). Bunun yerine, kubbe benzeri çıkıntının olduğu modelde etki yüzeyi bu çıkıntının yarıçapıdır (Şekil 1.4B). Basıncın birim alan başına düşen kuvvet olduğu göz önünde bulundurulduğunda, etki yüzeyi azalır aynı vakumlama basıncını elde etmek için gereken kuvvet de azalır. Örneğin, boş küresel modelde vakum etkisi oluşturmak için gerekli kuvvet kubbe benzeri yapının olduğu modelde gerekli kuvvetin yaklaşık olarak 12 katıdır (Tramacere vd., 2013).



Şekil 1.4 : Asetabulumun **a)** içinin boş küre olduğu ve **b)** içerisinde kubbe benzeri çıkıntının olduğu vantuz modellerinin şematik gösterimleri (Tramacere vd., 2013).

1.4 Minyatürize Yapılardan Oluşan Ahtapottan Esinlenilen Yapıştırıcıların Avantajları

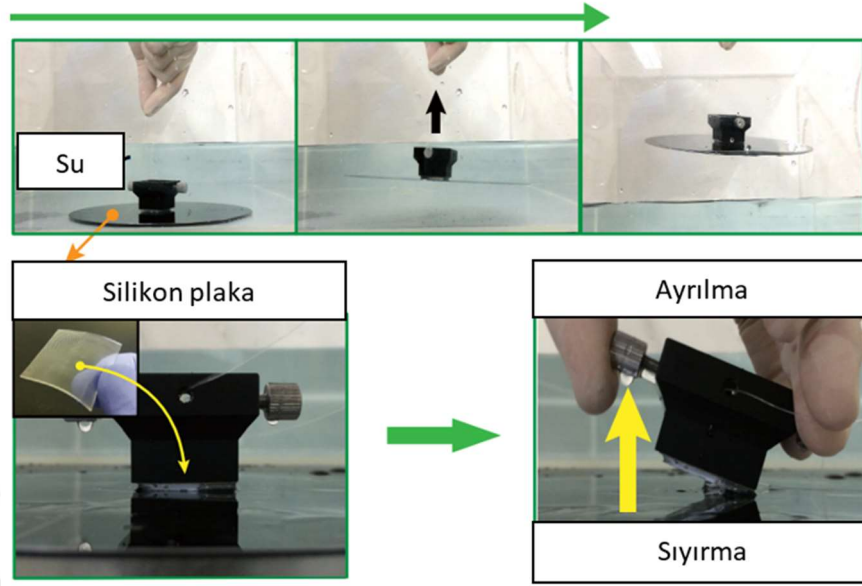
Ahtapot vantuzlarının yapışma mekanizmasından esinlenerek, bir dizi ticari ve endüstriyel uygulama için büyük ölçekli yapay vantuzlar geliştirilmiştir (Hou vd., 2012; Varenberg & Gorb, 2009; Wainwright vd., 2013). Bu vantuzlar hedef yüzeyin malzeme cinsine bağlı olmaksızın güçlü yapışma sağlaması sayesinde düz yüzeyler üzerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Şekil 1.5) (Chu vd., 2010). Bununla birlikte, büyük ölçekli yapay vantuzların kullanımında birçok sorunla karşılaşılması nedeniyle bu sorunların çözümü için ahtapottan esinlenerek nispeten küçük ölçekli yapay vantuzların yapıştırıcıları geliştirilmiştir.



Şekil 1.5 : a) Ticari olarak temin edilebilen yapay büyük ölçekli vantuz. b) Farklı ebatlarda büyük ölçekli vantuzlu ürünler.

Bilinen büyük ölçekli vantuzlu ahtapottan ilham alan yapıştırıcı sistemleri, vantuzların içindeki basıncı azaltmak için yapıştırma işlemi sırasında ek bir vakum sistemi ve güç kaynakları gerektirir (Chang vd., 2014; Follador vd., 2014; Xue vd., 2013). Ayrıca, hassas bir yüzey üzerinde vantuzun yüzeyden ayrılması sırasında nispeten yüksek kuvvetler gerekli olduğu için mekanik hasar oluşumuna sebebiyet vermesi büyük ölçekli vantuzlarda görülen en önemli yapışma sorunlarından birisidir. Örneğin, yarı iletkenler üretilirken, yüzey kirlenmesi olmadan ıslak veya kuru koşullarda ince bir silikon plaka doğru bir şekilde taşınmalıdır. Baik ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada, ürettikleri minyatürize ahtapottan esinlenilen bir yapıştırıcının pratik bir uygulamasını göstermek için poliüretan esaslı bir yapıştırıcı kullanarak yaklaşık sekiz inç boyutlarında bir silikon levhanın taşınmasını sağlamışlardır. Daha sonra, oldukça düşük bir kuvvetle yapıştırıcının yüzeyden sıyrma yoluyla ayrılabilirdiği tespit

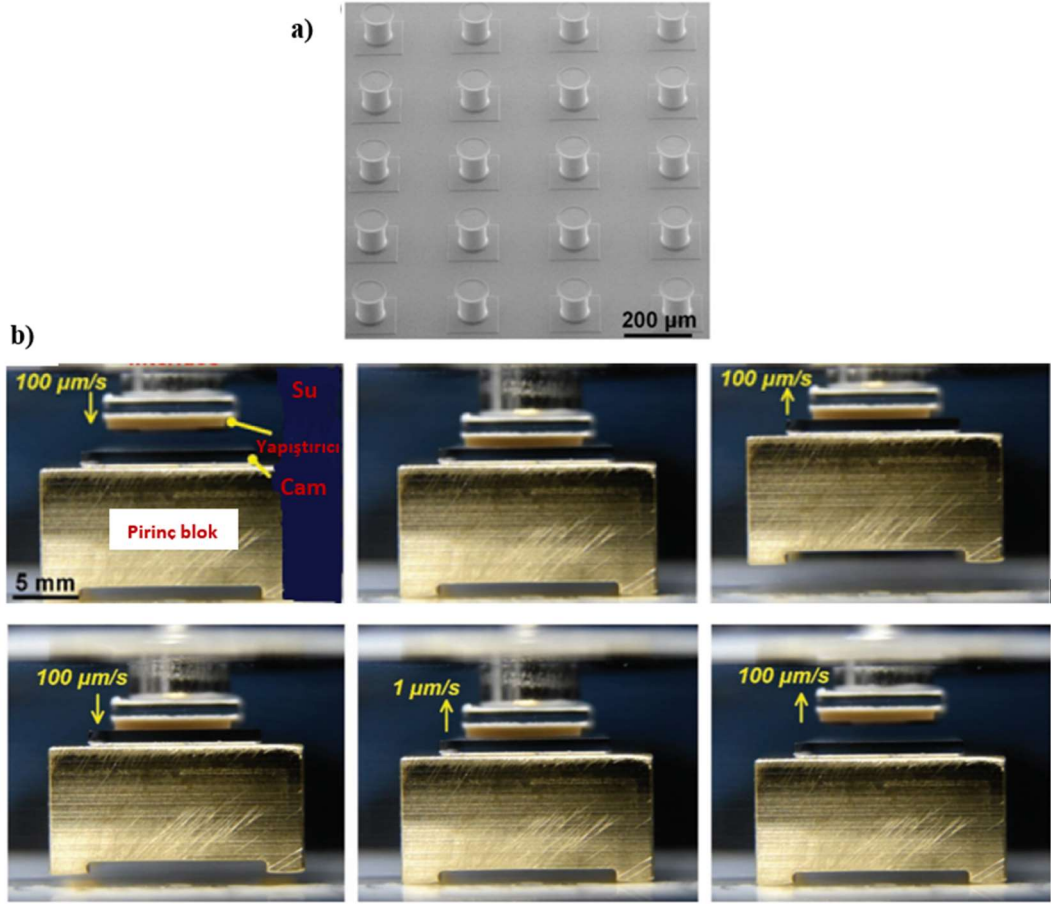
etmişlerdir ve bu işlemin sonucunda da yüzeyde herhangi bir hasar oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 : Sualtında ahtapotun esinlenilen minyatürize bir yapıştırıcı kullanılarak silikon plakanın taşınmasını ve yapıştırıcının ayrılmasını gösteren görüntüler (Baik vd., 2017).

Buna ek olarak, büyük ölçekli vantuzlara yapışma kuvvetinin kontrol edilmesi yoluyla sualtında değiştirilebilirlik özelliği kazandırmada yaşanan sıkıntılar günümüzde de devam etmektedir. Bu yüzden, özellikle yumuşak robotik uygulamalarda nesnelere taşınmasında bu tür vantuzlar aktif olarak kullanılamamaktadır. Wang ve diğ. (2020) yaptıkları bir çalışmada, yumuşak robotik uygulamalarda kullanılmak üzere sualtı koşullarında değiştirilebilir yapışma için mikroyapıda vantuz benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcıların potansiyelini araştırmışlardır. Sualtı yapışma testleri, yapıştırıcının ayrılmaya kadar 0,1 ila 100 $\mu\text{m s}^{-1}$ arasında değişen sabit geri çekme hızları ile sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak, üretilen mikro-vantuz dizileri kullanılarak sualtındaki bir nesnenin bir konumdan alınıp başka bir konuma yerleştirilmesi gösterilmiştir. Bu yerleştirme işleminde mikroyapıların değiştirilebilirliğini göstermek için, iki mikroyapının arası 300 μm mesafede olacak şekilde 25 mm^2 lik bir alanda 256 mikroyapıdan oluşan bir yapıştırıcı geliştirilmiştir (Şekil 1.7a). 30 g ağırlığın sualtındaki taşınması Şekil 1.7b' de gösterilmiştir. İlk olarak, üretilen yapıştırıcı 300 mN' luk bir ön yük altında pirinç blok ile temas ettirilmiştir. İkinci olarak, blok 100 $\mu\text{m s}^{-1}$ lik yüksek bir geri çekme hızı kullanılarak kaldırılmıştır ve kaldırılmış durumdaki blok 50 s boyunca havada tutulmuştur. Pirinç

blok başlangıç pozisyonuna döndürüldükten sonra, $1 \mu\text{m s}^{-1}$ gibi çok daha düşük bir geri çekme hızında serbest bırakılmıştır. Yapışma kuvveti 60 mN olduğu için pirinç bloğun ağırlığını kaldırabilecek kuvvetin altında kalmıştır. Bu çalışma, yapışma kuvvetinin, geri çekme hızı değiştirilerek değiştirilebileceğini başarıyla göstermiştir. Bu nedenle minyatürize ahtapottan esinlenen yapıştırıcılar katı nesnelere su altında taşınması için yüksek potansiyel sergilerler.

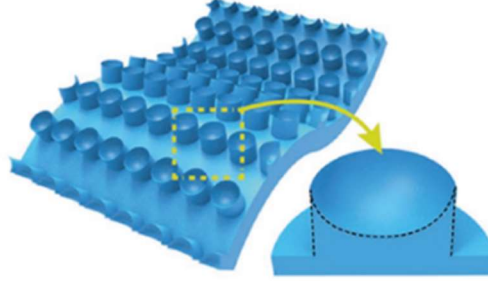


Şekil 1.7 : a) Üretilen yapıştırıcıların $5 \times 5 \text{ mm}^2$ lik alanındaki mikroyapıların taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve **b)** pirinç bloğun su altında tutulması ve bırakılmasından oluşan döngüye karşılık gelen görüntüler (Wang vd., 2020).

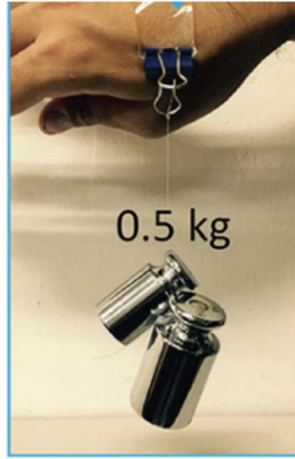
Büyük vantuzlu yapıştırıcıların doğasında bulunan bir başka sorun da bunların yalnızca düz bir yüzey üzerinde kullanılabilmesidir. Bununla birlikte, çoğu insan vücudu dokusu ve yarası, milimetre/mikrometre ölçeğinde tümsekler, eğriler ve köşelere sahiptir (Lee vd., 2016). Baik ve diğ. (2018), içbükey geometride mikroyapılardan oluşan minyatürize ahtapottan esinlenen yapıştırıcılar geliştirmişlerdir (Şekil 1.8a). Üretilen yapıştırıcı tüylü cilde karşı hem çekme hem de soyma yönlerinde yüksek kuru/ıslak yapışma performansları göstermiştir (Şekil 1.8b).

Bu sonuçlar, geliştirilen yapıştırıcının yara iyileşmesi ve cilde/organa takılabilen akıllı tıbbi cihazlar için biyoyumlu medikal bantları geliştirmenin yolunu açabileceğini göstermektedir.

a)



b)

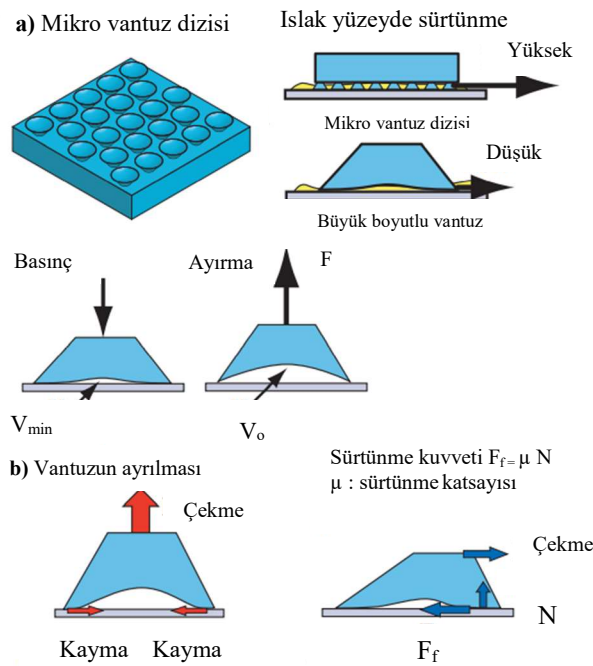


Şekil 1.8 : a) İçbükey geometride yapılardan oluşan yapıştırıcı ve bu yapıştırıcının **b)** insan cildine yapışmasını gösteren fotoğraflar (Baik vd., 2018).

Büyük ölçekli vantuzların kullanımında yaşanan bir diğer sorunda ıslak düz bir yüzey üzerinde vantuz ile yüzey arasındaki sürtünmenin “sıvı yağlaması” nedeniyle önemli ölçüde azalır ve vantuzların çekme kuvveti altında kayma yönünde kaymasına neden olmaktadır (Miyake vd., 2007). Bununla birlikte, aynı presleme basıncı altında vantuzun boyutunu küçülterek, vantuz dizisi ile ıslak bir yüzey arasında hapsedilen sıvı filmin kalınlığı daha hızlı azalır. Sonuç olarak, temas bölgesindeki sıvı film incelik ve dolayısıyla sürtünme katsayısı artar. Vantuzun boyutunu küçülterek sürtünme artırma mekanizması aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Şekil 1.9, Vinh ve arkadaşları tarafından üretilen PDMS mikro vantuz dizisinin şekli ve tek bir vantuzun yapışma mekanizmasını göstermektedir. Düz bir yüzeye bastırıldıktan sonra, bir vantuzun teorik emme kuvveti (F) (1.1) nolu denklemle hesaplanabilir. Burada P atmosferik basınç ve A vantuzun taban alanıdır, V_{min} yüksüz durumda vantuz içindeki havanın hacmidir ve V_o , ayrılmadan hemen önceki vantuz içindeki havanın hacmidir.

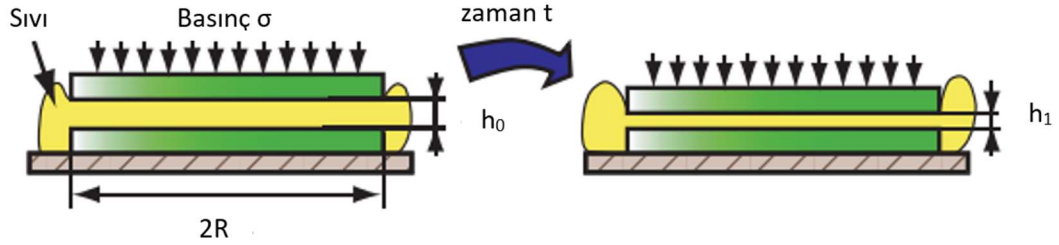
$$F = P \left(1 - \frac{V_{min}}{V_o} \right) A \quad (1.1)$$



Şekil 1.9 : Üretilen minyatürize vantuzlardan oluşan yapıştırıcının şematik görünümü ve tek bir vantuzun yapışma mekanizması (Thanh-Vinh vd., 2011).

Vantuzun yüzeyden ayrılma mekanizması Şekil 1.9(b)' de gösterilmiştir. Bir vantuz normal yönde çekildiğinde, çekme kuvveti vantuzun deforme olmasına neden olur. Vantuzun yüzeyle arasındaki temas alanı azalarak vantuz tabanının merkezine doğru geri çekilir. Çekme kuvveti arttıkça, temas alanı alt tabaka yüzeyinde kaymaya başlar. Yüzey kuru durumda olduğunda, temas alanının kayması hava sızıntısına neden olur ve vantuzun ayrılmasına yol açar. Ancak, alt tabaka ıslaksa, temas alanındaki sıvı film, temas alanı kaymaya başladığında bile hava sızıntısını önler. Bu nedenle, sıvı filmin varlığı, kuru bir alt tabaka durumunda yapışmaya kıyasla daha iyi sızdırmazlık ve daha güçlü yapışma sağlar.

Bir vantuz kesme yönünde çekildiğinde, vantuzun deformasyonu, alt tabakaya normal yönde baskı kuvvetinin olduğu temas alanına yol açar (Şekil 1.9(b)). Baskı kuvvetinin varlığı, vantuz ve alt tabaka arasındaki sürtünme kuvvetini harekete geçirir. Islak bir yüzey durumunda, bir makro-vantuz ile bir mikro-vantuz arasındaki fark, temas bölgesinde hapsedilen sıvı filmin kalınlığında yatmaktadır.



Şekil 1.10 : Basınç altında iki dairesel disk arasında sınırlandırılmış sıvı filmin kalınlık azalması.

R yarıçapına sahip iki paralel dairesel diskin viskozite değeri η olan bir sıvıya batırıldığı düşünüldüğünde (Şekil 1.10), iki disk arasında sınırlandırılmış sıvı film kalınlığını h_0 'dan h_1 'e düşürmek için gereken süre denklem (1.2)'de hesaplanmıştır (Federle vd., 2006).

$$t = \frac{3\eta R^2}{4\sigma} \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad (1.2)$$

Bu nedenle, aynı baskı basıncı altında, mikro vantuzun temas alanında kapatılmış sıvı film kalınlığının büyük ölçekli vantuzlara göre daha hızlı azaldığı açıktır. Sıvı film incelendiğinde sürtünme katsayısı da doğru orantılı olarak artış gösterir (B. Persson, 2000; B. N. J. Persson, 2007). Bu nedenle, bir mikro-vantuz dizisinin sürtünmesi, vantuz boyutunu küçülterek geliştirilebilir.

1.5 Minyatürize Yapılardan Oluşan Ahtapotun Esinlenilen Yapıştırıcıların Yapışma Mekanizmaları

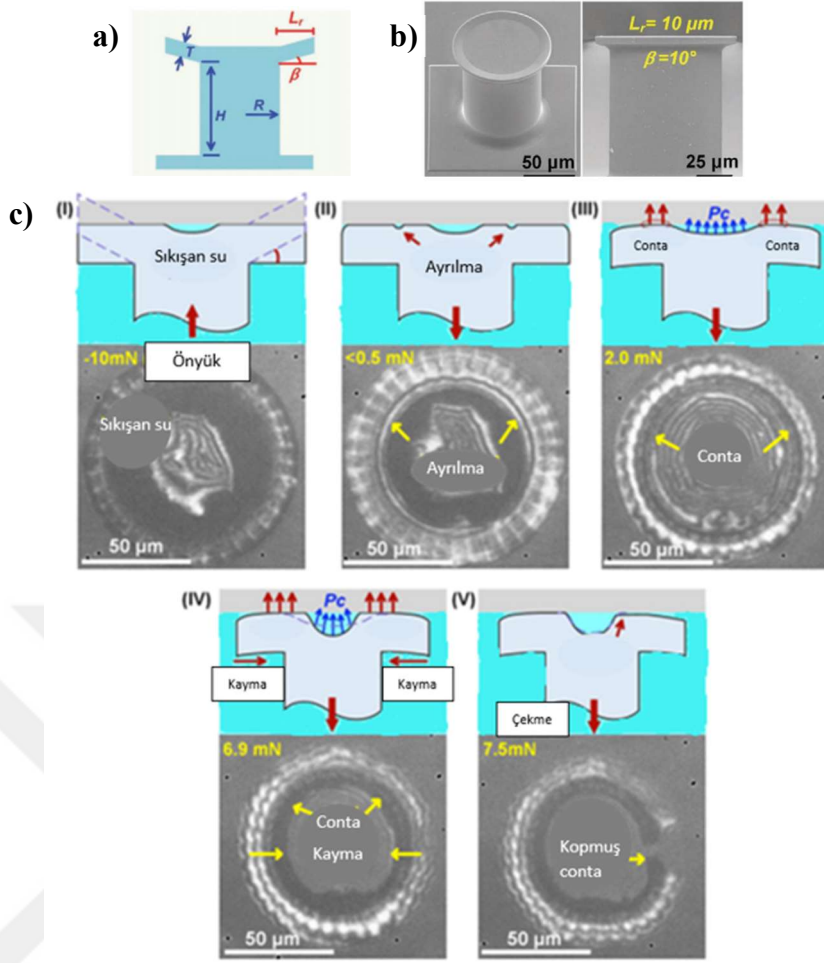
1.5.1 Açılı sütunsal içbükey yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması

Wang ve diğ. (2019) yaptıkları bir çalışmada, açılı sütunsal içbükey şeklindeki mikroyapıları kalıptan kopyalama yöntemi ile poliüretandan üretmişlerdir. Her mikroyapının kol yüksekliği (H) 100 μm , kol yarıçapı (R) 40 μm , kenar kalınlığı (T) 5 μm , kol uzunluğu (L_r) 10 μm olup, kenar açısı (β) 10 derecedir (Şekil 1.11a). Tek

bir mikroyapının taramalı elektron mikroskobunda çekilen görüntüsü Şekil 1.11b' de gösterilmiştir.

Üretilen yapıştırıcının sualtı ortamda bastırıldığı yüzeyden ayrılmasını gösteren görüntüler ve şematik çizimler Şekil 1.11c' de gösterilmiştir. Optik görüntüler, temas bölgesini gösterirken, çizimler, altta yatan mekanizmaları tasvir etmek için yan görünüşleri temsil etmektedir.

Bastırma sırasında, içbükey mikro yapının kenarı ilk önce alt tabaka ile temas eder ve Şekil 1.11c(I)' de gösterildiği gibi, ayarlanan ön yüke ulaşılan kadar elastik olarak deforme olur. Ön yükleme sırasında, mikroyapının kenarları tamamen temas edene kadar ortamdaki su uzaklaştırılır. Tutarlı bir şekilde, temas bölgesi içinde sıkışmış bir miktar artık su kalır Şekil 1.11c' de (I)'deki optik görüntü). Kuvvet gevşemesi (II) sırasında, su hızla kontağa akar, bu da kontağın bu noktada iyi kapatılmadığını gösterir. Bununla birlikte, çekme yükleme aşamasında (III ve IV), mikroyapı ve yüzey arasında daha iyi bir sızdırmazlık (ilgili optik görüntülerdeki koyu gri halka) en dış kenarında değil, daha içeriye doğru, sıkışan suyu içine alarak oluşturulur (III). İlginç bir şekilde, daha yüksek çekme yüklerinde (IV) daha güçlü bir sızdırmazlık oluşur. Su altında son ayrılma iki fazlı (V) gibi görünmektedir. İlk olarak, hapsolmuş sudan çatlak çekirdeklenmesi ve ardından çatlak yayılması (II ve III) yoluyla kademeli olarak ayrılır. Kol ayrıldığında, dış kenar ve iç conta içe doğru kayarak büzülmeye başlar . Bu temas büzülmesi muhtemelen düşük hidrostatik basıncın ve kabın altında tutulan suyun sıkıştırılmazlığının bir sonucudur: kabın altındaki boşlukta dikey bir çekme, kenarda merkezci (içe doğru) bir çekmeye neden olur. Son ayrılma, büyük bir su akışına, basıncın dengelenmesine ve mikro yapının tamamen ayrılmasına yol açan, çemberin bir parçasının içe doğru çökmesiyle (V) meydana gelir.

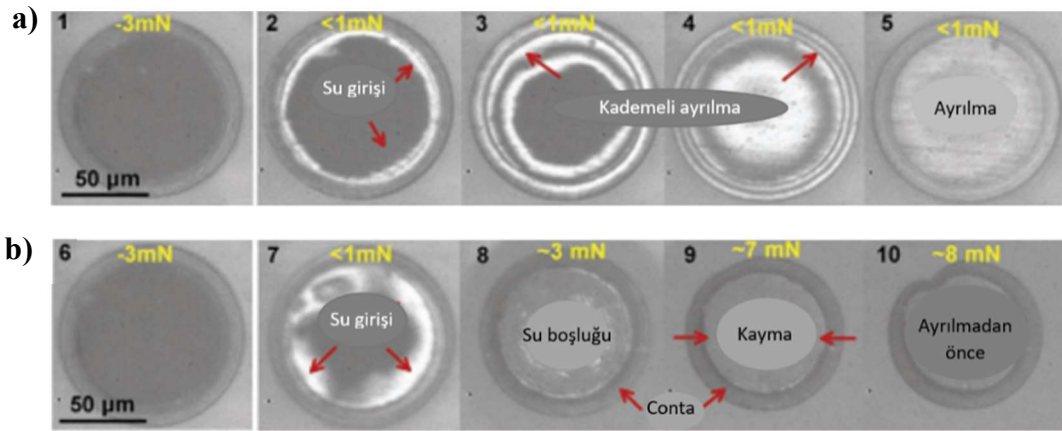


Şekil 1.11 : a) Üretilen mikroyapının şematik görüntüsü; burada H, yükseklik ve R, kolun yarıçapı, T kalınlık, LR kenarın yansıtılmış genişliğidir ve B, kenar açısıdır, **b)** Tek bir mikroyapının taramalı elektron görüntüsü, **c)** Mikroyapının sualtı ortamda ayrılmasını gösteren görüntü dizisi (Wang vd., 2019).

Mikroyapıların düz ve pürüzsüz cam altlığa yapışması, 0.1 ile $100 \mu\text{m s}^{-1}$ arasında değişen geri çekme hızının bir fonksiyonu olarak sistematik bir şekilde su altında test edilmiştir (Wang vd., 2020). Yapışma testleri sonucunda, çekme kuvveti artan hızlarla daha da artmıştır. Şekil 1.12a-b, iki farklı hızda ($1 \mu\text{m/s}$ – $20 \mu\text{m/s}$) geri çekilen mikroyapıların optik görüntülerini göstermektedir. Her iki hızda da, kontak önyüklemesi sırasında mikroyapının basılmasıyla oluşmuştur. Geri çekme sırasında, iki yapışma hızındaki davranış farklılık göstermektedir. Yavaş geri çekme hızında ($1 \mu\text{m/s}$) kolun çevresindeki beyaz alanlardan bazılarında ilk su girişi gözlenmiştir (Şekil 1.12a, adım 2). Bunun sonucunda kolun ayrılması, 3. adımda görülen parazit dalgalanmaları ile gerçekleşmiştir (Şekil 1.12a). Ayırma işlemi, kolun altındaki bir boşluğa yol açmış olup, bu boşluk çekme sırasında daha fazla su ile dolmuştur. Boşluğun genişlemesi,

dış kenardaki giriş yoluyla ve suyun sıkıştırılmamasıyla kısıtlanır (Şekil 1.12a, adım 4). Son olarak, yapının tamamı yerinden çıkmıştır (Şekil 1.12a, adım 5). Kenarın parlak gri rengi yüzey temasının zayıf olduğunu gösterir (Şekil 1.12a, adım 3-5).

Hızlı geri çekme hızında ($10 \mu\text{m/s}$), olay sırası (Şekil 1.12b) burada yapının son olarak ayrılmasından önce daha büyük ve daha dengeli bir sızdırmazlık (adım 6-9) geliştirilmesine göre farklılık göstermektedir (adım 10). Sonuç olarak, boşluktaki hidrostatik basınç düşürülerek kenarın alt tabakaya daha sert bastırılmasına neden olunmuştur (kenarın koyu gri renginden görülebilir, Şekil 1.12b, adım 8-10). Buna ek olarak, su akışı daha da azaltılmış ve bu da daha düşük kavite basıncına ve daha sıkı bir contağa neden olmuştur. Koyu çizgi yakın kontağı ve contalamayı; kesişim çizgileri ayrılmanın başlangıcını işaret etmektedir, gri kalın renk su tabakalarını işaret etmektedir. Yüksek çekme kuvvetlerinin güçlü contaların görünümü ile bağlantılı olduğu görüntülerden açıkça görülmektedir. Özet olarak, geri çekme hızı ve ortaya çıkan su girişi, bu tür mikroyapıların su altında yapışmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.



Şekil 1.12 : a) Yavaş hızda ($1 \mu\text{m/s}$) ve b) hızlı hızda ($10 \mu\text{m/s}$) geri çekilen mikroyapılar için kontak resimleri (Wang vd., 2020).

1.5.2 Kubbe benzeri çıkıntılı yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması

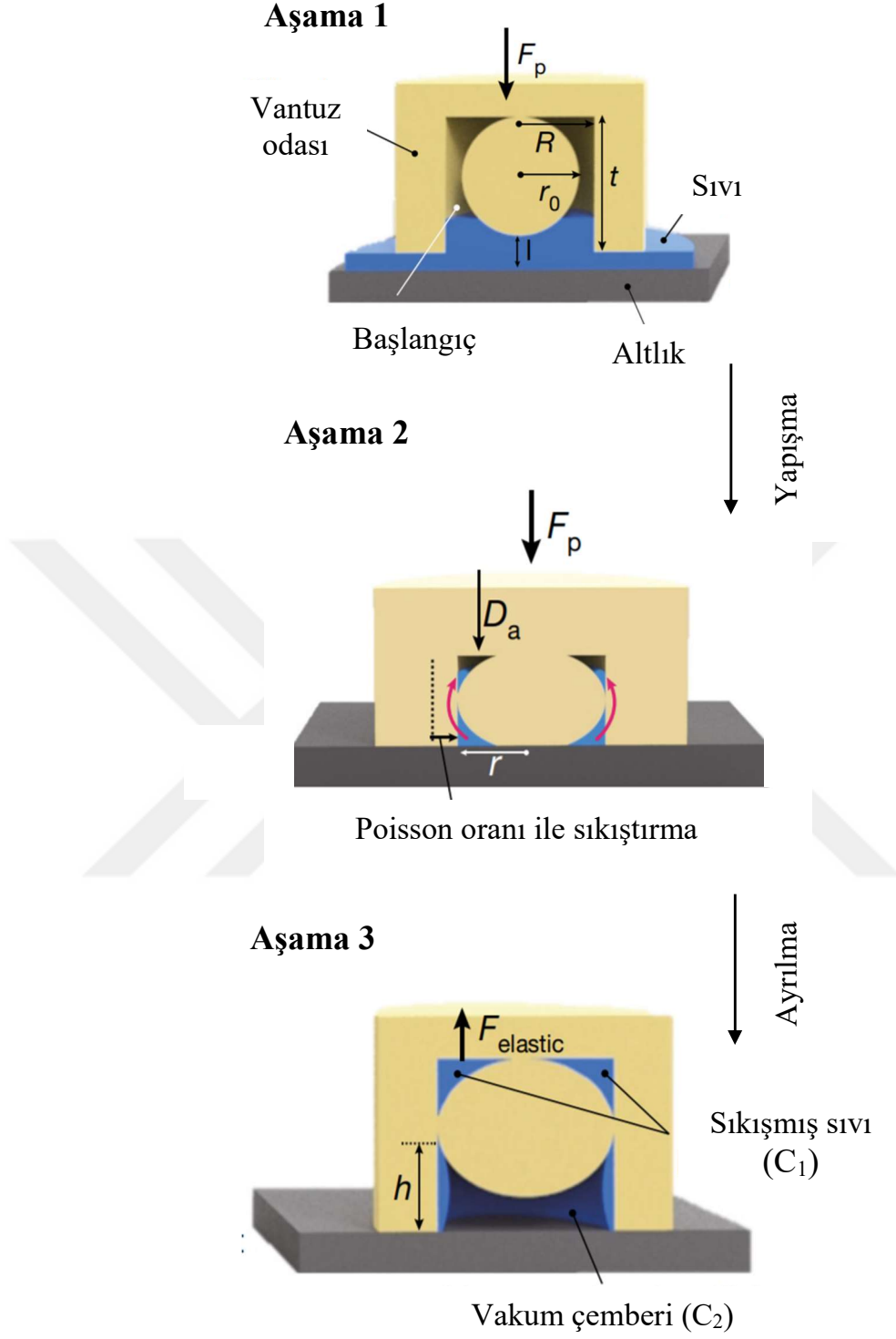
Literatürde, ahtapotların vantuzlarında bulunan kubbe benzeri çıkıntılara dayanan yapıştırıcılar kullanılarak, ahtapot vantuzlarının ıslak yüzeylere yapışmasını temel alan mekanizmalar için mevcut anatomik hipotezlerin ötesinde basit bir metodolojik model önerilmiştir (Tramacere, Pugno, vd., 2015; Tramacere vd., 2013).

Spesifik olarak, ahtapotun esinlenen yapıştırıcı ile ıslak yüzey arasındaki moleküler etkileşimler tarafından oluşturulan normal yapışma kuvveti ($\sigma_{o,ıslak}$), (1.3) nolu denklemde gösterildiği gibi vakum kuvvetinin ($\sigma_{s,ıslak}$) ve kapiler kuvvetin (σ_c) toplamı olarak ifade edilebilir:

$$\sigma_{o,ıslak} = \sigma_{s,ıslak} + \sigma_c \quad (1.3)$$

Şekil 1.13' de gösterildiği gibi, yapıştırıcılar tarafından elde edilen mekanik kilitleme, üç adımda gerçekleşir. İlk olarak, vantuzlar uygulanan bir yük vasıtasıyla ıslak yüzey ile temas ettirildiğinde, vantuz odasının başlangıç hacmi kademeli olarak azalır ve vantuz içindeki sıvı moleküllerin sayısını en aza indirir (aşama 1). İkinci olarak, vantuz odası elastik yapıda olmasından dolayı kubbe benzeri mikroyapı ve bitişiğindeki yan duvarlar temas edene kadar sıkıştırılır (aşama 2). Bu elastik deformasyon nedeniyle, vantuz odası üst (C1) ve alt (C2) odalara ayrılmakta, içlerinde kılcal hareket meydana gelmektedir. Bu kapiler kuvvet kalan suyu üst bölüme (C1) doğru iletir. Üçüncü olarak, harici yük kaldırıldıktan sonra, sıvı moleküllerin kohezif kuvvetleri C1 bölmesini kapatır (aşama 3). Üst bölme olan C1, sıvı moleküller ile doldurulduktan sonra, elastik gevşeme sebebiyle alt bölmede (C2) ortam basıncına (ΔP_0) göre son derece düşük bir basınç oluşmasına sebep olur. (1.4) nolu denklemde ortam basıncıyla C2 bölmesi arasında oluşan basınç farkı gösterilmiştir.

$$\Delta P_{max} = \Delta P_0 - \Delta P_{C2} \quad (1.4)$$



Şekil 1.13 : Sualtı koşullarda kubbe benzeri yapılara sahip yapıştırıcıların yapışmasının altında yatan mekanizmalar (Baik vd., 2017).

Alt bölmelerdeki kapiler destekli basınç düşüşünün neden olduğu vakum kuvveti ($\sigma_{o,islak}$) (1.5) nolu denklemdeki gibi tanımlanabilir:

$$\sigma_{s,islak} = -\Delta P_{max} \pi r^2 \kappa n \quad (1.5)$$

burada r, uygulanan bir yük altında bir yüzey ile temas ettirildikten sonra deforme olmuş kubbe benzeri mimarinin temas alanının yarıçapıdır ve n, birim alan başına düşen mikroyapı sayısıdır ve κ , değeri 0,97 olan 50 mikron yarıçapına sahip yapı için katsayıdır.

Şekil 1.14' da gösterildiği gibi, r, (1.6) nolu eşitlik yardımıyla belirlenebilir:

$$r \approx \sqrt{(2R+1)D_a} \quad (1.6)$$

Burada D_a , vantuzun daralmasından kaynaklanan dikey yer değiştirme; l, kubbe benzeri mimarinin ucu ile alt tabaka arasındaki ilk mesafedir ve R, yapının yarıçapıdır. Elastik bir membranın sıyırma tekniğiyle yüzeyden ayrılması düşünüldüğünde (Afferrante vd., 2013), ıslak tutunma için, kapiler kuvvet yardımlı vakum kuvveti ($\sigma_{s,islak}$) (1.7) nolu denklemde gösterildiği gibi ön yüke bağlı olarak malzeme özellikleri ile geometrik parametreler arasındaki rekabet olarak ifade edilebilir:

$$\sigma_{s,islak} \cong -2.145 \left(\sqrt[3]{\frac{1-\nu^2}{E}} \right) \left(\frac{(2R+1) R \kappa n}{\sqrt[3]{tr_o}} \right) \Delta P \times F_p^{1/3} \quad (1.7)$$

Burada E, polimerik malzemelerin elastik modülü, t, vantuz boşluğunun derinliği, ν kullanılan polimerik malzemelerin Poisson oranı, F_p uygulanan ön yük ve r_o yapay kubbenin yarıçapıdır. Yapıştırıcı ıslak bir yüzeye sabitlendiği için, yapı ile katı yüzey arasındaki kapiler kuvvetler Young'ın Laplace denkleminden tahmin edilebilir (Bullock, 2010). Yapıştırıcıdaki sıvı destekli vakum kuvveti ve kapiler kuvvetlerin kombinasyonuna dayanan bu model, biyolojik olarak esinlenilmiş kubbe benzeri yapılara sahip minyatürize yapıştırıcıların ıslak yapışma kuvvetlerini ($\sigma_{o,islak}$) doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir.

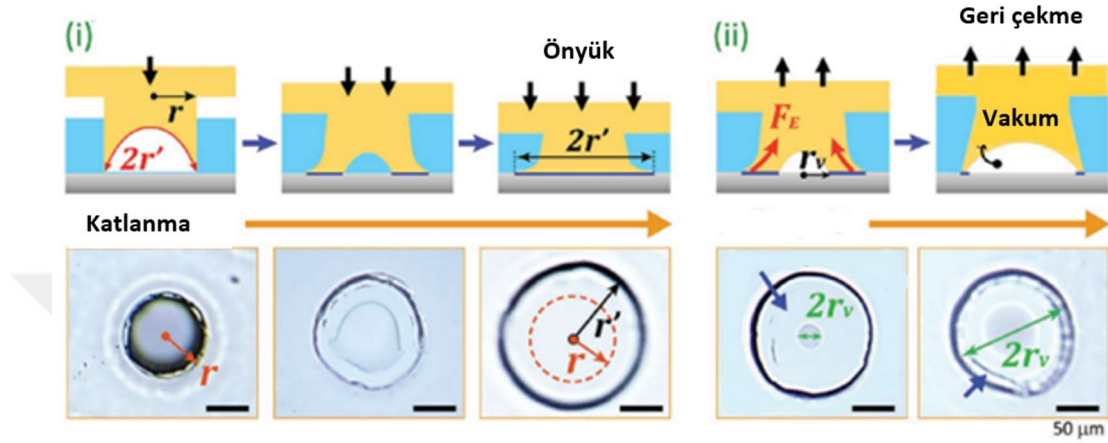
1.5.3 İçbükey yapılardan oluşan minyatürize yapıştırıcıların yapışma mekanizması

İçbükey geometride yapılardan oluşan ahtapot ilham alan yapıştırıcıların toplam yapışması, vakum kuvveti (σ_s) ve kapiler kuvvetlerin (σ_c) toplamı ile (1.8) nolu denklem kullanılarak hesaplanabilir:

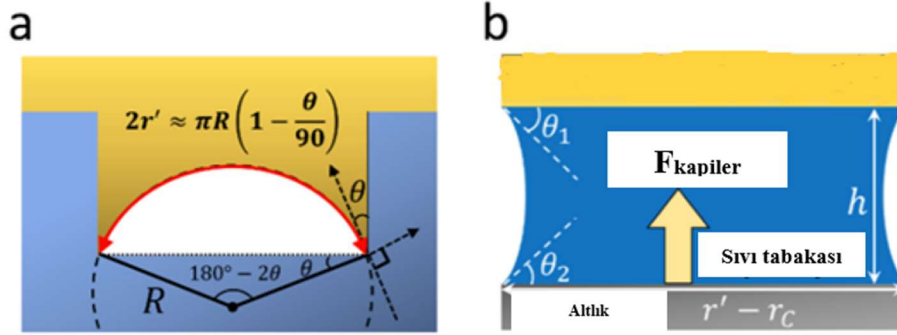
$$\sigma_{toplaml} = \sigma_s + \sigma_c \quad (1.8)$$

Yapay yapıştırıcı yüzeye bastırıldığında, yüzeydeki $\pi r'^2$ ile ifade edilen etkili temas alanını artırmak için içbükey geometrideki yapılar katlanarak açılır (Şekil 1.14(i) ve Şekil 1.15b) (Baik vd., 2018). Burada, r' katlanmamış yapının yarıçapı olup, (1.9) nolu denklem kullanılarak elde edilebilir:

$$r^1 = \frac{\pi r}{2} \left(1 - \frac{\theta}{90}\right) \quad (1.9)$$



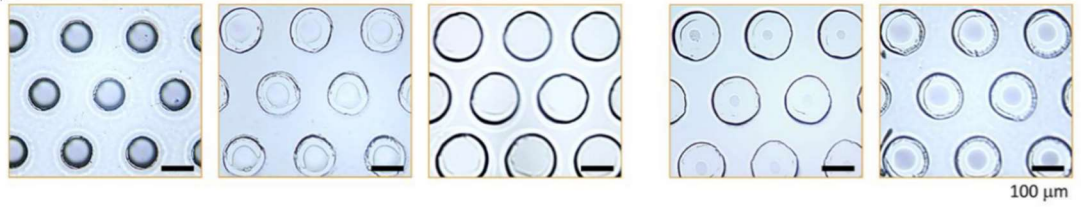
Şekil 1.14 : Islak yüzey üzerinde bir mikro içbükey yapının ayrıntılı açılma (i) ve geri çekilme (ii) işlemleri sırasındaki şematik ve optik mikroskop görüntüleri (Baik vd., 2018).



Şekil 1.15 : a) İçbükey şekildeki vantuzların eğri uzunluğunu tahmin etmeye yarayan çizim. b) İki paralel yüzey arasındaki sıvı köprü modelinden kaynaklanan kılcal destekli yapışmanın şematik görüntüsü (Baik vd., 2018).

Açılma sırasında mikroyapılar arasındaki etkileşimi önlemek için yapışkan plakalar (1.10) nolu eşitliğe uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, mikroyapılar tamamen açılmış haldeyken fiziksel olarak birbirine temas etmesi mümkün değildir (Şekil 1.16).

$$(r^1 - r < d) \quad (1.10)$$



Şekil 1.16 : Islak yüzey üzerinde birden çok mikro içbükey yapının açılma ve geri çekilme (ii) işlemleri sırasındaki optik mikroskop görüntüleri (Baik vd., 2018).

Kapiler kuvvetler (σ_c) durumunda, yapıların içi, uygulanan bir ön yük ile mikroyapıların elastik deformasyonu sebebiyle genişleyebilir ve vakum durumuna ulaşabilir (Şekil 1.14). Burada, birbirine geçen paralel yüzeyler arasındaki kılcal köprüler (σ_c) yoluyla yapışma, katlanmış durumdaki mikroyapıların dinamik temas alanı (1.10) nolu denklemde gösterildiği üzere kullanılarak (1.11) denkleme göre hesaplanabilir (Cheung & Sitti, 2008) :

$$(A_{\text{dynamic}} = \pi(r^{12} - r_v^2)) \quad (1.10)$$

$$\sigma_c = \pi(r^{12} - r_v^2)\gamma n \cdot \left(\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{h^t} + \frac{2}{r^1 - r_v} \right) \quad (1.11)$$

Burada γ suyun yüzey gerilimi ($\sim 0.072 \text{ J/m}^2$), n birim alandaki mikroyapı sayısı, θ_1 saf suyun temas açısı, θ_2 substrat üzerindeki suyun (silikon plaka) temas açısı ve h' sıvı filmin yüksekliğidir ($\sim 0.25 \mu\text{m}$).

Ardından, vakum kuvveti (σ_s) (1.12) nolu denklemde tanımlanır:

$$\sigma_s = \Delta P_{\text{max}} A_v n \quad (1.12)$$

Mikroyapılar geri çekildikçe, yapıların içinde boşluk oluşumu meydana gelir (Şekil 1.14). Burada ΔP_{max} , ortam basıncı ile mikroyapı içindeki basınçla arasındaki basınç farkıdır (neredeyse bir vakum durumu oluşturur; $\sim 101 \text{ kPa}$) ve A_v emme odasının içindeki boşluğun alanıdır (πr_v^2). Toplam yapışma, vakum kuvveti ve kapiler kuvvetlerin toplamı olduğundan, σ_{total} toplam denklem (1.11) ve (1.12) nolu denklemlerin biraraya gelmesiyle oluşan (1.13) nolu denklem yardımıyla elde edilebilir.

$$\sigma_{\text{total}} = \Delta P_{\text{max}} \pi r_v^2 n + \pi(r^{12} - r_v^2)\gamma n \cdot \left(\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{h^t} + \frac{2}{r^1 - r_v} \right) \quad (1.13)$$

Sualtı ortamında, yapıların genişletilmiş içbükey uçları ile birbirine geçen bir yüzey arasında kılcal köprüler oluşturarak birleşmeyi sağlayan ve aynı zamanda hava sızıntılarını engelleyen suyun varlığı nedeniyle güçlü bir yapışma sağlanmaktadır

(Barbero & Frasch, 2009). Özellikle, katlanmamış üç boyutlu mikro uçlar ile dinamik temas alanı olan kenetlenmiş yüzey arasındaki temas alanı (1.14) nolu denklemde gösterildiği gibi yapıştırıcı çekildikçe değişecektir.

$$A_{\text{dynamic}} = \pi(r^{12} - r_v^2) \quad (1.14)$$

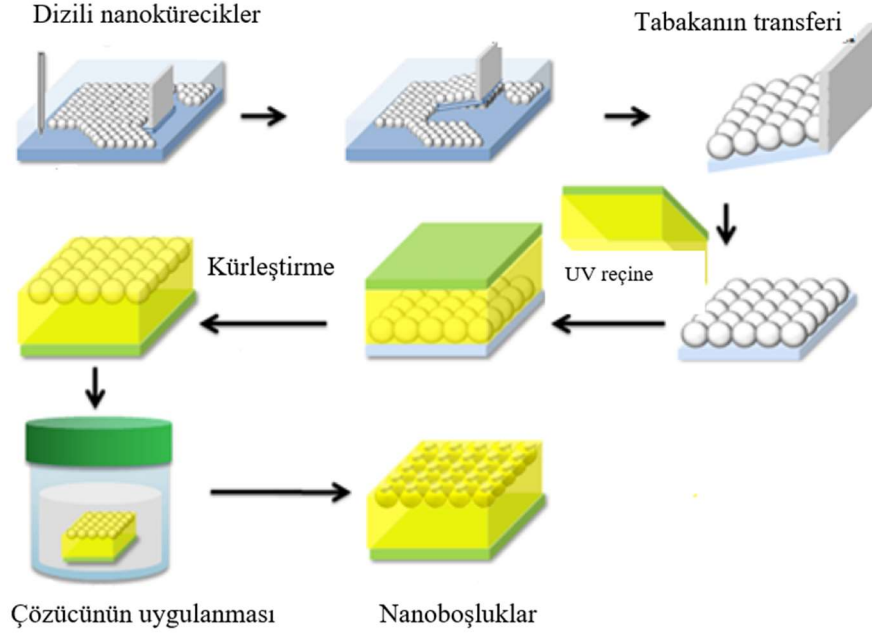
Vakum etkisi, boşluk alanı ile tahmin edilebilirken, kapiler kuvvetler (σ) A_{dinamik} 'in bir fonksiyonu olarak (1.15) nolu denklem yardımıyla ifade edilebilir.

$$A_v = \pi r_v^2 \quad (1.15)$$

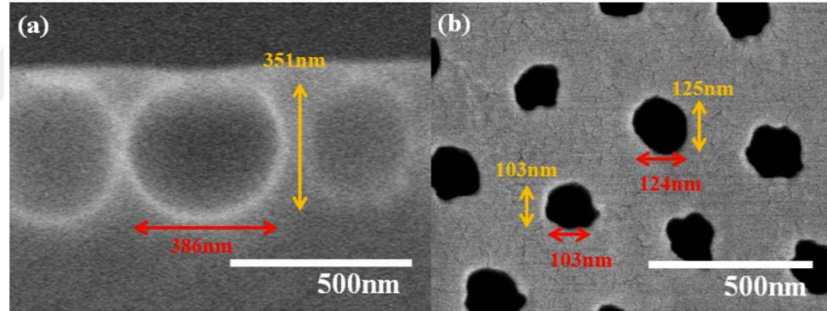
1.6 Minyatürize Ahtapotun Esinlenilen Yapıştırıcıların Üretim Yöntemleri

1.6.1 Çözücü yöntemiyle üretim

Chang ve diğ. (2014) Polistiren (PS) nanoküreciklerden oluşan bir tabaka üzerine UV reçinesi kaplanması ve bu reçinenin çeşitli yumuşak çözücülerle işleme tabi tutulmasını içeren litografik bir metotla yapışma kuvveti üretebilen nanoboşluklar geliştirmişlerdir (Şekil 1.17). Literatürde yer alan bu çalışmada, nanoküreciklerden oluşan tek bir tabaka imal etmek için kepçeleme transfer tekniği kullanılmıştır. Sıkı paketlenmiş nanoküreciklerden meydana gelen tabaka, UV ile kürlenebilir reçine ile kaplanmıştır. Üretilen tabaka üzerinde nanoboşluklar oluşturabilmek amacıyla tabaka çeşitli çözücüler içerisine daldırılmıştır. Düşük polariteli olan bu çözücüler, reçine yüzeyini aşındırarak nanoboşlukların oluşmasına sebep olmuşlardır (Şekil 1.18). Reçine yüzeyinde oluşan nanoboşluklar diğer yüzeylere uygulandığında, vantuzların bir ahtapotun dokunaçları üzerindeki etkisine benzer şekilde, büyük miktarda yapışma kuvveti üretmiştir (Chang vd., 2014).



Şekil 1.17 : UV ile kürlenebilen reçinenin PS nanoküre içeren tabakaya uygulanmasının ve ardından nano boşluklu yapıları üretmek için reçine yüzeyinde aşındırma etkisinin şematik gösterimi (Chang vd., 2014).

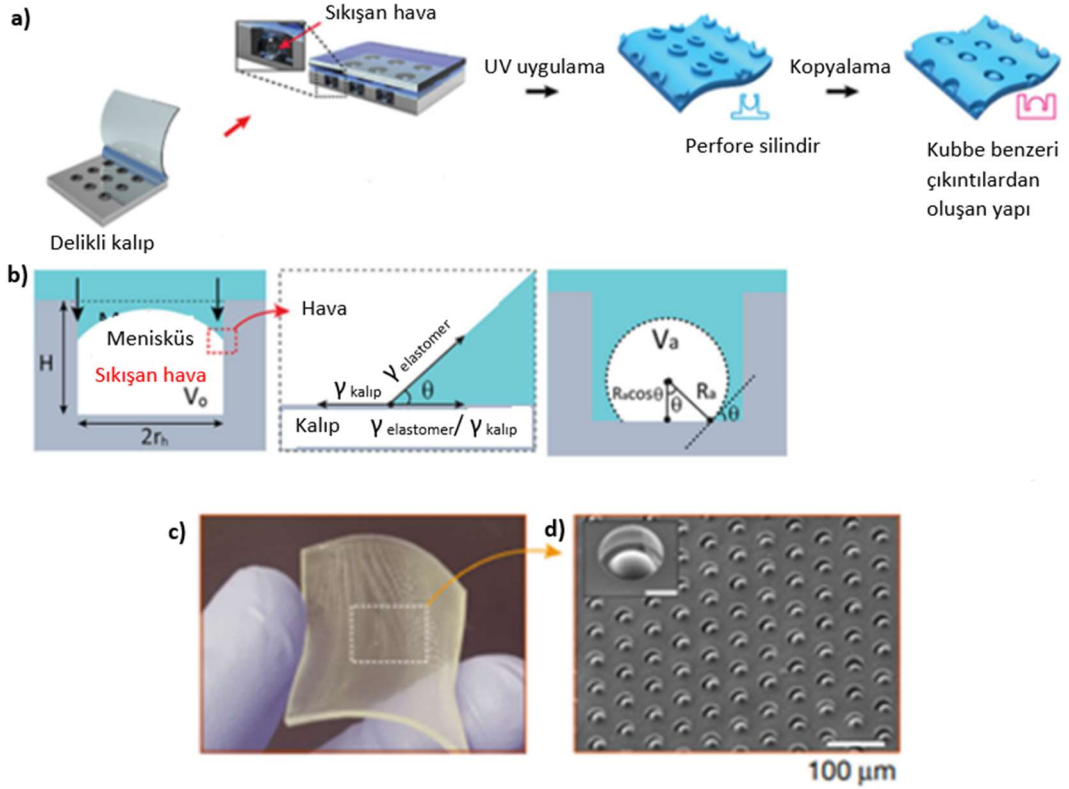


Şekil 1.18 : Çözücüye maruz bırakılmış UV reçine yüzeylerindeki nano boşlukların (a) kesit ve (b) üstten görünüşlerinin SEM görüntüleri (Chang vd., 2014).

1.6.2 Kısmi doldurma tekniğiyle üretim

Baik ve diğ. (2017), ahtapotlardaki kubbe benzeri çıkıntılardan esinlenerek, perfore yapılardan oluşan polimerik bir master üretmeyi ve ardından onu kopyalamayı içeren bir teknikle vantuzların geometrisini taklit eden yapay bir yapıştırıcı geliştirmişlerdir (Şekil 1.19). Daha spesifik olarak, poliüretan akrilat bazlı polimerden oluşan sıvı bir elastomer, daha önce hidrofobik bir malzemeye kaplanan fotolitografi yöntemiyle geliştirilmiş silikon kalıbın mikrometre ölçekli deliklerine kısmi doldurma tekniği vasıtasıyla kısmen doldurularak perfore yapılardan oluşan polimerik master üretilmiştir. Bu polimerik masterın kopyalanmasıyla ıslak ve kuru koşullarda yapışma

sağlayan poliüretandan yapılmış ahtapottan ilham alan yapay vantuzlar elde etmişlerdir. Kısmi doldurma tekniği, kılcal kuvvetlerle yükselen sıvı formdaki elastomerle kalıp deliklerinde sıkışmış hava kabarcıkları arasındaki kuvvet dengesine dayanır. Şekil 19c, üretilen ahtapottan ilham alan yapılara sahip yapay yapıştırıcının (alan $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$) görüntüsünü göstermektedir. Her yapı $50\ \mu\text{m}$ 'lik bir yarıçapa sahiptir ve santimetrekarelik alan başına yaklaşık 5×10^3 yapı bulunmaktadır. Üretilen yapay yapıştırıcının izometrik olarak çekilmiş SEM görüntüsü Şekil 19d'de gösterilmiştir.



Şekil 1.19 : a) Kısmi doldurma tekniği ile perfore yapıların ve bu perfore yapılardan kopyalama yoluyla yapıştırıcıların üretimi, b) Kısmi doldurma tekniğinin detaylı olarak şematik gösterimi, c) Üretilen yapıştırıcının görüntüsü (yaklaşık $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$), d) Üretilen yapıştırıcının SEM görüntüsü.

Baik ve diğ. (2018) yaptıkları bir diğer çalışmada, fotolitografi yöntemiyle üretilmiş delikli bir kalıbı kullanarak kısmi doldurma tekniğiyle içbükey geometride yapılardan oluşan sualtında kullanılabilen yapıştırıcılar geliştirmişlerdir. Şekil 1.20a' da gösterildiği gibi kısmi doldurma işlemi sırasında kalıp deliklerindeki hava hapsedilerek sıvı elastomere (Poliüretan) içbükey şeklinde geometri kazandırılmıştır. Aşama 1'de, kapiler etkiyle içbükey şeklini alan sıvı elastomer, aralık oranı 1 olan (her yapı arasındaki mesafenin(d) çapa(2r) bölümü) ve altıgen dizilimdeki deliklerden (çap 100 µm; yükseklik 100 µm) oluşan kalıba kısmen doldurulur.

Kalıbın yüzeyine kaplanmış durumdaki sıvı elastomerin üzerine şeffaf bir film (PET) yerleştirildikten sonra, homojen bir yük uygulanarak yapıların yüksekliği artırılmıştır (Şekil 1.20b (ii) Aşama II). Daha sonra, kalıp içerisindeki sıvı elastomeri UV'ye maruz bırakma yoluyla sertleştirdikten sonra elastomer kalıptan ayrılmıştır. Böylece, Şekil 1.20d' de gösterildiği gibi, polimerik bir malzemeden (poliüretan) oluşan içbükey geometride yapılara sahip ahtapotlan ilham alan yapıştırıcı (3 × 3 cm²) üretilmiştir. İçbükey yapıların varlığı izometrik olarak çekilen taramalı elektron mikroskobu (Şekil 1.20c) ve bu görüntünün iç kısmında sunulmuş olan içbükey yapının optik mikroskopta (Şekil 1.20d) çekilen kesit görüntüsüyle de doğrulanmıştır.

Yapıştırıcıların üretiminde kontrol edilebilir kapiler etkiyi açıklamak için basit bir model tasarlanmıştır. Kopyalama işleminde sıkışan havanın basıncı (P_a; mavi ok), kapiler etkiden kaynaklanan Laplace basıncı (P_L; yeşil ok) ve uygulanan dış basınç (P_C; siyah ok) arasında (1.16) nolu denklemde gösterildiği gibi bir denge söz konusudur.

$$P_a = P_L + P_C \quad (1.16)$$

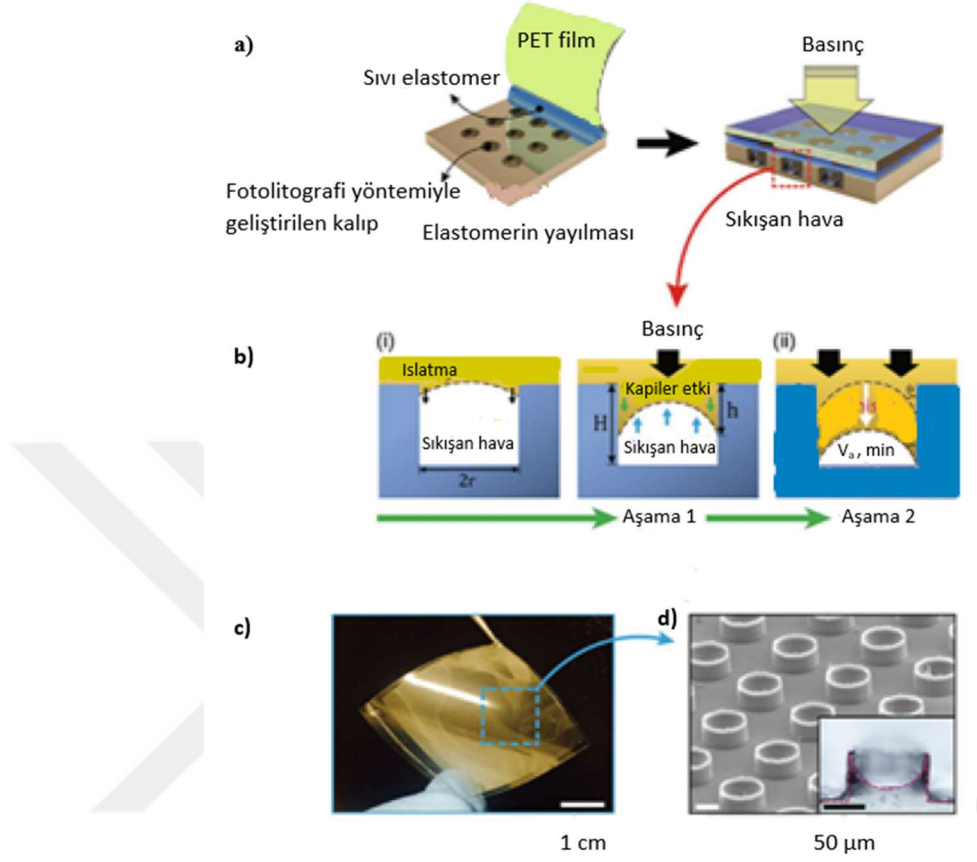
Burada, hapsolmuş havadaki kapiler etkiye göre Laplace basıncı, (1.17) nolu denklem ile verilir; burada r, deliklerin yarıçapıdır, γ, arayüzey gerilimidir ve θ, sıvı ile kalıp arasındaki temas açısıdır (Şekil 1.20b(ii)).

$$P_L = 2\gamma\cos\theta/r \quad (1.17)$$

Boyle yasasına uygun olarak, içbükey yapının geometrisi ve yüksekliği (h), (1.18) nolu denklem aracılığıyla eşit şekilde P_C basıncı uygulanarak kontrol edilir.

$$h = \left(1 - \frac{P_o}{P_L + P_C}\right) H + r \tan \theta \left(\sec \theta - \frac{1}{3} \tan \theta\right) \quad (1.18)$$

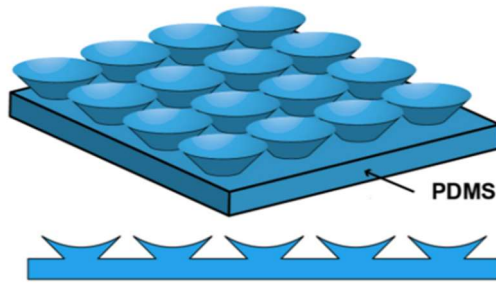
burada P_0 , ortam koşulundaki havanın basıncıdır (≈ 101 kPa), H , deliğin yüksekliğidir (≈ 100 μm) ve r , silindirik deliğin yarıçapıdır (≈ 50 μm). Kalıba hafif bir yük (300 kPa) uygulandıktan sonra yapıların yüksekliği ≈ 75 μm olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 1.20 : a) Kısmi doldurma tekniği ile içbükey geometride yapıların üretimi, b) Kısmi doldurma tekniğinin detaylı olarak şematik gösterimi, c) Üretilen yapııştırıcının görüntüsü (yaklaşık 3 cm \times 3 cm), d) Üretilen yapııştırıcının SEM görüntüsü.

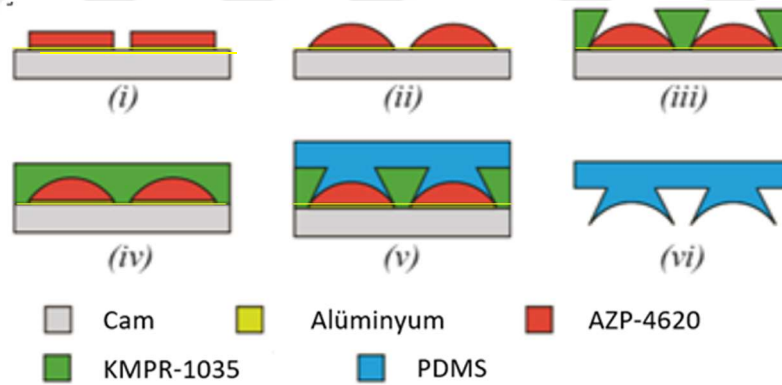
1.6.3 Kopyalama tekniğiyle üretim

Şekil 1.21'de gösterildiği gibi mikrometre boyutunda açılı içbükey yapılarla kaplı yapışkan bir plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen mikro yapılar içbükey bir yüzey ve açılı bir duvardan oluşmaktadır (Nguyen & Shimoyama, 2019; Thanh-Vinh vd., 2011).

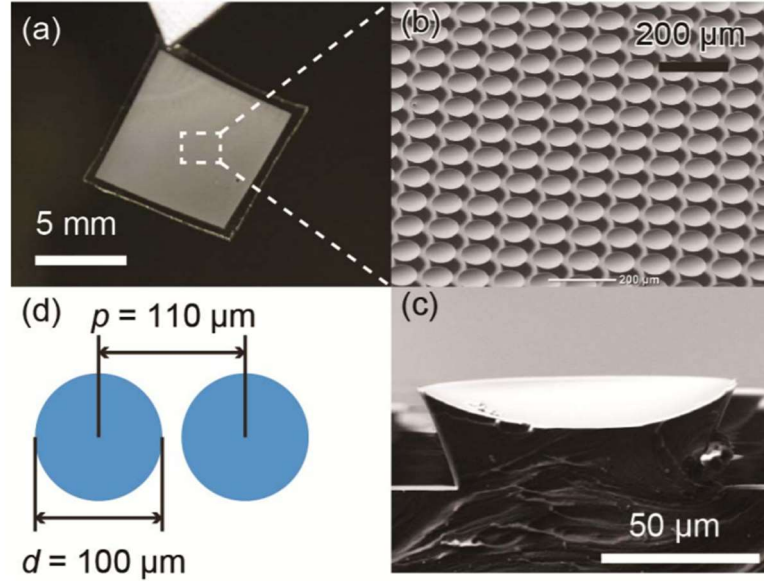


Şekil 1.21 : Mikro vantuz dizilerinden oluşan yapışkan plakanın şematik çizimi.

Mikroyapı dizisinin üretim süreci Şekil 1.22' de gösterilmektedir. İlk olarak, iki adımdan oluşan fotolitografik bir yöntemle kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, lens şeklinde desenler oluşturmak için AZP fotorezisti yuvarlatılmıştır. Bir sonraki adımda, açılı duvarlar oluşturmak için KMPR fotorezisti açılı bir şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra, üretilen kalıbın içerisine PDMS dökülmüş olup, kalıp 110 °C'de 1 saat bekletilerek PDMS'in kürleşmesi sağlanmıştır. Son olarak, kürleştirilmiş durumdaki PDMS'in kalıptan kopyalanmasıyla açılı içbükey mikroyapılardan oluşan bir plaka elde edilmiştir.



Şekil 1.22 : Açılı içbükey geometride mikroyapı dizisinin üretim süreci (Nguyen & Shimoyama, 2019).

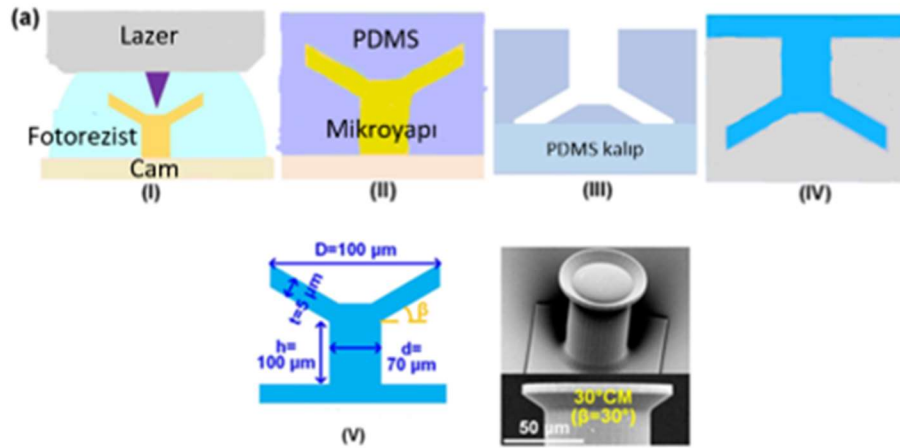


Şekil 1.23 : Üretilen mikroyapı dizisinin tasarım parametreleri ve SEM görüntüleri (Nguyen & Shimoyama, 2019).

Üretilen mikroyapı dizisinin fotoğrafı ve SEM görüntüleri Şekil 1.23'de gösterilmektedir. Üretilen plakada, her bir vantuzun taban çapı ve iki bitişik vantuz arasındaki aralık sırasıyla 100 ve 110 μm 'dir. Bu tasarım ile vantuzların toplam alanı, plaka yüzeyinin yaklaşık % 65'ini kaplar. Açılı içbükey yapı dizili plakanın boyutu 10 mm \times 10 mm olup, plakanın kalınlığı 0,2 mm'dir.

Y. Wang ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, kopyalama tekniği kullanılarak açılı sütunsal içbükey geometride yapılardan oluşan yapıştırıcılar geliştirilmiştir. Üretilmesi hedeflenen geometrideki yapılar Inventor programı (Autodesk, San Rafael, CA, USA) kullanılarak tasarlanmıştır. Üç boyutlu yapılar, iki fotonlu bir litografi sistemi (Photonic Professional GT, Nanoscribe, Eggenstein-Leopoldshafen, Almanya) aracılığıyla basılmıştır. Baskı için daldırma modu ve IP-DIP (Nanoscribe, Eggenstein-Leopoldshafen, Almanya) reçine kullanılmıştır. Yapılar propilen glikol monometil eter asetat (PGMEA, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, ABD) içine 10 dakika daldırılarak geliştirilmiştir ve geliştirilen bu yapılar 1 dakika izopropanol içinde durulanmıştır. Geliştirilen yapılar, mekanik stabiliteyi arttırmak için 5 dakika süreyle UV ışığına (200 mW, 365 nm, OmniCure S1500A, Almanya) maruz bırakılarak sertleştirilmiştir. Son olarak, üretilen yapılar 45 dakika boyunca buhar biriktirme yöntemiyle (1H,1H,2H,2Hperflorooktil)-triklorosilan (AB111444, ABCR, Karlsruhe, Almanya) kaplanmıştır. Elde edilen yapılar kopyalama için kalıp

olarak kullanılmıştır (Şekil 1.24a). Bu amaçla, iki bileşenli polidimetilsiloksan (PDMS, Sylgard 184, Dow Corning, Midland, ABD) 10:1 elastomer/sertleştirici oranında karıştırılmıştır. Daha sonra, hazırlanan karışım yapıların üzerine dökülüp, en az 3 saat 75 °C'de kürlenmiştir. Kalıptan çıkarma işleminden sonra, PDMS şablonu, 30 dakika boyunca 200 °C'de bir sıcak plaka üzerinde sertleştirilmiştir. Poliüretan yapıların (PU, NEUKADUR A75, Altropol GmbH, Stockelsdorf, Almanya) imalatı için PDMS şablonları (başka yüzey işlemleri olmadan) kullanılmıştır. 1.2/1 elastomer/sertleştirici oranında iki bileşen karıştırılarak sıvı fazda poliüretan (PU) elde edilmiştir. Hazırlanan poliüretan karışımı, PDMS şablonuna dökülmüştür ve akabinde en az 3 saat boyunca 65 °C'de kürlenmiştir. Kalıptan çıkarmanın ardından, poliüretan mikro yapılar sıcak bir plaka üzerinde 120 °C'de sonradan tekrar sertleştirilmiştir. Üretilmiş mikroyapının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 1.24b' de gösterilmiştir.







Şekil 1.24 : (a) (I) iki fotonlu litografi ve (II–IV) kopya kalıplama ile üretim sürecinin gösterimi. (V) Mikro yapıların boyutları. (b) Üretilmiş mikro yapının taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

1.7 Minyatürize Ahtapotlar Esinlenilen Yapıştırıcıların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Ahtapotların vantuz yapıları taklit edilerek farklı geometrik şekillerde minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcılar üretilmiştir. Kubbe benzeri çıkıntılı, içbükey, açılı içbükey ve açılı sütunsal içbükey şekilli geometrilerin kapsamlı bir şekilde yapışma özellikleri araştırılmıştır. Ek olarak, ahtapotlar esinlenilen minyatürize yapıştırıcıların özellikleri Çizelge 1.1' de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1 : Ahtapottan esinlenen minyatürize yapıştırıcılardaki yapıların özellikleri.

Yapıların isimleri	Yapıların şekli	Malzeme	Yapıların çapı	Yapışma kuvveti (Sualtı ortamda)	Dayanıklılık
Açılı içbükey		PDMS	100 µm	46.3 kPa (Cam yüzeyinde)	-
Kubbe benzeri çıkıntılı		Poliüretan	100 µm	41 kPa (Silisyum yüzeyinde)	10000 çevrim
İçbükey		Poliüretan	100 µm	45 kPa (Silisyum yüzeyinde)	100 çevrim
Açılı sütunsal içbükey		PDMS	100 µm	1.2 Mpa (Cam yüzeyinde)	-

1.8 Literatür Özeti

Minyatürize ahtapot esinlenilen yapıştırıcıların üretimine ve biyomedikal, robotik uygulamalarında kullanımına yönelik çalışmalar son yıllarda yeni trendler arasına girmiştir.

Ancak bilgi dahilinde ilk olarak bu çalışmalara Vinh ve diğ. (2011) 2011 yılında başlayarak, hem kuru hem de ıslak yüzeylerde yapışması için kopyalama yöntemiyle yapay PDMS esaslı açılı içbükey şekilli mikroyapı dizisi geliştirmişlerdir. Ürettikleri mikroyapı dizisinin, düz uçlu mikroyapı dizisinin ve düz PDMS elastomerinin cam yüzey üzerinde ıslak ve kuru ortamlarda yapışma kuvvetlerini ölçmüşlerdir. Cam yüzey ıslandığında, düz uçlu dizinin ve düz elastomerin yapışma kuvvetleri sırasıyla 1.7 kat ve 7 kattan fazla azalmıştır. Öte yandan, cam yüzey ıslatıldığında açılı içbükey şekilli dizinin yapışma kuvveti yaklaşık olarak 1.1 kat artmıştır. Ayrıca, hem ıslak hem de kuru koşullarda, üretilen yapıştırıcı, düz uçlu ve düz elastomerlerden daha yüksek yapışma kuvveti sergilemiştir.

Chang ve diğ. (2014) yaptıkları bir çalışmada, bir nanokürecik tabakasını bir UV reçine ile lamine edilmesi yoluyla çözücü esaslı bir litografik üretim süreci tanıtmışlardır. Bu çalışmada, UV reçineyi çeşitli yumuşak çözücülere maruz bırakmak suretiyle nanoboşluklu yapılar geliştirip yapay vantuz üretiminde kullanmak amaçlanmıştır. Çözünürlük parametresine bağlı olarak çözücülerin UV reçine üzerindeki boşluk geometrisi üzerine etkisi araştırılmıştır. Üretilen nanoyapıda vantuz benzeri yapılardan oluşan yapıştırıcı kesme yönünde 75.2 N/cm^2 değerinde bir yapışma kuvveti sergilemiştir.

Lee ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, ahtapot vantuzlarının içindeki boşluk basıncına bağlı olan yapışma kuvvetini kontrol etmek için kas aktivasyonunu taklit ederek, elastomerik nanoboşluklu bir plakanın üzerindeki bir hidrojel tabakasının ısıya duyarlı aktivasyonunun, termal bir şekilde uyarıldığında yapıştırıcının değiştirilebilirlik özelliği kazandığını göstermişlerdir. Üretilen plakanın yapışma kuvveti 59.1 kPa olarak belirlenmiş olup, 22 ile $35 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklık değişimine bağlı olarak yapışma kuvvetleri oranı 170 olarak belirlenmiştir. 22 ile $61 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında, yapışkan ped, maksimum 94 kPa yapışma kuvveti ile maksimum 293 oranında

yapışma değiştirme kuvveti göstermiştir. Üretilen plakaların yarı iletken cihazlar üretmek için mikro ve nanomembranların isteğe bağlı alt tabakalar üzerine transfer baskısında kullanılabileceği öne sürülmüştür

Ahtapotlar, kollarındaki vantuzlar nedeniyle denizler arası bölgedeki kaygan, pürüzlü ve düzensiz yüzeylere yapışabilir. Chu ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, kopyalama tekniği vasıtasıyla iki boyutlu kolloid silikon kristallerini kullanarak silisyum plakalar üzerinde yapay nanovantuz dizileri oluşturmuşlardır. Ortaya çıkan nanovantuzlar, kuru ve ıslak ortamlarda hem mikro pürüzlü hem de düz yüzeylerde yüksek yapışma kuvvetleri sergilemişlerdir. Bu durum, üretilen yapıştırıcıların yara örtüsü olarak kullanılabileceğini göstermektedir .

Baik ve diğ. (2017), ahtapotların vantuzlarında bulunan kubbe benzeri çıkıntılara dayanan, biyolojik olarak esinlenilmiş, tekrarlı olarak yapışabilen bir ıslak/kuru yapışma sistemi üretmişlerdir. Bu çıkıntıların mimarisini taklit etmek için, polimer esaslı malzeme üzerine desenler oluşturmayı ve onu herhangi bir karmaşık kimyasal sentez ve yüzey modifikasyonu olmadan mastar olarak kullanmayı içeren bir tür kısmi doldurma tekniği kullanmışlardır. Üretilen yapıştırıcıdaki mikrometre ölçekli kubbe benzeri yapıların yapışma kuvvetini arttırdığı tespit edilmiştir. Ahtaptan ilham alan bu sistem, çeşitli koşullar altında (kuru, nemli, sualtında ve yağ altında) silikon alttaşlara, cama ve pürüzlü cilt yüzeylerine güçlü, tersine çevrilebilir, yüksek oranda tekrarlanabilir yapışma sergilemektedir. Potansiyel bir uygulama alanı göstermek için, büyük bir silikon alttaş havada ve sualtında herhangi bir yüzey kontaminasyonu olmadan taşınmasında üretilen yapıştırıcı kullanılmıştır .

Cilt yüzeylerinde yüksek yapışma, çeşitli tıbbi uygulamalarda giyilebilir ve cilde takılabilir elektronikler için oldukça talep edilen bir özelliktir. Chun ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, karbon bazlı iletken polimerden oluşan kompozit film üzerinde ahtapot vantuzlarındaki kubbe benzeri çıkıntıları içeren yapılar üretmişlerdir. Kubbe benzeri mimarilere sahip biyo-esinlenen iletken vantuzlar sualtı ortamda 500 gr ağırlığı taşıyabilmiştir. Ek olarak, üretilen yapıştırıcı, çeşitli yüzeylerde hem kuru hemde ıslak koşullar altında yüksek düzeyde yapışkanlık göstermişlerdir. Bu yapıştırıcılar, silikon yüzey (maks. 5.24 Ncm⁻²) ve cilt kopyası (maks. 1.89 Ncm⁻²) üzerinden kontaminasyona neden olmadan zahmetsiz bir şekilde sıyırma yöntemiyle ayrılabilmişlerdir.

Doğada bulunan cilt mimarilerinin yapışma yetenekleri, bağlandıkları yüzeyler ile dikkate değer etkileşimler üretebilirler. Bunlar arasında, ahtapot vantuzları, kuru ve ıslak koşullarda tekrarlı yapışma için benzersiz hiyerarşik yapılara sahiptir. Baik ve diğ. (2018), ahtapot vantuzunun morfolojisinden esinlenerek içbükey şekilli mikrouçlara sahip biyolojik olarak uyumlu ve tekrarlanabilir yapışma sağlayan yapıştırıcıların üretimini gerçekleştirmişlerdir. Biyo-esinlenen sentetik yapıştırıcılar fotolitografik yöntemle üretilen bir kalıp vasıtasıyla kısmi doldurma tekniği kullanılarak geliştirilmiştir. Üretilen yapıştırıcıların yapışma anındaki etkin temas alanlarıyla ilgili ve silisyum plaka üzerinde hem kuru hemde sualtı koşullarında (maks. 11 Ncm^{-2}) yapışma performanslarını artırmak için deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanısıra, üretilen yapıştırıcının domuz derisi üzerindeki sıyırma yönündeki yapışma kuvveti (maks. 14.6 mJ) tespit edilmiştir. Yapıştırıcı nemli, tüylü ve pürüzlü bir cilt üzerinde gözlenebilen herhangi bir kimyasal kalıntı olmaksızın stabil tutunma göstermiştir.

Ahtapot vantuzlarını taklit ederek, kuru ve ıslak koşullarda güçlü ve tekrarlı yapışma özelliğine sahip cilt/organa yapışabilen yapıştırıcıların geliştirilmesi oldukça çekici hale gelmiştir. Bununla birlikte, insan vücudunun üç boyutlu, pürüzlü ve kavisli yüzeylerine karşı yüksek uygunluk elde etmek, yara koruma ve tıbbi uygulamalar için yapıştırıcı geliştirmek hala daha zorluğunu korumaktadır. Baik ve diğ. (2019), ahtapot vantuzundaki kırışıklıklardan ve kubbe benzeri yapılardan esinlenerek bir yapıştırıcı geliştirmişlerdir. Üretilen yapıştırıcıların yüksek yapışma kuvvetleri kırışıklıklar ile kenetlenen yüzey arasındaki kılcal etkileşimlerle alakalıdır. Yapıştırıcı, maksimum temas alanı ve kırışıklıkların yüksek uyumu sayesinde hem kuru hemde ıslak koşullarda cilde sağlam bir şekilde tutunmuştur. Ayrıca, üretilen yapıştırıcıdaki kılcallık arttıkça dinamik hareketler altında bile çok daha yumuşak, pürüzlü ve ıslak durumdaki çeşitli iç organlara güçlü bir yapışma sağlanabilmiştir. Üretilen yapıştırıcı, cilde/organa takılabilir yara örtüleri, terapötik arayüzler ve biyoelektronik cihazlar gibi çeşitli biyomedikal uygulamalar için çok yönlü yapıştırıcıları geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

Vinh ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, yoğun bir açılı içbükey şekilli mikroyapı dizisine sahip esnek bir yapıştırıcı üretilmiştir. Mikrovantuzların taban çapı ve yüksekliği sırasıyla $100 \mu\text{m}$ ve $30 \mu\text{m}$ 'dur. Yüzey ıslandığında, üretilen mikrovantuz dizisinin yapışmasının önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir. Önerilen vantuz dizisinin

ıslak pürüzsüz bir yüzeye birim alan başına maksimum yapışma kuvveti yaklaşık olarak 0.37 Mpa'dır. Ayrıca, yapışma mukavemetinin alttaşın ıslanabilirliği ve yüzey geriliminden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, mikrovanuz dizisinin ıslak durumda yaklaşık olarak 0.12 Mpa'lık bir yapışma kuvveti ile 10 mm kadar küçük yarıçaplı eğriliğe sahip yüzeylere dahi yapışabileceği gösterilmiştir.

Biyoesinlenen mikrofibriller yapıştırıcılardaki son gelişmeler, çeşitli yüzeylere güvenilir şekilde bağlanmaya izin veren teknolojilerle sonuçlanmıştır. Kılcal ve van der Waals kuvvetleri sualtında önemli ölçüde zayıfladığından, fibriller yapıştırıcılar ıslak ortamlarda çok daha az etkilidir. Güçlü ve tekrarlı sualtı yapışması elde etmek için çeşitli stratejiler önerilmiş olsada, ek yüzey işlemleri olmaksızın hem havada hemde sualtında çalışan güçlü yapıştırıcılar henüz geliştirilememiştir. Wang ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, havada ve su altında güçlü ve kontrol edilebilir bir yapışma sağlayan açılı sütunsal içbükey şekilli yapılardan oluşan yapıştırıcı geliştirilmiştir. Üç farklı açıdaki (15, 30 ve 45⁰) ve mantar şekilli yapıların yapışma kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Havada, 15 derece açılı yapı mantar şekilliyle benzer yapışma kuvveti sergilerken, sualtında 20 kat daha fazla yapışma kuvveti sergilemiştir. Ayrıca, üretilen yapılar kendinden sızdırmaz özellik göstermekte olup, bu sayede daha güçlü çekildiğinde güçlü bir conta oluşumu yoluyla daha kararlı bir yapışmaya yol açtığı tespit edilmiştir.

Değiştirilebilir sualtı yapışması çok sayıda uygulama için faydalı olabilir, ancak temas arayüzünde su bulunması nedeniyle son derece zordur. Wang ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, geri çekme hızını 100 ila 0.1 $\mu\text{m s}^{-1}$ arasında ayarlanmasıyla yüksek (~1 MPa) ve düşük (<0.2 MPa) yapışma gücü arasında geçiş yapabilen açılı sütunsal içbükey şekilli mikroyapılardan oluşan yapıştırıcılar (100 mikron çapında ve 5 mikron kenar kalınlığında) rapor edilmiştir. Bu çalışma, talep üzerine ıslak yapışmayı kontrol etmenin yolunu açmakta olup, akıllı yapıştırıcıların daha fazla uygulamada kullanılmasına sebep olabilir.

Sonuç olarak ahtapottan esinlenen minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcıların üretimine ve yapışma özelliklerine ilişkin farklı çalışmalar literatürde mevcuttur; ancak bu çalışmalarda ilgili minyatürize yapıların pahalı, zaman alıcı ve çok aşamalı bir teknik olan fotolitografik metotlarla üretildiği bildirilmektedir. Bu tez çalışması, ahtapottan esinlenen minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcıların pratik bir şekilde

CNC işleme tekniğiyle üretiminin incelenmesi ve üretilecek yapıştırıcıların yapışma özelliklerinin belirlenmesi suretiyle literatüre katkı sağlayacaktır.



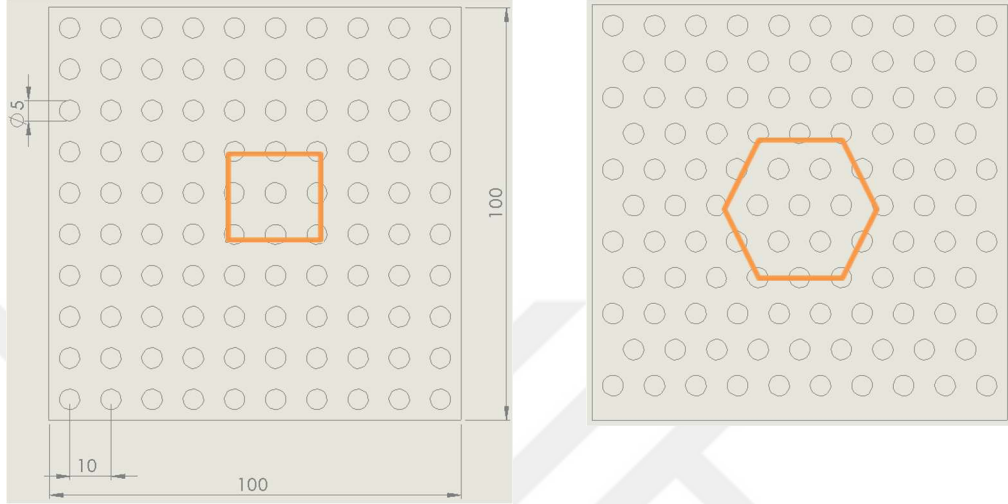
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Minyatürize Ahtapot Esinlenen Yapıştırıcının Üretiminde Kullanılan Kalıbın Üretimi

Ahtapot esinlenen içbükey şekilli elastomerik minyatürize yapılardan oluşan yapıştırıcılar imal etmek için, öncelikle bilgisayar destekli nümerik kontrollü (CNC) talaşlı imalat yöntemiyle PMMA (Polimetilmetakrilat) malzemeden oluşan delik desenli (2 mm çap ve derinlikte) kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2(a)-(b)). Kalıbın tasarımı, elastomerik yapıların yapışma anında birbirine temas etmesini engellemek ve birim alana düşen yapı sayısını artırmak yoluyla yapışma kuvvetini maksimuma çıkarmak için altıgen dizilimde boşluklu (GD 1 ve AR 1) olacak şekilde belirlenmiştir. Örneğin, 100x100 birimlik bir alana kare dizilimde 5 birim çapındaki deliklerden 100 adet yerleştirilirken altıgen dizilimde 105 adet delik yerleştirilebilmektedir. Bu da delik sayısında % 5 artışa karşılık gelip, aynı oranda yapışma kuvvetinde artacağını göstermektedir (Şekil 2.1). Burada GD, genişlik-derinlik oranıyken AR, her yapı (d) arasındaki mesafenin çapa (2r) bölünmesidir. Öncelikle, bilgisayar destekli tasarım programı olan Solidworks kullanılarak belirlenen tasarımda kalıbın bilgisayar ortamında çizim dosyası hazırlanmıştır (Şekil 2.2(c)). Hazırlanan tasarım dosyası 2 mm çapında bir matkapla donatılmış üç eksenli bir CNC işleme makinesinin (Haas/VF5) bilgisayarına yüklenmiştir. Daha sonra, 70 mm x 70 mm x 10 mm boyutlarında bir PMMA plaka CNC tezgahı tablasına yerleştirilmiş olup, otomatik bir işleme süreciyle 50 mm/sn ilerleme ve 2500 dev/dk dönme hızlarıyla yerleştirilen plakanın belirlenen ölçülerde işlenmesi sağlanmıştır. Talaşlı imalat yöntemiyle kolaylıkla işlenebildiği için kalıp malzemesi seçiminde PMMA tercih edilmiştir. Şekil 2.2d’de üretilen kalıbın üstten görüntüsü gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, PMMA plaka üzerinde yüksek hassasiyette bir dizilimde delikler üretilmiştir.

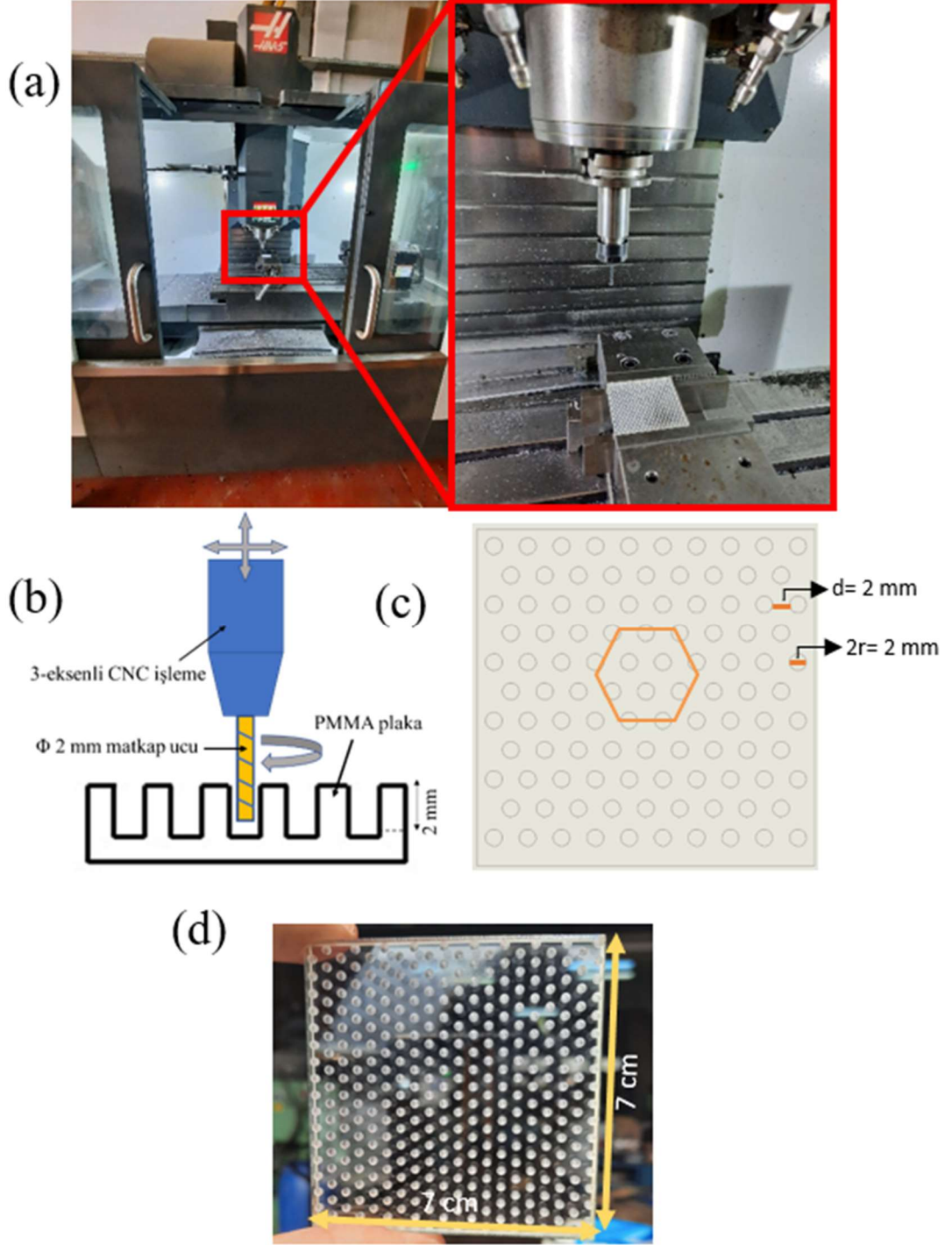
100 adet (Kare dizilim)

105 adet (Altıgen dizilim)



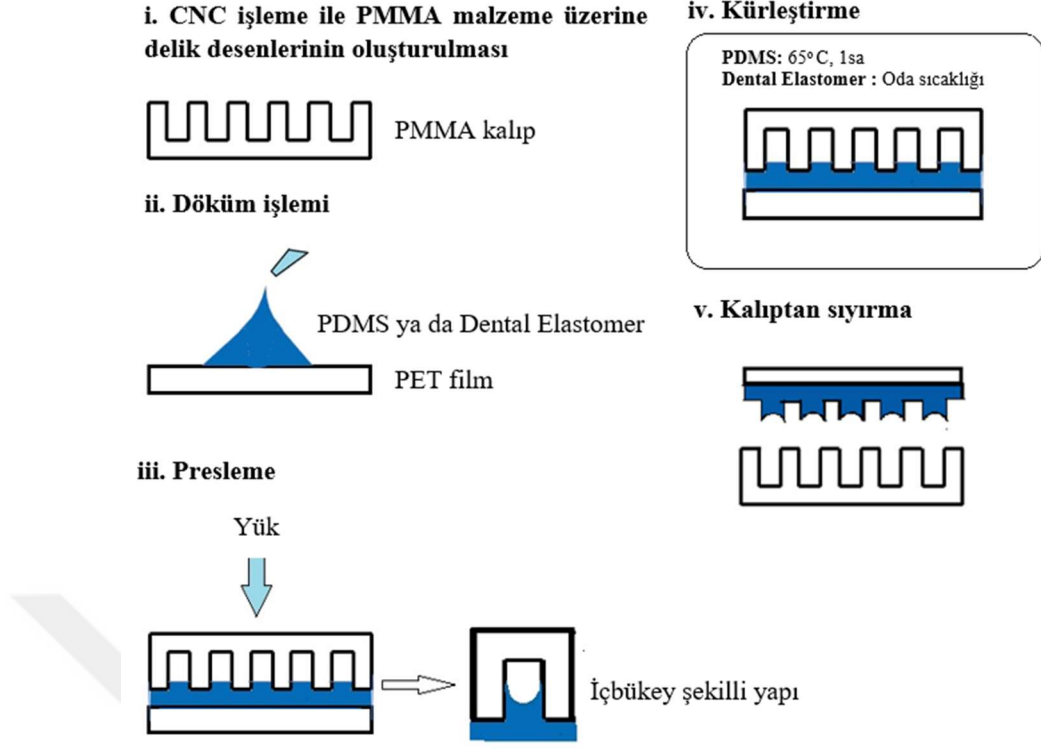
➔ % 5 Artış

Şekil 2.1 : Kare ve altıgen dizilimde deliklerden oluşan kalıp tasarımları.

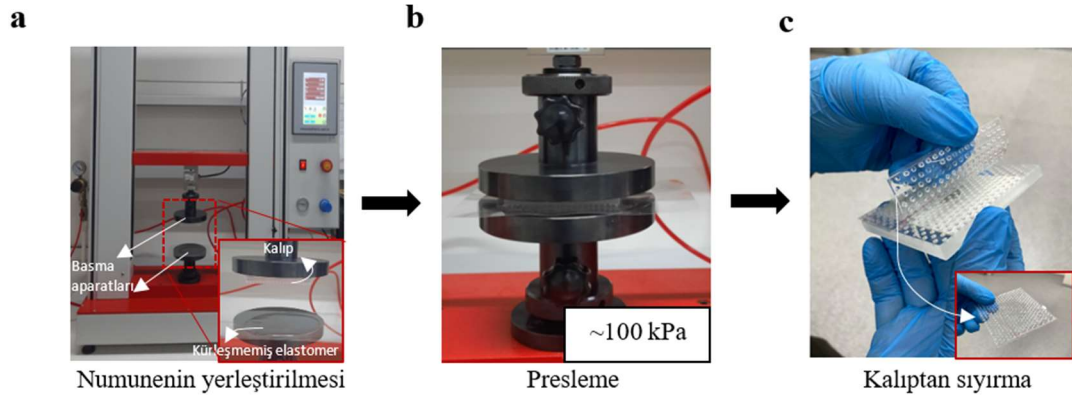


Şekil 2.2 : (a) Delik desenli PMMA kalıbın CNC işleme sürecinin fotoğrafları, (b) CNC işleme ile kalıp üretiminin şematik gösterimi, (c) Bilgisayar destekli tasarım programında tasarlanmış kalıbın çizimi, (d) Üretilen PMMA kalıbın fotoğrafı.

Ahtapottan ilham alınarak ve içbükey geometriye sahip polimer yapılardan oluşan ıslak ortam yapıştırıcıları kısmi doldurma tekniğiyle üretilmiş olup, üretim aşamaları şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmiştir. İlk olarak, belirlenen tasarımda (Şekil 2.2c) delik dizilerine sahip PMMA malzemeden oluşan kalıp, yukarıda açıklandığı gibi CNC işleme yöntemiyle hazırlanmıştır (Şekil 2.2) (aşama i). Hazırlanan kalıplar, şekil 2.4a' da gösterildiği gibi mekanik test cihazına bağlanmış üst taraftaki basma aparatına çift taraflı bant kullanılarak sabitlenmiştir. Daha sonra, şekil 2.4a' da gösterildiği üzere alt taraftaki basma aparatının üzerine yerleştirilmiş olan 120 µm kalınlığında bir polietilen tereftalat (PET) filmin üzerine kurlanmamış elastomer dökülerek yaklaşık ~1 dakika süresince yayılması beklenmiştir (aşama ii). Daha sonra, kurlanmamış elastomer ve boşluklu kalıp şekil 2.4b'de gösterildiği gibi elastomerin kalıp ve PET film arasındaki kapiler etkiyle yükselişini hassas bir şekilde kontrol etmek için 100 kPa'lık bir basınçta 2 dakika süreyle preslenmiştir (aşama iii). Preslenmiş haldeki elastomer ve kalıp birbirinden ayrılmayacak şekilde mekanik test cihazından sökülmüştür. Elastomerlerde kurlanmanın sağlanması için PMMA kalıpla temas halinde olan PDMS 1 saat süreyle 65 °C' de etüvde bekletilirken dental elastomer 10 dakika süreyle oda sıcaklığında bekletilmiştir (aşama iv). Kurlanmış elastomer/PET film kalıptan sıyırma yoluyla sökülerek vakumlama etkisiyle yapışabilen polimer yapılardan oluşan ahtapottan esinlenen yapıştırıcılar elde edilmiştir (Şekil 2.4c ve aşama v).



Şekil 2.3 : İçbükey şekilli geometrideki elastomerik yapıların üretim aşamalarının şematik gösterimleri.



Şekil 2.4 : Fotoğraflarda basma testi aparatlarının bağlı olduğu mekanik test cihazıyla yapılan detaylı üretim prosesi gösterilmektedir. a) Hazırlanan kalıp üstte bulunan basma testi aparatına sabitlendikten sonra elastomer PET filmin üzerine dökülmesi b) Elastomerle kaplanmış PET filmin preslenmesi (~100 kPa). c) Kürleştirme işleminden sonra polimer yapılardan oluşan yapııştırıcının kalıptan ayrılması.

2.2 Minyatürize Ahtapotlan Esinlenilen Yapıştırıcıların Üretiminde Kullanılan Elastomerler

Ahtapotlan esinlenilen yapıştırıcıların geliştirilmesinde polidimetilsiloksan (PDMS) ve dental elastomer olmak üzere iki çeşit elastomer kullanılmıştır.

PDMS elastomeri yüksek şeffaflığa ve düşük yüzey enerjisine sahip olup, bir prepolimer ve sertleştirme ajanı içerir (Slygard 184, Dow Corning Corp.). PDMS genellikle prepolimerin ve siloksan oligomer gibi sertleştirme ajanınının 10:1 karışımı oranında kullanılır. PDMS, prepolimerin ısı enerjisi ve platin bazlı katalizör kullanılarak organometalik çapraz bağlantılar (Si-CH₂-CH₂-Si bağlantısı) oluşturarak elastomer olarak yaklaşık 48 saat oda sıcaklığında bekletilerek kürleşmesiyle elde edilir. Organik çapraz bağlantı reaksiyonu hızlandırılabilir ve PDMS için gereken sertleştirme süresi sıcaklığı artırılarak azaltılabilir. Örneğin, kullanım talimatına dayanarak 150 °C'de 15 dk'lık bir kurutma süresi PDMS' i tamamen kürleştirmek için yeterlidir. Bu çalışmada, kürlenmeyi hızlandırmak ve aynı zamanda PMMA (yumuşama sıcaklığı ~90 °C) kalıbın yumuşamasını engellemek için kürleşme sıcaklığı olarak 65 °C tercih edilmiştir. PDMS elastomerinin çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 : Dow Corning Slygard 184 PDMS'inin bazı fiziksel özellikleri.

Özellik (kürlenmiş durumda)	Değer
Young modülü	1.2-2.0 MPa
Çekme dayanımı	6.2 MPa
Durometre sertliği	50 Shore A
Viskozite	3900 mPa.s
Yoğunluk	1.03 g/cm ³
Termal iletkenlik	0.18 W/(m.K)
Termal genişlemenin lineer katsayısı	310.10 ⁻⁶ 1/K
Dielektrik sabit	2.65
Kırılma indisi	1.430

İçbükey şekilli elastomerik yapı üretimi aynı zamanda dental uygulamalarda kullanılan silikon esaslı elastomerle de (Elite Double 22) yapılmıştır. Bu malzeme, PDMS'den çok daha yüksek başlangıç viskozitesine sahip olup, oda sıcaklığında 1:1 oranında sertleştiriciyle prepolimerin karıştırılmasından sonra ~10 dakika içerisinde tamamen kürleşmektedir. Bu elastomerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Elite Double 22 elastomerinin bazı fiziksel özellikleri.

Özellik (kürlenmiş durumda)	Değer
Sertlik	22 Shore-A
Ayrıntı üretimi	20 µm
Boyutsal kararlılık (24 saat sonra)	-0.05%
Çekme dayanımı	2.5 N/mm ²
Uzama	450 %
Yırtılma dayanımı	5 N/mm ²

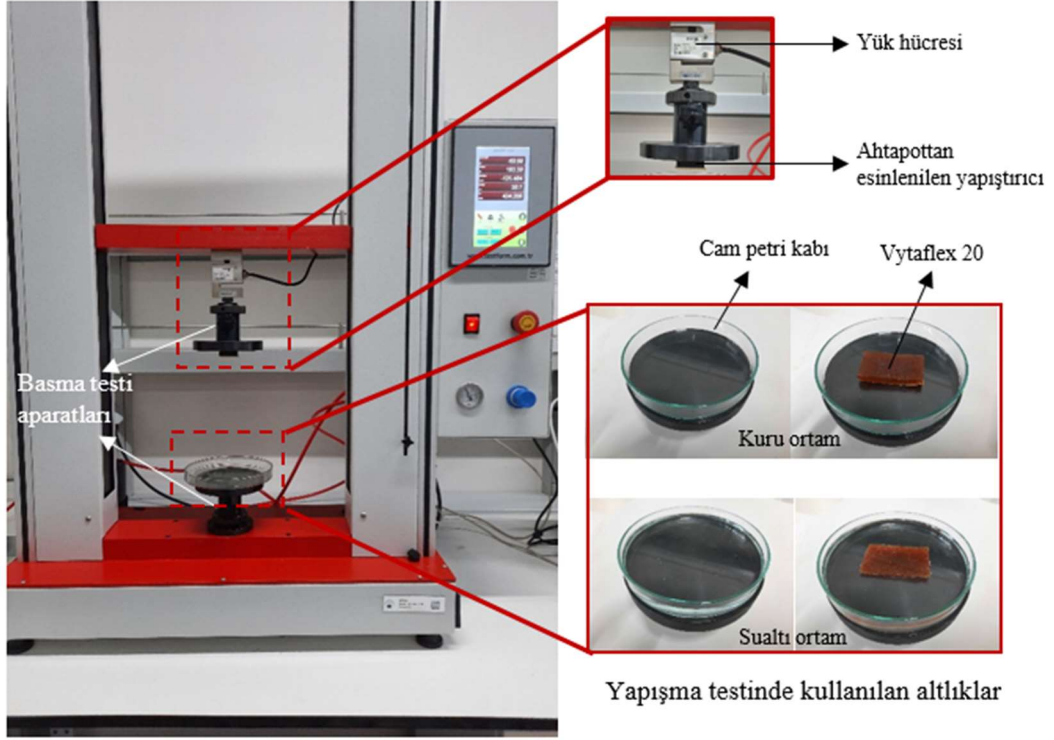
2.3 Üretilen Yapıştırıcıların Morfolojik Karakterizasyonu

Numunelerin morfolojik ve kesit görüntüleri stereo mikroskop (Zeiss, Discovery.V12) kullanılarak incelenmiştir. Fotoğraf görüntüleri elde etmek için cep telefonu kamerası kullanılmıştır. Numunelerin yük uygulanmadan önce, yük uygulanması esnasında ve sonrasında yapıştırıldıkları yüzeyle arasında oluşan temas alanı görüntüleri optik mikroskop (Zeiss, Axio Vert A1) ile elde edilmiştir.

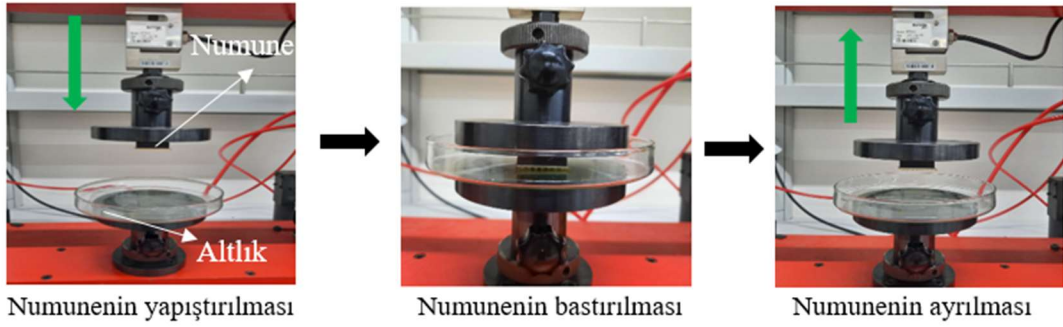
2.4 Üretilen Yapıştırıcıların Yapışma Testleri

Yapışma testleri mekanik test cihazında (Testform/AS1) gerçekleştirilmiş olup, cihazın yük hücresi ve basma testi aparatları ölçümlerde kullanılmıştır (**Şekil 2.5**). Dikey yöndeki yüklerin kayıt edilmesi yük hücresi (Baykon, BT604) aracılığıyla sağlanmıştır. Yapışma testleri sert (cam petrinin iç yüzeyi) ve deforme edilebilir (vytaflex 20 (shore 20A)) altlıkların yüzeyinde uygulanmıştır. Altlıklar cihazın alt kısmındaki basma testi aparatına sabitlenirken, üretilen yapıştırıcılar üst kısımdaki basma testi aparatına sabitlenmiştir. Üretilen yapıştırıcılar (2x2 cm²) belirtilen altlıklar üzerinde belirli bir önyük altında belirli bir süre kuru, sualtı, silikon yağlı, asidik (pH

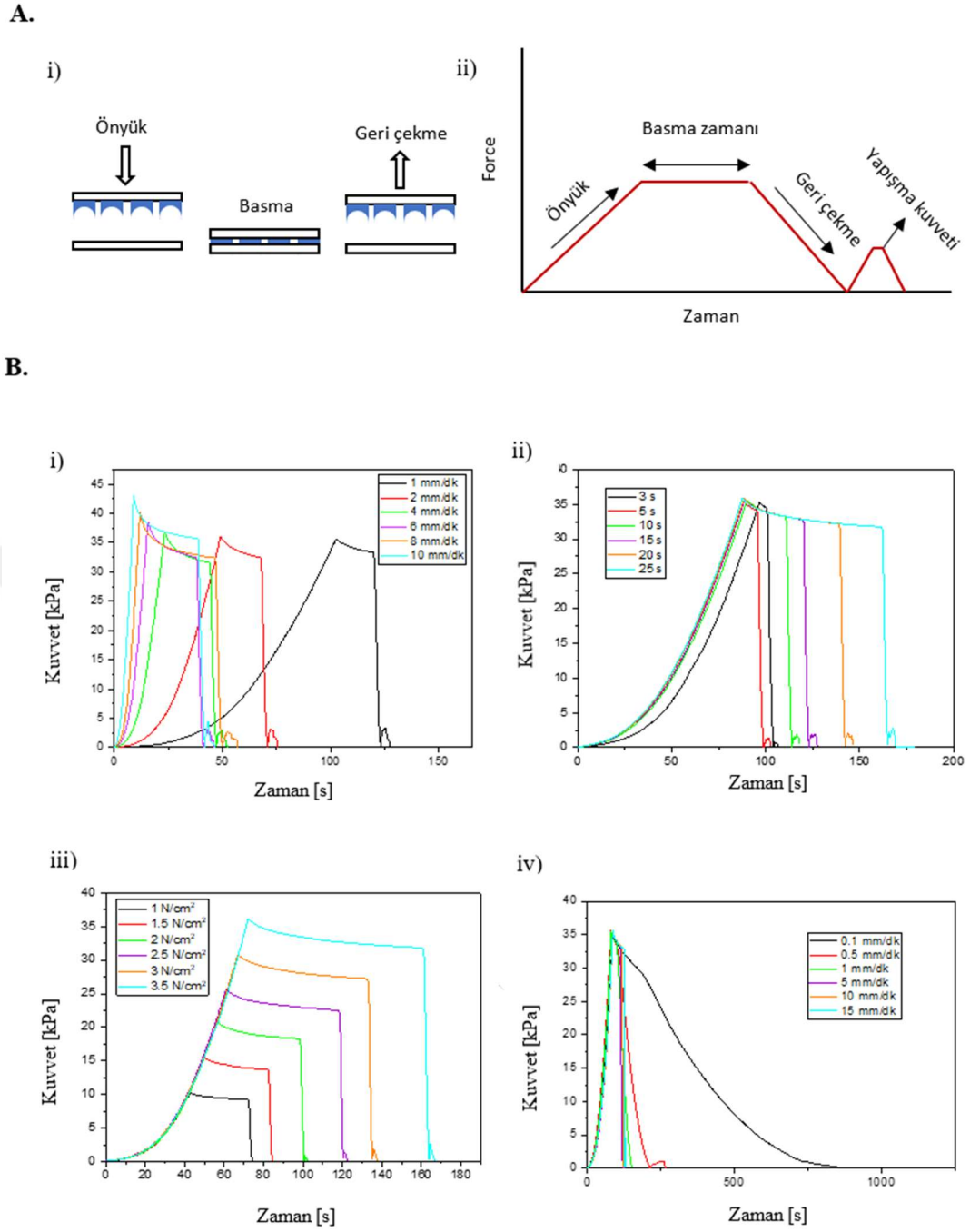
3) ve bazik (pH 11) çözeltili ortamlarında temas halinde bekletilmişlerdir. Daha sonra, yapıştırıcı dikey yönde geri çekilmiştir (Şekil 2.6). Önyük geri çekildikten sonra, en yüksek yük yük-zaman eğrisindeki yapışma kuvveti olarak belirlenmiştir. Yapışma kuvvetleri uygulanan önyükün deforme olmamış haldeki içbükey yapının alanına bölümü ile hesaplanmıştır. Şekil 2.7A' da yapışma testinin (i) ve yük-zaman eğrisinin (ii) şematik çizimleri gösterilmiştir. Üretilen yapıştırıcıların farklı türdeki ıslak ortamlarda yapışma davranışlarını daha iyi anlamak için, yapıştırıcılar farklı önyük hızlarıyla (1-15 mm/dk), basma süreleriyle (3-25 sn), geri çekme hızlarıyla (0.1 – 15 mm/dk) ve insan parmağının hafifçe bir dokunuşuna eşdeğer aralıktaki önyüklerle (10-35 kPa) sualtı, silikon yağlı, asidik (ph 3) ve bazik (pH 11) çözeltili ortamlarda rijit ve deforme olabilen altlıklar üzerinde yapışma testlerine tabi tutulmuşlardır. Farklı test parametrelerinin uygulanmasıyla elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinin temsili görüntüleri Şekil 2.7B (i-iv)'de gösterilmiştir. Bunlara ek olarak, üretilen yapıştırıcılardaki içbükey şekilli elastomer yapıların yapışma kuvvetine etkisini teyit etmek amacıyla düz yapıda PDMS ve düz yapıda dental elastomerlerinde yapışma kuvvetleri ölçülmüştür. Yapışma testleri üç kez tekrar edilmiş olup, ortalama değerler standart sapmalarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 2.5 : Mekanik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilen yapışma testi.



Şekil 2.6 : Mekanik test cihazında numunenin altlığa yapıştırılmasının ve altlıktan ayrılmasının fotoğrafları.







Şekil 2.7 : A. i) Yapışma testinin ve ii) kuvvet-zaman eğrisinin şematik gösterimi B. Farklı i) önyük hızlarında, ii) basma zamanlarında, iii) önyüklerde ve iv) geri çekme hızlarında ahtapottan esinlenen yapıştırıcıların temsili yük-zaman eğrileri.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretilen ahtapottan ilham alan PDMS ve dental elastomer esaslı yapıştırıcıların fotoğrafları (alan 7 x 7 cm) ve bu yapıştırıcıların sahip olduğu içbükey şekilli minyatürize yapıların şematik çizimleri şekil 3.1(a-b)-3.2(a-b)'de gösterilmiştir. Üretilen yapıştırıcıların stereo mikroskopla çekilen üstten, izometrik ve kesit görüntüleri sırasıyla şekil 3.3(a-b-c)-3.4(a-b-c) ve şekil 3.5(a-b-c)-3.6(a-b-c)'de gösterilmiştir. Üretilen yapıştırıcıların her ikisi içinde geçerli olmak üzere her bir yapı ~1 mm yarıçapında olup, yapıştırıcı plaka üzerinde 1 cm² içerisinde ~7 yapı bulunmaktadır. Ayrıca, yapılar arası mesafe ~2 mm uzunluğundadır ve yapıştırıcılar iç (alan ~3 cm x 3 cm) ve dış olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. İçbükey yapıların oluşumu, sıvı elastomer ile kalıptaki silindirik delik arasında presleme sırasında havanın sıkışmasıyla açıklanabilir. Sıvı elastomer, kalıptaki silindirik bir deliğin yan duvarı ile hapsolmuş hava arasında kapiler hareketle yükselir ve içbükey yapıyı oluşturur (Baik vd., 2017, 2018; del Campo, Greiner, vd., 2007; del Campo, Álvarez, vd., 2007).

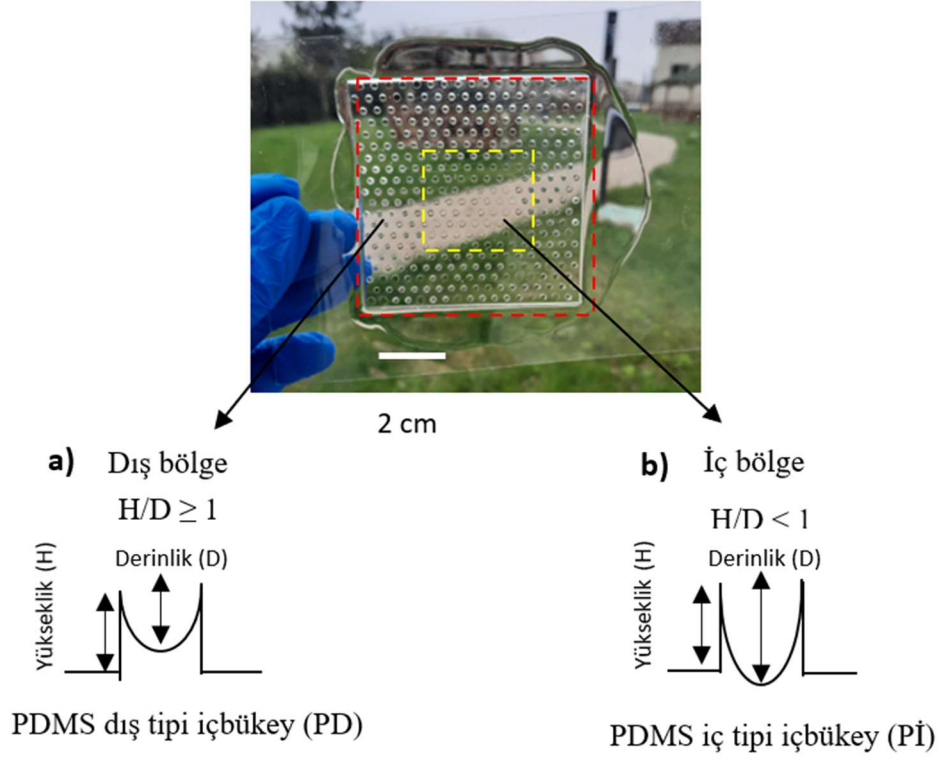
PDMS esaslı elastomerden oluşan yapıştırıcıların iç ve dış bölgeleri sırasıyla iç konkav (Yükseklik/Derinlik < 1) ve dış konkav (Yükseklik/Derinlik > 1) yapılardan oluşur. Üretiminde dental esaslı elastomer kullanılan yapıştırıcılarda farklı olarak iç ve dış bölgelerin sırasıyla dış konkav (Yükseklik/Derinlik > 1) ve perfore yapılardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.1(a-b)-3.2(a-b)'de görüldüğü gibi 2 farklı elastomer kullanılarak 4 farklı yapı üretilmiş olup, bu yapılar sırasıyla PDMS dış tipi içbükey (PD), PDMS iç tipi içbükey (Pİ), dental perfore tipi içbükey (DP) ve dental iç tipi içbükey (Dİ) olarak isimlendirilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Üretilen yapıların şematik çizimleri ve isimleri.

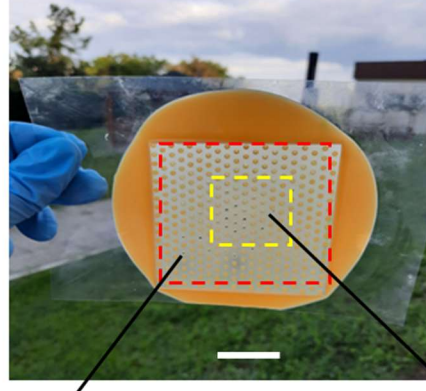
Üretilen yapıların şematik çizimleri				
Üretilen yapıların isimleri	PDMS dış tipi içbükey (PD)	PDMS iç tipi içbükey (PI)	Dental perfore tipi içbükey (DP)	Dental iç tipi içbükey (DI)

İç ve dış bölgeler arasında oluşan yapı farklılıkları, “Sıkma akışı” teorisiyle açıklanabilir (Radhakrishnan & Narayan, 1990). Sıkma akışı, sıvı fazdaki bir malzemenin iki paralel nesne veya plaka arasında bastırılması sonucu sıvının iç bölgeden dış bölgeye doğru harekete geçmesine sebep olan bir akış türüdür. Yapıştırıcı imalatının iii. adımında, delik desenli kalıp elastomer/PET filme karşı dikey olarak bastırılmıştır. Bu, iç bölgedeki sıvı elastomerin bir kısmının dış bölgeye akışına neden olmuştur. Bu nedenle, sıvı fazdaki elastomer dış bölgedeki delik boşluklarını iç bölgeye göre daha fazla doldurarak PDMS esaslı elastomerden oluşan yapılarda derinlik değerinin (D) azalmasına neden olurken, dental esaslı elastomerden oluşan yapılarda ise perfore şeklinde eğrileşmeye sebep olmuştur. PDMS ve dental elastomer esaslı yapılar arasındaki farklılıkların sebebi olarak dental elastomerin başlangıç viskozitesinin PDMS’den daha yüksek olması gösterilebilir. Benzer şekilde, Greiner v.d. (2007) yaptıkları bir çalışmada fotolitografi yöntemiyle geliştirdikleri delikli bir kalıbı başlangıç viskozitesi farklı dental elastomerlerin üzerine bastırdıklarında oluşan yapıların geometrilerinde belirgin farklılıklar gözlemlemişlerdir. İç bükey yapıların oluşumunu yönlendiren kuvvetleri bulmak için, aşağıdaki üretim parametrelerinin geometri üzerindeki etkisi bağımsız olarak incelenmiştir: dış basınç, kalıp deliklerinin çapı, kalıbın yüzey alanı.

Farklı basınçlar altında (uygulanan yükler 20 ile 150 kPa arasında), farklı delik çaplarında (2 mm ve 3 mm) veya farklı yüzey alanlarında (3 cm x 3 cm and 7 cm x 7 cm) üretilen yapıların geometrilerinde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Campo ve diğ. (2007) yaptıkları bir çalışmada da benzer sonuçlar gözlenmiştir.

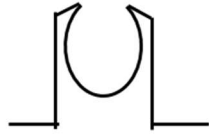


Şekil 3.1 : İçbükey şekilli PDMS elastomer yapılara (~ 7 cm x 7 cm) sahip ahtapottan esinlenilen yapıştırıcının fotoğrafı. **a)** İmal edilmiş yapıştırıcının dış bölgesindeki yapıların ve **b)** iç bölgesindeki yapıların şematik gösterimi.



2 cm

a) Dış bölge

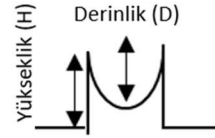


Dental perfore tipi içbükey (DP)

b) İç bölge

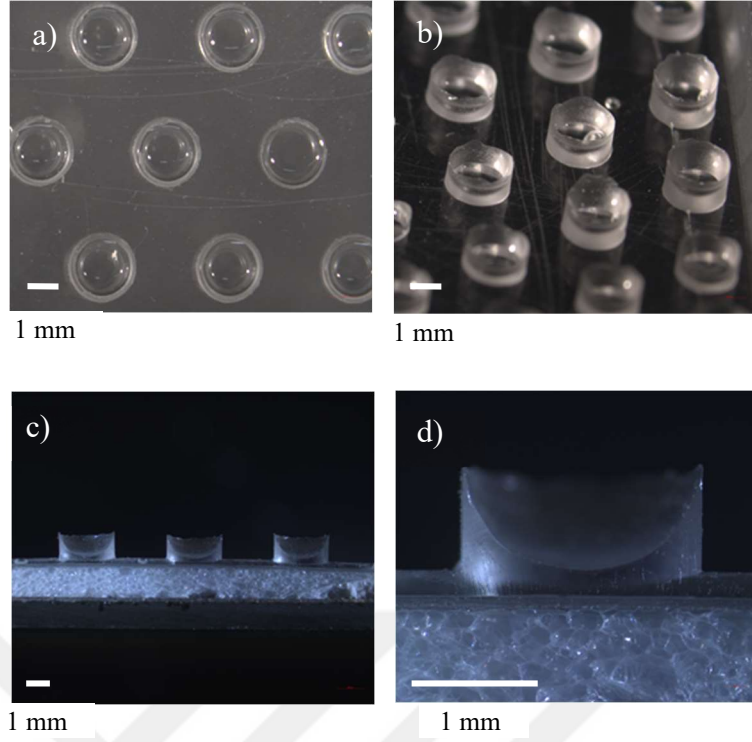
$H/D \geq 1$

Derinlik (D)

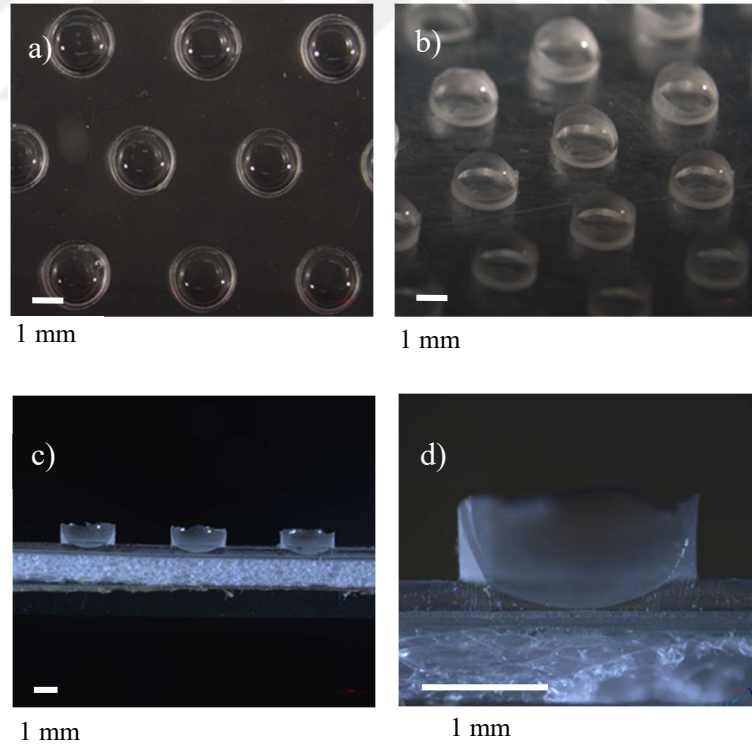


Dental iç tipi içbükey (DI)

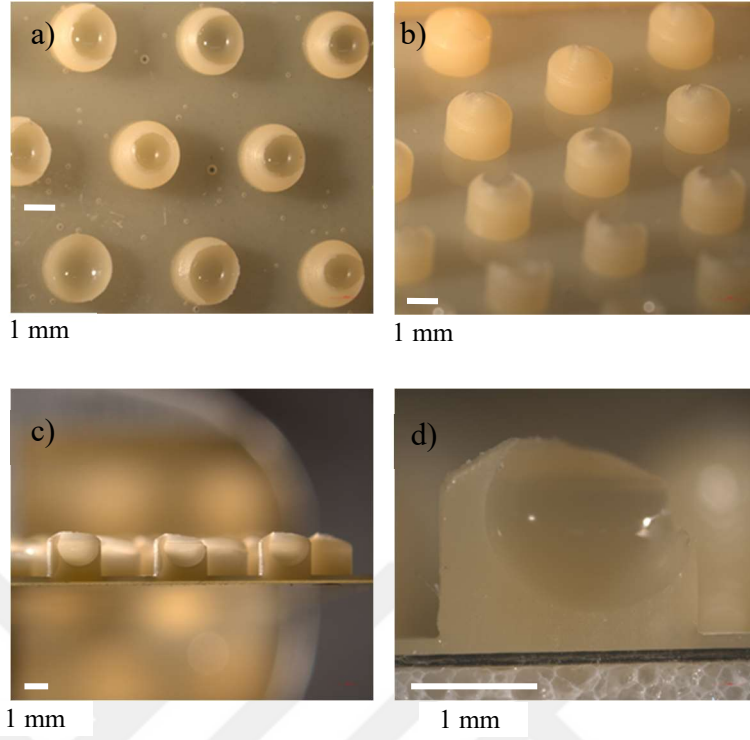
Şekil 3.2 : İçbükey şekilli dental elastomer yapılara (~ 7 cm x 7 cm) sahip ahtapottan esinlenilen yapıştırıcının fotoğrafı. **a)** İmal edilmiş yapıştırıcının dış bölgesindeki yapıların ve **b)** iç bölgesindeki yapıların şematik gösterimi.



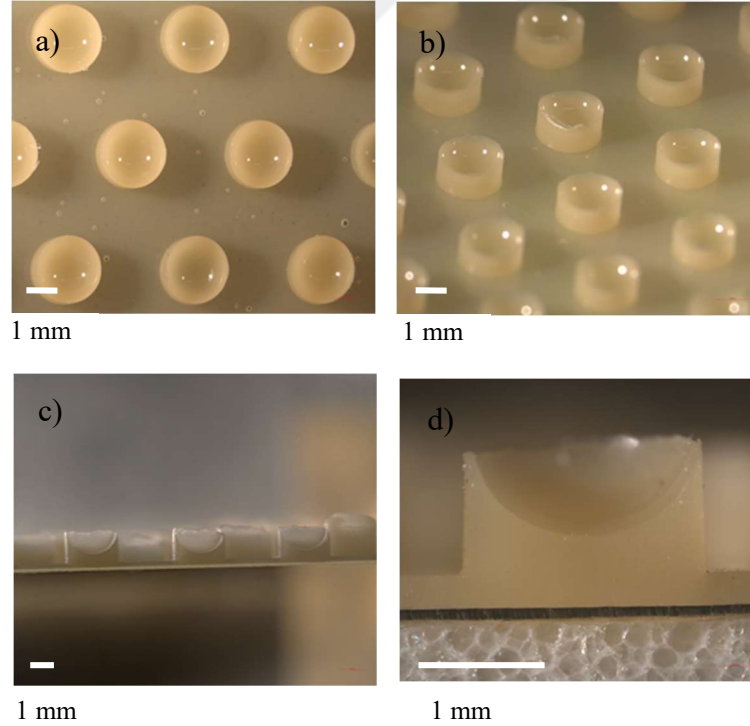
Şekil 3.3 : PDMS dış tipi iç bükey yapıların (PD) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.



Şekil 3.4 : PDMS iç tipi iç bükey yapıların (PI) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.



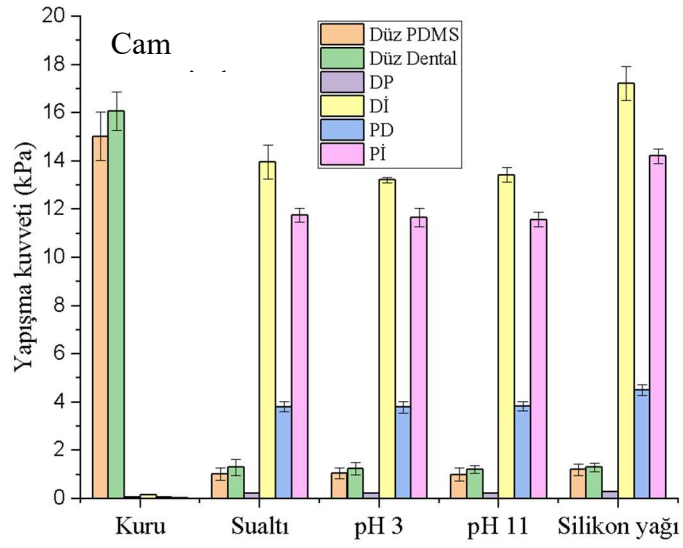
Şekil 3.5 : Dental perforate tipi iç bükey yapıların (DP) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.



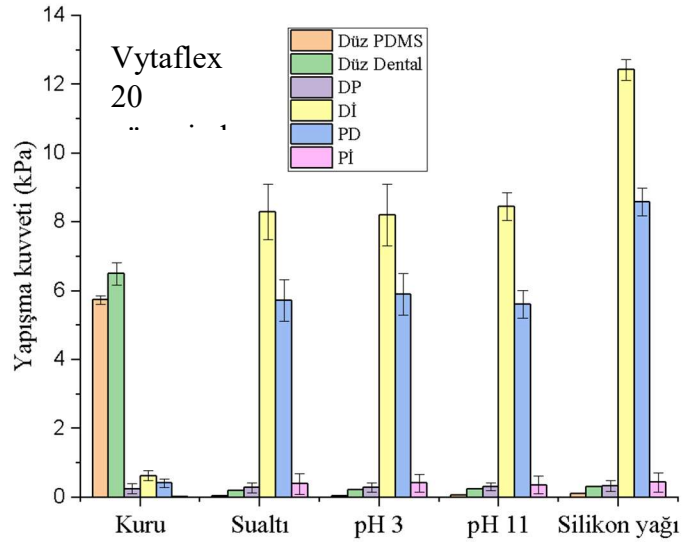
Şekil 3.6 : Dental iç tipi iç bükey yapıların (DI) stereo mikroskopta çekilen a) üstten, b) izometrik ve c-d) kesit görüntüleri.

Üretilen yapıştırıcıların iç ve dış bölgelerinden yaklaşık olarak 2 x 2 cm² boyutlarında plakalar kesilmiştir. Kesilen bu plakaların farklı sertlikteki cam (sert) ve vytaflex 20 (deforme edilebilir) yüzeyler üzerinde yapışma testleri gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Şekil 3.7-3.8' de gösterilmiştir. Yapışma testleri, 1 mm/dk ön yük hızı, 35 kPa önyük, 15 sn basma süresi ve 15 mm/dk geri çekme hızı kullanılarak kuru, sualtı, asidik, bazik ve silikon yağlı koşullarda gerçekleştirilmiştir.





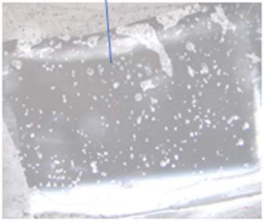
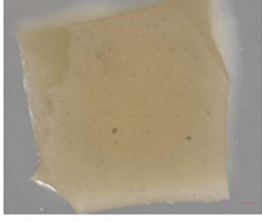

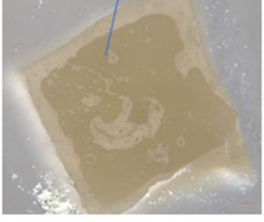





Şekil 3.7 : Üretilen yapıştırıcıların cam yüzey üzerinde ve kuru, sualtı, asidik, bazik ve silikon yağlı ortamlarda yapışma kuvvetleri.




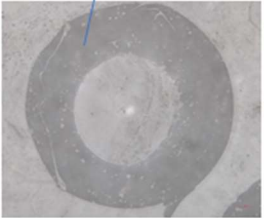
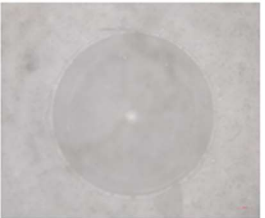
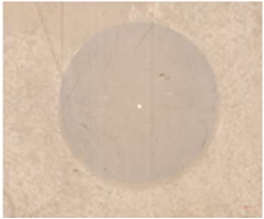
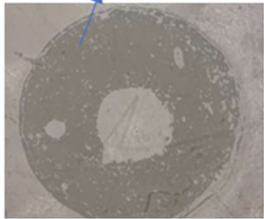


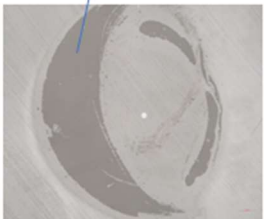
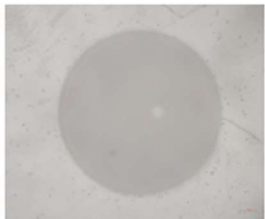
Şekil 3.8 : Üretilen yapıştırıcıların vytaflex 20 yüzey üzerinde ve kuru, sualtı, asidik, bazik ve silikon yağlı ortamlarda yapışma kuvvetleri.

Kuru koşullarda, düz Őekilli elastomer numunelerin yapışma mukavemetleri, ićbükey ve perfore yapılara sahip yapıştırıcılara kıyasla hem cam hem de vytaflex 20 yüzeylerde ćok daha yüksektir. Bu durumun sebebi kuru ortamda temas halinde olan iki düz yüzey arasında oluşan moleküler etkileşimlerdir (van der Waals kuvvetleri). Düz Őekilli elastomer bir yük etkisiyle düz bir yüzeye bastırıldığında van der Waals kuvvetleri devreye girer ve uygulanan yük kaldırıldığında kuvvetlerin etkisi devam ederek yapışma olayını gerćekleřtirir. Bununla birlikte, ićbükey ve perfore yapılara sahip yapıştırıcılar aynı Őekilde bir yük etkisiyle düz bir yüzeye bastırıldıktan sonra uygulanan yük kaldırıldığında moleküler etkileşimler etkisini kaybeder. Elastomer malzemeler elastik yapıda oldukları için deforme olduktan sonra deforme olmadan önceki ilk Őekillerine geri dönme eğilimindedirler. Bu durum, uygulanan yük kaldırıldıktan sonra ićbükey ve perfore yapıların yük altındaki Őekillerini koruyamamasına ve bunun sonucunda da temas halinde oluşan van der Waals etkileşimlerinin kaybolmasına neden olur. Yük uygulanmadan, yük altında ve yük uygulandıktan sonra ćekilen optik mikroskop görüntülerindeki koyu gri renkli bölgeler van der Waals kuvvetlerinin oluşumunu ve kaybolmasını açıkća göstermektedir (Őekil 3.9).

Numune isimleri	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Düz PDMS		 van der Waals etkileşimleri	 van der Waals etkileşimleri
Düz Dental		 van der Waals etkileşimleri	 van der Waals etkileşimleri
PD		 van der Waals etkileşimleri	

1 mm

Şekil 3.9 : Üretilen numunelerin cam yüzey üzerinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.

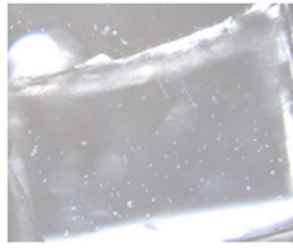

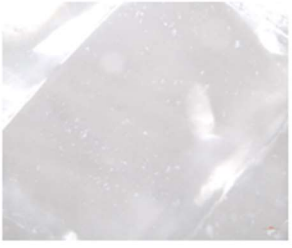









Numune isimleri	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Pİ			
Dİ			
DP			

1 mm

Şekil 3.9 (devam) : Üretilen numunelerin cam yüzeyi üzerinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.









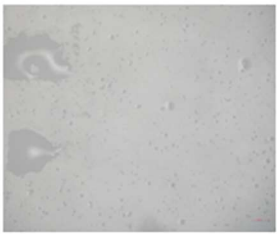



Bununla birlikte, kuru koşullar ile karşılaştırıldığında, ıslak koşulların van der Waals etkileşimlerini engellemesi nedeniyle düz şekilli elastomerlerin yapışma kuvvetlerinin oldukça zayıfladığı tespit edilmiştir. Düz şekilli elastomerlerle yapışma yüzeyi arasında herhangi bir moleküler etkileşimin olmadığı optik mikroskopla ıslak koşullarda yük uygulamadan, yük altında ve yük uygulandıktan sonra çekilen görüntüler yardımıyla doğrulanmıştır (Şekil 3.10-3.13). Yük uygulandıktan sonra çekilen görüntülerde koyu gri renkli bölgelere rastlanmamış olmakla birlikte bu görüntüler yük uygulanmadan önce çekilen görüntülerde oldukça benzerdir. Bu sonuçlar, numuneye yük uygulanması sırasında van der Waals kuvvetlerinin etkin hale gelmediğini göstermektedir.



Islak ortam	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

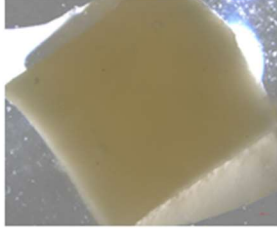

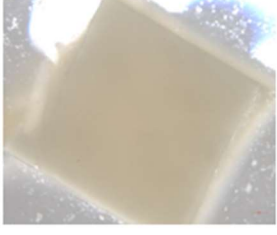









1 mm

Şekil 3.10 : Düz PDMS elastomerin ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			













1 mm

Şekil 3.11 : Düz PDMS elastomerin ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.12 : Düz Dental elastomerin ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.

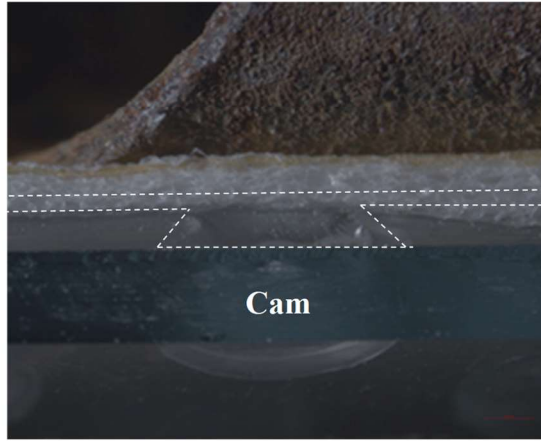
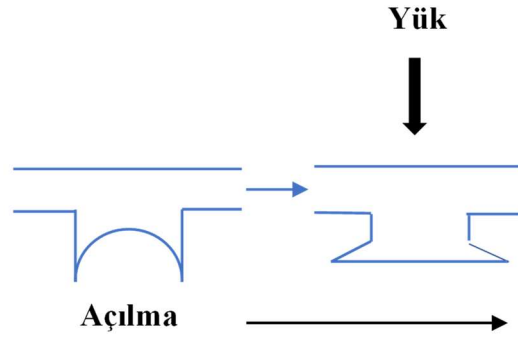
Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

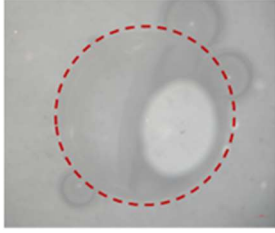
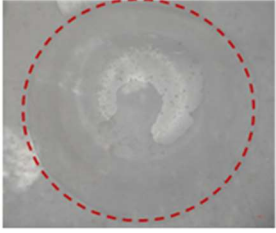
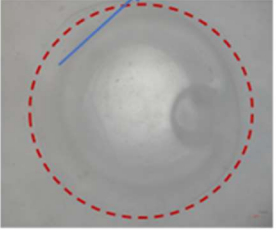
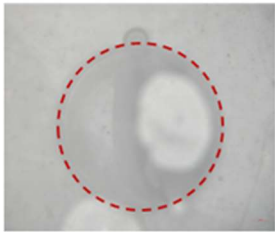
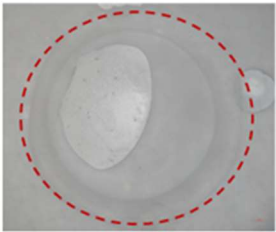
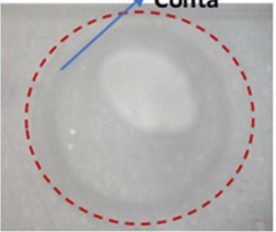


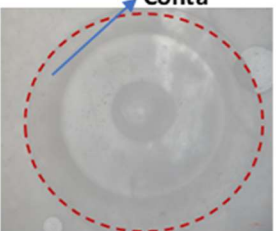
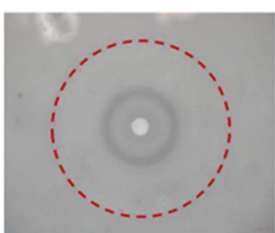
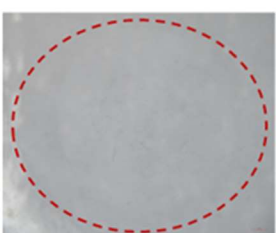
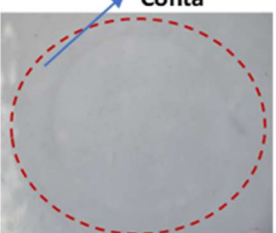
Şekil 3.13 : Düz Dental elastomerin ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.

Buna ek olarak, ıslak koşullarda içbükey geometride yapılara sahip yapıştırıcıların düz şekilli elastomerlerle karşılaştırıldığında yapışma kuvvetlerinin belirgin bir oranda arttığı gözlenmiştir. Bu durum, içbükey yapıların ıslak koşullarda yapışma kuvvetini artırmaya sebep olduğunu göstermektedir. Bu artış, içbükey yapılar ve temas yüzeyi arasında oluşturulan vakum ve kapiler kuvvetlerin toplamı ile açıklanabilir. İçbükey yapılar bir alt tabakaya karşı bastırıldığında, esnek olan yapılar, temas yüzeyi ile arasındaki etkin temas alanını artırmak için katlanarak yüzeye uyum sağlar. Yapıştırıcının yüzeyden ayrılması sırasında, yapılar geri çekilirken yapıların içerisinde boşluklar oluşur ve böylece vakum kuvveti meydana gelir. Ayrıca, sıvının varlığı birbirine geçen yüzeyler arasında meydana gelen kapiler kuvvetler aracılığıyla sızdırmaz bir tabakanın (conta) oluşumunu sağlayarak bir yapışma kuvveti oluşturur.

Islak ortamda gerçekleştirilen testlerde, PD, Dİ ve Pİ tipi yapılar önyük vasıtasıyla yüzeye bastırıldıklarında katlanarak açılmışlardır. PD ve Dİ tipi yapılar hem vytaflex 20 hem de cam yüzeyinde açılırken Pİ tipi yapı ise sadece cam yüzeyinde açılmıştır. Bu yapıların açılmış durumları stereo mikroskopta çekilen kesit görüntülerinde gösterilmiştir (Şekil 3.14-3.16-3.18-3.20-3.22). Böylece, ortamdaki sıvı ile belirtilen yapılar arasında sızdırmaz özelliğe sahip bir conta meydana gelmiş olup, bu bölgede ortaya çıkan kapiler kuvvetler vasıtasıyla yapışma olayı gerçekleşmiştir. Islak ortamlarda optik mikroskopla yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra çekilen görüntülerinden conta oluşumları tespit edilmiştir. Yük altında belirtilen yapılar katlandığı için optik görüntülerinde yapının görünen alanı genişlemiş olarak gözükmemektedir. Yükün kaldırılması sonrasında genişleyen yapı aynı genişlikte kalmıştır ya da bir miktar genişliği azalmıştır. Bu durum belirtilen yapılar ile belirtilen yüzeyler arasında conta oluşumunu göstermekte olup, optik görüntülerindeki koyu gri bölgeler oluşan bu contaları temsil etmektedir (Şekil 3.15-3.17-3.19-3.21-3.23).

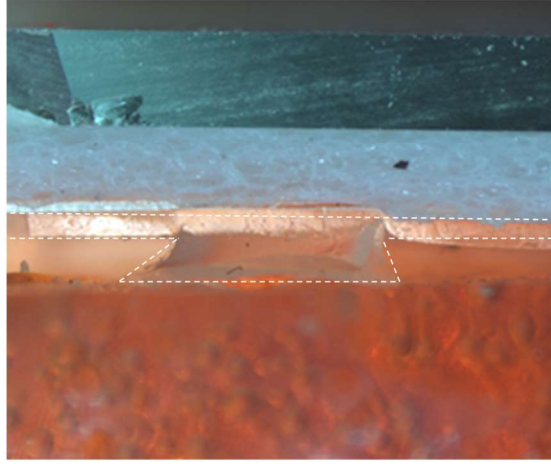
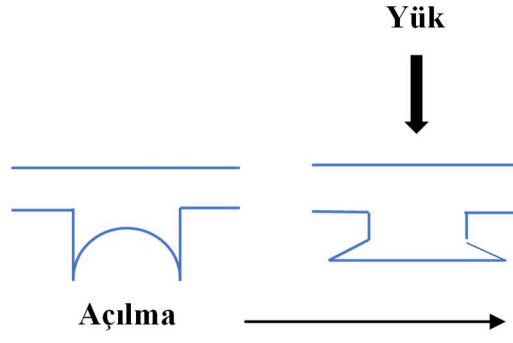


Şekil 3.14 : PD yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

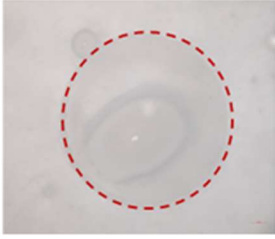
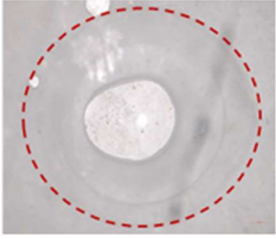
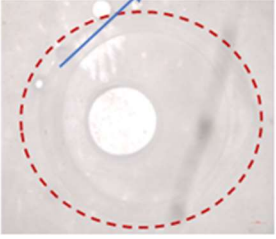
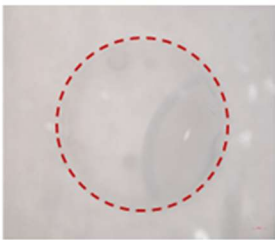
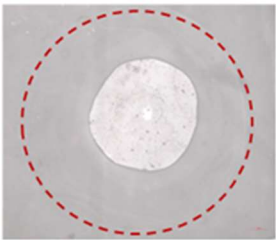
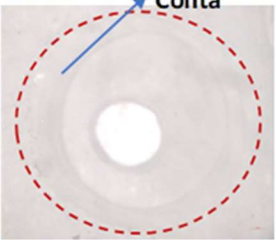
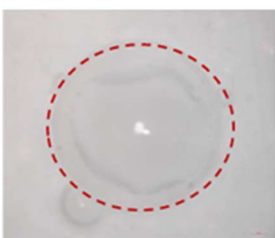
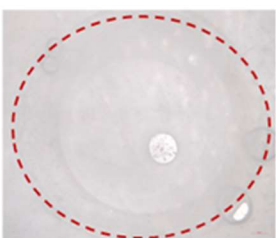
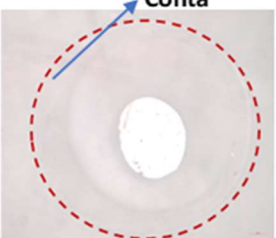
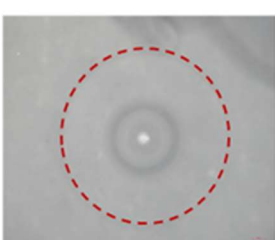
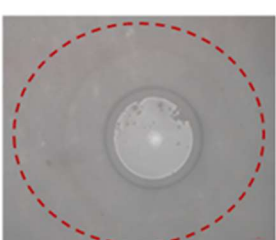
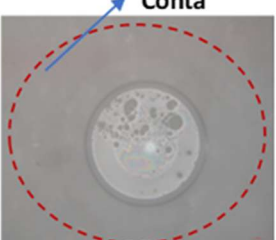
Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.15 : PD yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.

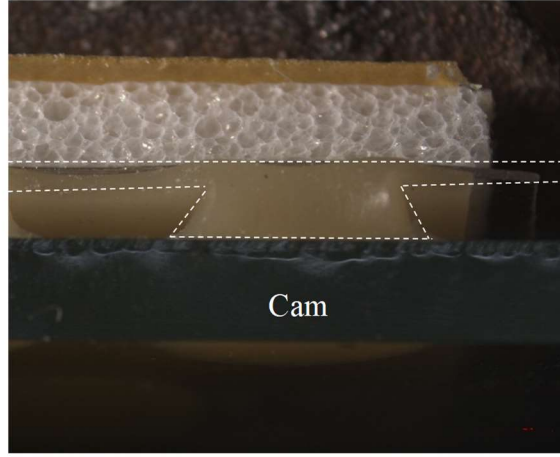
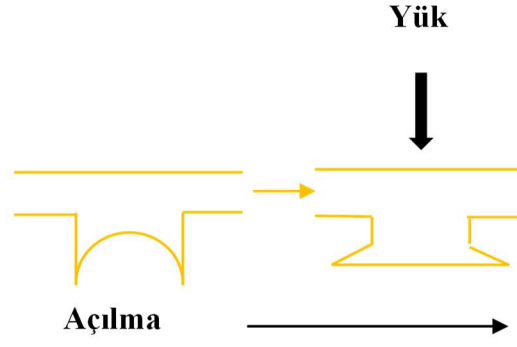


Şekil 3.16 : PD yapının ön yük altında Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.17 : PD yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.

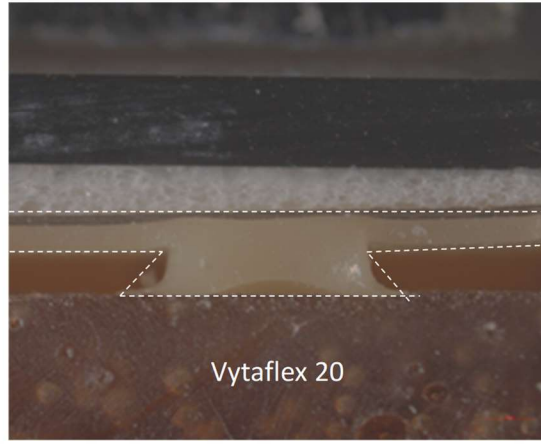
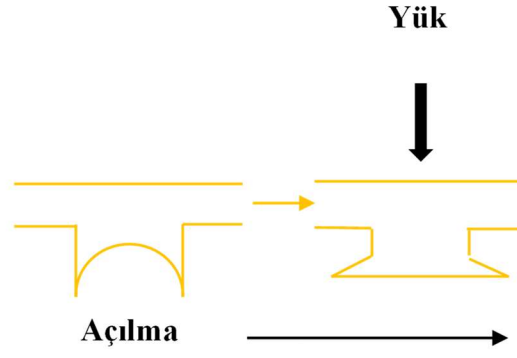


Şekil 3.18 : D1 yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.19 : Dİ yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskop görüntüleri.

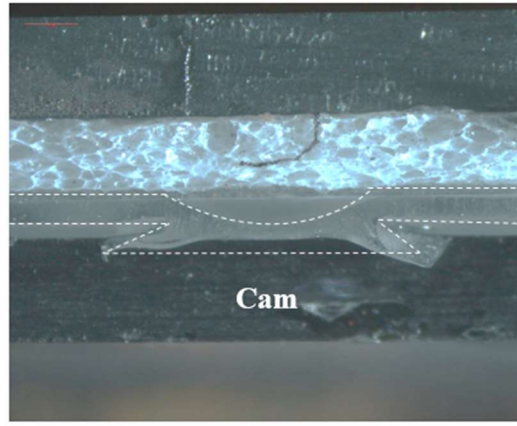
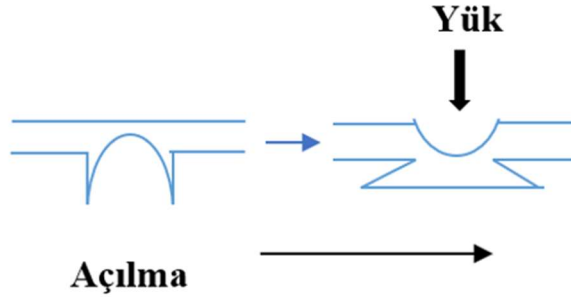


Şekil 3.20 : D1 yapının ön yük altında Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.21 : Dİ yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri.



Şekil 3.22 : Pİ yapının ön yük altında ve cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

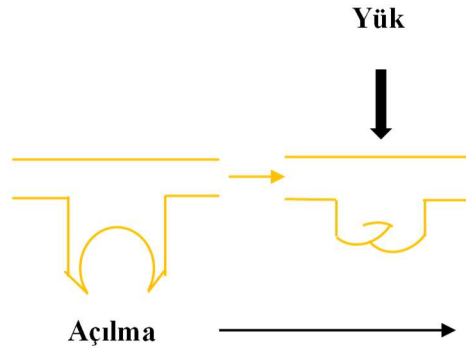
Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

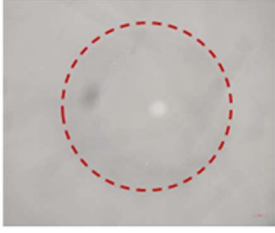
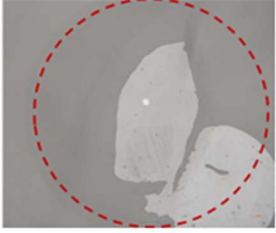
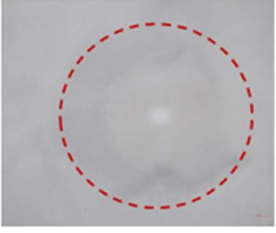
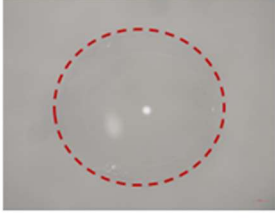
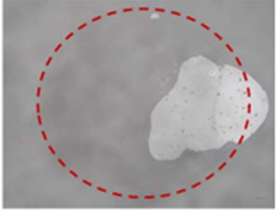

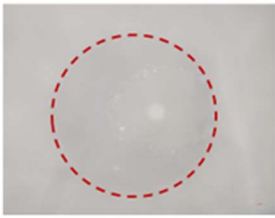
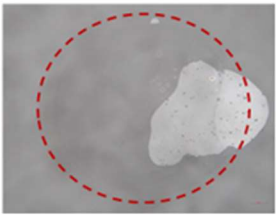
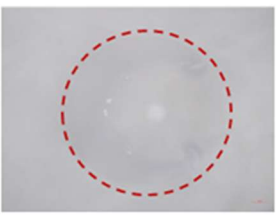
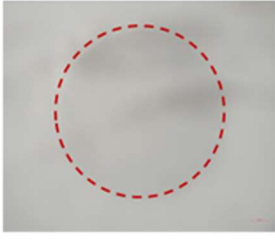
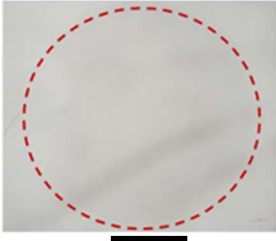
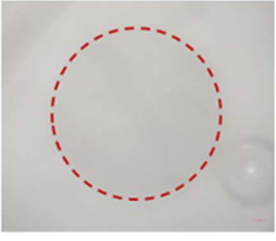
Şekil 3.23 : Pİ yapının ön yük altında ve cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

Bunlara ek olarak, DP ve Pİ tipi yapılar bir önyük vasıtasıyla bastırıldıklarında katlanarak açılmamışlardır. DP tipi hem cam hem de vytaflex yüzeyinde açılmazken Pİ tipi yapı yalnızca cam yüzeyinde açılmamıştır. Belirtilen yapıların yük altında kesitlerinden çekilen stereo görüntüleri bu durumu açık bir şekilde göstermektedir (Şekil 3.24-3.26-3.28). Bu yapıların yük uygulanmadan önce ve yük uygulandıktan sonra optik mikroskopta çekilen görüntülerinden görüldüğü üzere görünen alanlarında belirgin bir farklılık olmaması conta oluşumunun gerçekleşmediğini göstermektedir (Şekil 3.25-3.27-3.29). Bu yüzden, belirtilen bu iki yapıdan oluşan yapıştırıcılar oldukça düşük bir yapışma kuvveti (< 1 kPa) sergilemişlerdir.



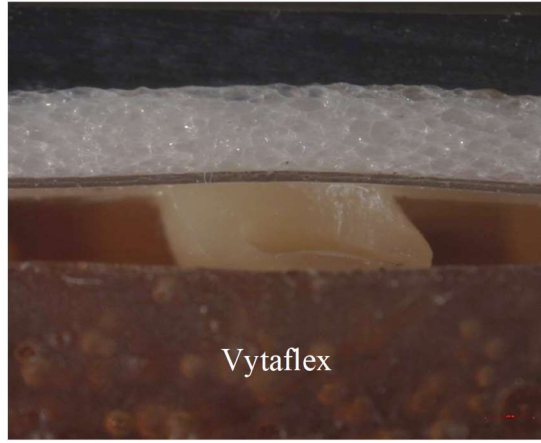
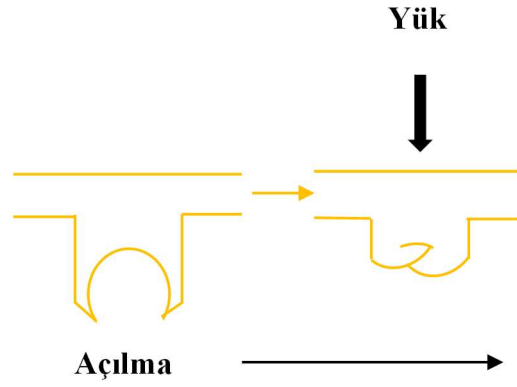


Şekil 3.24 : DP yapının ön yük altında cam yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.


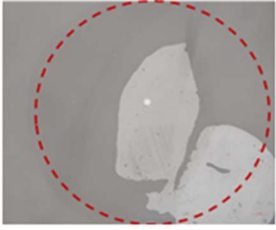
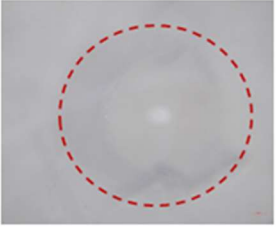
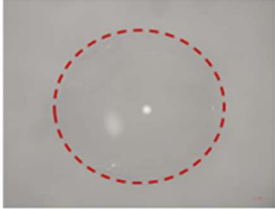
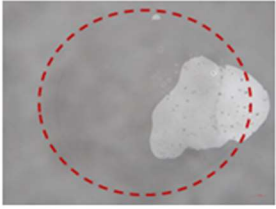
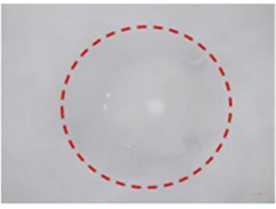

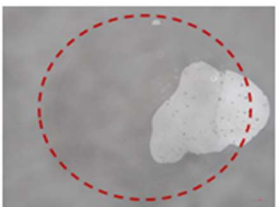
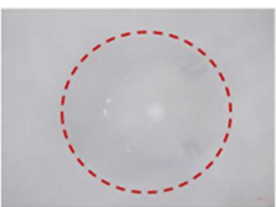

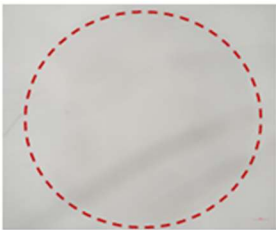
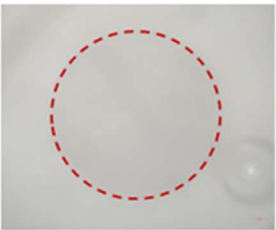
Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.25 : DP yapının ıslak ortamlarda ve cam yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.

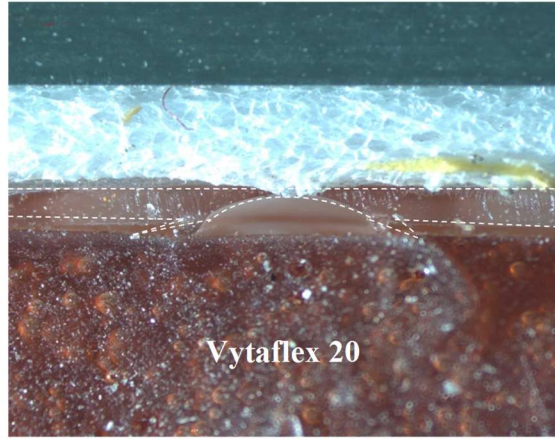
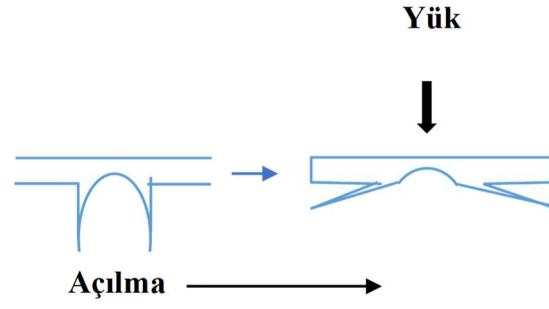


Şekil 3.26 : DP yapının ön yük altında ve Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

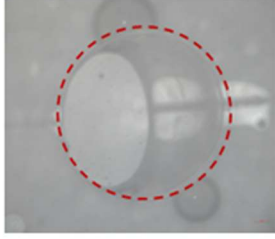
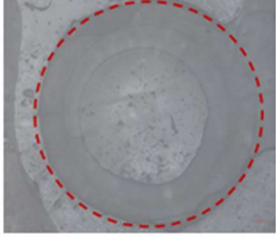
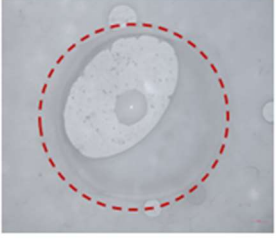
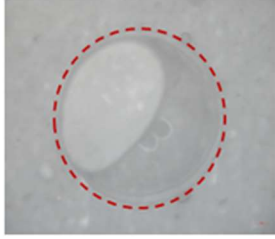
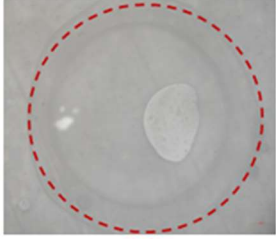
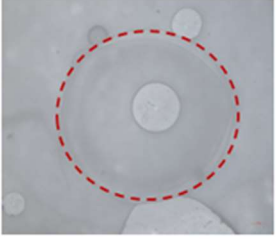
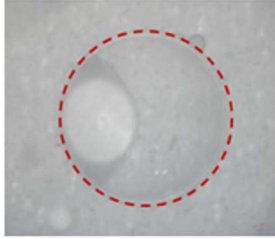
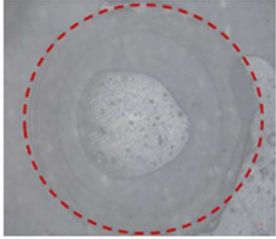
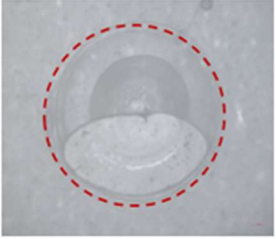
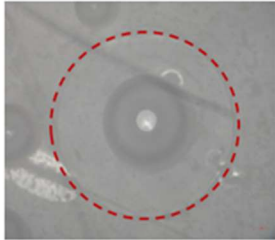
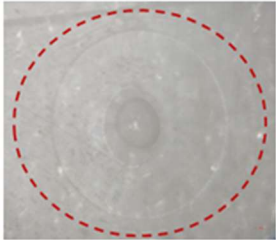
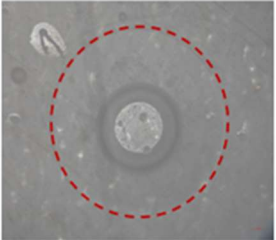
Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

1 mm

Şekil 3.27 : DP yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.28 : Pİ yapının ön yük altında ve Vytaflex 20 yüzey üzerinde açılmasını gösteren şematik çizim ve bu yapının açılma anındaki kesitinin stereo mikroskop görüntüsü.

Islak ortamlar	Yük uygulanmadan önce	Yük altında	Yük uygulandıktan sonra
Sualtı			
pH 3			
pH 11			
Silikon yağı			

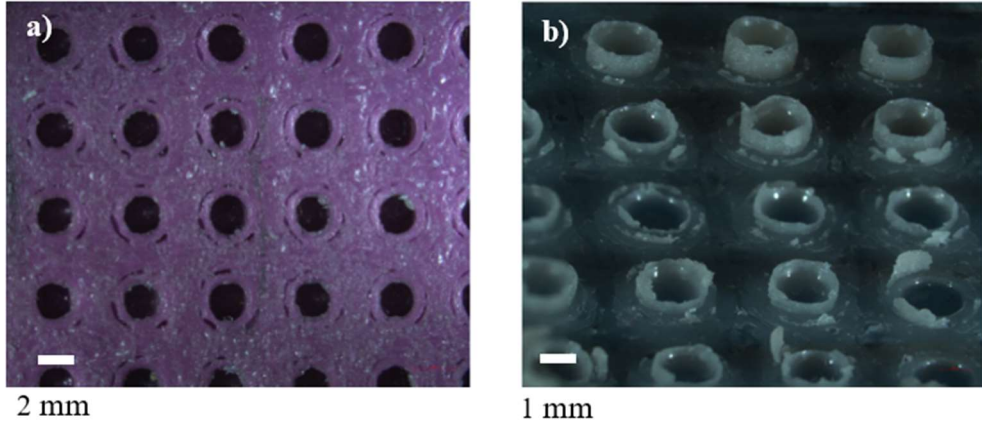
1 mm

Şekil 3.29 : Pİ yapının ıslak ortamlarda ve Vytaflex 20 yüzeyinde yük uygulanmadan önce, yük altında ve yük uygulandıktan sonraki optik mikroskop görüntüleri.

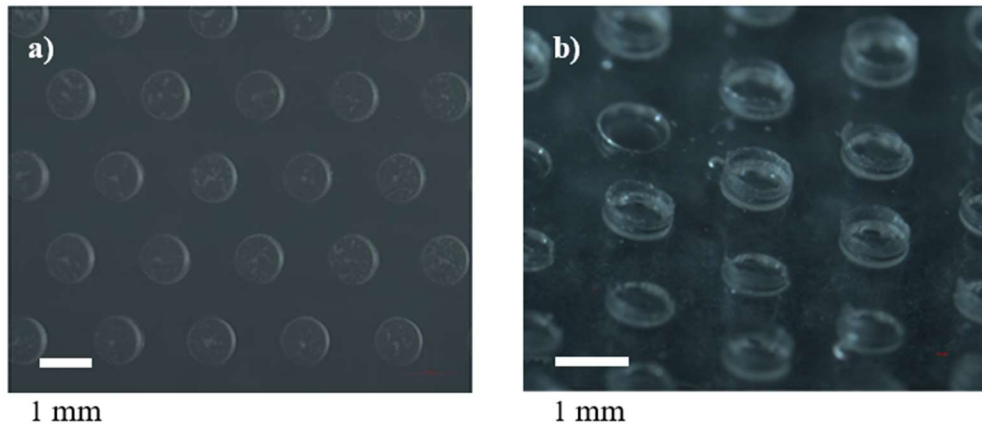
Ayrıca, en yüksek yapışma mukavemeti hem cam üzerinde (~ 14 kPa) hem de vytaflex 20 yüzeyinde (~ 8.5 kPa) Dİ tipi yapılardan oluşan yapıştırıcı tarafından sergilenmiştir. Bu durum, dental elastomerin sertliğinin (Shore A 20) PDMS elastomerin sertliğinden (Shore A 46) daha düşük bir değere sahip olmasıyla alakalıdır. Elastomerlerin sertlikleri ile elastik modülü arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki 1958 yılında Gent tarafından yapılan bir çalışmada gösterilmiştir. Elastik modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Shore sertliğinde olduğu gibi, daha düşük değerler daha yumuşak bir malzemeyi gösterir. Bu çalışmada, dental ve PDMS elastomerler kullanılarak geliştirilen Dİ, PD ve Pİ tipi yapılar bir önyük vasıtasıyla yüzeye bastırıldıklarında katlanarak açılmışlardır. Böylece, ortaya çıkan vakum kuvveti ve temas yüzeyinde oluşan conta ile yapışma sağlamışlardır. Elastomerik malzemeler elastik özelliğe sahip oldukları için deforme olduktan sonra ilk şekillerine geri dönme eğilimindedirler. Yumuşak yapıda olan dental elastomerde bu eğilim PDMS elastomerine kıyasla daha azdır. Bu yüzden, dental elastomer kullanılarak geliştirilen Dİ tipi yapıların katlanarak açılma sonucu sağladıkları yapışmadan sonra ilk şekillerine geri dönme eğilimi daha düşük olduğu için elde edilen yapışma kuvvetleri üretilen yapıştırıcılar arasında bu tip yapıştırıcıların en yüksek değere sahip olmasına sebep olmuştur.

Bunlara ek olarak, su altında, pH3 ve pH11 çözeltili ortamlarda üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetleri arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, asidik ve bazik ortamların üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinin değişmesine sebebiyet vermediğini göstermektedir. Bununla birlikte, silikon yağlı ortamda, ilginç bir şekilde üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Ortamdaki sıvının viskozitesinin artması bu duruma sebep olmuş olabilir. Benzer sonuçlar literatürde Baik ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada da tespit edilmiştir.

CNC yöntemiyle üretilen ve 2 mm çapında deliklerden oluşan PMMA kalıp kullanılarak elde edilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerini daha da artırmak amacıyla iki farklı yöntem uygulanmıştır. İlk olarak, CNC yöntemi yerine 3 boyutlu eklemeli imalat yöntemiyle ABS malzemeden oluşan kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.30’ da üretilen kalıp ve bu kalıp ile kopyalanan yapılar gösterilmektedir. İkinci yöntem olarak da, CNC yöntemiyle 2 mm yerine 0,85 mm çapında deliklerden oluşan PMMA kalıp üretilmiştir. Şekil 3.31’ de, üretilen kalıpların ve bu kalıplardan kopyalanan PDMS esaslı elastomerlerin görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 incelendiğinde, üretilen kalıplardaki deliklerin pürüzlü olduğu görülmektedir. Bundan dolayı homojen geometride içbükey şekilli yapılar üretilememiştir. Üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetleri 1 kPa değerinin altında olup, oldukça zayıf bir yapışma sergilemişlerdir.



Şekil 3.30 : a) Üç boyutlu eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ABS kalıbın ve b) bu kalıptan kopyalanan PDMS esaslı elastomerin stereo mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.31 : a) CNC yöntemiyle üretilen 0,85 mm çapında deliklerden oluşan PMMA kalıbın ve b) bu kalıptan kopyalanan PDMS esaslı elastomerin stereo mikroskop görüntüleri.

Islak koşullarda, geliştirilen yapıştırıcılardan Dİ tipi yapılarla sahip olanların hem cam hem de vytaflex 20 yüzeyindeki, PD tipi yapılarla sahip olanların vytaflex 20 yüzeyindeki ve Pİ tipi yapılarla sahip olanların cam yüzeyindeki yapışma özelliklerinin daha iyi anlaşılması için, sistematik olarak 4 farklı test parametreleri uygulanmış olup, önyük hızları (1-15 mm/dk), önyükler (10-35 kPa), basma süreleri (3-25 sn) ve geri çekme hızları (0.1–15 mm/dk) değiştirilmiştir (Şekil 3.32-3.47). Bu parametrelerden biri değiştirilirken diğerleri için önyük hızı 1 mm/dk, önyük 35 kPa, basma süresi 15 sn ve geri çekme hızı 15 mm/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Yapılan testler sonucunda, belirtilen değer aralıklarında önyük hızlarının ve basma sürelerinin değiştirilmesinin belirtilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetini önemli bir oranda değiştirmediği gözlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde ahtapottan esinlenen minyatürize elastomer esaslı yapıştırıcıların farklı ıslak ortamlarda (sualtı, silikon yağlı, asidik ve bazik) yapışma özelliklerinin önyük hızının ve bekleme sürelerinin değişmesinden bağımsız olduğu söylenebilir. Bu özellikler sayesinde belirtilen yapıştırıcıları yapıştırmak için önyük hızı ve basma süresi açısından spesifik bir değer uygulanması gerekmediği için üretilen yapıştırıcıların manuel olarak elle kullanımını kolaylaşacaktır.

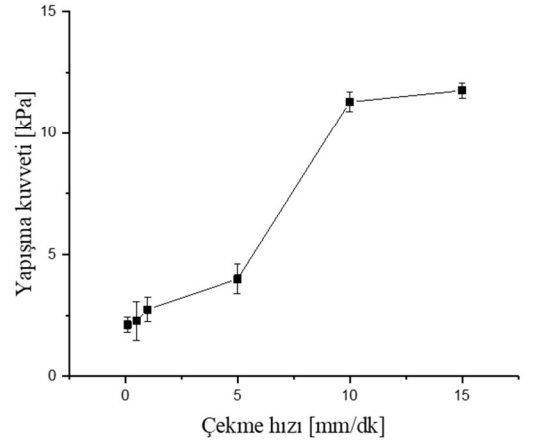
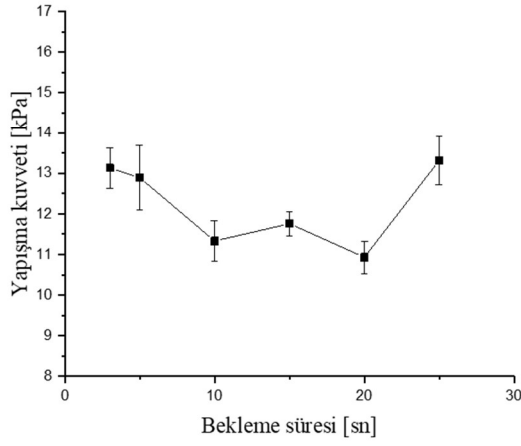
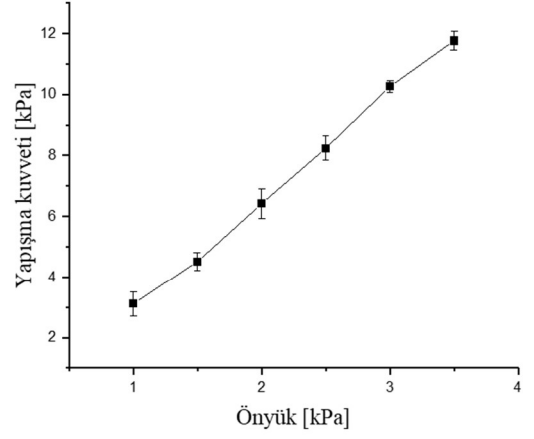
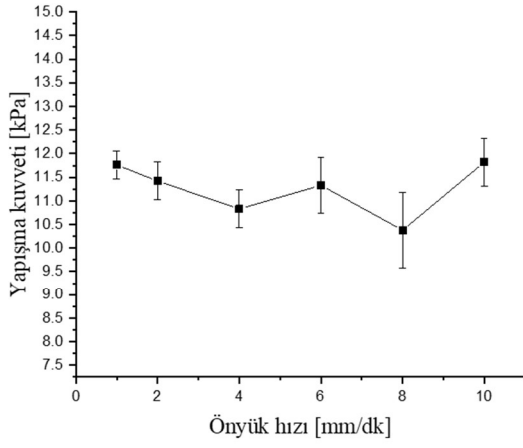
Öte yandan, belirtilen yapıştırıcıların yapıştırılmasında uygulanan önyük değerinin değiştirilmesinin bu yapıştırıcıların yapışma kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. İnsan baş parmağının hafifçe bir şekilde bastırmasına karşılık gelen ~ 35 kPa değerindeki yük maksimum ön yük olarak uygulanmıştır. Bu yük 10 kPa' a kadar azaldıkça belirtilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetleri ıslak ortamın türü farketmeksizin doğru orantılı olarak azalmıştır.

Bu duruma, belirtilen yapılar ile yüzey arasında sıkışan sıvı sebep olmaktadır. Üretilen yapılar, önyükleme sırasında yüzey ile uyumlu olacak şekilde temas edene kadar katlanarak açılır. Böylece, sıkışmış durumdaki sıvının büyük bir kısmı yapı içerisinden atılır. Bu miktar uygulanan önyük arttıkça artmaktadır. Küçük önyüklemelerde belirtilen yapılar nispeten daha az açıldığı için temas bölgesinde daha fazla sıvı tutulur ve bu nedenle vakum kuvveti azalarak yapışma kuvvetinin düşmesine neden olur.

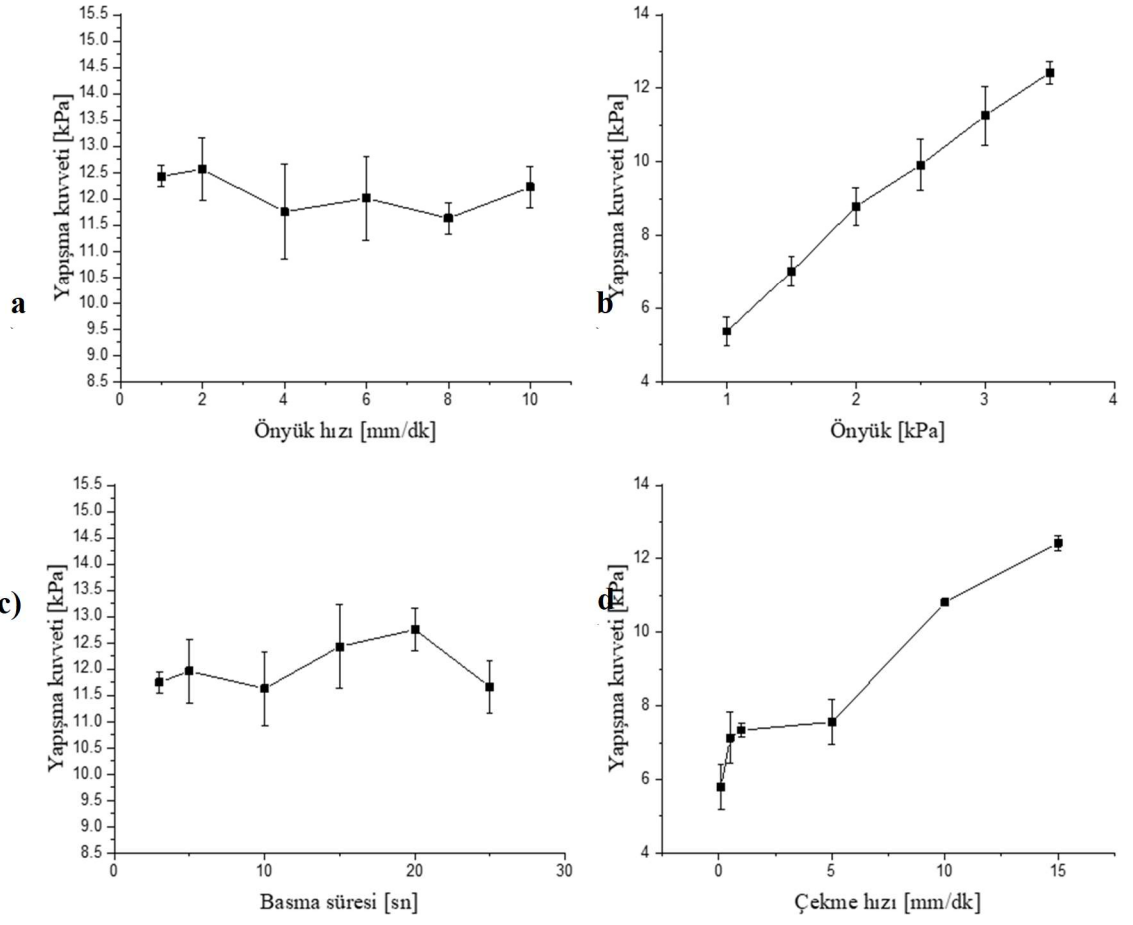
Benzer şekilde, önyüklemede olduğu gibi geri çekme hızı test sonuçları üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinin geri çekme hızına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Belirtilen yapıştırıcıların ıslak ortamlarda yapışma kuvvetlerinin artan geri çekme hızlarıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu değişimin belirtilen yapılar ile ilgili yüzeyler arasındaki su sızdırmayan bölgenin (conta) geri çekme sırasında gösterdiği davranışının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Y. Wang ve diğ. (2020), sualtı koşullarında yaptıkları yapışma testleri sonucunda deforme olabilen konkav benzeri mikroyapılar için aynı davranışı gözlemlemişlerdir. Özetle, geri çekme hızının ve contadaki değişimlerin, içbükey geometride mikroyapıların sualtı ortamda yapışmasında belirleyici bir rol oynadığını bildirmişlerdir. Bu davranışın sebebini, daha hızlı geri çekmenin conta bölgesinde bir iyileşmeye yol açarak yapının sızdırmazlık özelliğini geliştirmesi ve böylece yapışma kuvvetini artırması olarak açıklamışlardır.

Bu çalışma kapsamında yapılan geri çekme testleri, ıslak koşullarda belirtilen yapıştırıcılar için geri çekme hızının değiştirilerek yapışma kuvvetinin kontrol edilebileceğini başarılı bir şekilde göstermiştir. Bu nedenle, gözlenen bu etki sayesinde üretilen yapıştırıcılar düz nesnelere sualtında bir yerden başka bir yere taşınmasında yumuşak robotik bir tutucu olarak yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptirler.

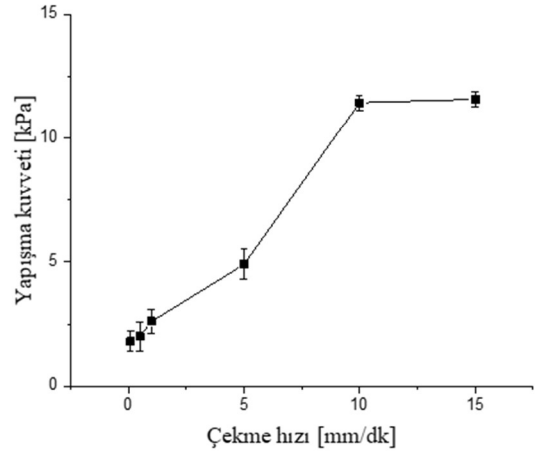
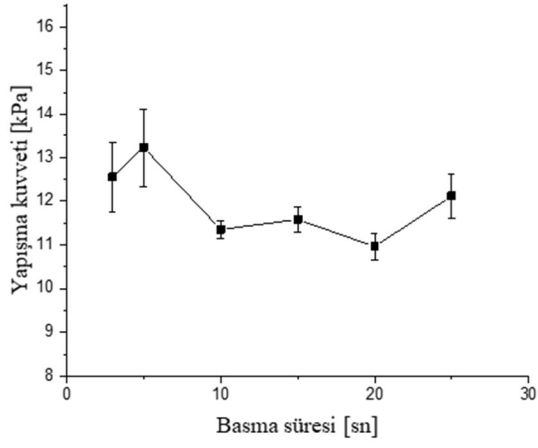
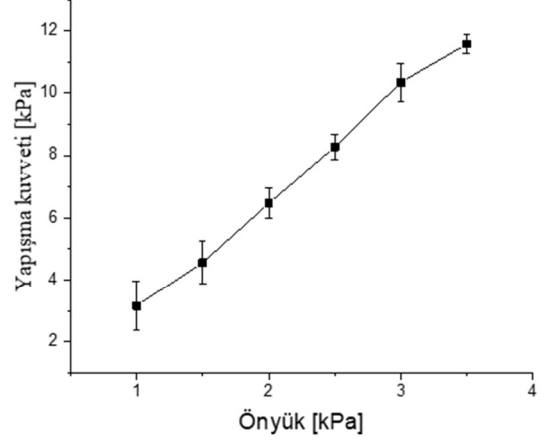
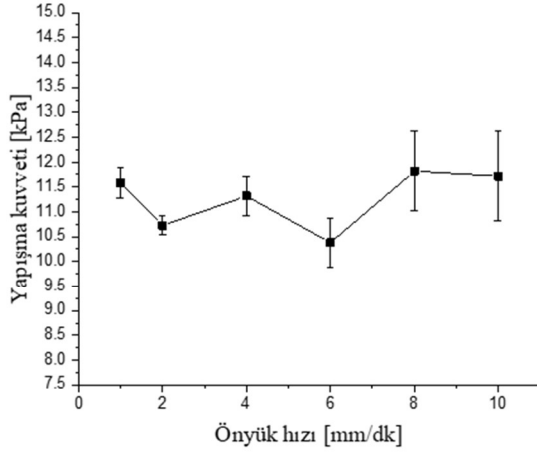
Üretilen yapıştırıcıların dayanıklılığı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla ek testler uygulanmıştır. Belirtilen yapıştırıcılar sualtı ortamında ve cam yüzeyinde tekrarlı olarak yapıştırma ve ayrılma döngülerine maruz bırakılmışlardır. 100 döngüye kadar yapılan testler sonucunda, geliştirilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinde kayda değer bir azalma olmaksızın performanslarını korudukları gözlenmiştir (Şekil 3.48).



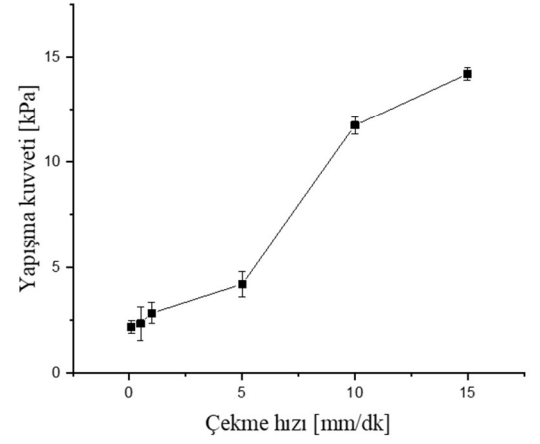
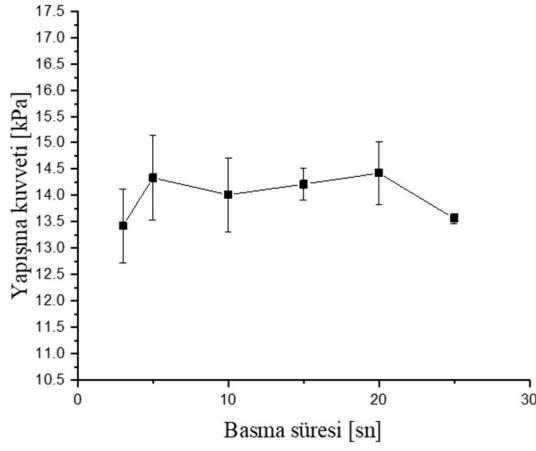
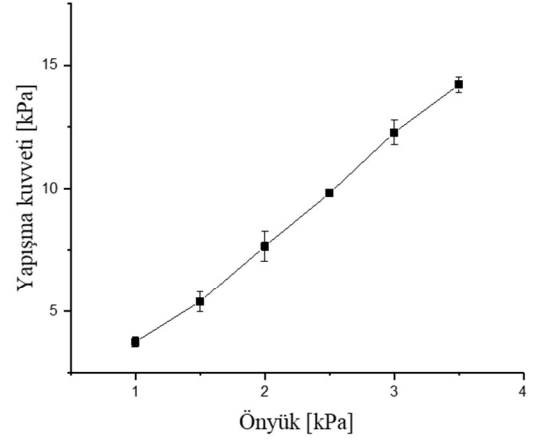
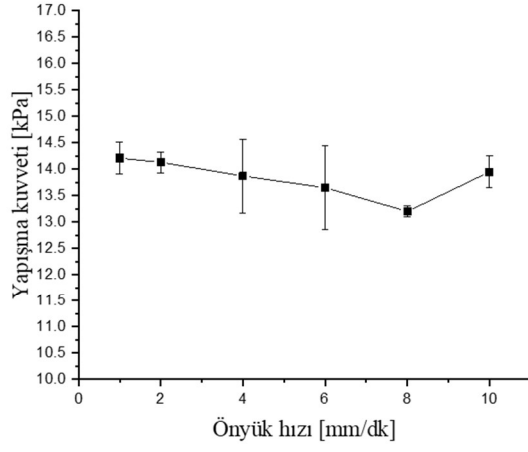
Şekil 3.32 : PDMS iç tipi içbükey (Pİ) yapıştırıcıların farklı **a)** önyük hızlarında, **b)** önyüklerde, **c)** bekleme sürelerinde, **d)** çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarında yapışma kuvvetleri.



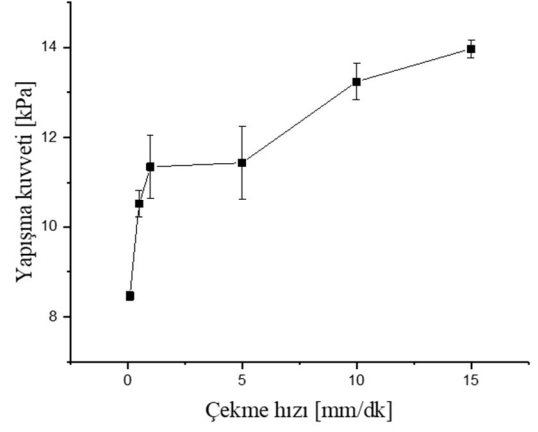
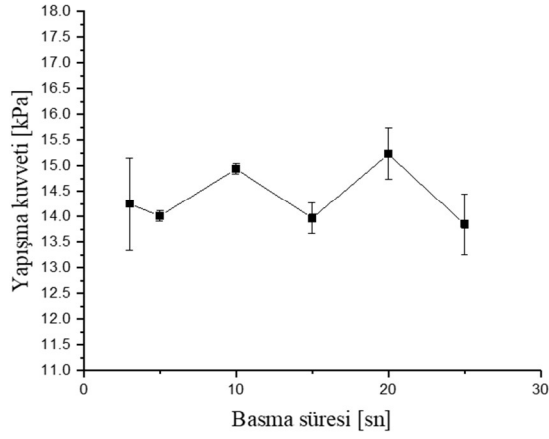
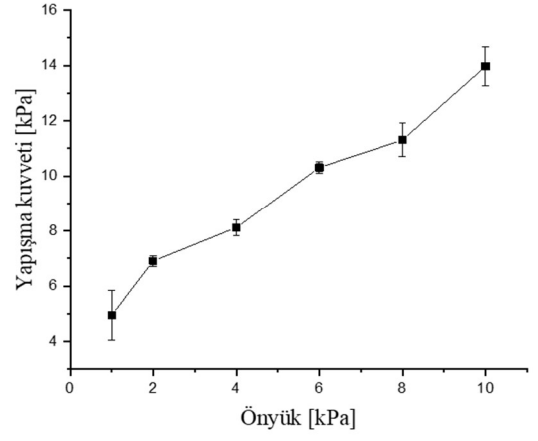
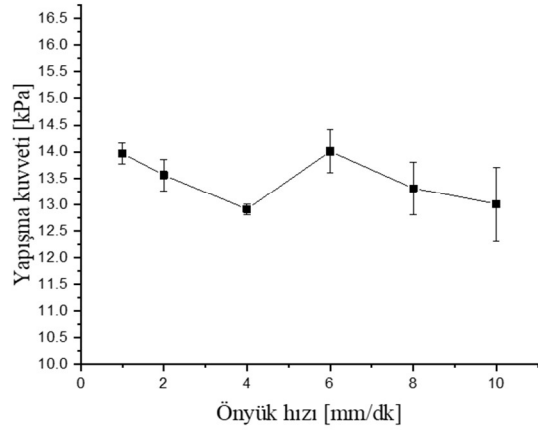
Şekil 3.33 : PDMS iç tipi içbükey (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



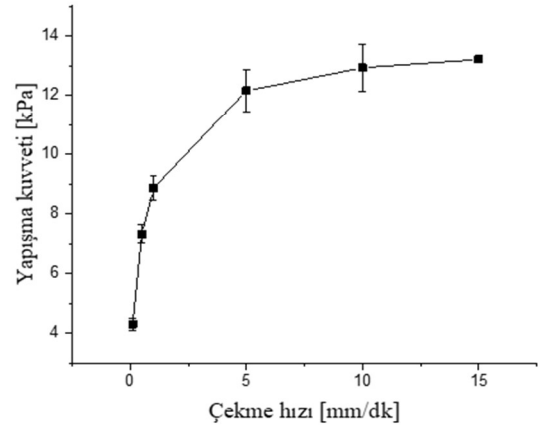
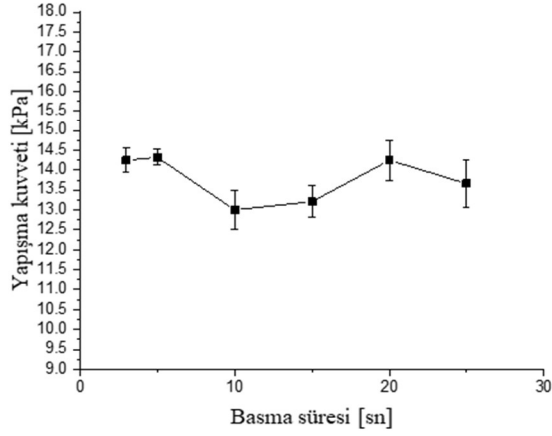
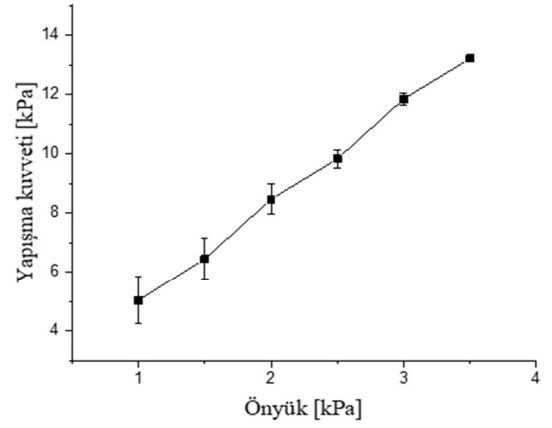
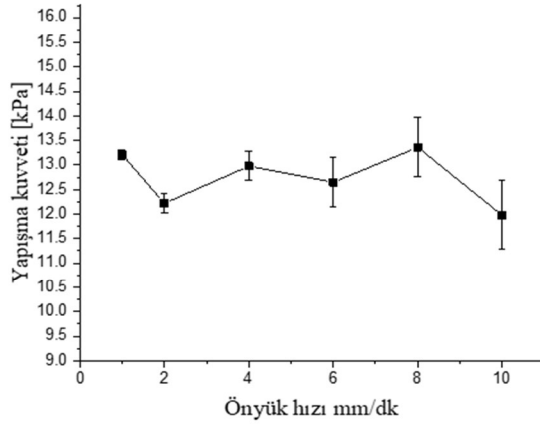
Şekil 3.34 : PDMS iç tipi içbükey yapılı (PI) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



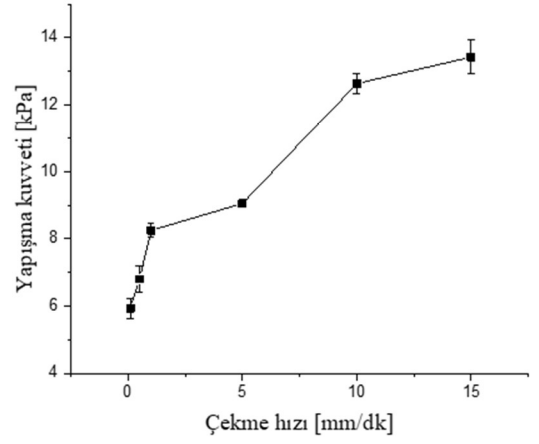
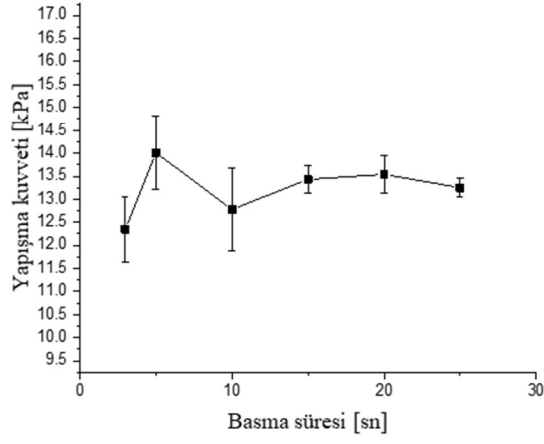
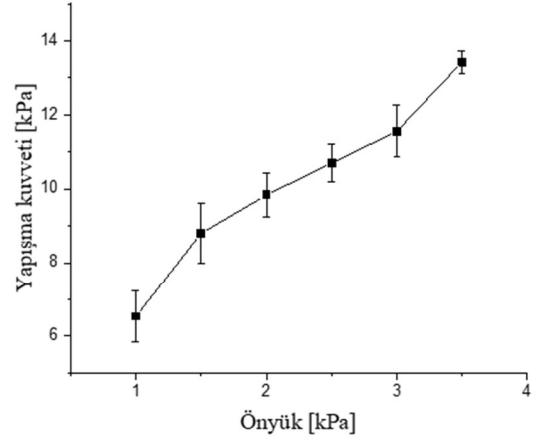
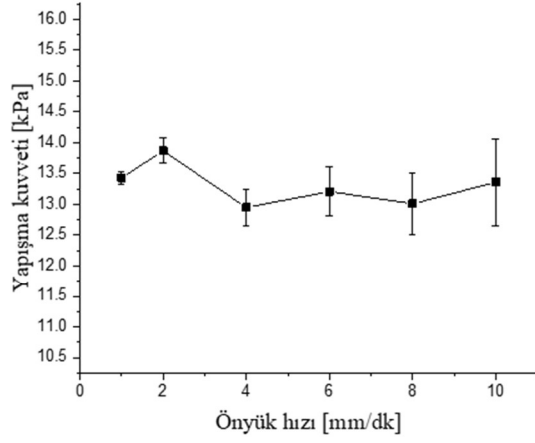
Şekil 3.35 : PDMS iç tipi içbükey yapı (Pİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.



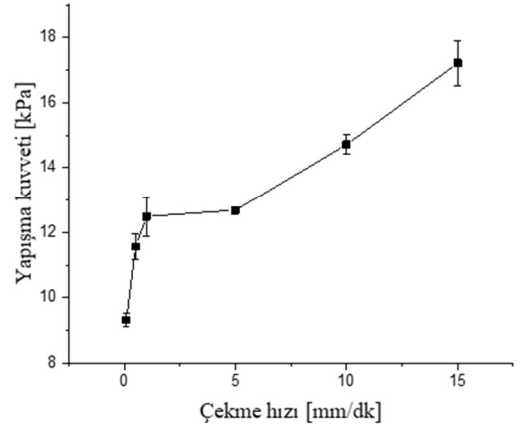
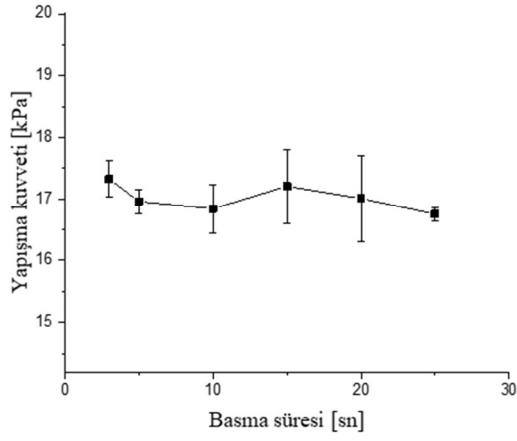
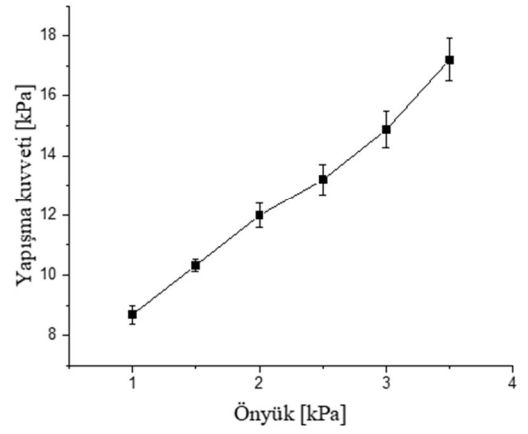
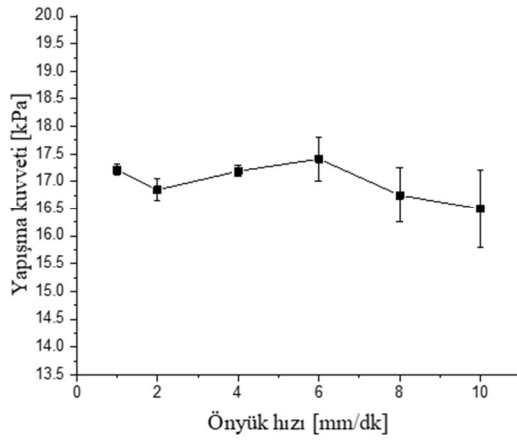
Şekil 3.36 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri.



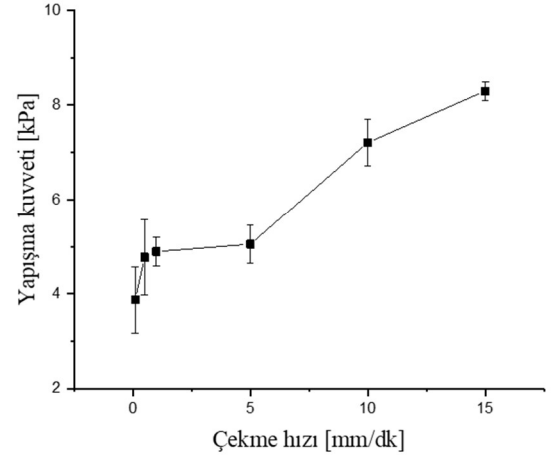
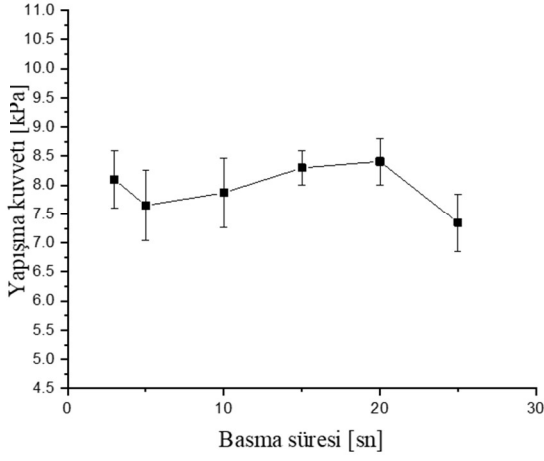
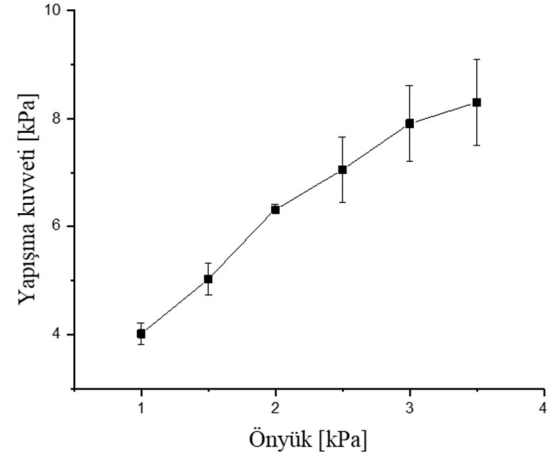
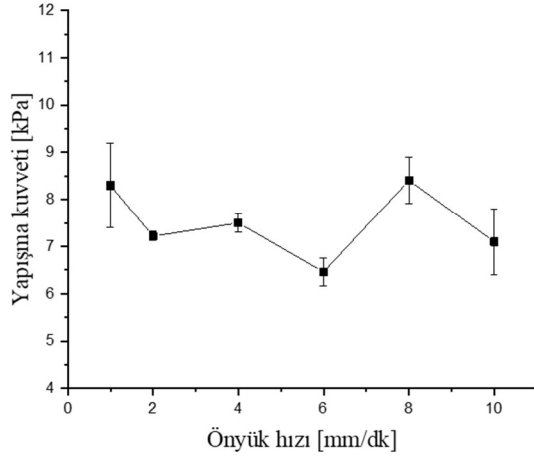
Şekil 3.37 : Dental iç tipi içbükey yapı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



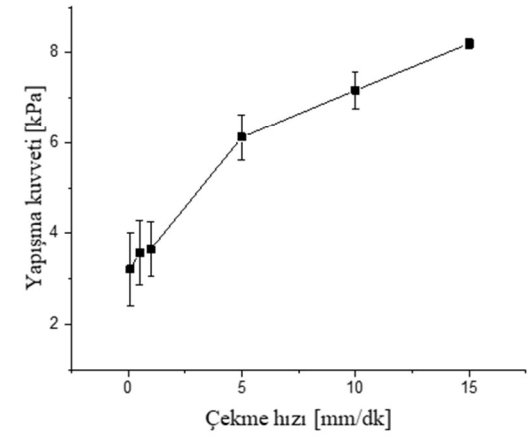
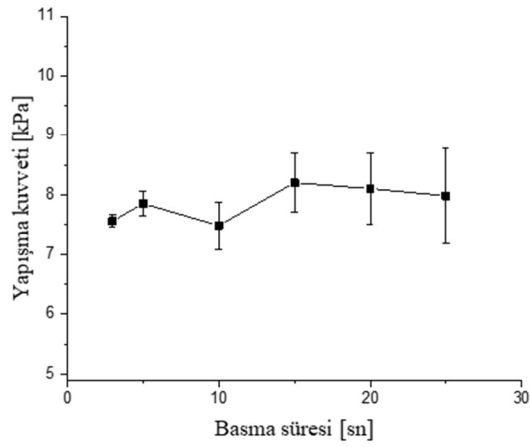
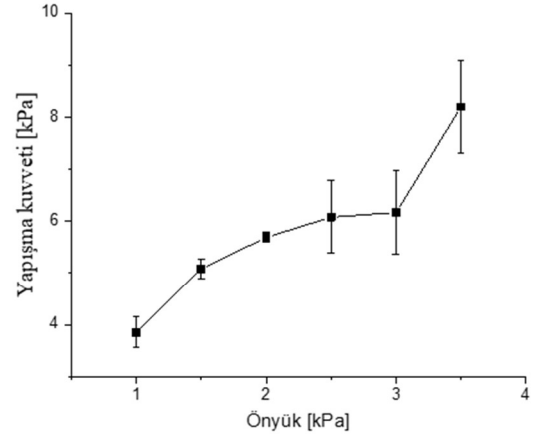
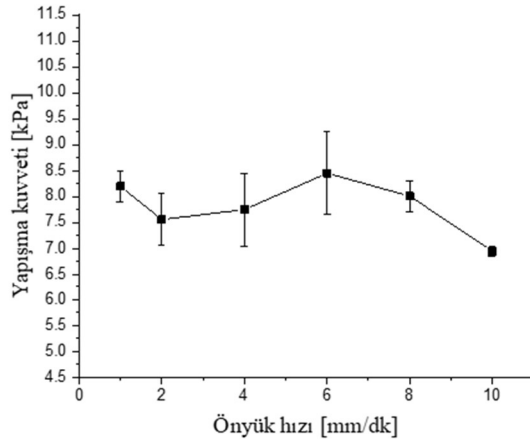
Şekil 3.38 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzeylerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



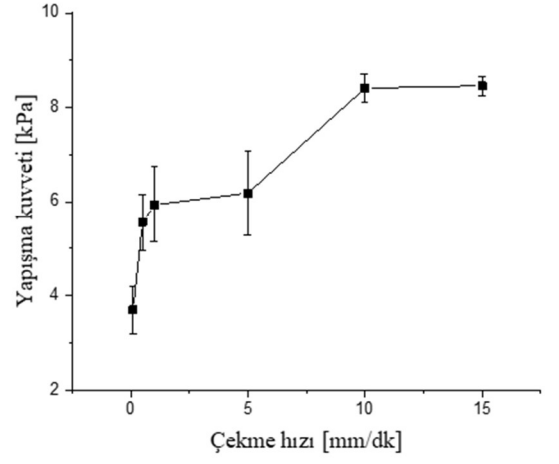
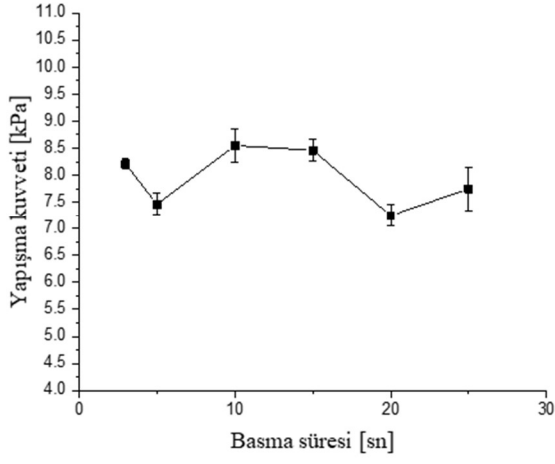
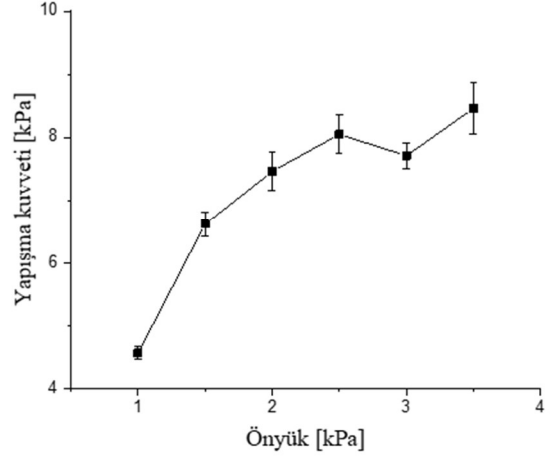
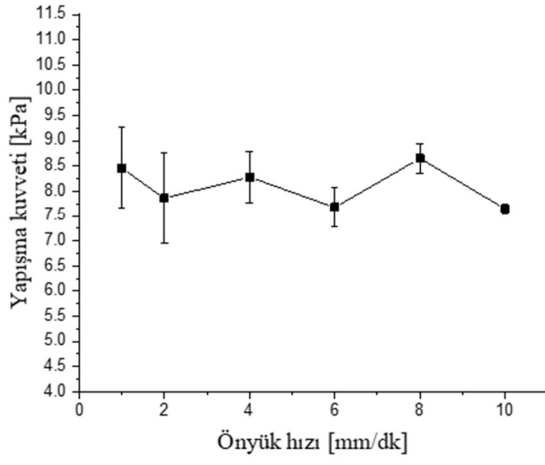
Şekil 3.39 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında cam yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.



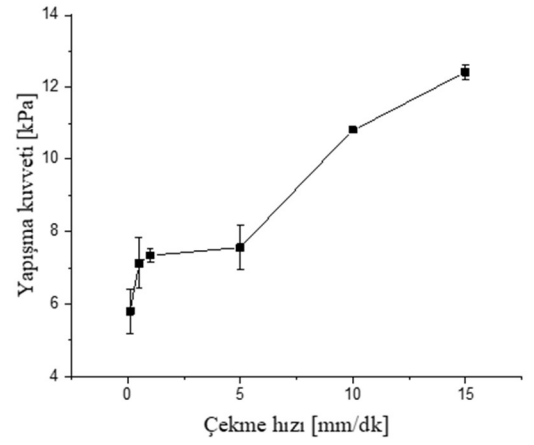
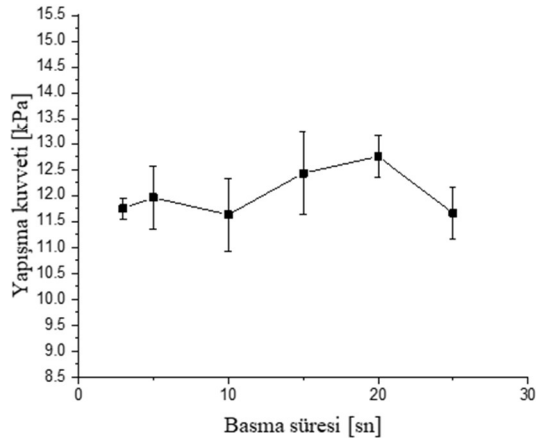
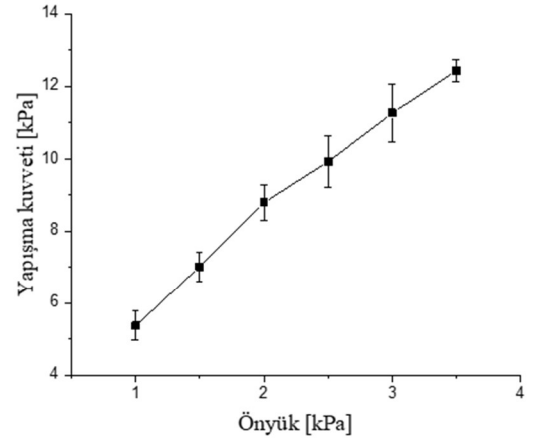
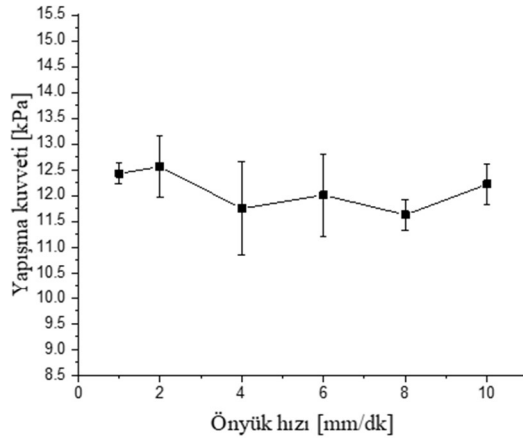
Şekil 3.40 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) basma sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri.



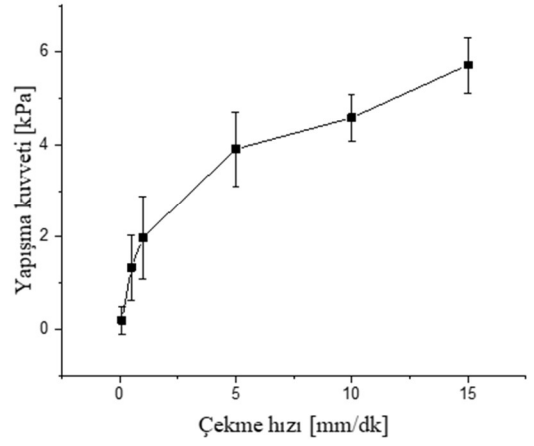
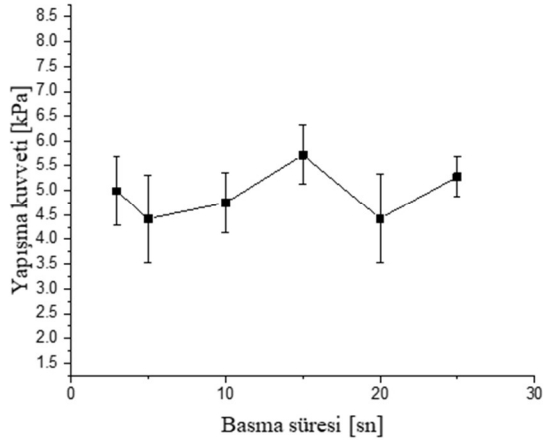
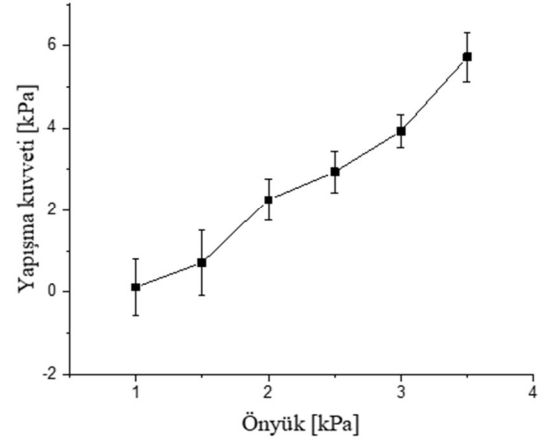
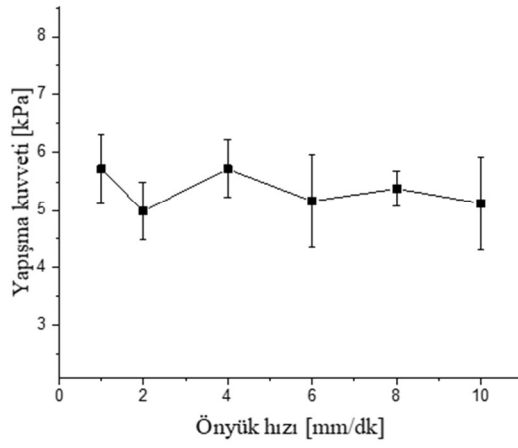
Şekil 3.41 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



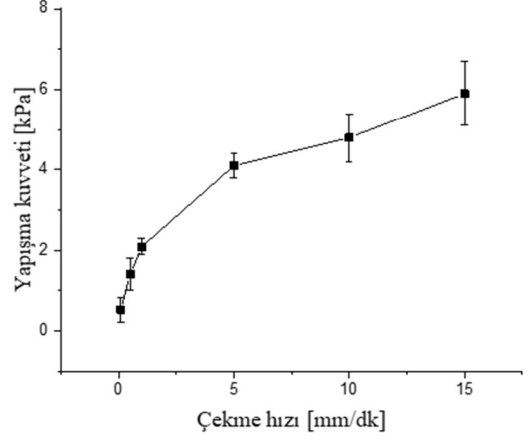
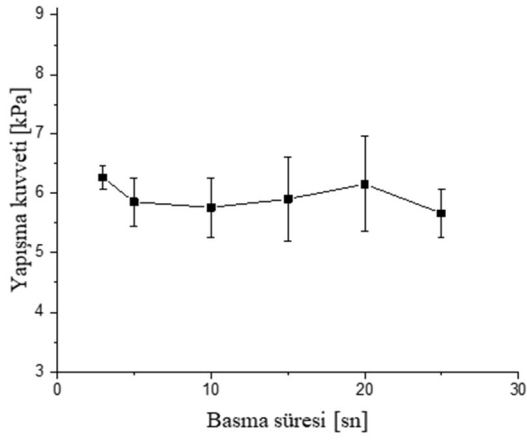
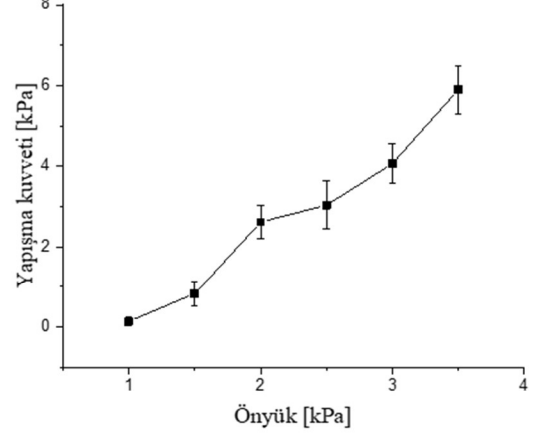
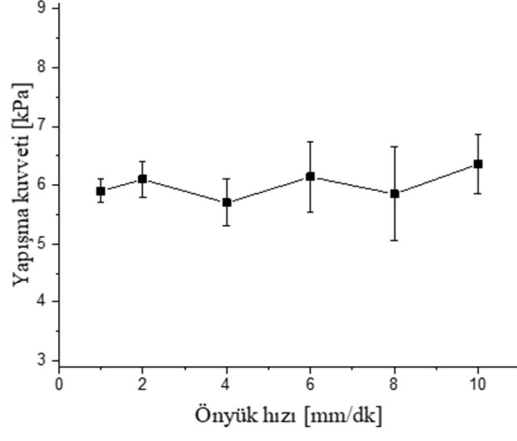
Şekil 3.42 : Dental iç tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



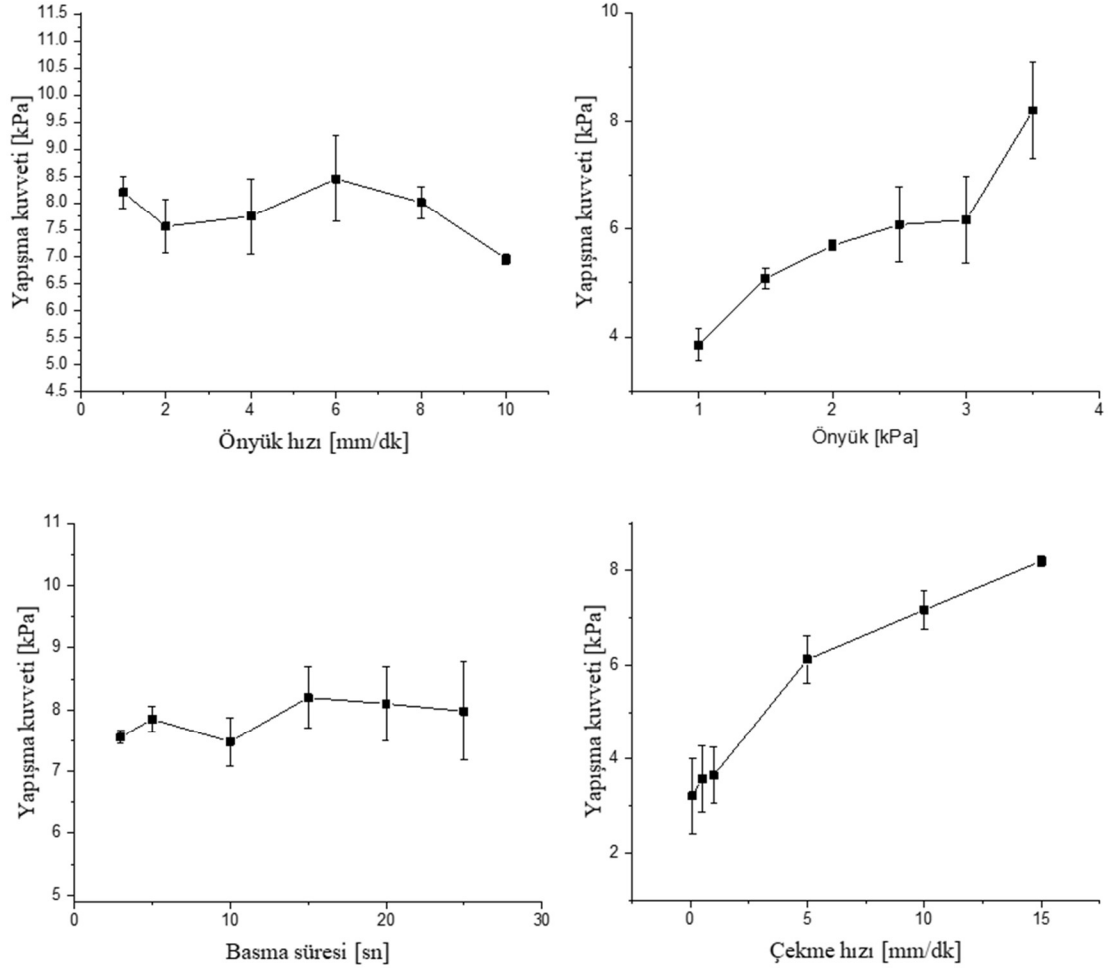
Şekil 3.43 : Dental iç tipi içbükey yapı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.



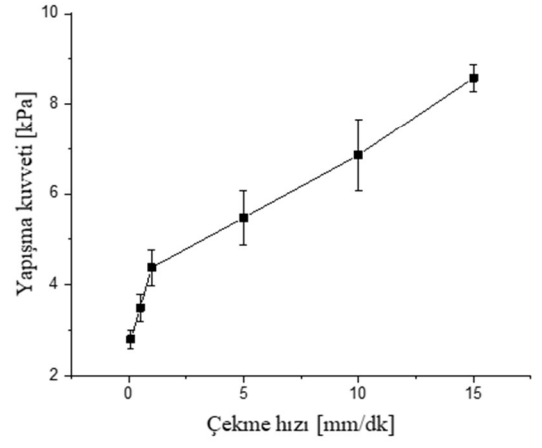
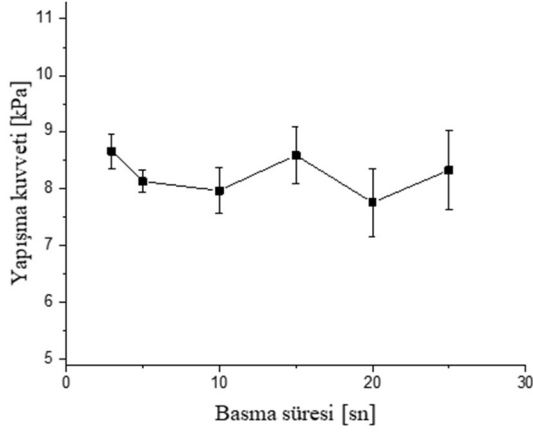
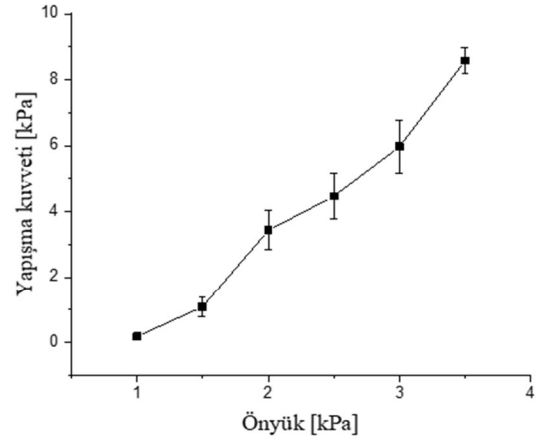
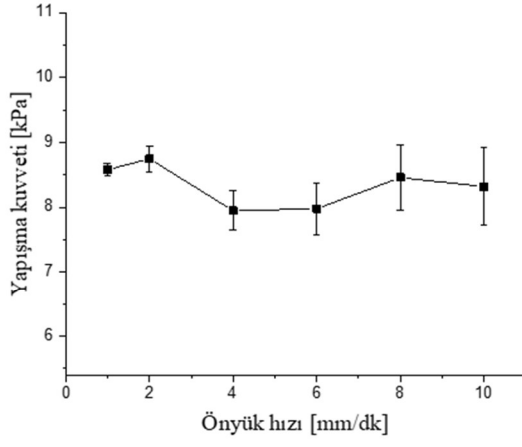
Şekil 3.44 : PDMS dış tipi içbükey yapı (PD) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve sualtı koşullarda yapışma kuvvetleri.



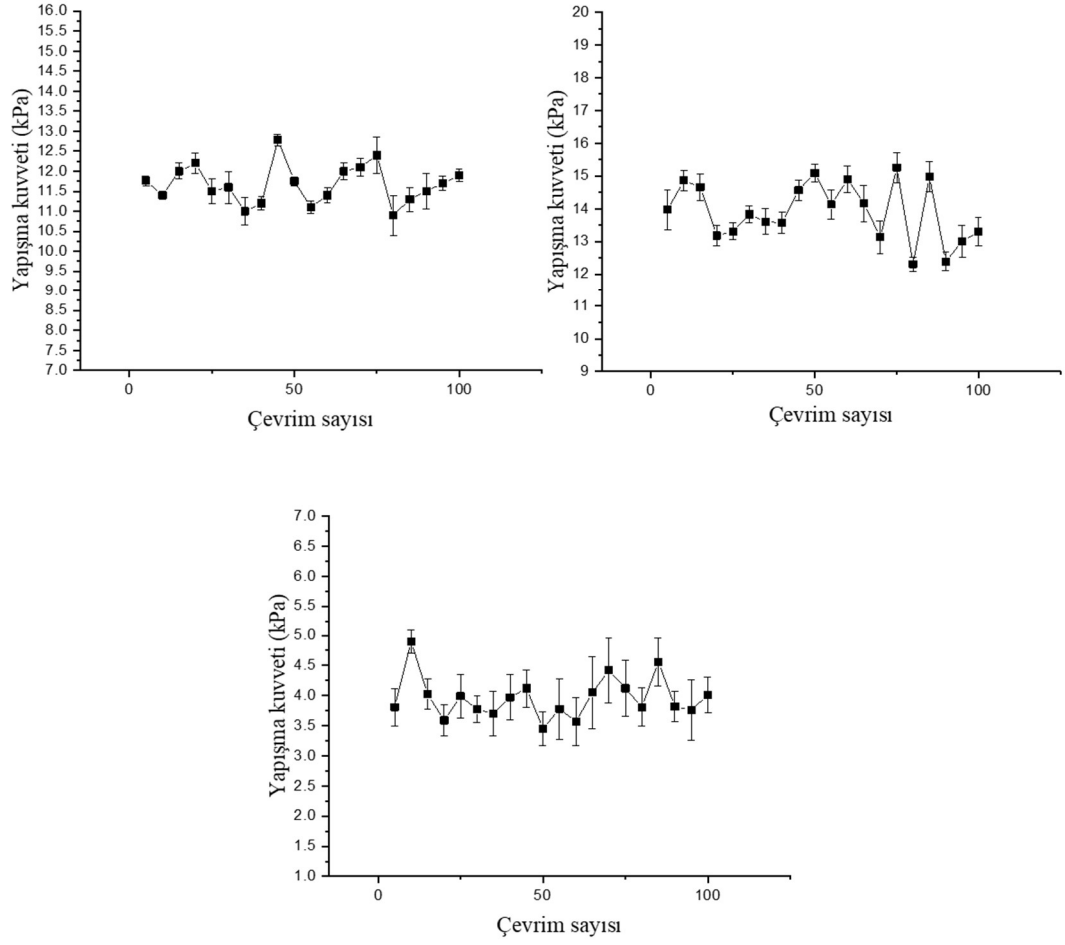
Şekil 3.45 : PDMS dış tipi içbükey yapıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 3 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



Şekil 3.46 : Dental iç tipi içbükey yapı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vyaflex 20 yüzey üzerinde ve pH 11 çözeltili koşullarda yapışma kuvvetleri.



Şekil 3.47 : PDMS dış tipi içbükey yapılı (Dİ) yapıştırıcıların farklı a) önyük hızlarında, b) önyüklerde, c) bekleme sürelerinde, d) çekme hızlarında vytaflex 20 yüzey üzerinde ve silikon yağlı koşullarda yapışma kuvvetleri.



Şekil 3.48 : a) Dental iç tipi içbükey yapıların (Dİ), b) PDMS iç tipi içbükey yapıların (Pİ), c) PDMS dış tipi içbükey yapıların (PD) cam yüzey üzerinde ve sualtı koşullarında 100 çevrime kadar yapışma kuvvetleri.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, CNC işleme yöntemiyle delik desenli kalıp üretimi gerçekleştirilmiş olup, kısmi doldurma tekniği kullanılarak PDMS ve dental esaslı elastomer malzemelerle minyatürize boyutlarda ahtapot vantuzu benzeri yapılar üretilmiştir. Daha sonrasında, üretilen minyatürize yapılardan oluşan elastomerlerin sert ve deforme edilebilir yüzeyler üzerinde yapışma özellikleri analiz edilmiştir.

Üretilen ahtaptan ilham alan PDMS ve dental elastomer esaslı yapıştırıcıların alanı $7 \times 7 \text{ cm}^2$ olup yapıştırıcı plaka üzerinde 1 cm^2 içerisinde ~ 7 yapı bulunmaktadır. Her bir yapı $\sim 1 \text{ mm}$ yarıçapındadır.

Yapılan üretimler sonucunda dört farklı geometride yapı üretilmiş olup, bu yapılar sırasıyla PDMS dış tipi içbükey (PD), PDMS iç tipi içbükey (Pİ), dental perfore tipi içbükey (DP) ve dental iç tipi içbükey (Dİ)' dir.

Sualtı ortamda gerçekleştirilen yapışma testleri sonucunda, en yüksek yapışma mukavemeti hem sert yüzey üzerinde ($\sim 14 \text{ kPa}$) hem de deforme edilebilir yüzey üzerinde ($\sim 8.5 \text{ kPa}$) Dİ tipi yapılardan oluşan yapıştırıcı tarafından sergilenmiştir. Bu durumun, dental elastomerin sertliğinin (Shore A 20) PDMS elastomerin sertliğinden (Shore A 46) daha düşük bir değere sahip olmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

Islak ortamda gerçekleştirilen sistematik yapışma testleri sonucunda, önyük hızlarının ve basma sürelerinin değiştirilmesinin üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetini önemli bir oranda değiştirmedeği gözlenmiştir. Öte yandan, üretilen yapıştırıcıların yapıştırılmasında uygulanan önyük değerinin azaltılmasıyla yapışma kuvvetleri ıslak ortamın türü farketmeksizin doğru orantılı olarak azalmıştır. Benzer şekilde, önyüklemeye olduğu gibi ıslak ortamlarda yapışma kuvvetlerinin artan geri çekme hızlarıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, geri çekme hızının değiştirilerek yapışma kuvvetinin kontrol edilebileceğini başarılı bir şekilde göstermiştir. Bu nedenle, gözlenen bu etki sayesinde üretilen yapıştırıcılar düz nesnelerin sualtında bir yerden başka bir yere taşınmasında yumuşak robotik bir tutucu olarak yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptirler.

Sualtı ortamda ve sert yüzeyde 100 çevrime kadar gerçekleştirilen dayanıklılık testleri sonucunda, üretilen yapıştırıcıların yapışma kuvvetlerinde kayda değer bir azalma olmaksızın performanslarını korudukları gözlenmiştir.

İleriki çalışmalarda, üretilen yapıştırıcıların insan cildi, iç organı ya da yarası üzerinde yapışma testleri yapılarak Sağlık Bakanlığı'nın kriterlerine uygun biyomedikal yapıştırıcı olarak üretilmesi ile katma değeri yüksek, yerli bir biyomedikal malzeme geliştirilmesi sağlanmış olacaktır.



KAYNAKLAR

- Afferrante, L., Carbone, G., Demelio, G., & Pugno, N.** (2013). Adhesion of elastic thin films: Double peeling of tapes versus axisymmetric peeling of membranes, *Tribology Letters*, 52(3), 439-447.
- Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, S. T., Zesch, W., Chan, W. P., Kenny, T. W., Fearing, R., & Full, R. J.** (2000). Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature*, 405(6787), 681-685.
- Autumn, K., Majidi, C., Groff, R., Dittmore, A., & Fearing, R.** (2006). Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays, *Journal of Experimental Biology*, 209(18), 3558-3568.
- Autumn, K., & Peattie, A. M.** (2002). Mechanisms of adhesion in geckos. *Integrative and comparative biology*, 42(6), 1081-1090.
- Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. N., & Full, R. J.** (2002). Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(19), 12252-12256.
- Baik, S., Kim, D. W., Park, Y., Lee, T.-J., Ho Bhang, S., & Pang, C.** (2017). A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi, *Nature*, 546(7658), 396-400.
- Baik, S., Kim, J., Lee, H. J., Lee, T. H., & Pang, C.** (2018). Highly Adaptable and Biocompatible Octopus-Like Adhesive Patches with Meniscus-Controlled Unfoldable 3D Microtips for Underwater Surface and Hairy Skin, *Advanced Science*, 5(8), 1800100.
- Baik, S., Lee, H. J., Kim, D. W., Min, H., & Pang, C.** (2019). Capillarity-Enhanced Organ-Attachable Adhesive with Highly Drainable Wrinkled Octopus-Inspired Architectures, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(29), 25674-25681.
- Bandara, N., Zeng, H., & Wu, J.** (2013). Marine mussel adhesion: Biochemistry, mechanisms, and biomimetics, *Journal of adhesion science and technology*, 27(18-19), 2139-2162.
- Barbero, A. M., & Frasc, H. F.** (2009). Pig and guinea pig skin as surrogates for human in vitro penetration studies: A quantitative review. *Toxicology in vitro*, 23(1), 1-13.
- Barnes, D. K.** (2002). Invasions by marine life on plastic debris, *Nature*, 416(6883), 808-809.

- Barnes, W.** (1999). Tree frogs and tire technology, *Tire Technol. Int*, 99, 42-47.
- Beutel, R. G., & Gorb, S.** (2001). Ultrastructure of attachment specializations of hexapods (Arthropoda): Evolutionary patterns inferred from a revised ordinal phylogeny, *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 39(4), 177-207.
- Bullock, J. M. R.** (2010). *Biomechanics of the fibrillar adhesive system in insects*.
- Chang, W.-Y., Wu, Y., & Chung, Y.-C.** (2014). Facile fabrication of ordered nanostructures from protruding nanoballs to recessional nanosuckers via solvent treatment on covered nanosphere assembled monolayers, *Nano letters*, 14(3), 1546-1550.
- Chen, Y.-C., & Yang, H.** (2017). Octopus-inspired assembly of nanosucker arrays for dry/wet adhesion, *ACS nano*, 11(6), 5332-5338.
- Cheung, E., & Sitti, M.** (2008). Adhesion of biologically inspired oil-coated polymer micropillars, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22(5-6), 569-589.
- Chu, B., Jung, K., Han, C.-S., & Hong, D.** (2010). A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion, *International journal of precision engineering and manufacturing*, 11(4), 633-647.
- Chun, S., Kim, D. W., Baik, S., Lee, H. J., Lee, J. H., Bhang, S. H., & Pang, C.** (2018). Conductive and Stretchable Adhesive Electronics with Miniaturized Octopus-Like Suckers against Dry/Wet Skin for Biosignal Monitoring, *Advanced Functional Materials*, 28(52), 1805224.
- del Campo, A., Álvarez, I., Filipe, S., & Wilhelm, M.** (2007). 3D Microstructured Surfaces Obtained by Soft-Lithography Using Fast-Crosslinking Elastomeric Precursors and 2D Masters, *Advanced Functional Materials*, 17(17), 3590-3597.
- del Campo, A., Greiner, C., Álvarez, I., & Arzt, E.** (2007). Patterned Surfaces with Pillars with Controlled 3D Tip Geometry Mimicking Bioattachment Devices, *Advanced Materials*, 19(15), 1973-1977.
- Eisenhaure, J., & Kim, S.** (2017). A review of the state of dry adhesives: Biomimetic structures and the alternative designs they inspire, *Micromachines*, 8(4), 125.
- Emerson, S., & Diehl, D.** (1980). Toe pad morphology and mechanisms of sticking in frogs, *Biological Journal of the Linnean Society*, 13(3), 199-216.
- Ernst, V. V.** (1973). The digital pads of the tree frog, *Hyla cinerea*. II. The mucous glands, *Tissue and Cell*, 5(1), 97-104.
- Federle, W., Barnes, W., Baumgartner, W., Drechsler, P., & Smith, J.** (2006). Wet but not slippery: Boundary friction in tree frog adhesive toe pads, *Journal of the Royal Society Interface*, 3(10), 689-697.

- Follador, M., Tramacere, F., & Mazzolai, B.** (2014). Dielectric elastomer actuators for octopus inspired suction cups, *Bioinspiration & biomimetics*, 9(4), 046002.
- Gorb, S., & Scherge, M.** (2000). Biological microtribology: Anisotropy in frictional forces of orthopteran attachment pads reflects the ultrastructure of a highly deformable material, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 267(1449), 1239-1244.
- Green, D. M.** (1981). Adhesion and the toe-pads of treefrogs, *Copeia*, 790-796.
- HANNA, G., Jon, W., & BARNES, W. J.** (1991). Adhesion and detachment of the toe pads of tree frogs, *Journal of Experimental Biology*, 155(1), 103-125.
- Hou, J., Wright, E., Bonser, R. H., & Jeronimidis, G.** (2012). Development of biomimetic squid-inspired suckers, *Journal of Bionic Engineering*, 9(4), 484-493.
- Huber, G., Mantz, H., Spolenak, R., Mecke, K., Jacobs, K., Gorb, S. N., & Arzt, E.** (2005). Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(45), 16293-16296.
- Kier, W. M., & Smith, A. M.** (1990). The morphology and mechanics of octopus suckers, *The Biological Bulletin*, 178(2), 126-136.
- Kier, W. M., & Smith, A. M.** (2002). The structure and adhesive mechanism of octopus suckers, *Integrative and Comparative Biology*, 42(6), 1146-1153.
- Kier, W. M., & Smith, K. K.** (1985). Tongues, tentacles and trunks: The biomechanics of movement in muscular-hydrostats, *Zoological Journal of the Linnean Society*, 83(4), 307-324.
- Kuba, M. J., Byrne, R. A., Meisel, D. V., & Mather, J. A.** (2006). Exploration and habituation in intact free moving *Octopus vulgaris*, *International Journal of Comparative Psychology*, 19(4), 426-438.
- Lee, H., Um, D., Lee, Y., Lim, S., Kim, H., & Ko, H.** (2016). Octopus-inspired smart adhesive pads for transfer printing of semiconducting nanomembranes, *Advanced Materials*, 28(34), 7457-7465.
- Miyake, T., Ishihara, H., & Yoshimura, M.** (2007). *Basic studies on wet adhesion system for wall climbing robots*, 1920-1925.
- Nachtigall, W.** (2013). Biological mechanisms of attachment: The comparative morphology and bioengineering of organs for linkage, suction, and adhesion, *Springer Science & Business Media*.
- Nguyen, T.-V., & Shimoyama, I.** (2019). Micrometer-Sized Suction Cup Array with Strong Adhesion to Wet Surface, *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors*, 1643-1646.

- Packard, A., Trueman, E. R., & Clarke, M. R.** (1988). *The skin of cephalopods (Coleoids): General and special adaptations.*
- Persson, B.** (2000). *Sliding Friction: Physical Principles and Applications.*
- Persson, B. N. J.** (2007). Wet adhesion with application to tree frog adhesive toe pads and tires, *Journal of Physics: Condensed Matter*, *19*, 376110.
- Radhakrishnan, P. S. V., & Narayan, K. A.** (1990). *Squeezing flow between parallel plates*, 8.
- Scherge, M., Gorb, S. N., & Gorb, S.** (2001). *Biological micro-and nanotribology.* Springer Science & Business Media.
- Thanh-Vinh, N., Takahashi, H., Kan, T., Noda, K., Matsumoto, K., & Shimoyama, I.** (2011). *Micro suction cup array for wet/dry adhesion*, 284-287.
- Tramacere, F., Beccai, L., Kuba, M., Gozzi, A., Bifone, A., & Mazzolai, B.** (2013). The morphology and adhesion mechanism of Octopus vulgaris suckers, *PLoS One*, *8*(6), e65074.
- Tramacere, F., Beccai, L., Sinibaldi, E., Laschi, C., & Mazzolai, B.** (2011). *Adhesion Mechanisms Inspired by Octopus Suckers.* 192-193.
- Tramacere, F., Follador, M., Pugno, N., & Mazzolai, B.** (2015). Octopus-like suction cups: From natural to artificial solutions, *Bioinspiration & biomimetics*, *10*(3), 035004.
- Tramacere, F., Pugno, N. M., Kuba, M. J., & Mazzolai, B.** (2015). Unveiling the morphology of the acetabulum in octopus suckers and its role in attachment, *Interface focus*, *5*(1), 20140050.
- Varenberg, M., & Gorb, S. N.** (2009). Hexagonal surface micropattern for dry and wet friction, *Advanced Materials*, *21*(4), 483-486.
- Wainwright, D. K., Kleinteich, T., Kleinteich, A., Gorb, S. N., & Summers, A. P.** (2013). Stick tight: Suction adhesion on irregular surfaces in the northern clingfish, *Biology letters*, *9*(3), 20130234.
- Wang, Y., Kang, V., Arzt, E., Federle, W., & Hensel, R.** (2019). Strong Wet and Dry Adhesion by Cupped Microstructures, *ACS Applied Materials & Interfaces*, *11*(29), 26483-26490.
- Wang, Y., Kang, V., Federle, W., Arzt, E., & Hensel, R.** (2020). Switchable Underwater Adhesion by Deformable Cupped Microstructures, *Advanced Materials Interfaces*, *7*(23), 2001269.
- Xue, L., Kovalev, A., Dening, K., Eichler-Volf, A., Eickmeier, H., Haase, M., Enke, D., Steinhart, M., & Gorb, S. N.** (2013). Reversible adhesion switching of porous fibrillar adhesive pads by humidity, *Nano letters*, *13*(11), 5541-5548.

Yu, M., & Deming, T. J. (1998). Synthetic polypeptide mimics of marine adhesives, *Macromolecules*, 31(15), 4739-4745.

Yu, M., Hwang, J., & Deming, T. J. (1999). Role of L-3, 4-dihydroxyphenylalanine in mussel adhesive proteins, *Journal of the American Chemical Society*, 121(24), 5825-5826.

Zhao, H., & Waite, J. H. (2006). Linking adhesive and structural proteins in the attachment plaque of *Mytilus californianus*, *Journal of Biological Chemistry*, 281(36), 26150-26158.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Murat EROĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2017, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı