

**ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRLERİNİN
FABRİKASYONU VE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

**FABRICATION AND ELECTRICAL
CHARACTERIZATION OF FLEXIBLE CAPACITIVE
PRESSURE SENSORS**

TURGAY BEBEK

DOÇ. DR DİNÇER GÖKCEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Annem ve Babam'a

ÖZET

ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRLERİNİN FABRİKASYONU VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Turgay BEBEK

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN

Haziran 2025, 93 sayfa

Esnek elektronik uygulamalarının günümüz teknoloji dünyasında etki alanının genişlemesi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla insan-makine etkileşiminin ve sensör uygulamalarının önemi her geçen gün artmaktadır. Fiziksel veya mekanik bir etkiyi, çıkışında elektriksel sinyale dönüştürerek cevap çıktısı üreten ve bu çıktıların sağlık, robotik, giyilebilir teknoloji, eğitim ve eğlence sektörü gibi teknolojik uygulamalarda, istenilen amaca hizmet edecek şekilde anlamlandırılmasını sağlayan esnek sensörler yüksek esneklik, kararlılık, yüksek doğruluk, imalat kolaylığı, düşük maliyet gibi etmenleri ile esnek elektronik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu tez kapsamında, esneklik, ayarlanabilir sertlik, ısıya dayanıklılık, biyo-uyumluluk gibi özellikler ile ön plana çıkan Polidimetilsiloksan (PDMS) ve yine benzer özelliklere ve ayrıca kendini iyileştirebilme özelliğine ve hidrojel yapıya sahip Polivinil alkol (PVA) ve Boraks karışımı olmak üzere iki farklı çeşit malzemenin herhangi bir eklenti mikro ve nano parçacık katkılama yapılmaksızın farklı karışım oranları ile farklı malzeme katman kalınlıklarındaki formasyonları üretilerek hem karışım oranı ve katman kalınlığının sensör performansına etkisi incelenmiş hem de iki malzemenin karşılaştırması yapılmıştır. Üretilen sensörler, farklı basınç değerlerinde elektromekanik testlere tabi

tutularak esnek kapasitif basınç sensörlerinde farklı malzemelerin, farklı sertlik ve farklı kalınlıklarda sensör hassasiyetine ve doğrusallığına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmalar sonucunda belirlenen sertlik değerindeki PVA ve Boraks karışımı için 8×8 boyutunda kapasitif sensör dizisi fabrikasyonu yapılmış ve sensör performansı ve uygulanan kuvvete göre haritalandırılmasının sensör dizisi üzerinde gösterilmesi sağlanmıştır. Tez kapsamında test edilen PDMS tabanlı sensör tasarımlarının hassasiyet ve doğrusallık gibi sensörü karakterize eden parametrelerinin malzemeyi oluşturan bileşenlerin farklı oranlarda karıştırılması ve malzemenin farklı kalınlıklarda kullanımı ile değişim gösterdiği görülmüştür. PDMS içerisine herhangi bir eklenti mikro ve nano parçacık katkılama yapılmamasından dolayı hassasiyet ve doğrusallığının düşük çıktığı görülmüştür. PDMS tabanlı sensör tasarımları düşük basınç aralığında hassasiyet göstermiş olup bu sensör tasarımlarının düşük basınçlar için kullanımlarının uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Tez kapsamında test edilen PVA Boraks tabanlı sensör tasarımlarının hassasiyet ve doğrusallık gibi sensörü karakterize eden parametrelerinin malzemeyi oluşturan bileşenlerin farklı oranlarda karıştırılması ve malzemenin farklı kalınlıklarda kullanımı ile değişim gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte PVA Boraks hidrojelinin zamana bağlı olarak ağırlık kaybetmesi ile sensör performansının etkilendiği görülmüştür. Zamanla ağırlık kaybı, PVA Boraks katmana sahip sensörlerde en yüksek basınçtaki tepe kapasitans değerlerinde düşüşe neden olurken, malzemenin daha rijit yapıya dönüşmesi ile kararlılığının oluşmasının sensör performansını artırıcı etkileri olduğu anlaşılmıştır. PDMS ile karşılaştırıldığında PVA Boraks hidrojelinin daha geniş basınç aralıklarında daha yüksek hassasiyet ve doğrusallık ile çalışabildiği görülmüştür. Üstelik PVA Boraks hidrojelinin kendisini iyileştirebilme özelliği sayesinde sensör dayanımının yüksek olduğu bu nedenle PVA Boraks sensör tasarımlarının daha uzun süre kullanılabileceği anlaşılmıştır. PVA Boraks hidrojelinin üretimi PDMS malzemesi üretiminden daha az maliyetle, daha az eforla ve kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Bu özelliği ile de PVA Boraks hidrojelinin, PDMS elastomerinden üstün niteliklere sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Esnek Elektronik, Kapasitif Basınç Sensörü, Sensör Dizisi, Geliştirilebilir Hassasiyet, Doğrusallık, PDMS, PVA, Boraks

ABSTRACT

FABRICATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF FLEXIBLE CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

Turgay BEBEK

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Dincer GOKCEN

June 2025, 93 pages

In today's technological world, the growth of flexible electronic applications and their widespread adoption has significantly increased the importance of human-machine interaction and sensor applications. Flexible sensors that convert a physical or mechanical effect into an electrical signal output, and enable the interpretation of these outputs to serve desired purposes in technological applications such as health, robotics, wearable technology, education, and entertainment, hold an important place in flexible electronic applications due to factors like high flexibility, stability, high accuracy, ease of manufacturing, and low cost. Within the scope of this thesis, two different types of materials, namely Polydimethylsiloxane (PDMS) which stands out with its properties such as flexibility, adjustable hardness, heat resistance, biocompatibility, and Polyvinyl alcohol (PVA) and Borax mixture which have similar properties and also self-healing properties and hydrogel structure, were produced with different mixing ratios and different dielectric layer thicknesses without any additional micro and nano particle doping. The effects of both mixing ratio and dielectric layer thickness on sensor performance were investigated, and the two materials were compared. The produced

sensors were subjected to electromechanical tests at various pressure values, and the effects of different materials, hardnesses, and thicknesses on sensor sensitivity and linearity in flexible capacitive pressure sensors were investigated. In addition, as a result of these studies, an 8×8 size capacitive sensor array was fabricated for the PVA and Borax mixture with the determined hardness value, and the sensor performance and its mapping according to the applied force on the sensor array are demonstrated. It has been observed that the parameters characterizing the sensor, such as sensitivity and linearity, of the PDMS-based sensor designs tested in this thesis vary with the mixing of the components that make up the material in different ratios and the use of varying thicknesses of the dielectric material. It was observed that the sensitivity and linearity were low due to the absence of any micro- and nano-particle doping in the PDMS. PDMS-based sensor designs exhibited sensitivity in the low-pressure range, and it was assessed that these sensor designs could be appropriate for use at low pressures. It has been observed that the parameters characterizing the sensor, such as sensitivity and linearity, of the PVA Borax-based sensor designs tested within the scope of the thesis vary with the mixing of the components constituting the material in different ratios and the use of various thicknesses of the dielectric material. Additionally, it was noted that sensor performance was impacted by the weight loss of PVA Borax hydrogel over time. Although weight loss over time led to a decrease in peak capacitance values at the highest pressure in sensors with a PVA Borax dielectric layer, it was found that the material's transformation into a more rigid structure and the establishment of its stability positively influenced sensor performance. Compared to PDMS, it was observed that PVA-Borax hydrogel operates with higher sensitivity and linearity over a broader pressure range. Moreover, due to the self-healing property of PVA-Borax hydrogel, PVA-Borax sensor designs can be used for a long time. Producing PVA-Borax hydrogel requires less cost, effort, and ease compared to producing PDMS material. With this advantage, it is evident that PVA-Borax hydrogel possesses superior qualities compared to PDMS elastomer.

Keywords: Flexible Electronics, Capacitive Pressure Sensor, Sensor Array, Expandable Sensitivity, Linearity, PDMS, PVA, Borax.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca akademik katkılarıyla tez çalışmamın her safhasında yol göstericim ve ilham kaynağım olan, karşılaştığım her zorlukta beni her zaman motive eden ve daha iyisini yapmam için sürekli çabalayan kıymetli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN'e,

Bilgi birikimiyle tez çalışmalarına destek olan Nanoteknoloji ve Nanotıp A.B.D. öğretim üyesi Sayın Doç.Dr. Cem BAYRAM'a,

Tez sürecimde yaşadığım yoğunluk ve zor zamanlarıma anlayışla yaklaşarak bana her türlü desteği sağlayan değerli amirim Sayın Mustafa TOKGÖZ'e ve manevi destekleri için HAVELSAN'daki değerli çalışma arkadaşlarıma,

Yüksek lisans tez çalışmam kapsamında destekleri ve katkıları için tüm Mikro ve Nano Sistemler Araştırma Laboratuvarı (MNS-Lab) mensuplarına, özellikle Hazar Haluk AKSAÇ'a,

Hayatım boyunca maddi manevi her zaman desteklerini yanı başımda hissettiğim, fedakarlıklarını üzerimden asla esirgemeyen canım annem Fatma BEBEK ve canım babam Bestami BEBEK'e,

Yüksek lisans eğitimim boyunca attığım her adımda yol arkadaşım, düştüğümde açılan kanadım, biricik eşim Ebrar BEBEK'e,

Sonsuz teşekkürlerimle...

Turgay BEBEK

Haziran 2025, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 TEZ KAPSAMI.....	1
1.2 TEZ AKIŞI.....	3
2. GENEL KAVRAMLAR	4
2.1. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİ.....	4
2.1.1. KAPASİTİF SENSÖRLER.....	4
2.2. ESNEK SENSÖR ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER	5
2.2.1 POLİDİMETİLSİLOKSAN (PDMS)	5
2.2.2 POLİVİNİLALKOL (PVA).....	6
2.2.3 SODYUM TETRABORAT (BORAKS)	6
2.2.4 ESNEK SENSÖRLERDE KULLANILAN DİĞER MALZEMELER	7
2.3. ESNEK SENSÖR ÜRETİM YÖNTEMLERİ	8
2.3.1 KARIŞTIRMA	8
2.3.2 DÖKÜM VE DAMLATMA.....	9
2.3.3 SPREY DESTEKLİ DÖNDÜREREK KAPLAMA	9
2.3.4 LAZER AŞINDIRMA	10
2.4. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	10
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	14
3.1. ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ FABRİKASYONU	14
3.1.1. ALT ve ÜST KATMAN ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ.....	14
3.1.2. MALZEME ÜRETİMİ	19
3.1.2.1. PDMS ÜRETİMİ	20

3.1.2.2 PVA ve BORAKS ÜRETİMİ.....	21
3.1.3. SENSÖR TASARIMLARI.....	24
3.1.3.1. PDMS MALZEME KATMANINA SAHİP SENSÖR TASARIMLARI	24
3.1.3.2. PVA ve BORAKS MALZEME KATMANINA SAHİP SENSÖR TASARIMLARI.....	25
3.1.4. SENSÖR DİZİLERİNİN OLUŞTURULMASI	27
3.2. TEST ORTAMININ KURULMASI	28
3.3. ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ.....	29
3.3.1. PDMS KATMANLI KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ	30
3.3.1.1. FARKLI KATMAN KALINLIKLARINDA UYGULANAN BASINCA GÖRE PDMS SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ	30
3.3.2. PVA ve BORAKS KATMANLI KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ.....	42
3.3.2.1. SENSÖR MALZEMESİNİN FREKANSA GÖRE KAPASİTANS VE FAZ AÇISI DEĞİŞİMİ	42
3.3.2.2. FARKLI MALZEME KATMAN KALINLIKLARINDA UYGULANAN BASINCA GÖRE PVA BORAKS SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ	43
3.3.2.3. DEĞİŞKEN MALZEME KATMAN KALINLIKLARINDA ZAMANA GÖRE UYGULANAN SABİT BASINCA PVA BORAKS SENSÖRÜNÜN TEPKİSİ.....	73
3.3.2.4. SENSÖRÜN ODA SICAKLIĞINDA BEKLETİLMESİYLE FARKLI GÜNLERDE ALINAN ÖLÇÜMLERİN KAPASİTANS DEĞİŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	74
3.3.3. SENSÖR DİZİSİNDE BASINCA GÖRE HARİTALANDIRMA	77
4. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	79
5. KAYNAKLAR	83
EKLER.....	93
EK 1 – Tez Çalışması Orjinallik Raporu	93
ÖZGEÇMİŞ	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Alt ve üst elektrot fabrikasyon aşamaları; a) pyralux parçası, b) döndürme ile spreycaplama, c) kaplama yapılmış pyralux parçası, d) lazer kazıma, e) lazer kazıma sonrası desen oluşumu, f) ıslak aşındırma sonrası bakır plakanın kaldırılması, g) aseton uygulanması sonrası bakır kontakların oluşturulması.....	15
Şekil 2. Lazer kazıma ile alt ve üst elektrot oluşturmada kullanılan CAD tasarımı.	17
Şekil 3. Elektrotların lazer kazıma sonrası optik mikroskop görüntüsü; a) ~0.3 mm genişliğe sahip elektrot, b) ~0.75 mm genişliğe sahip elektrot.	17
Şekil 4. Elektrotların ıslak aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüleri; a) ~0.28 mm genişliğe sahip elektrot, b) ~0.75 mm genişliğe sahip elektrot, c) sensör kontak tabakası üretim sonuçları.....	19
Şekil 5. PDMS fabrikasyonu; a) Baz ve ajan eklenerek karışımın karıştırılması, b) karışım sırasında hava kabarcıklarının oluşumu, c) PDMS'i kürlemek için vakum ile fırınlama yapılması, d) kürlenmiş PDMS malzemesi.	21
Şekil 6. PVA ve Boraks fabrikasyonu; a) toz PVA'den PVA jel hazırlanması, b) toz Boraks'tan Boraks çözeltisinin hazırlanması, c) PVA jeli ve Boraks çözeltisinin karıştırılması, d) PVA Boraks hidrojelinin oluşturulması.....	23
Şekil 7. Farklı baz ve ajan karışım oranları için hazırlanan 100 µm, 200 µm ve 400 µm malzeme katman kalınlığına sahip PDMS tabanlı kapasitif basınç sensörleri.....	25
Şekil 8. Sensör üretim yöntemi; a) malzemenin kontak üzerine serilmesi, b) 400 µm kalınlıkta malzemenin üretimi.....	26
Şekil 9. Farklı PVA ve Boraks karışım oranları için hazırlanan 100 µm, 200 µm ve 400 µm malzeme katman kalınlığına sahip PVA Boraks tabanlı kapasitif basınç sensörleri	27
Şekil 10. Sensör dizisi görseli; a) 8x8 sensör dizisi, b) sensör dizisinin bant ile kapatılması.	28
Şekil 11. Testlerde kullanılan bası istasyonu.	29
Şekil 12. PDMS 10:1 – d sensörünün LCR metre ile test edilmesi a) offset'siz test sonucu, b) offset'li test sonucu c) ölçülen kapasitans değerlerinden offset'in çıkarılması ile elde edilen test sonucu.....	31

Şekil 13. PDMS 10:1 – d; a) basınca göre kapasitans değişimi, b) basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.....	32
Şekil 14. PDMS 10:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	34
Şekil 15. PDMS 10:1 – 4d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	35
Şekil 16. PDMS 15:1 – d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	36
Şekil 17. PDMS 15:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	37
Şekil 18. PDMS 15:1 – 4d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	38
Şekil 19. PDMS 20:1 – d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	39
Şekil 20. PDMS 20:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	40
Şekil 21. PDMS 20:1 – 4d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	41
Şekil 22. S1-4d sensörüne ait; a) frekansa göre kapasitans değişimi grafiği, b) frekansa göre faz açısı değişimi grafiği.....	43
Şekil 23. S2 sensörünün farklı malzeme katman kalınlıklarındaki tasarımlarının sensör kapasitans değeri üzerindeki etkisi.	44
Şekil 24. S1-d (T0); a) basınca göre kapasitans değişimi, b) basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	45
Şekil 25. S1-d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	47
Şekil 26. S1-d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	48
Şekil 27. S1-2d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	50
Şekil 28. S1-2d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	51
Şekil 29. S1-2d (T0+10G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.....	52
Şekil 30. S1-4d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	53
Şekil 31. S1-4d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.....	54
Şekil 32. S1-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	54
Şekil 33. S2-d (T0); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.....	56
Şekil 34. S2-d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	57
Şekil 35. S2-d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	58
Şekil 36. S2-2d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	59

Şekil 37. S2-2d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	60
Şekil 38. S2-2d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	61
Şekil 39. S2-4d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	62
Şekil 40. S2-4d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	63
Şekil 41. S2-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	64
Şekil 42. S3-d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	65
Şekil 43. S3-d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	66
Şekil 44. S3-d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	67
Şekil 45. S3-2d (T0); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	68
Şekil 46. S3-2d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	69
Şekil 47. S3-2d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	70
Şekil 48. S3-4d (T0); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	71
Şekil 49. S3-4d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	72
Şekil 50. S3-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.	72
Şekil 51. Aynı katman kalınlığına sahip sensör tasarımlarının 10 saniyelik periyotlardaki 100 kPa sabit bası değerlerine göre kapasitans değişimi. a) S1-2d, b) S3-2d.	73
Şekil 52. Zamanla sensor malzemesindeki ağırlık değişiminin sensör performansına etkisi: a) S1-d kapasitif basınç eğrileri, b) S2-4d kapasitif basınç eğrileri, c) S3-2d kapasitif basınç eğrileri.	76
Şekil 53. 8x8 esnek kapasitif basınç sensörü dizisinin haritalandırılması: a) basınç uygulanmamış ilk durum, b) 1cm ² yüzeye 200 g (19.62 kPa) basınç uygulanması, c) paralel bağlı kapasitör ile basınç uygulanmamış ilk durum, d) paralel bağlı kapasitör ile 1cm ² yüzeye 200 g (19.62 kPa) basınç uygulanması.	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	Kapasitans (İng. Capacitance)
C_0	İlk Kapasitans Değeri (İng. Initial Capacitance)
P	Basınç (İng. Pressure)
P_0	İlk Basınç (İng. Initial Pressure)
ε_0	Vakum Dielektrik Sabiti (İng. Permittivity of Free Space)
ε_r	Bağıl Dielektrik Sabiti (İng. Relative Permittivity)
A	Elektrot Yüzey Alanı (İng. Electrode Surface Area)
S_m	Sensör Mutlak Hassasiyeti (İng. Absolute Sensitivity)
S	Sensör Hassasiyeti (İng. Sensitivity)
ΔC	Kapasitans Değişimi (İng. Change in Capacitance)
ΔP	Basınç Değişimi (İng. Change in Pressure)
R^2	Belirleme Katsayısı (İng. Coefficient of determination)
y_i	Alınan Ölçüm (İng. Measured Value)
$\hat{y}_i$	Tahmin Değeri (İng. Predicted Value)
$\bar{y}$	Ölçüm ortalaması (İng. Mean of Measurements)
F	Farad
Pa	Paskal

Kısaltmalar

PDMS	Polidimetilsiloksan (İng. Polydimethylsiloxane)
PVA	Polivinil Alkol (İng. Polyvinyl Alcohol)
Boraks	Boraks/Sodyum Borat (İng. Borax/Sodium Borate)
PEDOT	Poli(3,4-etilendioksitiyofen) (İng. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene))
PEDOT: PSS	Poli(3,4-etilendioksitiyofen):poli(stiren sülfonat)
PPy	Polipirrol (İng. Polypyrrole)
CNT	Karbon Nanotüp (İng. Carbon Nanotube)
HCl	Hidrojen Klorür (İng. Hydrogen Chloride)
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit (İng. Hydrogen Peroxide)
DI	Deiyonize Su (İng. Deionized Water)

1. GİRİŞ

1.1 TEZ KAPSAMI

Esnek elektronik alanındaki teknolojik gelişmeler, yaygın olarak kullanılan geleneksel elektronik uygulamalardaki sert ve kırılgan malzemeler yerine yumuşak, esnek, kırılgan olmayan, bükülebilir, katlanabilir ve gerilebilir malzemelerin kullanımını mümkün kılmıştır. Elektronik alanındaki bu esneklik, süregelen elektronik uygulamalarının yanı sıra günlük hayatta insan-makine etkileşimini arttıracak yeni uygulamalara zemin oluşturmakta, günden güne gelişen esnek elektronik teknolojileri ile hayatımıza giren yenilikler ve insanlık üzerine etkileri artarak devam etmektedir [1,2].

Esnek elektronik uygulamalarında, esnek dokunsal sensörlerin kullanımı özellikle insan makine etkileşiminin yaygın olduğu sağlık alanında kendisine büyük bir yer bulmuş, dokunsal sensörlerin çalışma alanını genişletmiştir. Ampute hastalar için protez kullanımında tıpkı gerçek deride olduğu gibi dokunma hissini yansıtmak için dış çevreden alınan basınç, sıcaklık ve dokunma gibi girdileri elektriksel sinyallere dönüştürerek algılama işlemi yapan dokunsal sensörler, hastanın dokunma hissini daha gerçekçi bir şekilde deneyimlemesine yardımcı olur [3]. Deri üzerine kolaylıkla yapıştırılabilen giyilebilir esnek sensörler sayesinde hastalardan sporculara, yaşlılardan gençlere günlük yaşamda kullanımda dahi yapılan aktivitelerin, kas hareketlerinin, solunum sıklığının, vücut sıcaklığı ve kalp ritminin takibi gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir [4]. Kas iskelet rahatsızlıklarında veya felç durumlarında hastaların egzersiz sırasında kas aktivitelerinin ve tepkilerinin anlık olarak takibi esnek sensörlerin rehabilitasyon cihazlarında kullanımı ile sağlanabilmektedir [5]. Esnek sensörlere sahip akıllı yara bantlarının yara üzerine yerleştirilmesi ile yaranın nem, sıcaklık, pH değeri gibi durumları takip edilerek yaranın enfeksiyon riskini azaltmaya yardımcı olur. Bu sayede yara durumu düzenli bir şekilde takip edilebilmekte, buna göre gerekli müdahaleler anında yapılabilmektedir [6]. Sağlık alanının yanı sıra, esnek elektronik sensörlerin kullanımı yumuşak robotik alanında özellikle de insan-robot etkileşiminde çok önemli bir yer edinmiştir. Esnek basınç sensörlerinin kullanıldığı yumuşak robotik eller sayesinde, robotik elin tutulmak istenen cisme ne kadar kuvvet uyguladığı ölçülmekte ve cismin kırılmadan tutulması sağlanarak, kırılgan yapıya sahip cisimlerin zarar görmeden taşınması gerçekleştirilmektedir. Esnek dokunsal sensörler sayesinde robotlar, cisimlerin

yüzey dokusu, şekli, cismin sertliği gibi durumları algılayarak cisme ne kadar kuvvet uygulaması gerektiğine hassas bir şekilde karar verebilmektedir [7]. Robotlar üzerine yerleştirilen esnek sensörler sayesinde tıpkı insanlarda olduğu gibi robotların da dış dünya ile fiziksel etkileşim kurması sağlanabilmekte, bu sayede robotların dışardan gelen fiziksel etkilere karşı insansı tepkiler vermeleri sağlanabilmektedir [8].

Esnek sensörlere ait; yumuşaklık, esneklik, bükülebilirlik, katlanabilirlik, gerilebilirlik, biyo-uyumluluk, kendini iyileştirebilirlik, düşük enerji ile çalışabilirlik, kolay üretilebilirlik ve düşük maliyet gibi parametreleri göz önüne alındığında günümüz teknolojik uygulamalarında geniş bir çalışma ve araştırma yelpazesi sunmakta, insan-makine, insan-robot etkileşimini arttırarak teknolojinin seyrinde etkili bir rol oynamaktadır [9].

Esnek elektronik sensörlerde önemli bir yer tutan esnek dokunsal sensörler dış dünyadaki fiziksel bir etkiyi elektriksel sinyallere çevirerek fiziksel etkinin algılanmasını sağlamaktadır. Algılama işlemi genellikle kapasitif algılama, piezorezistif algılama, piezoelektrik algılama, triboelektrik algılama gibi prensiplere göre çalışmaktadır [10]. Kapasitif algılamada iletken iki yüzey arasındaki dielektrik tabakanın et kalınlığının, dış dünyadan sensör üzerine uygulanan basınç kuvvetine göre değişimi sensöre ait kapasitans değerini hassas bir şekilde değiştirmekte, kapasitanstaki bu hassas değişim ise bir elektrik devresi ile dijital sinyallere dönüştürülerek sensörün algılama işlemini yapabilmesini sağlamaktadır [11]. Diğer bir algılama prensibi olarak kullanılan piezorezistif algılamada ise dış dünyadan sensör üzerine uygulanan basınç, gerilme, eğilme, bükülme gibi etkilere göre sensörün elektriksel direncindeki değişim incelenmektedir [12]. Piezoelektrik algılama, sensör üzerine uygulanan kuvvetin algılama işlemini sağlayan aktif yapıda elektriksel yük oluşturmaya prensibine dayanmaktadır [13]. Dokunsal sensör olarak kullanımının yanı sıra enerji hasadı da yapabilen triboelektrik sensörlerin çalışma prensibi ise iki farklı malzemenin birbirine sürtünme ve ayrışmasından sonra oluşan yük transferi ile elektrostatik potansiyel oluşumuna dayanmaktadır [14].

Esnek elektronik sensör uygulamalarındaki gelişmeler ve kullanım alanlarının her geçen gün genişlemesi, kararlı ve hassas algılama konusunda sensör çalışma performansının arttırılmasını elzem kılmıştır. İnsan makine ve makine-makine etkileşiminin önemli yer tuttuğu günümüzde sensörler ile ilgili çalışmalar her geçen gün artmakta olup araştırmacılar tarafından odaklanılan en önemli konulardan biri sensör hassasiyetinin

geliştirilmesidir. Bu tez kapsamında esnekliği, kararlılığı, yüksek doğruluğu, imalat kolaylığı ve düşük maliyeti ile öne çıkan esnek kapasitif basınç sensörleri ele alınarak, kapasitif basınç sensörlerinin hassasiyet ve doğrusallık parametreleri incelenmiştir. Günümüz araştırmalarında, kapasitif basınç sensör hassasiyetinin geliştirilmesi için olumlu sonuçlar sunan birtakım yaklaşımlar geliştirilse de kapasitif sensörlerde kullanılan malzemelerin yapı ve değişken sertlik gibi özelliklerinin sensör hassasiyetinin arttırılması ve sensör doğrusallığının araştırılması konusunda kritik etkilerinin olduğu düşünülerek, tez kapsamında; esneklik, ayarlanabilir sertlik, ısıya dayanıklılık gibi özellikler ile ön plana çıkan Polidimetilsiloksan (PDMS) [15] ve yine benzer özelliklere sahip Polivinil alkol (PVA) ve Boraks hidrojel [16] olmak üzere iki farklı çeşit malzemenin farklı sertliklerde ve farklı kalınlıklardaki formasyonları oluşturulmuş, kapasitif sensör dizisi fabrikasyonu yapılmış ve kapasitif basınç sensör tasarımlarında hassasiyet ve sensör performansına olan etkisi incelenmiştir.

1.2 TEZ AKIŞI

Tezin genel akışı şu şekildedir:

- Bölüm 1: Tez kapsamı, tezin amacı,
- Bölüm 2: Esnek kapasitif sensörlerin çalışma prensibi, kullanılan malzemeler, fabrikasyon yöntemleri ve değerlendirme kriterleri
- Bölüm 3: Deneysel çalışmalar, sensör tasarımları, sensör fabrikasyonu ve testleri,
- Bölüm 4: Tez çalışmasında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve gelecek çalışmalar,
- Bölüm 5: Kaynaklar.

2. GENEL KAVRAMLAR

2.1. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİ

Geçmişten günümüze canlıların çevre ile etkileşimi; görme, dokunma, duyma, koklama ve tatma gibi duyu metaları ile gerçekleşmiş, dış etkilere karşı gösterdiği aksiyonlar insanlara çevresel farkındalık kazandırmıştır. Canlıların doğasında mevcut olan algılama işlemi robot ve elektronik dünyasında da sensörler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Tıpkı canlılarda olduğu gibi elektronik ortamda da dokunma işlemi; giyilebilir teknoloji ve robot deri uygulamalarında kullanılmak üzere esnek piezoelektrik, kapasitif ve piezoresistif esnek dokunsal sensörler ile [17], görme işlemi [Metin girmek için buraya tıklayın veya dokunun.](#); kamera ve yapay retina sistemlerinin kullanıldığı esnek fotodedektörler ile [18], duyma işlemi; işitme implantları ve mikrofonlarda kullanılan akustik ve piezoelektrik sensörler ile [19], koklama işlemi; malzeme teşhis, hava kalitesinin ölçümü gibi konularda kullanılan gaz sensörleri ile [20] ve tatma işlemi; gıda kalitesi ve yapay tat reseptörlerinde kullanılan esnek kimyasal biyosensörler ile gerçekleştirilmektedir [21].

Elektronik alanında, özellikle insan-makine etkileşiminde ve giyilebilir elektronik teknolojilerinde büyük bir öneme sahip olan piezoelektrik, piezorezistif, triboelektrik ve kapasitif esnek basınç sensörlerinde, fiziksel bir etki elektrik sinyallerine dönüştürülerek anlamlandırılmakta ve sensörün bağlı olduğu sistem beslenerek çevresel farkındalık oluşturulmaktadır.

2.1.1. KAPASİTİF SENSÖRLER

Kapasitif sensörler, sensör üzerine uygulanan mekanik kuvvete göre sensör çıkışındaki kapasitif değişimleri algılama yöntemi ile çalışmaktadır [22]. Kapasitanstaki değişim, paralel plakalı kondansatörlerde kullanılan şu denklem ile açıklanabilir:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

Denklem (1)'e göre C ; kapasitans, ϵ_0 ; vakum dielektrik sabiti, ϵ_r ; sensörde kullanılan dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabiti, A ; sensörde kullanılan elektrotların yüzey alanı, d ; ise iki elektrot arasındaki mesafedir. Kapasitif sensörlerde başlangıçta herhangi bir kuvvet sensör üzerine uygulanmamışken elektrotlar arasında görece büyük bir d mesafesi olduğundan dolayı sensör çıkışında düşük bir başlangıç kapasitans değeri

okunur. Sensör üzerine mekanik bir kuvvet uygulandığında, uygulanan kuvvetin elektrotlar arasındaki d mesafesini azaltması ile sensör kapasitansında artış görülmektedir. Kapasitanstaki bu artışın büyüklüğü, mekanik kuvvetin büyüklüğü ile doğrudan orantılıdır ve d mesafesinin azalması sensör çıkışında kapasitans değerinin artışı ile sonuçlanır [23]. Kapasitans değişimini etkileyen bir diğer husus ise sensörde kullanılan elektrotların yüzey alanı olan A' 'dır. Kapasitif sensörler kondansatör mantığı ile çalıştıkları için elektrotların yüzey alanı arttıkça, yüklerin depolanabileceği alan artar. Bu nedenle elektrotların yüzey alanı ne kadar arttırılırsa sensör çıktısında kapasitif değişimine pozitif yönde katkıda bulunmaktadır. Mekanik kuvvetin sensör üzerine etkimesi ile bazı özel durumlarda sensörde kullanılan dielektrik malzeme iç yapısındaki değişimler, malzemeye ait bağlı dielektrik sabitinde değişimlere neden olabilmekte ve bu değişimler de sensör çıktısında ölçülen kapasitans değerlerinde değişime neden olabilmektedir [24] .

2.2. ESNEK SENSÖR ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

Esnek sensörlerde kullanılan aktif ve pasif malzemeler; esneklik, biyouyumluluk, iletkenlik ve dayanıklılık gibi kriterler göz önüne alındığında sensörün hassasiyetini, kararlılığını, kullanım ömrünü ve performansını önemli derecede etkilemektedir. Esnek sensörlerde kullanılan malzemeler, sensörün çevresel dayanıklılığı ve esnekliğini belirleyen elastomer veya hidrojel malzeme içerikleri ile matris malzemeler, matris içerisinde oluşturdıkları elektriksel etkiler ile sensörün direnç, kapasitans ve empedans değerlerinde ölçülebilir değişimleri sağlayan karbon nanotüp, grafen gibi malzeme içerikleri ile iletken dolgu malzemeleri ve elektriksel sinyallerin aktarımında aktif rol oynayan PEDOT, PPy gibi iletken polimerler olmak üzere işlevselliğine göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır [25]. Bu çalışmada, hassasiyet ve doğrusalılık gibi sensör performansının incelenmesi kapsamında esnek kapasitif basınç sensör tasarımlarında dielektrik malzeme olarak birbirinden farklı baz ve ajan oranlarında PDMS kullanılırken, diğer sensör tasarımlarında farklı oranlarda PVA-Boraks hidrojel kullanılmıştır.

2.2.1 POLİDİMETİLSİLOKSAN (PDMS)

Esnek sensörlerde en yaygın kullanılan elastomerlerden biri olan PDMS, yüksek esneklik ve mekanik dayanımı, biyouyumluluğu, iyi elektriksel yalıtım kabiliyeti, şeffaf yapısı ile yüksek optik geçirgenliği sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Deformasyona karşı gösterdiği hızlı geri dönüş tepkisi ve mekanik gerilmelerde elastik yapısından

kaynaklı yıpranmadan çalışabilmesi özellikleri sayesinde sensör uygulamalarında kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır [26]. Genellikle baz (base) ve kür ajanı (agent) olmak üzere iki bileşenden oluşur ve bu bileşen karışımlarının oda sıcaklığında veya ısı altında kürleştirilmesi ile çapraz bağlı elastomer yapı oluşturulur. Karışım oranı malzemenin elastikiyet ve mekanik dayanımını ayarlama da doğrudan etkili olup bu durum sensör malzemesinde deformasyona bağlı hassasiyet etkisi gibi elektriksel özelliklerini de doğrudan etkilemektedir [26,27].

2.2.2 POLİVİNİLALKOL (PVA)

Düşük toksikliğe sahip, yumuşak, şeffaf ve biyouyumlu olması sebebiyle özellikle cilt ile temas eden giyilebilir sensörlerde sıklıkla kullanılan PVA yarı kristal formda olup suda çözünebilen sentetik bir polimerdir. Yapısında yüksek oranda hidroksil (-OH) grubu içerir. Bu da PVA'ya yüksek hidrofiliklik, hidrojen bağı oluşturma yeteneği ve diğer polimerlerle veya çapraz bağlayıcılarla kolay etkileşim sağlama avantajı kazandırır. Fiziksel veya kimyasal çapraz bağlayıcılar (örneğin boraks veya glutaraldehit) ile hidrojel haline getirilerek polimer zincirlerinin üç boyutlu ağ yapısına kavuşması sağlanabilir [28–30]. Oluşturulan hidrojellerin viskoelastik yapıları sayesinde sensörlerde üzerine uygulanan kuvvete karşı hem şekil değiştirme kabiliyeti hem de elektriksel özelliklerde ölçülebilir değişiklikler (örn. kapasitans) gösterir. Bu da onları basınca duyarlı sensör sistemleri için ideal bir dielektrik veya aktif katman malzemesi haline getirir. Hidrojel oluşturmak için kullanılan PVA ve çapraz bağlayıcı oranları hidrojinin direkt sertliği, esnekliği ve hassasiyetini etkilediği için sensörün kullanım alanına göre PVA ve çapraz bağlayıcı oranları belirlenmelidir [31].

2.2.3 SODYUM TETRABORAT (BORAKS)

Esnek sensörlerde direkt dielektrik katman olarak kullanılmalarından ziyade PVA gibi sınırlı mekanik elastikliğe sahip polimerler ile kullanılarak polimer zincirinde oluşturdukları çapraz bağlar sayesinde hidrojel bir yapı oluştururlar [30]. Bu hidrojel yapı içerisindeki çapraz bağlar sayesinde esnek sensörde kullanılan dielektrik malzeme esnekliği ayarlanarak sensör deformasyonu artırılabilir, yüksek su içeriği sayesinde sıkıştırılabilir bir yapı kazandığı için sensör üzerine uygulanan mekanik kuvvetlere karşı daha fazla sıkıştırılarak iyi tepkiler verebilmektedir. Boraksın PVA ile oluşturdukları hidrojellerin en önemli özelliklerinden biri ise dielektrik malzeme olarak esnek sensörlerde kullanıldığında, malzemenin hasar gördüğü noktada fiziksel olarak tekrar

çapraz bağ kurarak kendisini onarabilmesidir (İng. self healing) [32]. Kendini onarabilmesi sayesinde sensör dayanıklılığı artmakta, bu durum kullanım ömrünü uzatıcı etki yaratabilmektedir. Diğer yandan oluşturulan hidrojel yapının su bazlı olmasından ve içeriğinde yüksek su miktarı bulunmasından dolayı su kaybının önlenmesi için sensör malzemesine su tutucu katkılar sağlanmalıdır. Hidrojin su-nem kaybettiği noktada malzeme esnekliğini büyük ölçüde yitirerek işlevini yerine getiremeyebilir.

2.2.4 ESNEK SENSÖRLERDE KULLANILAN DİĞER MALZEMELER

Esnek sensörlerde dielektrik malzeme olarak kullanılabilen Ecoflex, silikon bazlı bir elastomer olup esnek bir yapıya sahip olması, deri benzeri hissiyat vermesi ve biyouyumlu olması nedeniyle giyilebilir teknolojilerde sıklıkla kullanılmaktadır [33]. İletken polimer olarak PEDOT:PSS (Poli(3,4-etilendioksitiyofen):Polistiren sülfonat) esnek sensörlerde hem dielektrik malzeme hem de elektrot olarak kullanılabilmekte, hem iletkenliği hem de esnekliği bir arada verebilmektedir. PEDOT elektriksel iletkenliği sağlayan yapıya sahip bir polimer iken PSS ise onu suda çözünür hale getiren ve işlenebilirliğini artıran polielektrolittir. Bu yapıda olması nedeniyle inkjet baskı, döndürme (İng. spin coating) gibi yöntemler ile esnek yüzeylere kolaylıkla uygulanarak esnek sensör üretimi yapılabilmektedir [34].

Esnek sensörlerde malzemenin performansını iyileştirmek için kullanılan bir diğer malzeme grubu karbon içerikleri ile karbon nanotüpler (CNT), grafen ve karbon siyahı (İng. carbon black) nanomalzemelerdir. Bu malzemeler elastomer veya hidrojel yapılara katkılanır ve malzemede iletken yol oluşumunu destekleyerek malzeme üzerine uygulanan kuvvete bağlı deformasyon ile iç yapıdaki iletken ağın bozulup tekrar kurulmasını sağlar [35]. Bu sayede kapasitans veya direnç ölçümlerinde sinyal üretimine olanak sağlar. Aynı zamanda yüzey alanını arttırarak algılama aralığının genişlemesine katkıda bulunur.

2.3. ESNEK SENSÖR ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Esnek sensör üretim yöntemleri, sensör tipi, sensörde kullanılan malzeme özellikleri, sensörün kullanım amacına göre çeşitlilik göstermektedir. Tez kapsamında kullanılan sensör üretim yöntemleri ilgili başlıklar altında verilmiştir.

2.3.1 KARIŞTIRMA

Karıştırma (İng. mixing) yöntemi esnek sensör üretiminde kullanılan en temel yöntemlerden biridir ve kullanılan materyallerin homojen şekilde dağıtılmasını amaçlar. Karıştırma işlemi sadece malzemelerin bir araya getirilmesinden ibaret olmayıp, aynı zamanda materyallerin homojen dağılımını hedefler. Homojen olmama durumu ve malzeme içerisindeki kümeleşmiş yapılar (İng. agglomerated) sensör yapısının elektriksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir [36]. Karıştırma işleminde genellikle manyetik karıştırıcılar ve mekanik karıştırıcılar kullanılır. Homojen bir yapı elde etmek ve malzeme içerisinde kümeleşmeyi önlemek için karıştırma hızı mutlaka iyi ayarlanmalıdır. Karıştırma işlemi doğrudan karıştırma (İng. direct mixing) ve dolaylı karıştırma (İng. indirect mixing) olarak ikiye ayrılır [37]. Doğrudan karıştırma yönteminde karıştırılmak istenen malzemeler bir kap içerisinde direkt üzerine ekleme yapılarak karıştırılırken, dolaylı karıştırma yönteminde ise karıştırılmak istenen malzemeler öncelikle farklı çözücülerde hazırlanarak ortak bir çözücünde birleştirilirler. Malzemelerin dolaylı karıştırılmasında ortak bir çözücünde birleştirilmeleri önemlidir çünkü böylelikle bileşenlerin arayüz etkileşimi daha kontrollü gerçekleşir. Kullanılan çözücü tipi hem katkının dağılımını hem de karışımın viskozitesini doğrudan etkiler. Karışım oranları, malzeme viskozitesi, karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Homojen dağılmış bir yapıya sahip esnek sensörde hassasiyet, heterojen dağılmış yapıya göre daha stabil ve hassas olabilmektedir. Karışımın düzgün dağılmasının yanı sıra, karışım sırasında sıklıkla karşılaşılan kabarcık (İng. bubble) oluşumu da sensör performansı üzerinde önemli etkilere neden olabilmektedir. Özellikle kapasitif basınç sensörlerinde kapasitans değerlerinin değişimini ve sensör hassasiyetini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle esnek sensör üretiminde karışım yapıldıktan sonra kabarcık oluşumu var ise karışım sensör forma dönüştürülmeden önce kabarcıklar mutlaka giderilerek karışım stabilize edilmelidir [38].

2.3.2 DÖKÜM VE DAMLATMA

Döküm ve damlatma yöntemlerinde temel amaç akışkan formdaki malzemelerin bir kalıp veya yüzey üzerine serilmesi sonrasında malzemedeki çözünürün buharlaştırılması ile istenilen kalınlıkta ve şekilde tabakalar elde edebilmektir. Döküm yönteminde malzeme, kullanıma yönelik önceden üretilmiş bir kap içerisine veya düz tabanlı kalıplara dökülerek malzemenin kalıbın şeklini alması sağlanır. Dökülen malzeme hacmine göre kalınlık kontrol edilebilir. Kullanım amacına göre mikro yapıya yüzeyler elde etmek için malzeme bu yüzeyler için özel üretilmiş kaplara döküldüğünde, kabın şeklini alacağı için özel desenli, kalınlığı malzeme hacmine göre ayarlanabilir yapılar oluşturulabilir. Damlatma yönteminde ise belirli hacimdeki malzemenin şırınga veya pipet yardımı ile düz bir zemin üzerine damlatılması ile gerçekleştirilir. Damlacıklar yüzey gerilimi ile zemin boyunca yayılım gösterirler. Buharlaştırma yardımıyla malzemedeki çözünür maddeden arındırılarak oluşturulmak istenilen katman elde edilir [37]. Katmandaki kalınlık kontrolü damlatılan damlacık sayısı ve bazı durumlarda döndürme işlemi ile sağlanabilir.

2.3.3 SPREY DESTEKLİ DÖNDÜREREK KAPLAMA

Sprey kaplama yönteminde malzemenin ince tabakalar halinde kaplanmak istenen yüzeye püskürtülerek transferi gerçekleştirilir. Esnek sensör üretiminde sıklıkla tercih edilen bir yöntem olup malzeme basınçlı hava veya spreyl tabancaları vasıtasıyla aerosol forma getirilerek yüzey üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilir. Kaplama işleminde spreyl başlığı ve kaplanacak yüzey arasındaki mesafe, kaplanacak malzemenin viskozitesi, püskürtme basıncı, püskürtme süresi gibi etkenler kaplama kalitesini ve kaplanan malzeme kalınlığını doğrudan etkilemektedir. Üretim yöntemlerinde birden çok yöntem birleştirilerek kullanılabilir. Örneğin; döndürmeli kaplamada, kaplanmak istenen malzeme döner bir platform üzerine sabitlenir ve ardından döndürme işlemi başlatılır. Dönen cisim üzerine kaplanmak istenen malzeme dökülür ve merkezkaç kuvveti etkisi ile malzeme kaplanır. Döndürerek kaplamada istenilen kaplama kalınlığının elde edilebilmesi için kaplama öncesinde dönüş hızının optimize edilmesi gerekmektedir. Spreyl kaplama ile döndürerek kaplama yöntemleri birleştirilerek gerçekleştirilebilir. Kaplama kalınlığının kontrolü ve homojen bir kaplama yapabilmek için kaplama yapılacak yüzey bir dönel platform üzerine oturtulur ve önceden belirlenmiş sabit bir hızda platform döndürülmeye başlanır. Kaplama için döndürerek kaplama yönteminde

kullanılan malzeme dökme işlemi değil, önceden belirlenmiş bir mesafeden dönen platform üzerindeki kaplama yapılacak yüzey üzerine püskürtme işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede püskürtme sırasında malzemenin yüzey üzerine homojen olarak dağılması gerçekleştirilir ve bölgesel olarak dağılma farklılıkları minimize edilmiş olur. Bu yöntem spray destekli döndürerek kaplama (İng. spray-assisted spin coating) olarak bilinmektedir [39,40]. Dönüş hızı değiştirilerek kaplama kalınlığı değiştirilebilir. Püskürtme sırasında malzeme partiküllerinin boyutlarının eşit olmasına ve püskürtme başlığında tıkanıklığa sebebiyet vermemesine dikkat edilmelidir. Püskürtme sonrasında malzemenin yüzeyde birikmesi, düz bir zemin sağlanamamasından dolayı yüzeyde dalgalanmaların oluşması, kuruma süresine bağlı olarak malzemede çatlakların oluşması gibi durumlara karşı dikkatli olunmalıdır.

2.3.4 LAZER AŞINDIRMA

Lazer aşındırma, desen oluşturulmak istenen yüzey üzerine yüksek yoğunluklu lazer ışığının yönlendirilmesi ile malzeme yüzeyinden istenmeyen kısımların kazınarak desen elde edilmesi işlemidir [41]. Bazı durumlarda direkt hedef yüzey üzerine lazer ışığı ile desenleme yapılabilirken bazı durumlarda ise malzeme üzeri fotorezist veya akrilik boya gibi koruyucu tabakalar ile kaplanarak, lazerin malzemeye zarar vermeyerek sadece boya tabakasını kazınması sağlanır. Kazınan tabaka sonrasında kimyasal işlemlerden geçirilerek üzerindeki koruyucu tabaka kaldırılır ve desen elde edilir. Lazer ile kazıma işlemi hızlı ve yüksek çözünürlük sağlamaktadır. Ayrıca işlem için maske, model veya kalıp gibi ek ekipmanlar gerektirmemektedir. Lazer ile aşındırma sırasında lazer ışığına çıplak göz ile maruz kalınmamasına çok dikkat edilmeli, işlem sırasında mutlaka koruyucu gözlük takılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise kullanılan lazerin özellikleri ve uygulamadaki güç faktörüdür. Malzemenin özelliklerine göre lazer gücü uygun seviyeye ayarlanmalıdır. Aksi takdirde malzemede yanma, deformasyon, kararma gibi etkiler görülebilmektedir.

2.4. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Esnek basınç sensörlerinin davranışlarının karakterize edilebilmesi için birtakım metrikler kullanılmaktadır. Bunlardan ilki sensör hassasiyetidir. Sensör hassasiyeti sensörün üzerine uygulanan basınç kuvvetine karşı kapasitans değerinde görülen değişim hızı ile ifade edilebilir. Sensör üzerine uygulanan basınç ile kapasitanstaki değişim ne

kadar yüksek olursa sensör o kadar hassas olarak değerlendirilir. Esnek sensörlerde hassasiyet şu denklem ile açıklanabilir:

$$S_m = \frac{\Delta C}{\Delta P} \quad (2)$$

Denklem (2)'de S_m ; mutlak hassasiyeti, ΔC ; kapasitans değişimini ve ΔP ; basınç değişimini belirtmektedir. Denklemdeki hassasiyet birimi genellikle F/Pa veya pF/kPa olarak ifade edilir [44]. Kapasitansın başlangıç kapasitans değerine göre nasıl değiştiğinin analizi ise şu formül ile gerçekleştirilir:

$$S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta P} = \frac{(C - C_0) / C_0}{P - P_0} \quad (3)$$

Denklem (3)'te S ; göreceli hassasiyeti, ΔC ; kapasitans değişimini, C_0 ; ilk kapasitans değerini ve ΔP ; basınç değişimini belirtmektedir. Tez kapsamında ölçülen hassasiyet değerleri sensör isimlendirmeleriyle karışmaması amacıyla H ile de gösterilmiştir. Göreceli kapasitans değişimi, formülden de anlaşılacağı üzere normalize edilmiş kapasitans değişiminin basınç değişimine oranı ile ifade edilir [42]. Kapasitans değerini normalize etmedeki amaç test edilen sensörlerin farklı başlangıç değerlerine sahip olmasından dolayı [43]'te de gösterildiği gibi sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesini sağlamaktır. Hassasiyet, kapasitansın uygulanan basınç altında ne kadar çok arttığı ile ilgili olduğu için genellikle esnek sensörler düşük basınç aralıklarında hassasiyet göstermektedir, çünkü bu bölgede sensör doğrusallığı daha fazla seyretmektedir. Bazı sensörlerde ise bu durum değişkenlik göstererek farklı basınç aralıklarında hassasiyet ve doğrusallık ilişkisi kurulabilir. Bu nedenle bu tür sensörlerde hassasiyet [44–48]'deki çalışmalarda olduğu gibi bölgesel olarak hesaplanarak analiz edilmelidir.

Esnek sensör performansının bir diğer önemli değerlendirme kriteri ise sensör doğrusallığıdır. Doğrusallık sensör üzerine uygulanan basınca göre kapasitansın ne derece düzgün ve tahmin edilebilir şekilde değiştiğini gösterir. Sensörde uygulanan basınç arttırıldıkça sensör kapasitans değeri idealde doğrusal olarak artması çoğunlukla tercih edilmektedir. Doğrusallık analizi için kapasitans – basınç veya kapasitans değişimi

basınç grafikleri üzerinde doğrusal regresyon uygulanarak analiz edilir ve çizilen doğru denklemi şu formül ile ifade edilir:

$$y = ax + b \quad (4)$$

Denklem (4)'te; y ; çıkış sinyali, a ; eğimi, x ; uygulanan basınç kuvvetini ve b ; çizilen doğrunun y eksenini kestiği noktayı ifade eder. Denklemdeki b sabiti doğrunun konumunu belirlemekte olup lineer uydurmada ofset etkisi göstermektedir. Tam doğrusal ilişki, ölçüm verilerinin belirli bir doğru üzerinde minimum sapması ile gösterilebilir. Tez kapsamında normalleştirilmiş hassasiyet hesaplaması için kapasitans değişiminin başlangıç kapasitansına oranına karşılık uygulanan basınç grafiğinden yararlanılmıştır. Grafik üzerinde yapılan doğrusal modelleme sonucunda elde edilen eğim (a) normalleştirilmiş hassasiyete (S) eşittir. Denklemdeki b sabitinin sıfır olduğu durumda çizilen doğru orijin noktasından geçer ve sistemin sıfır noktasındaki giriş için çıkış tepkisinin sıfır olduğunu gösterir ancak basınç sensöründe ölçüm alınan ilk değerin sensörün üzerine bası uygulanmadığı durumda bile sıfır olmaması nedeniyle b sabiti sıfırdan farklı olabilir. Bu durum sensörde başlangıç değerindeki ilk değerin sıfır olmaması ile sensör kalibrasyonu ve elektronik bileşen kaynaklı sabit bir kaymanın varlığından da kaynaklanabileceğinden, sensörde ölçülen ilk değerin sıfır olması durumunda bu nedenlerin araştırılması da faydalı olabilir.

Sensör doğrusallığı ölçüm verilerinin çizilen doğruya ne kadar iyi uyum sağladığı ile ilgili olarak şu denklem ile ifade edilebilir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Denklem (5)'te; R^2 ; belirleme katsayısını (İng. coefficient of determination), y_i ; alınan ölçümü, $\hat{y}_i$; tahmin değerini, $\bar{y}$; ölçüm verilerinin ortalamasını ifade eder. Denklemden de anlaşılacağı üzere hata karelerinin toplamının toplam varyansa bölümünden elde edilen sonucun 1'e ne kadar yakın olduğu durumu doğrusallığı tanımlamaktadır [49]. Doğrusallık değeri 1'e ne kadar yakınsa sensör o kadar doğrusal olarak değerlendirilir ve

bu durum sensörün üzerine uygulanan basınç kuvvetine göre kapasitans değerinin idealde doğrusal ve düzenli bir şekilde arttığının göstergesidir. Özellikle esnek sensörlerde malzemenin viskoelatik ve esnek yapısından dolayı bu durum tek bir bölgede doğrusallık incelenmesi yerine analizin [50]'de olduğu gibi birkaç basınç bölgesi için yapılmasını gerekli kılabilir.

Esnek kapasitif basınç sensörlerinde malzemenin elastik yapısı nedeniyle yükleme ve boşaltma eğrileri arasında, aynı basınç değerlerinde farklar oluşabilir [51].Yükleme ve boşaltma eğrileri arasındaki bu fark kapasitans değişiminin sadece uygulanan anlık basınç değerleri ile değil aynı zamanda birikimli olarak bir yükleme geçmişinin olduğunu göstermektedir. Bu durum histerezis etkisi (İng. hysteresis) olarak adlandırılır ve sensörün ölçüm kararlılığı ve ölçüm güvenilirliği açısından önemli bir parametredir [52,53]. Esnek sensörlerde histerezis etkisi ne kadar düşük ise sensör ölçümleri o kadar kararlı ve güvenilir olmaktadır.

Sensör üzerine uygulanan basınca göre sensör sinyalinin basınca verdiği yanıt tepkisi (İng. response time), basınç kaldırıldığında sensör sinyalinin eski değerine dönmesi ise toparlanma süresi (İng. recovery time) ile ölçülmekte ve bu iki ölçüm sensör değerlendirme kriteri olarak geçici tepki [54] (İng. transient response) olarak isimlendirilmektedir. Yanıt süresi, sensörün üzerine uygulanan basınç ile sensör sinyalinin kararlı duruma geçmesine kadar ölçülen süre, toparlanma süresi ise sensör üzerindeki basıncın kaldırılması ile sensör sinyalinin eski değerine dönmeye kadar ölçülen süre ile ifade edilmekte olup sensörün zamana karşı üzerine uygulanan basınca göre verdiği tepki verileri üzerinden hesaplanmaktadır. Bir sensör için, üzerine uygulanan basınca karşı ne kadar hızlı tepki veriyor ve basıncın kaldırılması ile ne kadar kısa sürede eski değerine ulaşıyor ise o kadar iyi geçici tepkiye sahip olduğu değerlendirilebilir [55].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölüm, esnek kapasitif basınç sensöründe yapılan fabrikasyon ve test faaliyetlerini kapsamaktadır. Fabrikasyon süreci ve gerçekleştirilen testler ilgili başlıklar altında detaylandırılmıştır. Ayrıca test sonuçlarının tartışılması da bu bölümde yapılmıştır.

3.1. ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ FABRİKASYONU

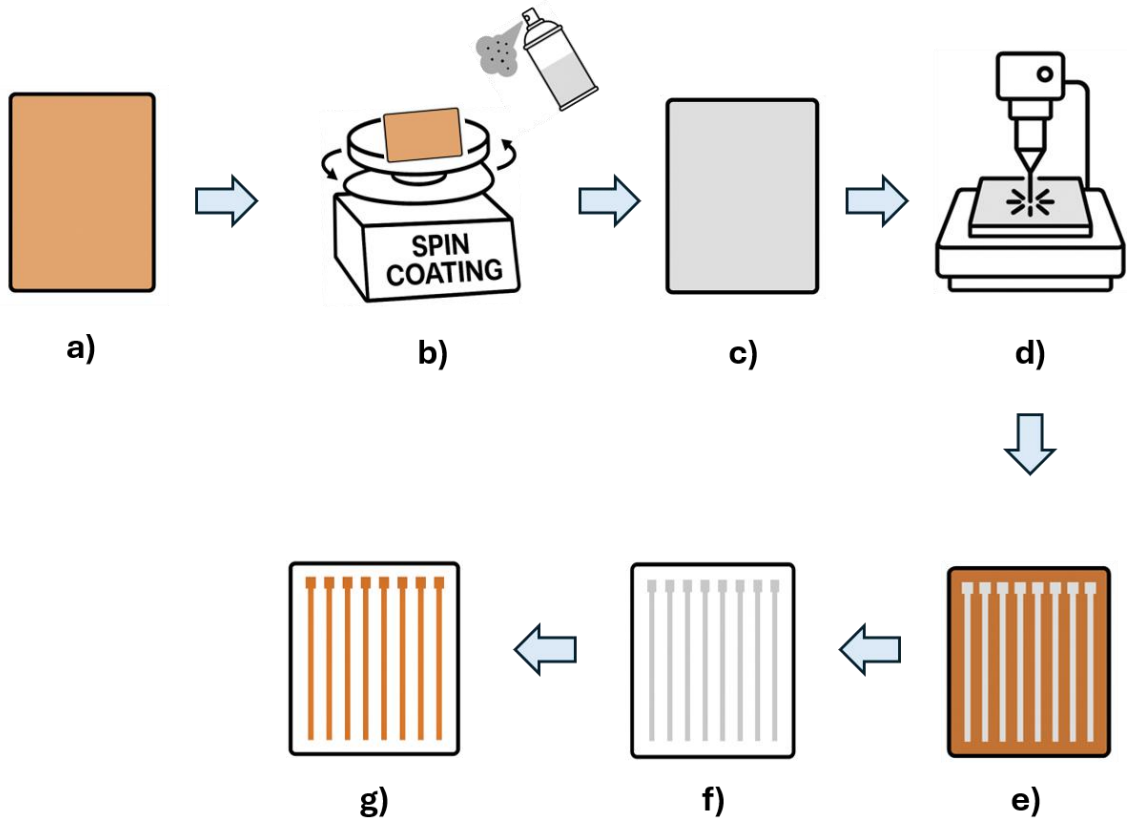
Tez kapsamında kapasitif basınç sensörleri oluşturmak için alt ve üst elektrot katmanı fabrikasyonu ve sensörlerde dielektrik malzeme olarak kullanılmak üzere PDMS ve PVA/Boraks malzemelerinin fabrikasyonu yapılmıştır.

3.1.1. ALT ve ÜST KATMAN ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ

Sensör elektrot üretiminde genellikle metal kaplama veya serigrafi yöntemleri kullanılmaktadır, ancak hem işlem yapılmak istenen desen için ek bir maske tasarımına ihtiyaç duyulması hem de fabrikasyon adımlarının optimize edilmesi açısından tez kapsamında esnek basınç sensör dizilerinde elektrot katman olarak Poliimid bazlı ve her iki tarafı bakır kaplı bir laminat olan DuPont firmasına ait bakır Pyralux malzemesi kullanılmıştır. Pyralux malzemesi yüksek termal stabiliteye sahiptir ve bu nedenle lazer kazıma işleminde üzerine uygulanan lazer ışınlarının oluşturduğu sıcaklığa karşı dayanım göstererek yapısal bütünlüğünü koruyabilmektedir. Üzerindeki bakır yüzey düzgün dağılmıştır ve öncesinde spreyle kaplama, sonrasında lazer kazıma işlemleri ile elektrot desenleri kolaylıkla oluşturularak ek bir maskeleme işlemine gerek duymaz. Malzeme esnek olduğu için sensör kullanımlarında bükülebilir yüzeylere kolaylıkla entegre edilebilir ve mekanik etkilere karşı dayanımı yüksektir. Malzeme arasında bulunan yüksek dielektrik dayanımına sahip Poliimid tabaka sayesinde elektriksel olarak izolasyon iyi bir şekilde sağlanabilmektedir. Pyralux birçok kimyasal ve çözücüye karşı dirençli bir yapıda olduğu için kullanılan malzemelerden dolayı zarar görmemekte, malzeme ile uyumlu çalışabilmektedir. Her iki tarafı da bakır kaplı bir malzeme olduğu için elektrot üretiminde tasarım ve fabrikasyon esnekliği sağlamaktadır. Malzemenin bahsedilen avantajlı özelliklerinden dolayı tez kapsamında sensör dizilerinde elektrot malzemesi olarak Pyralux kullanılmıştır.

Elektrot üretimi ilk aşamasında Pyralux üzerine maske oluşturabilmek için Pyralux'un bir yüzeyi tamamen boya ile kaplanmıştır. Kaplama hem döner platform üzerinde Pyralux üzerine boya dökülmesi ile hem de yine döner platform üzerinde spreyle kaplama yöntemi

ile denenmiştir. Boya dökülmesi işleminde boyanın kuruması hem uzun sürmüş hem de kaplama yüzeyinde kuruma kaynaklı istenmeyen desenler oluşmuştur. Ayrıca, boyanın dökülmesi işleminde kaplama yapılmak istenmeyen, Pyralux'un arka yüzeyinin büyük bir kısmı da boya ile kaplanmıştır. İstenmeyen yüzeydeki boyanın kaldırılması için de fazladan efor harcanmıştır. Boyanın yüzeye daha iyi ve homojen bir şekilde kaplanabilmesi ve işlemin daha hızlı tamamlanabilmesi nedeniyle spreysel kaplama yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 1'de alt ve üst katman elektrot üretimindeki fabrikasyon süreci verilmiştir.



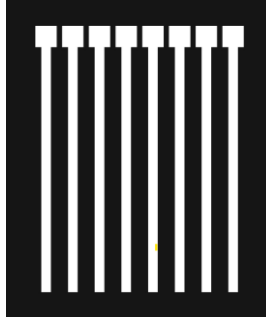
Şekil 1. Alt ve üst elektrot fabrikasyon aşamaları; a) pyralux parçası, b) döndürme ile spreysel kaplama, c) kaplama yapılmış pyralux parçası, d) lazer kazıma, e) lazer kazıma sonrası desen oluşumu, f) ıslak aşındırma sonrası bakır plakanın kaldırılması, g) aseton uygulanması sonrası bakır kontakların oluşturulması.

Kaplama yapılacak Pyralux parçası döner platform üzerine sabitlenerek dakikada 100 devir dönmesi sağlanmıştır. Malzeme dönüş yaparken akrilik boya (Polisan Akrilik Düz Renkler, Gri) malzemeye 20 cm uzak bir mesafeden spreysel kaplama yöntemi ile 5 saniye boyunca uygulanmıştır. Hedef malzemeye uzaklığın, dönüş hızının ve kaplama süresinin kaplama yapılan boya malzemesinin kalınlığı üzerinde direkt etkili olması nedeniyle optimal dönüş hızı, hedef uzaklığı ve kaplama süresi tespit edilmiş olup, bu parametreler

ile kaplama uygulanmıştır. Kaplama sırasında, bir önceki püskürtme işleminden sonra boya kalıntılarının sprey ucunda kuruyup kalması nedeniyle hedef üzerine heterojen püskürtme yapılmaması için her püskürtme öncesi sprey uç aseton ile temizlenmiştir. Kaplama sonrasında boyanın homojen dağılımı incelenmiş olup malzeme bir gün boyunca oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kuruma sırasında da malzeme aralıklar ile kontrol edilmiş olup istenmeyen, heterojen desen oluşturulmamasına dikkat edilmiştir.

Lazer kazıma öncesinde ısı artışı nedeniyle bükülmeye müsait yapıdaki Pyralux malzemesine kazınmak istenen desenlerin sağlıklı bir şekilde aktarımının yapılması için düz bir yüzeye sabitlenmesi sağlanmıştır. Lazer kazıma işlemi 30W JPT LP/Raycus fiber lazer markalama cihazı ile yapılmıştır. Desen kazıma öncesinde hizalama ve lazer odağının ayarlanabilmesi için örnek kazımlar yapılmıştır. Lazer kazıma sırasında lazer ışığının hedef üzerine vurduğu noktadaki ısı değişiminin örneğe zarar vermemesi ve üzerine oluşturulmak istenen desenin sağlıklı bir şekilde kazınabilmesi adına hem lazer gücü hem de lazerin hedef üzerinde bir noktaya vuruş süresi parametreleri değiştirilerek de örnek kazımlar yapılmış ve sonuçlar değerlendirilerek kazıma işlemi 30 kHz çalışma frekansı, 1000 mm/s kazıma hızı ve %90 güç parametreleri ile optimize edilmiş bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

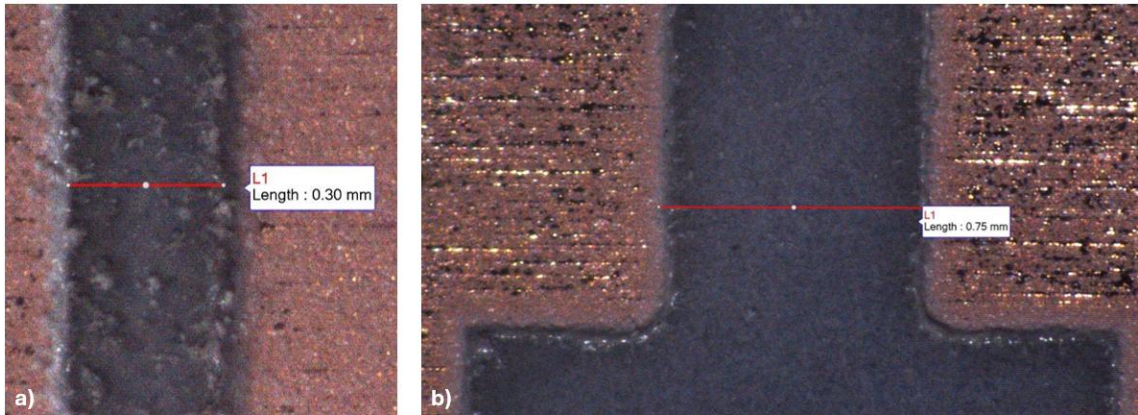
Lazer kazıma işlemi alt ve üst elektrot tasarımlarına göre yapılmıştır. Alt ve üst elektrotlar için aynı elektrot tasarımının kullanılması düşünülmüş olup sensörde biri alt tabakaya, diğeri ise 90° döndürülerek üst tabakaya hizalanacak biçimde yerleştirilmesi planlanmıştır. Tasarımda hem alt hem de üst tabaka için 8'er adet elektrot bulunmaktadır. Elektrotların her birinin uzunluğu 2.3 cm, genişliği 0.9 mm olacak şekilde dikdörtgen, kontak alınacak alan ise 2 mm² boyutunda kare olacak şekilde tasarlanmış olup 8 adet elektrot, 3 cm uzunluk ve 2.5 cm genişliğe sahip bir dikdörtgen içerisine Şekil 2'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Lazer kazıma sırasında lazer ışığının Şekil 2'de gösterilen siyah bölgelere vurması ile kazıma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Lazer kazıma ile alt ve üst elektrot oluşturmada kullanılan CAD tasarımı.

Elektrot genişliğini optimize edebilmek için iki farklı tasarım yapılmıştır. Tasarımları birbirinden ayıran tek fark elektrot genişlikleri olup birinci tasarımda elektrotlar 0.9 mm genişliğe sahipken, ikinci tasarımda elektrot genişliği 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Her iki tasarım ile lazer kazıma işlemi gerçekleştirilmiş, sonrasında kazıma işleminin kalitesi optik mikroskop altında incelenmiştir. Optik mikroskop ile inceleme yapılmadan önce, mikroskobun ölçüm kalibrasyonu yapılarak ölçümden kaynaklı hata payı minimize edilmiştir. Optik mikroskop ile inceleme yapılırken en iyi görüntüyü elde edebilmek için yaklaşma katsayıları karşılaştırması yapılan ölçümlerde aynı değerde kullanılmıştır.

Şekil 3-a’da CAD’de 0.5 mm elektrot genişliğinde yapılan tasarımın lazer kazıma sonrası elektrot genişliğinin, Şekil 3-b’de ise 0.9 mm elektrot genişliğinde yapılan tasarımın lazer kazıma sonrası elektrot genişliğinin optik mikroskop altındaki görüntüsü gösterilmektedir. İlk tasarımda 0.5 mm elektrot genişliği, lazer kazıma sonrasında ~0.3 mm’ye düşmüş, ikinci tasarımda ise 0.9 mm olan elektrot genişliği, lazer kazıma sonrasında ~0.75 mm’ye düşmüştür.



Şekil 3. Elektrotların lazer kazıma sonrası optik mikroskop görüntüsü; a) ~0.3 mm genişliğe sahip elektrot, b) ~0.75 mm genişliğe sahip elektrot.

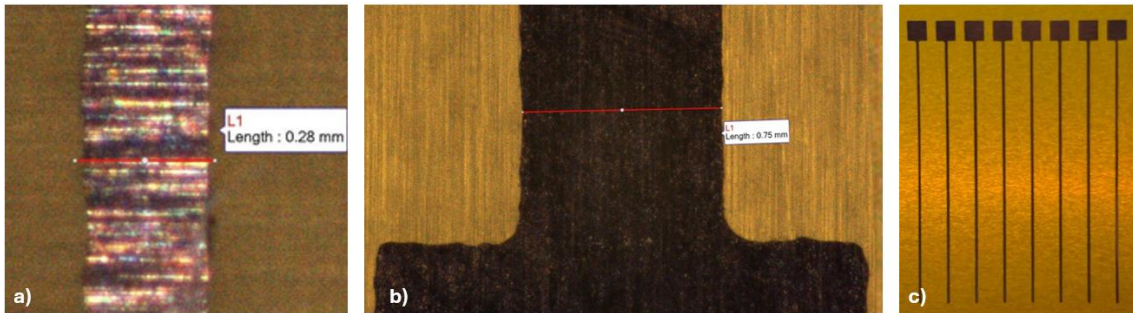
Lazer kazıma sırasında, kazıma boyutu küçüldükçe, kazımadaki hata payının arttığı görülmüştür. Hata payının artması hem kontak genişliğinin kontrollü bir şekilde tüm kontaklarda standart bir ölçüde kazıma yapılamamasına neden olmuş hem de Şekil 3'ten de anlaşılabacağı üzere kaplama kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir. Şekil 3-a'da boya kaplaması, lazer kazıma sırasında lazer ışığının vurduğu bölge daha dar olduğu için lazerin yaydığı yüksek ısı ile Şekil 3-b'ye göre daha fazla deforme olmuştur. Ayrıca 0.5 mm genişlikteki elektrotların ıslak aşındırma (İng. wet etching) sırasında belirli bir kısmının aşınarak kaldırıldığı bu nedenle elektrot bütünlüğünün bozulduğu görülmüştür. 0.5 mm elektrot genişliğine sahip tasarımda bu tür problemler ile karşılaşılması sonucunda elektrot tasarımının 0.9 mm genişliğe sahip elektrotlar ile gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Lazer kazımanın tamamlanmasının ardından elektrotlar ıslak aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Islak aşındırma işleminde; 10 ml hidroklorik asit (HCl) (Merck - fuming %37) ve 40 ml de hidrojen peroksit (H₂O₂) (Merck - %35) kullanılarak asit çözeltisi hazırlanmıştır. Asit çözeltisinin aşındırma performansı incelendiğinde optimum karışım oranını yakalamak için birtakım ön denemeler yapılmış ve aşındırma sırasında tepkimenin agresifliğini kırarak kontrollü bir şekilde aşındırma yapabilmek amacıyla çözeltiye 10 ml deiyonize su (İng. di water) eklenmiştir. Hazırlanan çözelti metal yüzeylerde etkili olup, metal dışındaki malzemelere etki etmemektedir. Bu sayede lazer kazıma ile kaldırılan boya tabakası altındaki bakır yüzey asit ile etkileşime girerek çözülürken, lazerin vurmadığı ve üzerinde boya tabakası olan yüzey asitten etkilenmeden işleminden çıkacaktır. Islak aşındırma sırasında en önemli parametrelerden biri örneğin asit içerisinde ne kadar süre ile kalacağıdır. Örnek asit içerisinde fazla bekletilirse asit boya ile korunan bölgelere yan taraflarından etki edeceği için aşındırma işlemi sonunda elde edilmek istenen şekilde bozulmalara yol açabilir. Literatürde bu durum alttan aşındırma (İng. under cut) olarak bilinmekte ve özellikle ıslak aşındırma yapılırken alttan aşındırma olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle boya kaplama sırasında örnek ile kaplama yapılmış, aynı boya kalınlığına sahip prototip elektrot örnekleri çözelti içerisinde bekletilerek optimum aşındırma süresinin 5 dakika olması gerektiği anlaşılmıştır. Islak aşındırma öncesinde örneklerin alt tarafı aseton ile temizlenerek bakırın kaldırılması sırasında bir engel ile karşılaşmaması sağlanmıştır. Tepkimenin stabilizesini ve elektrot harici katmanların daha iyi çözülmesini sağlamak amacı ile örnekler cam bir çubuk yardımı ile çözelti içerisinde tepkime boyunca hareket ettirilmiştir. Örnekler asit

çözeltisine batırıldıktan sonra tepkime başlamış ve 5 dakikanın sonunda boya kaplı olmayan tüm bakır yüzeylerin elektrottan aşındırılması sağlanmıştır.

Elektrot fabrikasyonunun son aşamasında ise ıslak aşındırma sonrasında istenilmeyen bölgelerden bakırın uzaklaştırıldığı ve istenilen bölgelerde üzerinde boya kaplı bir şekilde desenlerin açığa çıkarıldığı Pyralux örneği aseton ile dolu bir kap içerisine alınıp kontak üzerindeki boya tabakaları kaldırılmıştır. Bu sayede sensörün alt ve üst kontaklarının üretimi tamamlanmıştır.

Şekil 4-a'da CAD'de 0.5 mm elektrot genişliğinde yapılan tasarımın ıslak aşındırma sonrası elektrot genişliğinin, b'de ise 0.9 mm elektrot genişliğinde yapılan tasarımın ıslak aşındırma sonrası elektrot genişliğinin, c'de ise sensörde kontak tabakası olarak kullanılmak üzere hazır hale getirilmiş elektrotların optik mikroskop altındaki görüntüsü gösterilmektedir. İlk tasarımda 0.5 mm elektrot genişliği, ıslak aşındırma sonrasında ~0.28 mm'ye düşmüş, ikinci tasarımda ise 0.9 mm olan elektrot genişliği ~0.75 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Elektrotların ıslak aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüleri; a) ~0.28 mm genişliğe sahip elektrot, b) ~0.75 mm genişliğe sahip elektrot, c) sensör kontak tabakası üretim sonuçları.

3.1.2. MALZEME ÜRETİMİ

Esnek kapasitif basınç sensörlerinde kullanılan malzeme; sensör hassasiyeti, doğrusallığı, kararlılığı gibi sensör performansını doğrudan etkileyen en önemli sensör parçalarından biridir. Tez kapsamında PDMS ve PVA/Boraks olmak üzere iki farklı malzemenin karışım oranlarının değiştirilmesi ile farklı mekanik ve elektriksel özelliğe sahip dielektrik katmanlar elde edilmiştir. İki farklı malzemenin değişen malzeme karışım oranlarında hazırlanarak, kapasitif basınç sensörlerinde dielektrik malzeme olarak

kullanılması ile sensör performansına etkisinin her iki malzeme için de değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Performans karşılaştırmasının doğru bir şekilde yapılabilmesi için her iki malzeme de yalın bir şekilde üretilerek içerisinde malzemenin dielektrik sabitini arttıracak herhangi bir katkılama yapılmamış, malzemenin bası sırasında deformasyonunu arttıracak şekilde yüzey desenli, gözenekli veya çok katmanlı olarak üretilmemiştir. Malzemelerin üretim aşamaları, ilgili başlıklar altında detaylandırılmıştır.

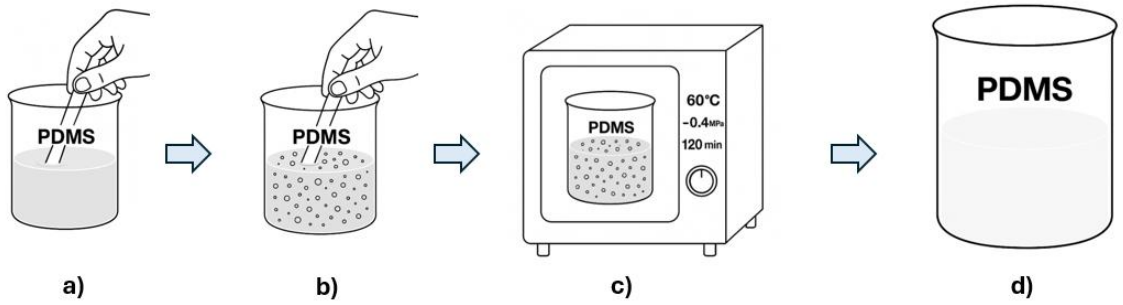
3.1.2.1. PDMS ÜRETİMİ

Tez kapsamında katman malzemesi olarak 10:1, 15:1 ve 20:1 olmak üzere üç farklı baz ve ajan kütle oranlarında PDMS malzemesi fabrikasyonu yapılmıştır. PVA ve Boraks hidrojel malzemesine sahip sensörler ile performans karşılaştırması yapabilmek adına PDMS fabrikasyonunda kapasitans değerini arttırmaya yönelik herhangi bir katkılama yapılmamıştır. Farklı baz ve ajan oranlarında fabrikasyon yapılmasındaki temel amaç malzemeyi oluşturan bileşen oranlarının sensör kapasitans değerine, sensör hassasiyetine ve doğrusallığına etkisinin incelenmesidir. PDMS fabrikasyonunda baz oranı arttırıldıkça malzeme daha esnek yapıya ulaştığı için bu durum sensör performansını doğrudan etkiyici bir faktör olmaktadır [56–58].

PDMS fabrikasyonunda literatürde sıklıkla kullanılan SYLGARD 184 Silikon Elastomer ve kür ajanı tercih edilmiştir. İlk karışım literatürde yaygın olarak kullanılan 10:1 oranı ile hazırlanmıştır. Kütlece 10 g elastomer ve 1 g kür ajanı bir karıştırma kabı içerisinde plastik bir çubuk yardımı ile dairesel ve yavaş hareketler ile süt köpüğü kıvamına gelene kadar 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. İkinci karışım 15:1 oranı ile hazırlanmıştır. Kütlece 15 g elastomer ve 1 g kür ajanı bir karıştırma kabı içerisinde plastik bir çubuk yardımı ile dairesel ve yavaş hareketler ile süt köpüğü kıvamına gelene kadar 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. İkinci karışımda, birinci karışımdan farklı olarak baz oranının artması nedeniyle daha akışkan bir karışım elde edilmiştir. Üçüncü karışım ise 20:1 oranı ile hazırlanmıştır. Kütlece 20 g elastomer ve 1 g kür ajanı bir karıştırma kabı içerisinde plastik bir çubuk yardımı ile dairesel ve yavaş hareketler ile süt köpüğü kıvamına gelene kadar 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Üçüncü karışımda, birinci ve ikinci karışımdan farklı olarak baz oranının artması nedeniyle daha akışkan bir karışım elde edilmiştir.

Karışımlar sırasında hava kabarcıkları meydana gelmiştir. Hava kabarcıklarının sensör performansı üzerindeki olumsuz etkileri göz önüne alınarak karışım Faithful marka vakumlu kurutma fırınında 60 °C ve 0.4 MPa vakum altında 2 saat kürlenmeye

bırakılmıştır. Karışım oda sıcaklığında 1-2 gün boyunca bekletilerek de baz ve ajanın kürlenmesi sağlanabilirdi ancak oda sıcaklığında bekletilerek oluşturulan PDMS elastomerinde hem hava kabarcıkları tam olarak giderilmemiş olabileceğinden hem de kontrollü bir üretim gerçekleştirilmek istendiğinden dolayı karışım vakum altında fırınlanarak kürlenme sağlanmıştır. Karışımlardaki hava kabarcıkları vakum etkisi ve kürlenme sonucunda giderilmiş olup şeffaf görüntüye sahip PDMS malzemeleri elde edilmiştir. PDMS üretimi ile ilgili akış Şekil 5’te belirtilmiştir.



Şekil 5. PDMS fabrikasyonu; a) Baz ve ajan eklenerek karışımın karıştırılması, b) karışım sırasında hava kabarcıklarının oluşumu, c) PDMS’i kürlenmek için vakum ile fırınlama yapılması, d) kürlenmiş PDMS malzemesi.

3.1.2.2 PVA ve BORAKS ÜRETİMİ

Tez kapsamında üretimi yapılan bir diğer malzeme ise PVA Boraks hidrojelidir. PVA suda çözünebilen, hidrofilik bir polimer olup –OH (hidroksil) grupları sayesinde çapraz bağlanmaya yatkın bir yapıdadır. Boraks ise suda çözüldüğünde borat iyonları ($B(OH)_4^-$) oluşturur [30]. Bu iki malzeme birleştirildiğinde, boraksın suda çözünmesi ile oluşan borat iyonları ile PVA’nın suda çözünmesi ile elde edilen -OH grupları arasında çapraz bağlar oluşur. Bu bağlar sayesinde karışım hidrojel kıvamına gelmektedir. Bu karışım gündelik hayatta “slime” olarak da bilinmektedir. Tez kapsamında PVA ve Boraks hidrojelinin incelenmek için tercih edilme amaçlarından biri de gündelik hayatta ek bir işlem veya fabrikasyon için özel malzemelere ihtiyaç duyulmadan basınç sensörleri üretiminin gerçekleştirilebilmesidir. Bu bağlamda slime malzemesinden kapasitif basınç sensörleri üretilmesi amaçlanmıştır. Tıpkı PDMS’te baz ve kür ajanı oranlarının değişimi ile farklı mekanik ve elektriksel özelliklere sahip malzeme üretimi yapılabildiği gibi PVA

ve Boraks karışımında da farklı oranların kullanılması ile sensör malzemesinin mekanik ve elektriksel özelliklerindeki değişimi incelemek hedeflenmiştir.

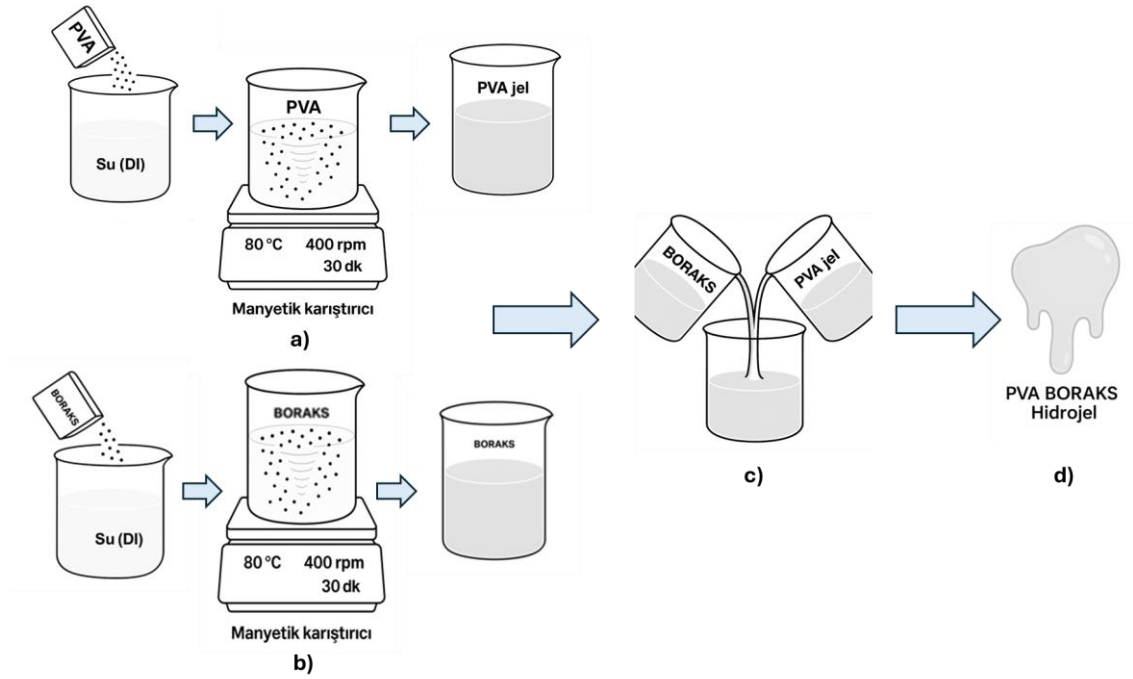
PVA Boraks fabrikasyonunda toz PVA ve toz Boraks (ETİ Maden) kullanılmıştır. PVA Boraks karışımında da tıpkı PDMS'te olduğu gibi 3 farklı PVA Boraks karışımının fabrikasyonu yapılmıştır. Şekil 6'da PVA Boraks fabrikasyon adımları gösterilmektedir.

Birinci karışımda, içerisinde 50 ml su bulunan cam beher kaba 4 g PVA dökülerek PVA çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda şeffaf görünümde PVA jel elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır. İçerisinde 50 ml su bulunan başka bir cam beher kaba 1 g Boraks dökülerek Boraks çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda saydam görünümde Boraks çözeltisi elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır.

İkinci karışımda, içerisinde 50 ml su bulunan cam beher kaba 4 g PVA dökülerek PVA çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda şeffaf görünümde PVA jel elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır. İçerisinde 50 ml su bulunan başka bir cam beher kaba 2 g Boraks dökülerek Boraks çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda saydam görünümde Boraks çözeltisi elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır.

Üçüncü karışımda, içerisinde 50 ml su bulunan cam beher kaba 4 g PVA dökülerek PVA çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda şeffaf görünümde PVA jel elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır. İçerisinde 50 ml su bulunan başka bir cam beher kaba 4 g Boraks dökülerek Boraks çözündürülmüştür. Çözelti, önceden 80 °C'ye ayarlanmış manyetik karıştırıcı üzerinde dakikada 400 devir dönmesi

sağlanarak, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin sonunda saydam görünümde Boraks çözeltisi elde edilmiş ve malzeme cam beher içerisinde dinlendirilmek üzere bekletilmeye alınmıştır.



Şekil 6. PVA ve Boraks fabrikasyonu; a) toz PVA'den PVA jel hazırlanması, b) toz Boraks'tan Boraks çözeltisinin hazırlanması, c) PVA jeli ve Boraks çözeltisinin karıştırılması, d) PVA Boraks hidrojelinin oluşturulması.

Tüm karışımlar sırasında suyun buharlaşma sonucu kaybını önlemek, karışımı fiziksel ortamdan izole etmek ve sıcaklığı muhafaza etmek amacıyla cam beher kap üzerine alüminyum folyo kapatılmıştır.

Üretilen PVA jellerinden 40'ar ml jel 3 farklı cam kaba aktarılmıştır. Birinci Boraks çözeltisinden 40 ml çözelti alınarak 1. cam kap içerisine, ikinci Boraks çözeltisinden 40 ml çözelti alınarak 2. cam kap içerisine ve üçüncü Boraks çözeltisinden 40 ml çözelti alınarak 3. cam kap içerisine dökülerek PVA jeli ve Boraks çözeltileri 3 ayrı kaptaki karıştırılmıştır. Karışımda PVA üzerine Boraks çözeltisinin dökülmesi ile çapraz bağ gerçekleşmesi ile malzeme formunun slime benzeri jelimsi bir yapıya döndüğü görülmüştür. Karışımlar bir süre el ile karıştırıldıktan sonra petri kabında dinlenmeye alınmıştır. Karışımlar sırasında hava kabarcıkları oluşmuş olsa da hazırlanan örneğin bir gün oda sıcaklığında dinlendirilmesi ile üretimde oluşan hava kabarcıklarının büyük oranda giderildiği görülmüştür. Malzemenin sensör hale getirilmesi sırasında uygulanan

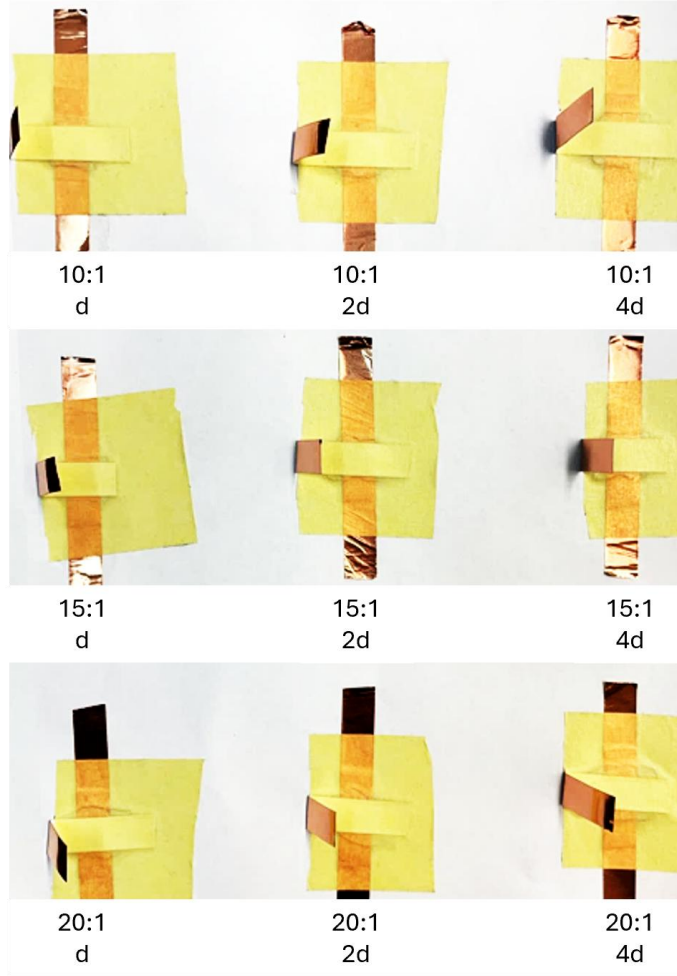
yöntem ile hava kabarcıkları malzemeden tamamen uzaklaştırılmıştır. Uygulanan sensör üretim yöntemi Sensör Tasarımları bölümünde detaylıca anlatılmıştır.

3.1.3. SENSÖR TASARIMLARI

Tez kapsamında, esnek kapasitif basınç sensörü oluşturmak adına 2 ana sensör tasarımı yapılmış olup bunlardan birinde PDMS elastomeri malzeme olarak kullanılır iken diğerinde ise PVA Boraks hidrojel malzeme olarak kullanılmaktadır. Her bir tasarım kendi içerisinde, malzeme kalınlığının kapasitans değişimine, sensör hassasiyeti ve doğrusallığına etkisinin incelenebilmesi için alt tasarımlara ayrılmıştır. Sensör tasarımları mevcut elektrot katmanı ile elektriksel ölçümler alınırken yaşanan kontak alamama ve kontaklara dokunma hassasiyeti nedeniyle tasarımı yapılan sensöre ait elektriksel ölçümlerin sağlıklı ve kolaylıkla alınabilmesi adına sensörlerde elektrot olarak 1 cm genişliğindeki bakır bantlar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen testler bu sensör tasarımlarına göre yapılmış olup, haritalandırma işlemi elektrot dizileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlara ilişkin detaylı bilgi ilgili başlıklar altında verilmiştir.

3.1.3.1. PDMS MALZEME KATMANINA SAHİP SENSÖR TASARIMLARI

Esnek kapasitif basınç sensöründe kullanılmak üzere önceki adımlarda fabrikasyonu yapılmış olan 10:1, 15:1 ve 20:1 baz:ajan oranlarındaki PDMS malzemesi her bir karışım oranı için 3 farklı kalınlıkta malzeme katmanı oluşturulmak üzere toplamda 9 adet PDMS sensör tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlar 10:1 karışım oranı için sırasıyla 100 µm, 200 µm ve 400 µm; 15:1 karışım oranı için sırasıyla 100 µm, 200 µm ve 400 µm; 20:1 karışım oranı ile sırasıyla 100 µm, 200 µm ve 400 µm'dir. Karışımı yapılan PDMS elastomeri fırınlanmadan önce, 100 µm için 0.5 ml; 200 µm için 1 ml ve 400 µm için 2ml hacimlerde PDMS, 8 cm çapında ve 1.5 cm yüksekliğindeki silindirik petri kabı ölçülerinde önceden hazırlanmış alüminyum folyodan oluşturulmuş kaplara dökülmüştür. Döküm işlemi ardından PDMS'in kaplara düzenli bir şekilde yayılımı sağlandıktan sonra fırınlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırınlama işlemi ardından kurlaşan PDMS malzemeleri alt ve üst kontak olarak bakır bantların kullanıldığı sensör yapılar haline getirilmişlerdir. PDMS elastomerinin farklı oran ve farklı malzeme katman kalınlıkları için tasarlanmış 9 adet sensör yapısı Şekil 7'de belirtilmiştir. Görselde d: 100 µm, 2d: 200 µm ve 4d: 400 µm'yi temsil etmektedir.

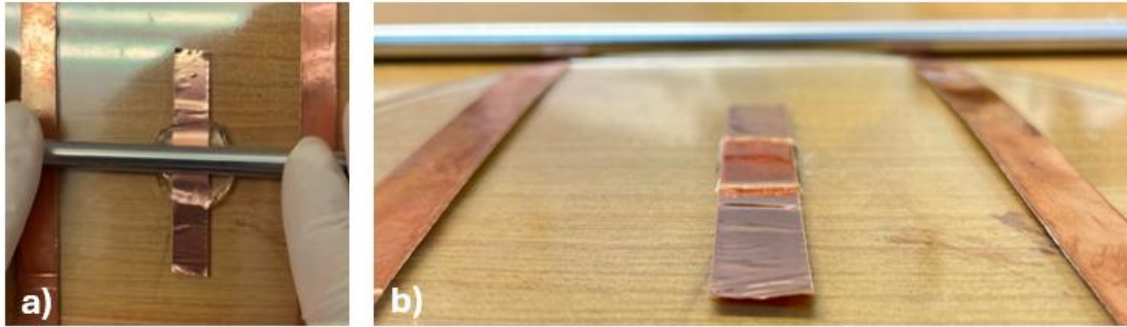


Şekil 7. Farklı baz ve ajan karışım oranları için hazırlanan 100 μm , 200 μm ve 400 μm malzeme katman kalınlığına sahip PDMS tabanlı kapasitif basınç sensörleri

3.1.3.2. PVA ve BORAKS MALZEME KATMANINA SAHİP SENSÖR TASARIMLARI

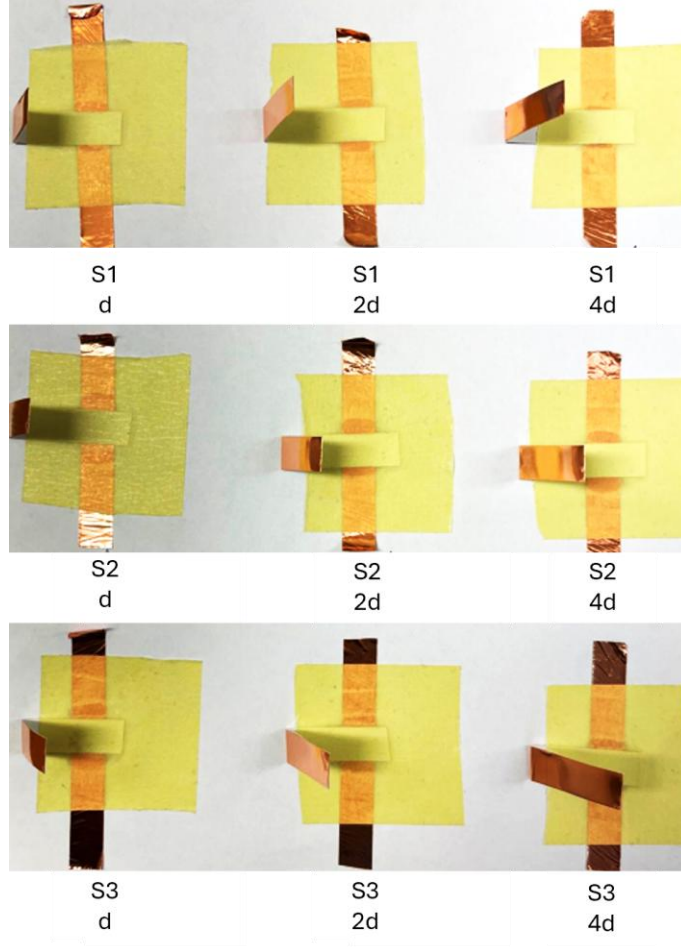
Esnek kapasitif basınç sensöründe kullanılmak üzere önceki adımlarda fabrikasyonu yapılmış olan 4:1, 2:1 ve 1:1 PVA:Boraks oranlarındaki PVA Boraks malzemesi her bir karışım oranı için 3 farklı kalınlıkta malzeme katmanı oluşturulmak üzere toplamda 9 adet PVA Boraks sensör tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlar 4:1 karışım oranı için sırasıyla 100 μm , 200 μm ve 400 μm ; 2:1 karışım oranı için sırasıyla 100 μm , 200 μm ve 400 μm ; 1:1 karışım oranı ile sırasıyla 100 μm , 200 μm ve 400 μm 'dir. Tezin bundan sonraki aşamalarında isimlendirmeyi kolaylaştırmak adına; 4:1 karışım oranı S1, 2:1 karışım oranı S2, 1:1 karışım oranı ise S3 olarak adlandırılacaktır. S1, S2 ve S3 malzemeleri katı ve yapışkan bir yapıda (slime) oldukları için sensör dielektriği olarak kullanımında istenilen katman kalınlığını yakalayabilmek adına birtakım testler

yapılmıştır. Bunlardan ilki, malzeme üretildiğinde döner platform üzerinde döndürerek kalınlık kontrolü sağlamak olmuştur ki bu yöntem gerek malzemenin katılığı gerekse de malzemenin yapışkan yapısından dolayı başarısız olmuştur. İkinci yöntem olarak PDMS’te olduğu gibi hacmi bilinen bir kap içerisine belirli hacimde malzeme yerleştirerek malzemenin kalıp içerisinde yüksekliğini ayarlamak olmuştur ki bu yöntemde de malzemenin kap içerisine tam nüfuz etmemesi ve yüksekliğin her noktada eşit olamamasından dolayı başarısız olmuştur. Bu noktada pratik bir yöntem düşünülmüş ve uygulanmıştır. Uygulanan yöntemde cam bir alt tabaka üzerine tabakanın her iki yanına istenilen yükseklik kadar bakır bant çekilmiştir. İki bant arasındaki bölgeye alt kontak yerleştirilmiştir ve örnek alt kontak üzerine serilmiştir. Silindirik bir çubuk örnek üzerinde yuvarlanarak örneğin inceltilmesi sağlanmıştır. Silindirik çubuk iki yandaki bakır banda temas ettiğinde örneğin kalınlığı çekilen bakır bant kalınlığı ile aynı olmaktadır. Dahası, bu yöntem ile örneğin açılmadan önceki durumunda örnek içerisinde hava kabarcıkları mevcut olsa bile örnek inceltilirken hava kabarcıkları yok edilmekte olup örneğin nihai halinde hava kabarcığı olmayan, şeffaf, istenilen kalınlıkta malzeme elde edilmiş olmaktadır. Şekil 8’de yönteme ait görsel paylaşılmıştır.



Şekil 8. Sensör üretim yöntemi; a) malzemenin kontak üzerine serilmesi, b) 400 µm kalınlıkta malzemenin üretimi.

Sensör örneği bu yöntem ile inceltirken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri açma işlemi sırasında örneğe fazla baskı uygulamamaktır. Fazla bası olduğu durumda örnek üzerinde gözle görünür şekilde çatlaklar oluşabilmektedir. Her ne kadar PVA ve Boraks karışımı kendini iyileştirebilme özelliğine sahip olsa bile testler sırasında kullanılmak için hazırlanan sensörler ölçüm doğruluğu sağlamak adına pürüzsüz, çatlaksız, şeffaf bir malzemeye sahip olacak şekilde üretilmişlerdir. PVA ve Boraks’ın farklı oran ve farklı malzeme katman kalınlıkları için tasarlanmış 9 adet sensör yapısı Şekil 9’da belirtilmiştir. Görselde d: 100 µm, 2d: 200 µm ve 4d: 400 µm’yi temsil etmektedir.



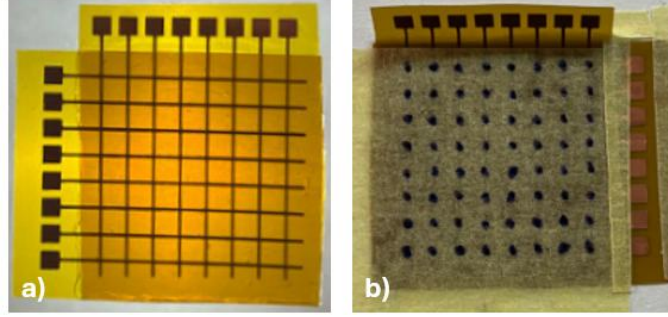
Şekil 9. Farklı PVA ve Boraks karışım oranları için hazırlanan 100 μm , 200 μm ve 400 μm malzeme katman kalınlığına sahip PVA Boraks tabanlı kapasitif basınç sensörleri

3.1.4. SENSÖR DİZİLERİNİN OLUŞTURULMASI

Sensör dizileri oluşturulurken PDMS ve PVA Boraks sensör üretimlerine benzer bir yöntem izlenmiştir. Önceki bölümlerde üretimi detaylıca anlatılan, test edilmek üzere hazırlanan PDMS ve PVA Boraks sensörlerinin kontak yapılarının bakır bant olmasından dolayı, malzeme kalınlığı bakır bant kalınlığı ile optimize edilerek sağlanmıştır. Sensör dizisinde ise kontak yapısı Pyralux olduğu için dizide kullanılan malzeme kalınlığı Pyralux sayfa kalınlığı ile optimize edilerek sağlanmıştır.

PVA Boraks malzeme tabanlı, sırasıyla S1 için; 100 μm , 200 μm ve 400 μm , S2 için; 100 μm , 200 μm ve 400 μm , S3 için; 100 μm , 200 μm ve 400 μm malzeme katman kalınlığındaki sensör dizileri üretilmiştir. Şekil 10'da üretilen bir diziyeye ait görsel paylaşılmıştır. PVA Boraks'ın jelimsi yapısından dolayı sensör dizisi üzerine bası uygulandığında malzeme ara katmandan taşmaya meyilli olduğu için katman

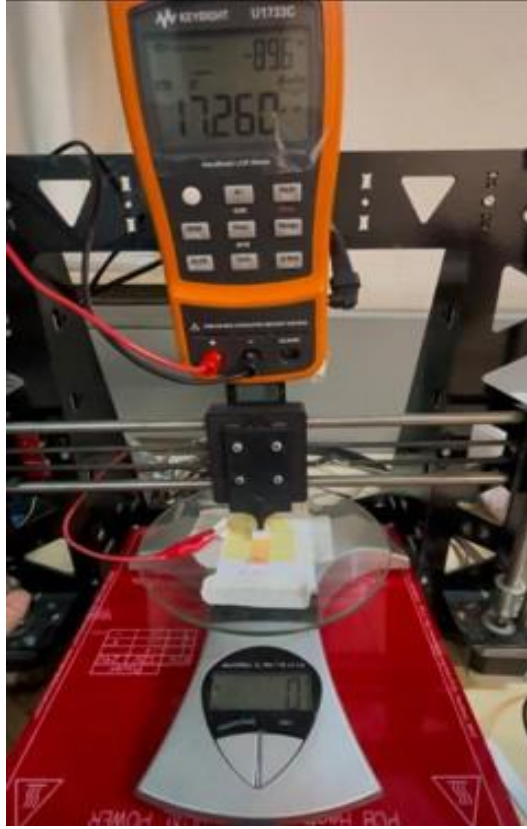
bütünlüğünü korumak amacıyla sensör dizisi üzerine bant çekilerek mühürleme (İng. sealing) işlemi yapılmıştır. Bu sayede malzemenin katman dışına çıkması önlenmiştir. Ayrıca, sensör dizisinde üst kontaklar ile daha sağlıklı bağlantı kurabilmek adına üst kontak yapısı Şekil 10-b’de gösterildiği gibi kapatılmıştır. Sensör dizisi üzerinde bası noktaları işaretlenerek basının nereye uygulanacağı belirtilmiştir.



Şekil 10. Sensör dizisi görseli; a) 8x8 sensör dizisi, b) sensör dizisinin bant ile kapatılması.

3.2. TEST ORTAMININ KURULMASI

PDMS ve PVA Boraks sensör tasarımlarına ait bası testleri Mikro ve Nano Sistemler Araştırma Laboratuvarında (MNS Lab) bulunan bası istasyonu ile yapılmıştır. Şekil 11’de gösterilen bası istasyonu, step motorların kontrolü sayesinde z-ekseninde 0.1mm, 1mm ve 10mm aralıklar ile hareket ettirilebilmektedir. Zemin tablasında bulunan hassas tartı sayesinde sensör örneği üzerine yapılan bası miktarı gram cinsinden görülebilmektedir. Sensör ile z-ekseninde hareket eden mekanizma arasında 1cm² yüzey alanına sahip plastik bir blok bulunmaktadır. Test sensörlerinin de aktif kontak yüzey alanları 1cm² olduğundan mekanizma tarafından uygulanan basının eşit bir şekilde sensör yüzeyine aktarılması sağlanmıştır. Test edilen sensörlere ait kapasitans verileri Keysight U1733C LCR metre ile alınmış olup Keysight’ın Data Logger GUI’si ile zaman etiketleri kullanılarak bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 11. Testlerde kullanılan bası istasyonu.

3.3. ESNEK KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ

Esnek kapasitif basınç sensörü testlerinde PDMS tabanlı üretilen 9 sensör tasarımı için basınca göre kapasitans değişim testleri yapılmış bu testlere ait sonuçlar PDMS malzeme katmanına sahip kapasitif basınç sensörü testleri başlığı altında detayları ile verilmiştir.

PVA Boraks tabanlı üretilen 9 sensör tasarımı için PDMS ile benzer olarak basınca göre kapasitans değişim testleri yapılmış bu testlere ait sonuçlar PVA Boraks malzeme katmanına sahip kapasitif basınç sensörü testleri başlığı altında detayları ile verilmiştir. Sensör tasarımlarında basınca göre kapasitans testlerinde sensör üzerine uygulanan kuvvet gram cinsinden kaydedilmiş olup uygulanan kuvvetin yüzey alanının da bilinmesi ile gram bilgisi kPa olarak çevrilmiştir. Mekanizmanın her hareketinde tartı üzerinde aynı gramaj değerinin okunmaması nedeniyle tüm test datalarından elde edilen bası değerlerinin standart sapması alınarak bulunan değer, her bir sensör testinde ölçüm alınan nokta için basınç hata payı olarak gösterilmiştir.

Basınca göre kapasitans verileri PDMS için [44,59]'da da test edildiği gibi 100 kHz, PVA Boraks için [60]'de test edildiği gibi 1kHz frekansta alınmış olup Keysight Data Logger

GUI'si yardımı ile uygulanan her basınç değerinde 10 adet kapasitans verisi okunup bunların ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Bası değerlerindeki işleme benzer şekilde kapasitans datasında da okunan her 10 adet verinin standart sapması alınarak bulunan değer, ölçüm alınan nokta için kapasitans hata payı olarak gösterilmiştir.

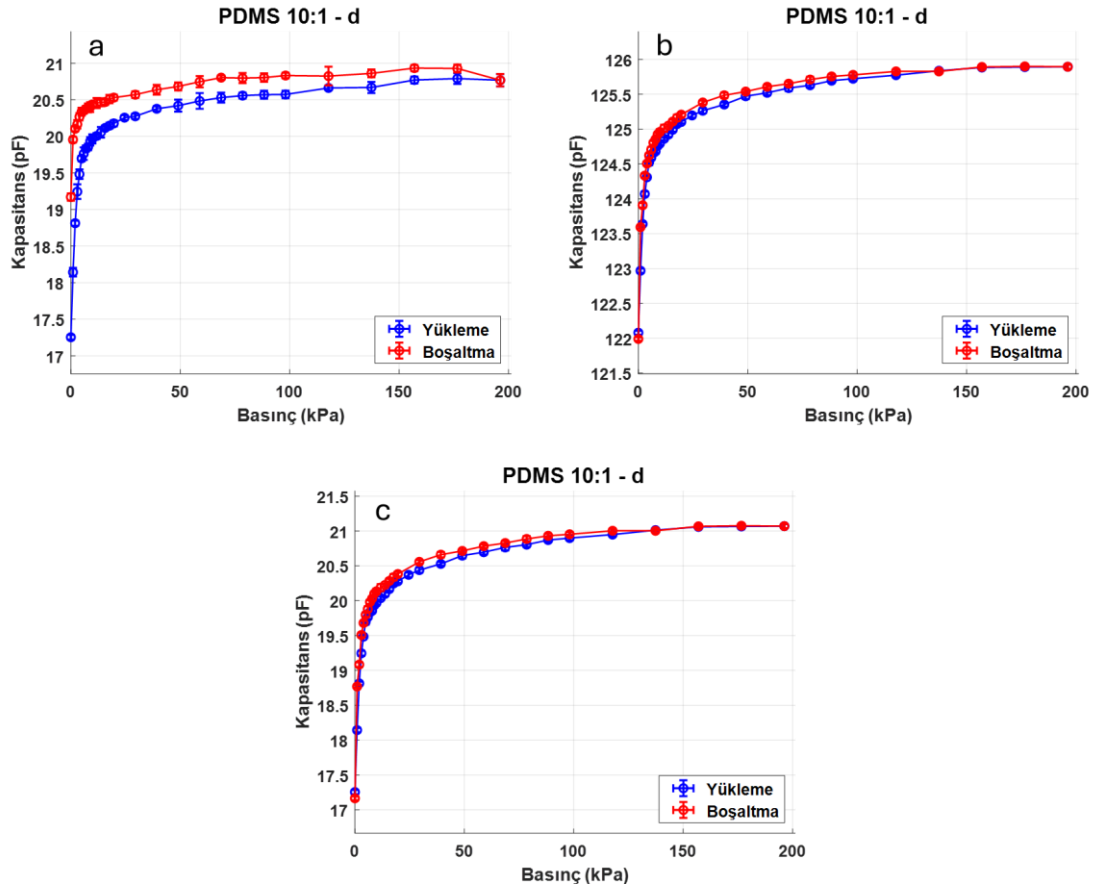
3.3.1. PDMS KATMANLI KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ

Tez kapsamında, PVA Boraks hidrojel yapısına sahip sensör tasarımlarının kapasitans performanslarını değerlendirebilmek için fabrikasyonu yapılan PDMS malzeme katmanına sahip sensörler test edilmiştir. PDMS sensörleri 10:1, 15:1 ve 20:1 olmak üzere farklı baz ve kür ajanı oranlarında üretilmiş olup testlerde PVA Boraks ile birebir karşılaştırma yapabilmek adına PVA Boraks sensör tasarımlarındaki sensörlerle aynı kalınlık değerlerine sahip sensörlerle test edilmiştir. PVA Boraks sensörlerinin katkısız ve yapısız formu incelendiğinden kıyaslama yapılabilmesi için katkısız PDMS sensörleri üretilip test edilmiştir.

Ölçüm sonuçları ve analizleri basınca göre kapasitans değişim grafiklerinde detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.3.1.1. FARKLI KATMAN KALINLIKLARINDA UYGULANAN BASINCA GÖRE PDMS SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ

Basınca göre kapasitans değişimleri testi, öncesinde de belirtildiği üzere LCR metre ile gerçekleştirilmiştir. PDMS sensör tasarımlarında malzemeye herhangi bir katkılama yapılmadığından dolayı basınca göre kapasitans değerleri düşük bulunmaktadır. Bu nedenle testlere başlamadan önce mevcutta ölçüm alınan LCR metrenin kullanım kitapçığı incelenmiş ve ölçüm aralığının en düşük 20 pF olarak belirtilmiş olduğu görülmüştür. LCR metrenin 20pF altındaki kapasitans ölçümlerinde nasıl performans gösterdiği test edilmiştir. Şekil 12'de LCR metrenin 20 pF altında yapılan ölçüme ait sonuçlar gösterilmektedir.

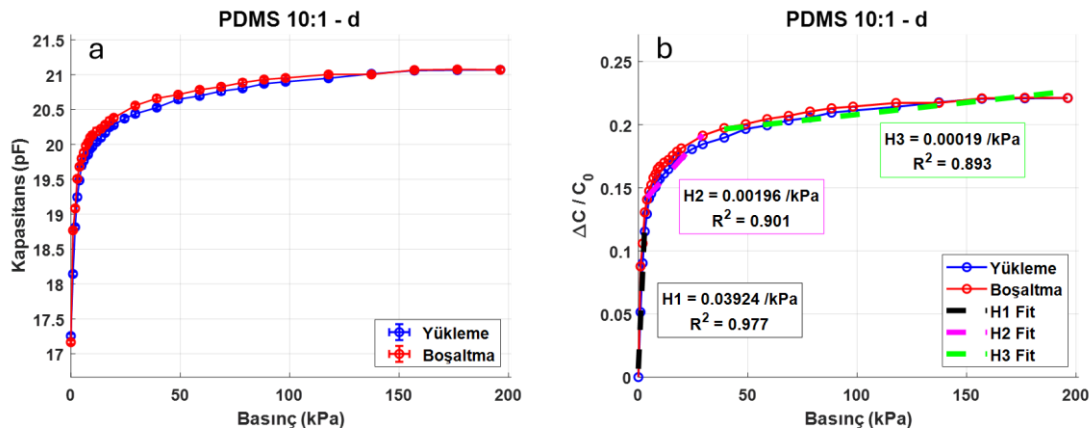


Şekil 12. PDMS 10:1 – d sensörünün LCR metre ile test edilmesi a) offset’siz test sonucu, b) offset’li test sonucu c) ölçülen kapasitans değerlerinden offset’in çıkarılması ile elde edilen test sonucu.

Bu test için öncelikle 10:1-d sensörü 100 kHz çalışma frekansında sensör üzerine uygulanan basınç ile test edilmiş, teste ait sonuç Şekil 12-a’da gösterilmiştir. Sonrasında, 100 pF değerindeki bir kapasitör LCR metre ile ölçülerek 100 adet ölçüm verisi alınmış ve bu verilerin ortalaması 104 pF bulunmuştur. Ardından ölçüm yapılacak olan sensöre, ortalama değeri 104 pF olan kapasitör paralel bağlanarak bası ölçümü tekrar edilmiştir. Ölçüme ait sonuçlar Şekil 12-b’de verilmiştir. Paralel bağlı kapasitörlerin eşdeğer kapasitansı bağlanan kapasitanslar toplamı olduğundan test bitiminde elde edilmiş verilerden 104 pF çıkarılarak sonuç elde edilmiştir. Şekil 12-c’de, alınan ölçüm verilerinin hepsinden kapasitör değeri olan 104 pF değerinin çıkarılması ile bulunan sonuç gösterilmektedir. Grafiklerden de görülebileceği üzere LCR metre 20 pF altında da güvenilir bir şekilde çalışmaktadır ancak ölçümün güvenilirliğini daha da arttırmak ve ölçüm cihazını kullanım kitapçığında belirtilen sınır değerin üzerine çıkarmak amacıyla,

PDMS testleri sensöre paralel bağlı 104 pF değerindeki kapasitör ile gerçekleştirilmiş ardından alınan tüm verilerden 104 pF değeri çıkarılarak sonuca ulaşılmıştır.

10:1 baz:ajan karışım oranında hazırlanmış PDMS malzeme katmanının d kalınlıkta üretilmiş olan sensörünün ölçüm sonuçlarına ait grafikler Şekil 13'te verilmiştir. Şekil 13-a'da sensör üzerine uygulanan basınca karşı sensörün yükleme ve boşaltma testleri sırasında kapasitans artış ve azalış eğrileri gösterilmektedir. Sensör üzerindeki basınç arttırıldıkça kapasitans artışı görülmektedir.

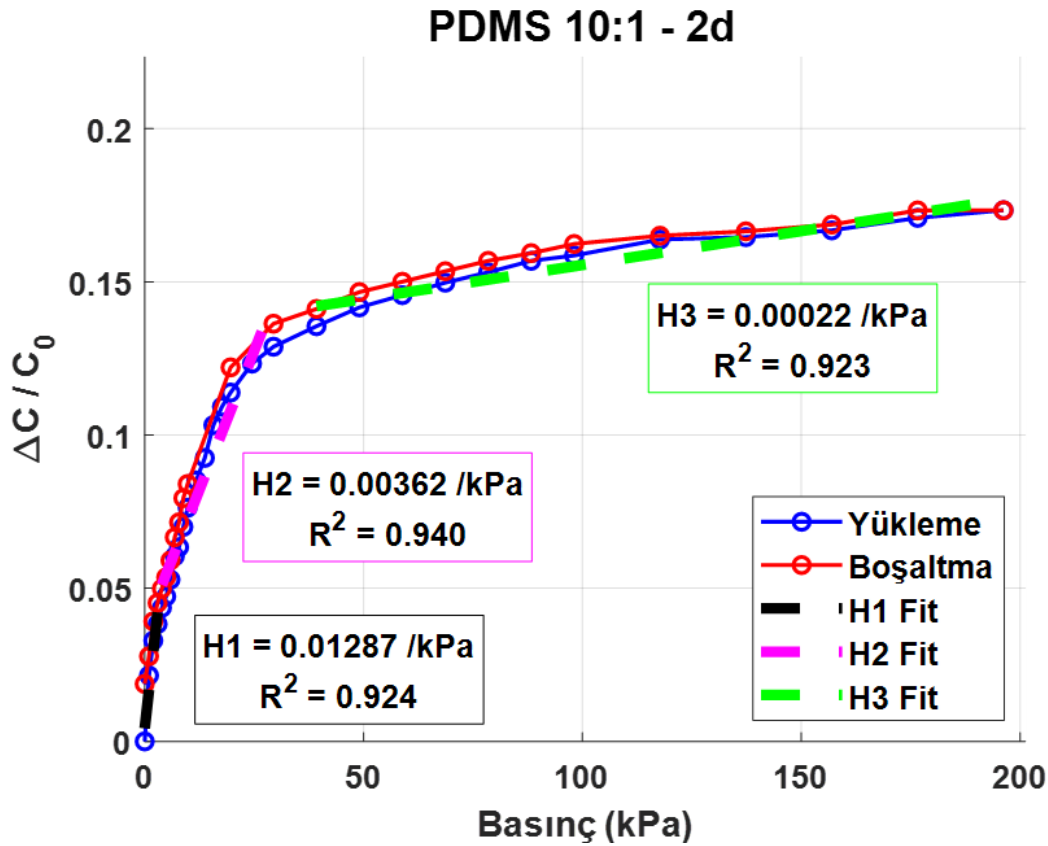


Şekil 13. PDMS 10:1 – d; a) basınca göre kapasitans değişimi, b) basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

Şekil 13-a incelendiğinde, özellikle 10 kPa basınç değerine kadar olan kısımda kapasitans değişimi yüksek seyretmiştir. 10 kPa ve sonrasında sensörün yavaş yavaş doyuma ulaştığı ve kapasitans değişimlerine verdiği tepkinin azaldığı görülmüştür. Grafikte yükleme ve boşaltma arasında az da olsa fark meydana geldiği görülmekte olup bu durum malzemenin elastik özelliğinden dolayı sensörde histerezis varlığına işaret etmektedir [52,53]. Ölçüm sırasında basınç değişimi ve kapasitans dalgalanmalarından kaynaklı ölçüm hataları grafik üzerinde yükleme ve boşaltma eğrilerinin ikisinde de hata çubukları ile gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere ölçüm hata payları düşük çıkmış olup bu durum testin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından önemli bir kriterdir [61]. Test edilen sensörün basınca göre kapasitans değişiminin ilk kapasitans değerine oranı alınarak normalleştirilmiş olup Şekil 13-b'de belirtildiği üzere sensöre ait hassasiyet ve doğrusallık değerleri hesaplanmıştır. Değişim oranının ilk kapasitans değerine bölünmesinin temel nedeni diğer sensörler ile karşılaştırılabilir, anlamlı değerler elde edebilmektir. Tez kapsamında PDMS ve PVA Boraks sensör tasarımlarına ait test sonuç grafiklerinde basınç değerleri sensörün çoklu bölge hassasiyetine sahip olmasından

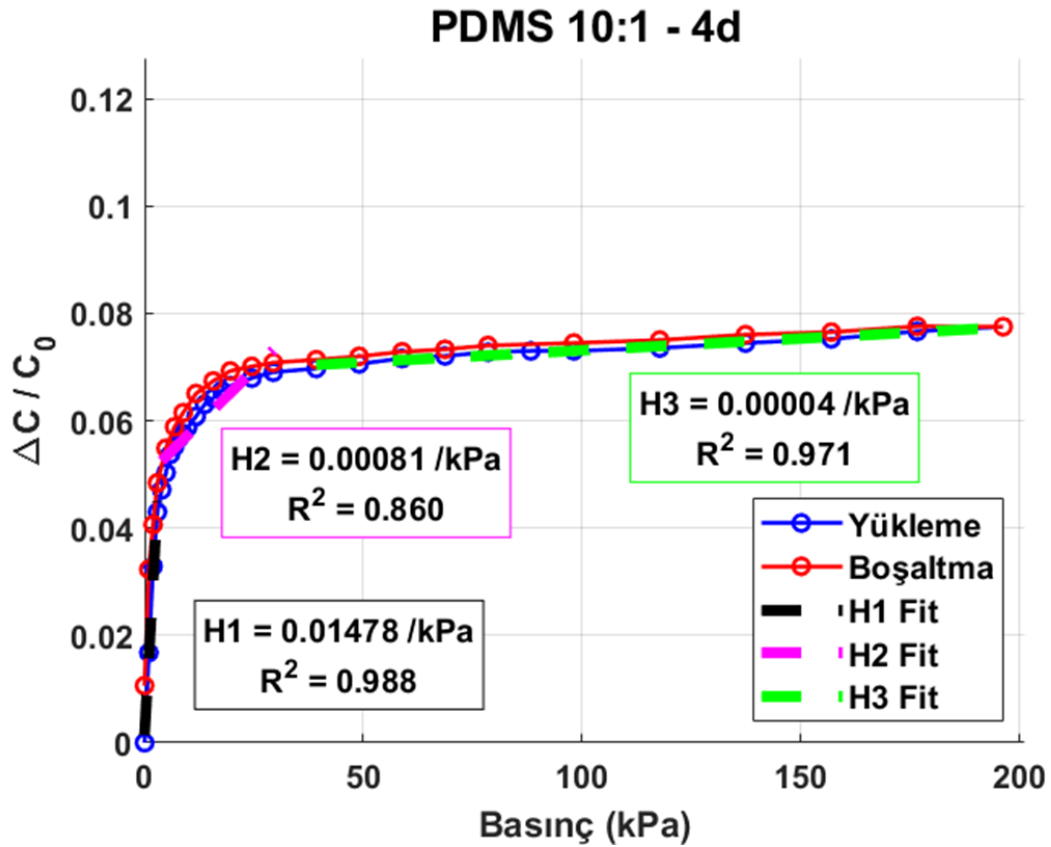
dolayı iki veya üç bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Çoklu bölge hassasiyetine sahip sensörlerde sensörün kapasitans değişimi gösterdiği en düşük basınç ve en yüksek basınç değerleri arasında tek bir eğim veya doğrusal model ile değerlendirilmesi sensörün karakteristik özelliklerini tam olarak ortaya koyamadığından bu tür sensörler genellikle hassasiyet ve doğrusallık gösterdiği basınç aralıklarına göre [44,50]'deki çalışmalarda olduğu gibi iki veya üç bölgede incelenmektedirler. Grafikte H1 bölgesi için 0 – 3 kPa basınç aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık incelenmiştir. H1 bölgesinde alınan noktasal verilere lineer uydurma ile (İng. linear fitting) noktaları en iyi şekilde üzerinde taşıyabilecek şekilde bir doğru parçası ($y = 0.03924x + 0.00657$) çizilmiştir. Önemle vurgulanması gereken husus lineer uydurma denklemlerinde basıncın x ile, normalize kapasitans değişiminin de y ile belirtilmiş olmasıdır. Bu bölgede hassasiyet değeri 0.03924 kPa^{-1} , R^2 değeri ise 0.977 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler H1 bölgesi için sensörün belirlenen bu basınçlardaki tepkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Doğrusallık açısından incelendiğinde ise sistemin doğrusallık faktörü R^2 ile karakterize edilebilir ve [62]'de de gösterildiği gibi R^2 değerinin 1'e çok yakın olması o sensörün yüksek doğrusal davranış sergilediğini göstermektedir. H1 bölgesinde hesaplanan R^2 değeri için sensörün bu bölgede doğrusallığa yakın bir durumda olduğu değerlendirilebilir ancak doğrusaldır denilmesi için bahsedildiği gibi 1 değerine çok yakın olmalıdır. H2 bölgesi için 3 – 30 kPa basınç aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık incelenmiştir. Bu basınç aralıklarında doğru parçası denklemi $y = 0.00196x + 0.13459$ olarak bulunmuştur. Bu bölgede hassasiyet değeri 0.00196 kPa^{-1} , R^2 değeri 0.901 olarak hesaplanmıştır. H2 bölgesinde sensör hassasiyetinin dramatik biçimde düştüğü görülmüştür. Ayrıca sensör doğrusallıktan uzaklaşan bir eğilim göstermiştir. H3 bölgesi $y = 0.00019x + 0.18910$ doğru denklemi ile ifade edilmiş olup bu bölgede hassasiyet değeri 0.00019 kPa^{-1} , R^2 değeri 0.893 olarak hesaplanmıştır. Bu bölgede sensör, üzerine uygulanan basınca karşı çok küçük kapasitans tepkisi verebilmektedir. Sensörün bu bölgede hassasiyetini kaybederek doyuma ulaştığı söylenebilir. Doğrusallık değeri incelendiğinde sensörün gittikçe doğrusal karakterden uzaklaştığı, bu bölgede sensörün lineer çalışmadığı söylenebilir.

PDMS'in 10:1 karışım oranı ile 2d katman kalınlığında üretilmiş sensörünün ölçüm sonuçlarına ait grafik Şekil 14'te verilmiştir. Grafikte basınç değerleri bir önceki sensör için anlatıldığı üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Tez kapsamında PDMS test sonuçlarına ait grafiklerde basınç değerleri üç bölgeye ayrılarak incelenmiştir. H1 bölgesi için 10:1 oranlı d kalınlıktaki sensör ile kıyaslandığında aynı basınç aralıklarında hassasiyet üçte bir oranında düşük çıkmıştır. Bunun nedeninin malzeme kalınlığı arttıkça dışarıdan uygulanan mekanik etkilerle malzemenin deformasyonun azalması ve buna bağlı olarak malzemenin daha az esnetilebilmesi olduğu düşünülmektedir [63,64]. H2 bölgesinde hassasiyetin düştüğü ancak doğrusal tutumunun H1 bölgesine göre artmaya başladığı görülmektedir. H3 bölgesinde sensörün nispeten doyuma ulaştığı ve basınca karşılık gelen kapasitans değişiminin çok fazla olmadığı görülmüştür. Bu durumda, pratik uygulamalarda basınç değişimine karşılık gelen kapasitans değerinin okunması sırasında nitelikli okuma devrelerine ihtiyaç duyulabilir. Bu bölgede sensörün doğrusallığa yakın bir performans sunduğu görülmektedir ($R^2 = 0.923$).



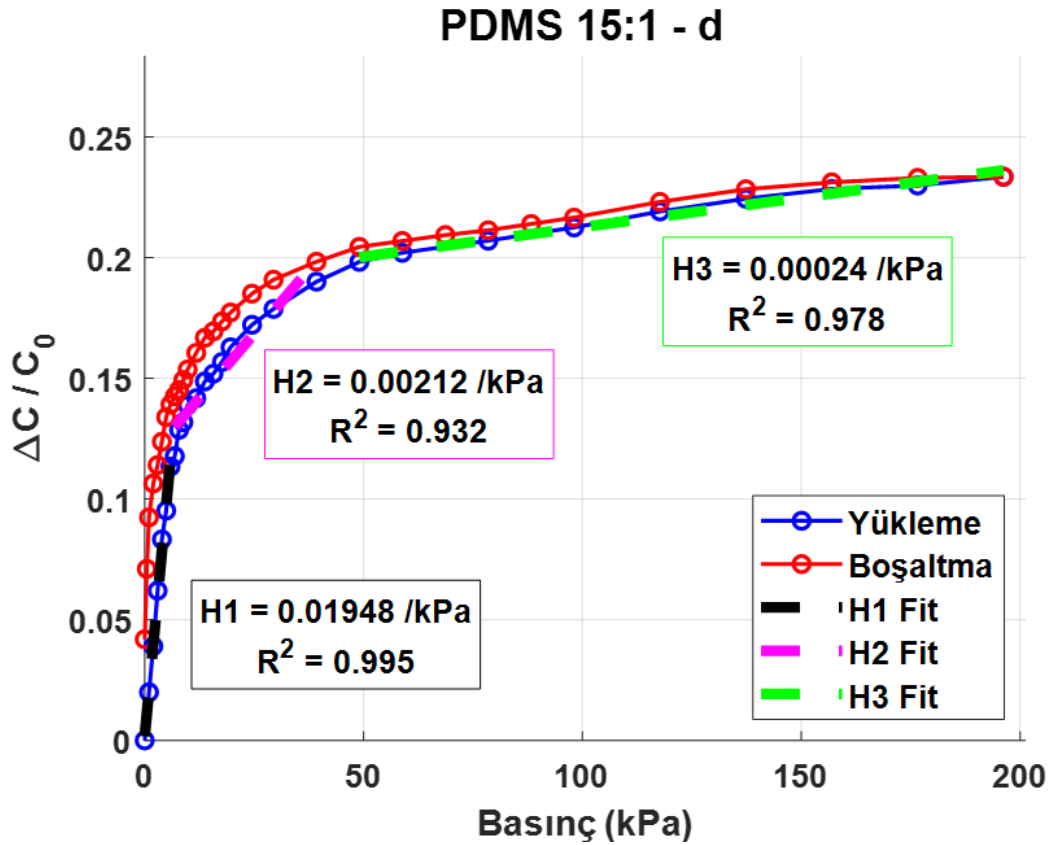
Şekil 14. PDMS 10:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Test sonuçları Şekil 15'te gösterilen bir diğer sensör tasarımı da 10:1 karışım oranına ve 4d katman kalınlığına sahip 10:1 – 4d sensörüdür. H1 bölgesi için 10:1 – d sensörü ile kıyaslandığında aynı basınç aralıklarında hassasiyet düşük ancak doğrusallık yüksek çıkmıştır. 10:1 – 2d sensörü ile karşılaştırıldığında ise hassasiyet bir miktar yüksek çıkmakla birlikte doğrusallık bu bölgede 10:1 orandaki sensörlerden elde edilen sonuçlar arasındaki en iyi değeri sergilemektedir ($R^2 = 0.988$). H2 bölgesinde sensörün basınca karşı değişimi kayda değer bir düşüş göstermiştir ve sensör bu bölgede doğrusal karakteristiğinden uzaklaşmıştır ($R^2 = 0.860$). H3 bölgesinde sensörün, üzerine uygulanan basınca karşı kısıtlı tepkiler vermekte olduğu ve sensörün nispeten doyuma ulaştığı görülmektedir. R^2 değeri, H3 bölgesinde 0.971 olarak hesaplanmıştır. Grafikteki eğri yatay seyrettiği için doğrusallık değeri yüksek çıkmıştır, ancak uygulamalarda düşük kapasitans değişimi ölçümleri zorlayıcı olabileceği için bu bölgede pratik kullanım için uygun şartları yerine getirmemektedir.



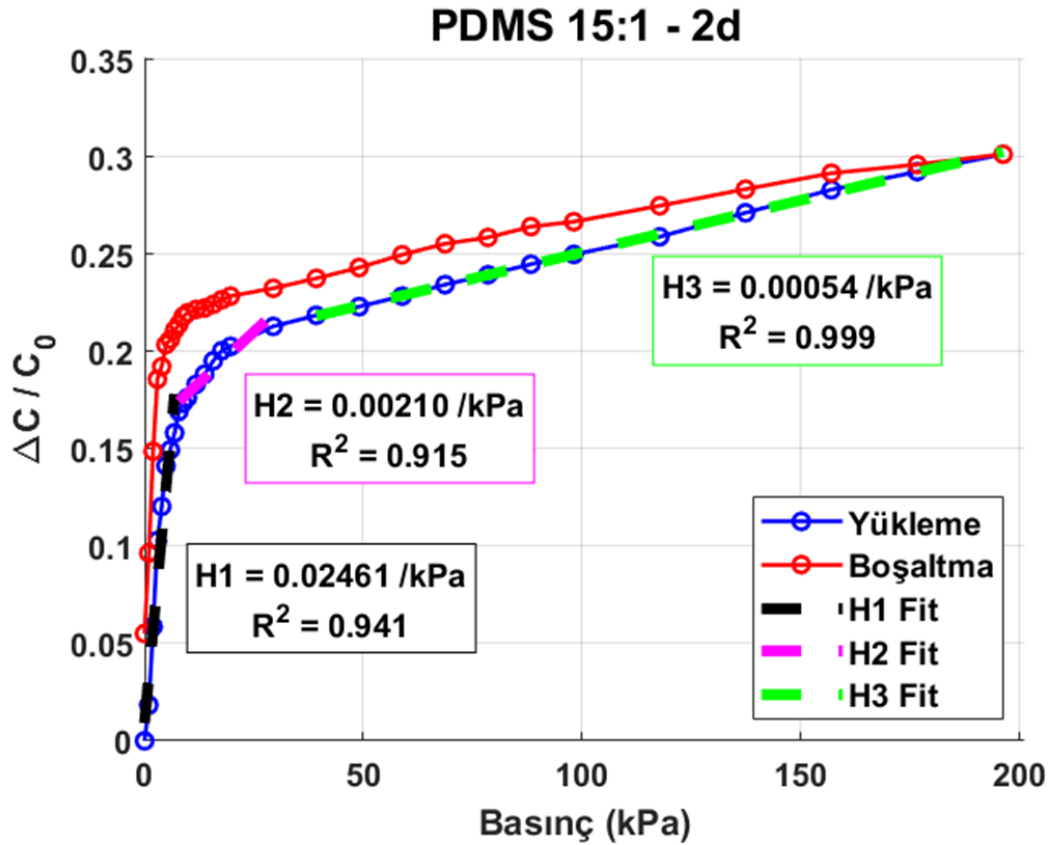
Şekil 15. PDMS 10:1 – 4d; basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

15:1 – d sensörünün kapasitans değişim grafiği Şekil 16’da verilmiştir. Sensör hassasiyeti H1 basınç bölgesi için 10:1 – d sensörü ile karşılaştırıldığında daha düşük ancak sensör doğrusallığı yüksek çıkmıştır. 10:1 – 2d sensörü ile kıyaslandığında ise hassasiyet yüksek çıkmakla birlikte doğrusallık bu bölgede bu noktaya kadar incelenen sonuçlar arasındaki en iyi değere sahiptir ($R^2 = 0.995$). Sensör hassasiyeti, H2 bölgesi incelendiğinde yaklaşık dokuz kattan fazla düştüğü görülmüştür. Sensör 0.932 R^2 değeri ile bu bölgede doğrusal karakteristiğinden uzaklaşmıştır. Grafik eğrisinin yatay seyretmesi sonucu R^2 değerinin yüksek çıktığı H3 bölgesinde sensör doyuma ulaşarak hassasiyetini önemli ölçüde azaltmıştır.



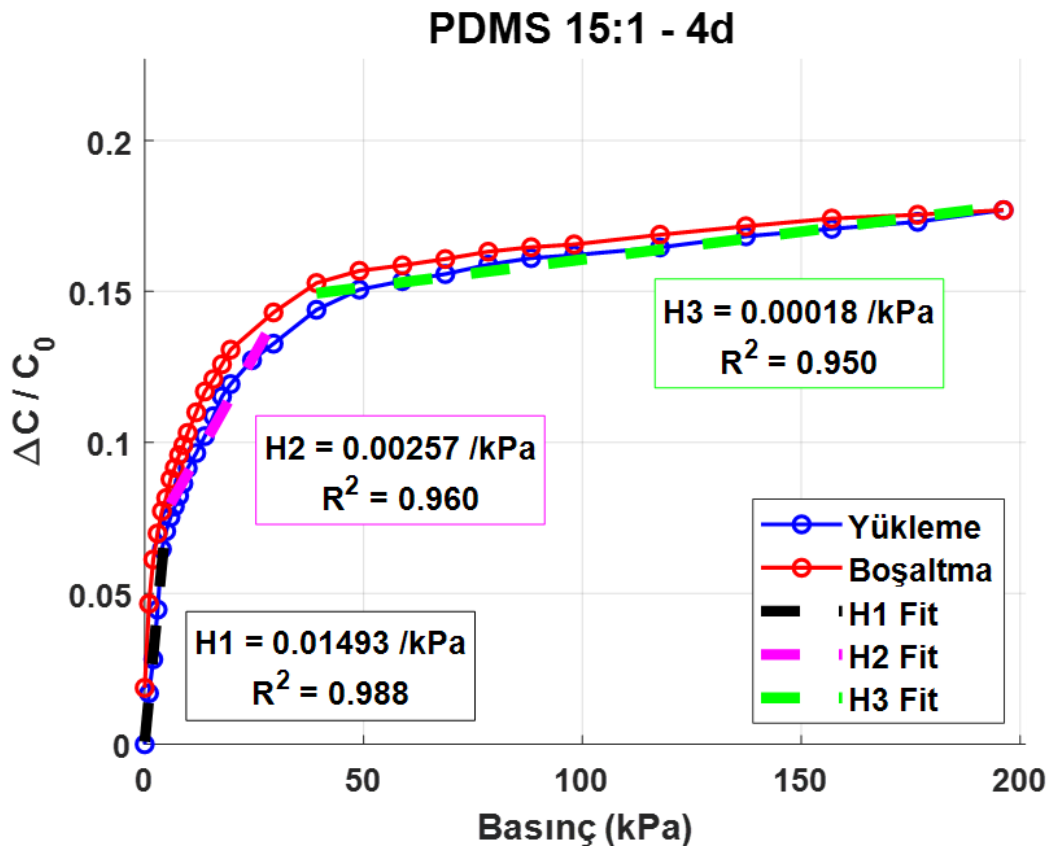
Şekil 16. PDMS 15:1 – d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

PDMS sensör tasarımlarından 15:1 karışım oranlı 2d kalınlıktaki sensörün basınca karşı kapasitans değişimi Şekil 17’de belirtilmiştir. Benzer basınç aralıklarında 15:1 – d sensörü ile H1 bölgeleri karşılaştırıldığında hassasiyetin yüksek ancak doğrusallığın düşük çıktığı görülmektedir. H2 bölgesi incelendiğinde sensör hassasiyetinin yaklaşık on kattan fazla düştüğü görülmekte olup bu bölgede hesaplanan R^2 değeri (0.915) göz önünde bulundurulduğunda sensör doğrusal karakteristiğinden uzaklaşma eğilimindedir. Sensör, H3 bölgesinde iyi bir doğrusal davranış yansıtmaya rağmen basınç ile kapasitans değişimi çok düşüktür (0.00054 kPa^{-1}).



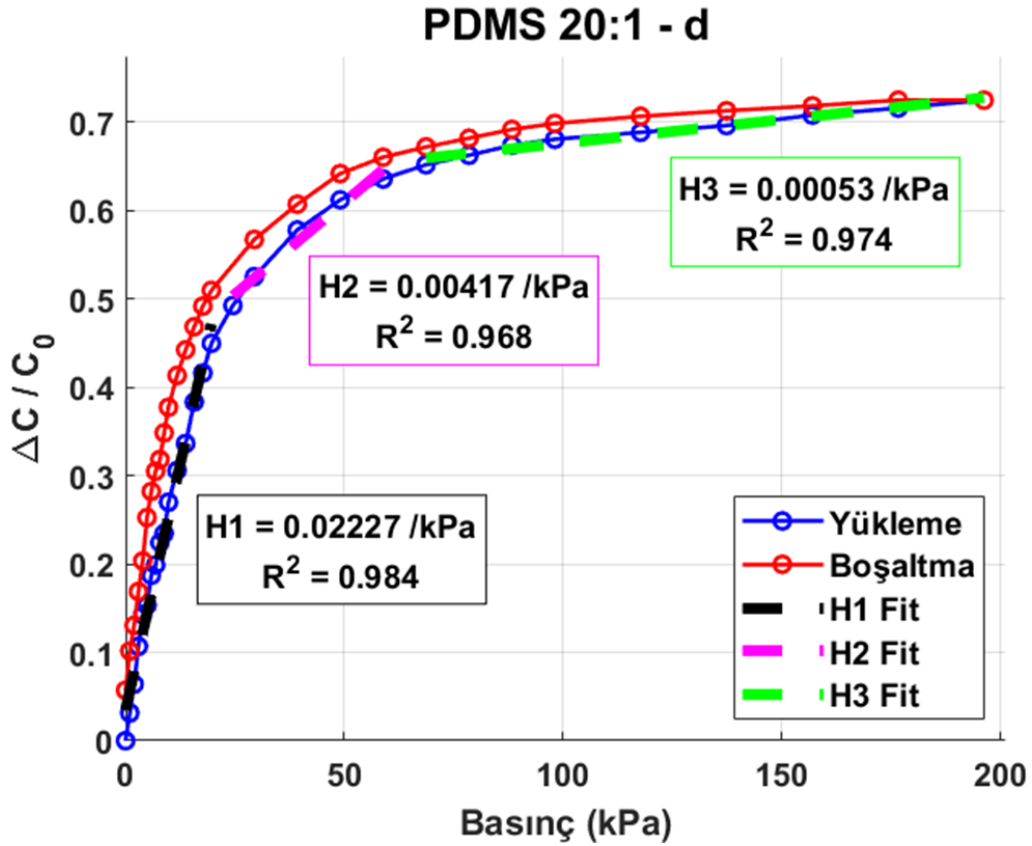
Şekil 17. PDMS 15:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Kapasitans değişiminin incelendiği bir diğer sensör tasarımı olan 15:1 – 4d sensörüne ait ölçüm sonuçları Şekil 18’de verilmiştir. 15:1 oranlı d ve 2d kalınlıktaki sensörler H1 bölgesi için karşılaştırıldığında benzer basınç aralıklarında hassasiyetin düştüğü ancak doğrusal özelliğinin yüksek çıktığı görülmektedir. Doğrusallıktan nispeten uzaklaşan sensörün H2 bölgesindeki hassasiyeti yaklaşık 5.8 kat düşmüştür H3 bölgesinde sensör, önceki sensör testlerinde belirtilen sonuçlara paralel olarak düşük hassasiyetli ve doğrusal tutum ortaya koymuştur.



Şekil 18. PDMS 15:1 – 4d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

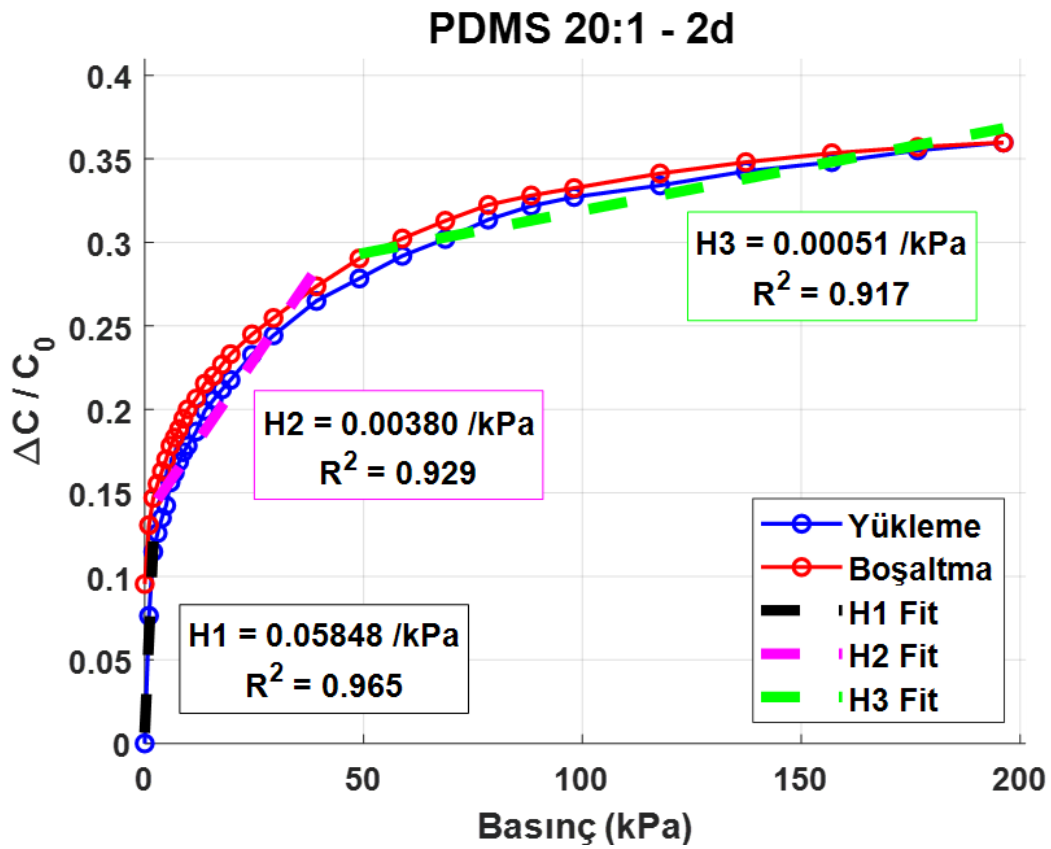
20:1 – d sensörünün ölçüm sonuçlarına göre 10:1 – d ve 15:1 – d sensörleri ile karşılaştırıldığında, Şekil 19’daki H1 bölgesinde hassasiyet 10:1 – d (0.03924 kPa^{-1}) sensöründen düşük, 15:1 – d (0.01948 kPa^{-1}) sensöründen yüksek çıkmıştır.



Şekil 19. PDMS 20:1 – d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

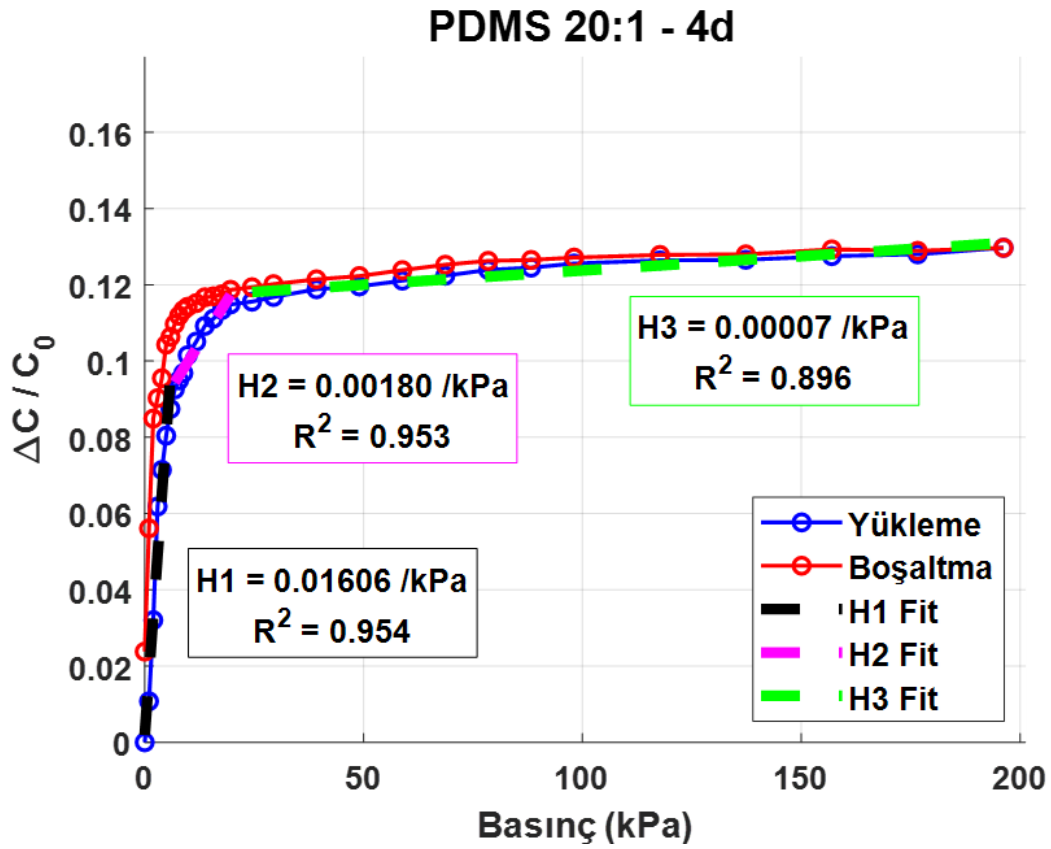
Bu inceleme yapılırken 10:1 – d sensörünün basınç aralığının 0 – 3 kPa olduğuna dikkat edilmelidir. 20:1 d sensörü H1 bölgesi için daha geniş basınç aralığına sahiptir. H2 bölgesinde sensör hassasiyeti yaklaşık 5 kat düşmüştür. Sensör yüksek basınç değerlerindeki H3 bölgesi için düşük kapasitans değişimi göstermektedir. Bu bölgede doğrusallık H2 bölgesine göre kısmen daha iyi durumdadır.

Sensör basınç değerine göre kapasitans değişimi Şekil 20’de belirtilen 20:1 – 2d sensörünün H1 bölgesindeki hassasiyet değerinin, bu noktaya kadar incelenmiş diğer sensörlere ait hassasiyet değerlerine göre en iyisi olduğu anlaşılmaktadır (0.05848 kPa^{-1}). H2 bölgesi incelendiğinde sensör hassasiyeti H1 bölgesine göre yaklaşık 15 kat düşmüştür. Sensörün doğrusallığı incelendiğinde hesaplanan R^2 değerinden (0.929) bu bölgede sensörün doğrusal özellikten uzaklaşma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Sensörün H3 basınç bölgesinde hem hassasiyeti düşük çıkmış hem de doğrusal tepkisi azalmıştır.



Şekil 20. PDMS 20:1 – 2d; basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Karışım oranı 20:1 ve 4d katman kalınlığındaki sensör tasarımının ölçüm sonuçları Şekil 21’de gösterilmiştir. 20:1 karışım oranında d (0.02227 kPa⁻¹) ve 2d (0.05848 kPa⁻¹) katman kalınlıklarındaki sensörleri ile karşılaştırıldığında H1 basınç bölgesindeki hassasiyet değeri düşük çıkmıştır. Hassasiyet değeri H2 bölgesinde H1 bölgesine oranla yaklaşık 9 kat düşmüştür. H3 bölgesi incelendiğinde sensörün kapasitans değişiminin diğer basınç bölgelerine göre daha çok azaldığı ve sensörün doğrusal karakteristiğinden uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 21. PDMS 20:1 – 4d; basınca göre normleştirilmiş kapasitans değişimi.

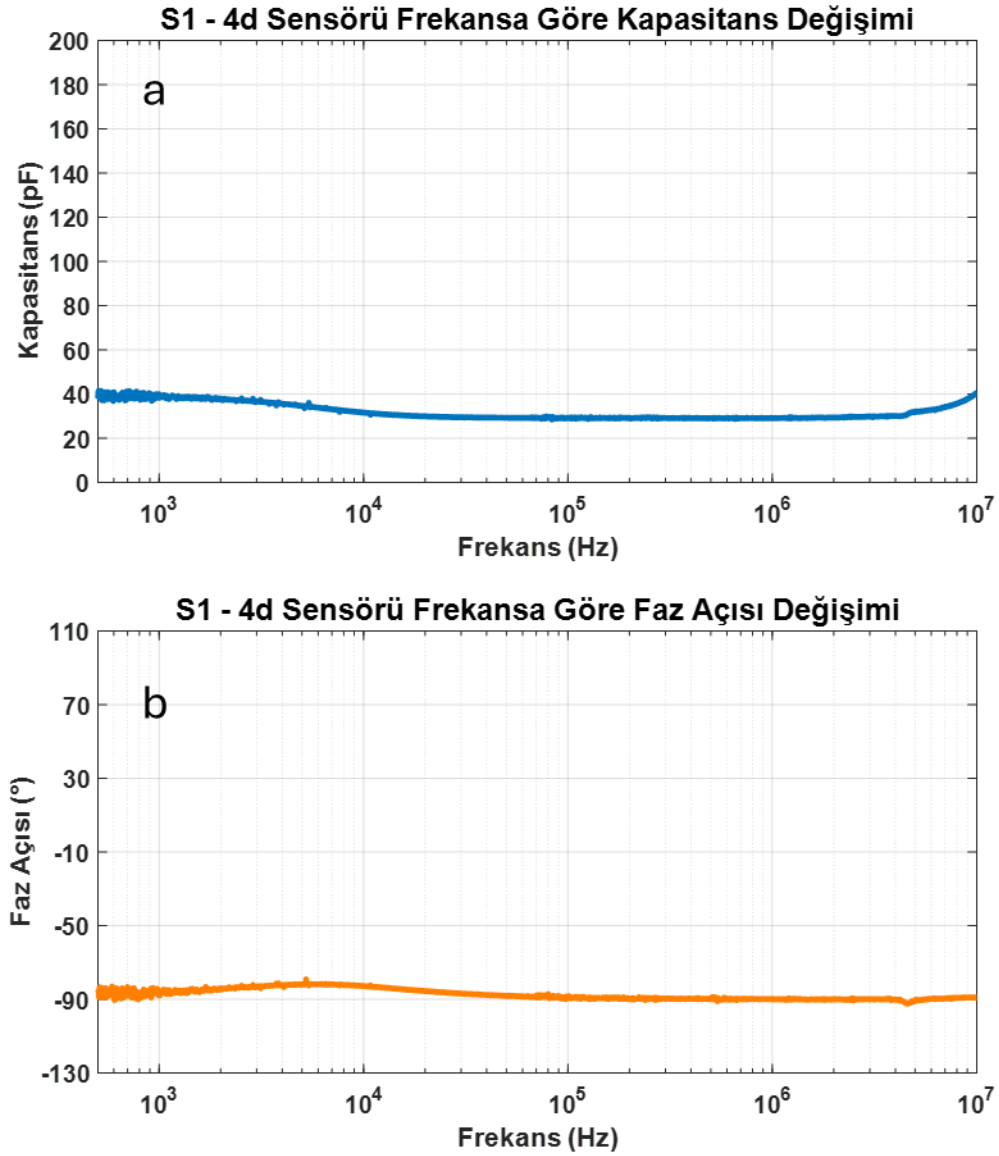
3.3.2. PVA ve BORAKS KATMANLI KAPASİTİF BASINÇ SENSÖRÜ TESTLERİ

Tez kapsamında, 1 g Boraks miktarına sahip sensör (S1) için; d, 2d ve 4d, 2 g Boraks miktarına sahip sensör (S2) için; d, 2d ve 4d ve 4 g Boraks miktarına sahip sensör (S3) için d, 2d ve 4d malzeme katman kalınlıklarındaki 9 adet PVA Boraks sensör tasarımının basınca karşı duyarlılığının zamanla değişimini anlayabilmek için üretimin ardından, 5 gün ve 10 gün sonra kapasitansın basınca göre değişimi üzerine testler yapılmıştır. Üretilen malzemeler sensör haline getirildikten sonra test edildiği ilk gün için T0, 5 gün sonra yapılan testler için T0+5G, 10 gün sonra yapılan testler için T0+10G isimlendirmeleri yapılmıştır.

Testler sonucunda sensörlerin zamanla kapasitif sensör özelliklerinin belirli seviyede değişim gösterdiği görülmüştür. Bu değişimin hidrojel yapısının ve dolayısıyla elastik özelliklerinin değişmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Malzeme içeriğindeki su miktarının elektrik yükü tutmasından dolayı ve zamanla su miktarının azalmasına bağlı olarak malzemenin daha rijit yapıya dönüşmesi ile malzemenin elastikliğini kaybetmesi, buna bağlı olarak enerji emiliminin azalmasının yüklem ve boşaltma histerisizinde azalmaya yol açtığı düşünülmektedir [65,66]. Ölçüm sonuçları ve analizleri basınca göre kapasitans değişim grafiklerinde detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.3.2.1. SENSÖR MALZEMESİNİN FREKANSA GÖRE KAPASİTANS VE FAZ AÇISI DEĞİŞİMİ

Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan PVA ve Boraks hidrojel yapıdaki malzeme katmanına sahip sensörlerden örnek olarak seçilen S1-4d sensörünün frekansa göre kapasitans ve faz açısı değişimleri Şekil 22’de gösterilmektedir. Şekil 22-a’da; sensör üzerine herhangi bir bası uygulanmadığı durumda alınan ölçümlerde sensör kapasitans değerinin frekansa bağlı olarak aşırı değişim göstermediği görülmektedir. Şekil 22-b’de sensörün frekansa göre faz açısı ise -90° yakınlarında değiştiği için sensör kapasitif etki gösteriyor diyebiliriz. Daha önce belirtildiği üzere, tez kapsamında ele alınan sensörlerin kapasitans ölçümleri sabit frekansta (1kHz) LCR metre kullanılarak alınmıştır.

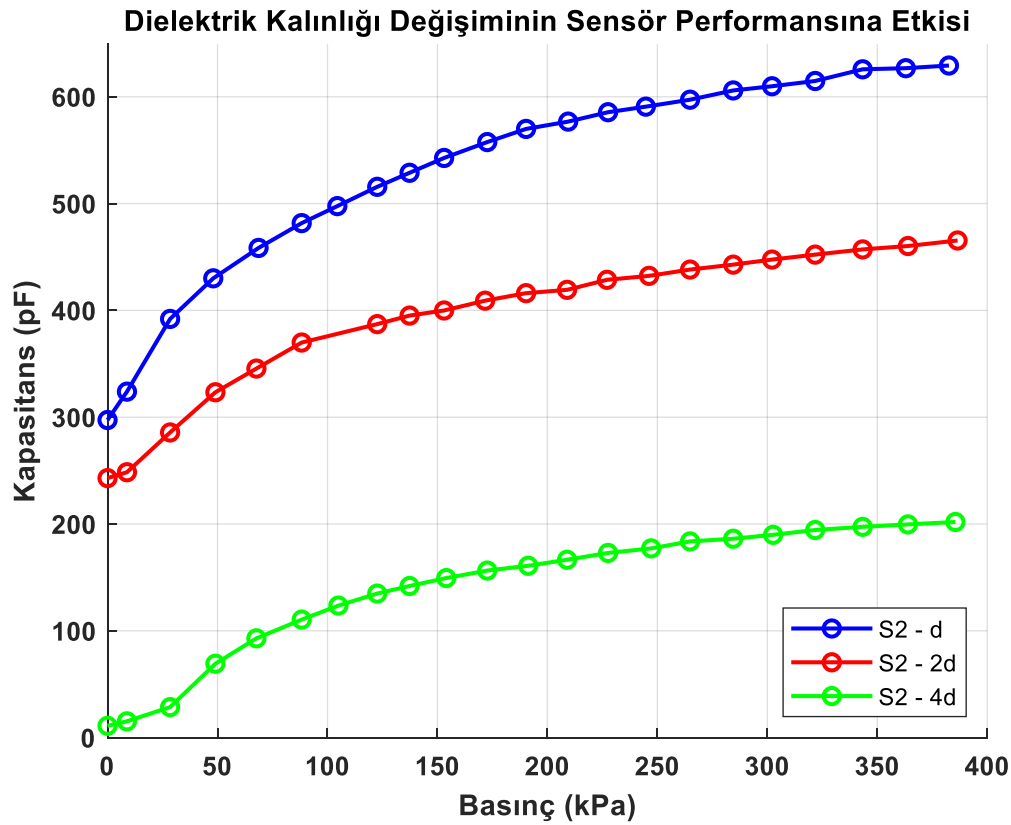


Şekil 22. S1-4d sensörüne ait; a) frekansa göre kapasitans değişimi grafiği, b) frekansa göre faz açısı değişimi grafiği.

3.3.2.2. FARKLI MALZEME KATMAN KALINLIKLARINDA UYGULANAN BASINCA GÖRE PVA BORAKS SENSÖR KARAKTERİSTİĞİ

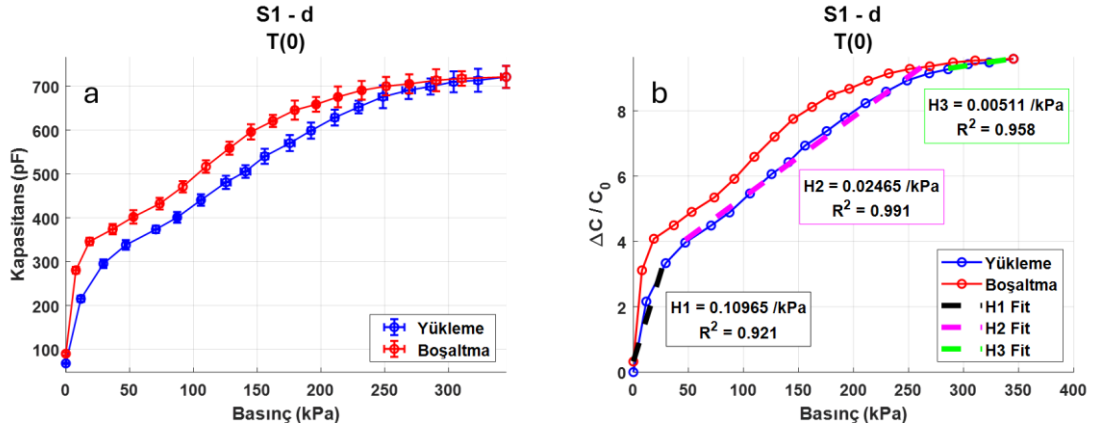
Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan PVA ve Boraks hidrojel yapıdaki malzeme katmanına sahip S2 sensörünün d, 2d ve 4d malzeme katman kalınlığındaki tasarımlarının basınca göre kapasitans değişimleri Şekil 23'te belirtilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere malzeme katman kalınlığı arttıkça sensör kapasitans değeri azalmaktadır. Teoride katman kalınlığı iki katına çıkarıldığında kapasitans değeri yarıya, katman kalınlığı dört katına çıkarıldığında ise kapasitans değeri dörtte birine düşmelidir ancak gerçekte malzemenin esneklik, sıkıştırılabilirlik gibi özellikleri ve çevresel koşullar arasındaki

karmaşıklık nedeniyle malzeme katman kalınlığı ve sensör kapasitans değeri arasında doğrusal olmayan bir yönelim görülebilmektedir. Sensör üzerine basınç uygulanması ile elektrotlar arasındaki mesafe azaldığından kapasitans değeri artar ancak kapasitans değişimi sadece buna bağlı olmayabilir. Malzeme kalınlığının artması ile malzemenin toplam sertliğinin artması ve sıkıştırılabilirliğinin azalmasından dolayı kapasitans değişimleri malzeme deformasyonuna bağımlı hale gelmektedir. Sertlik, sıkıştırılabilirlik gibi malzeme özellikleri de göz önüne alındığında kalınlığın kapasitans değeri üzerindeki etkisi teorideki gibi gerçekleşemeyebilir. Ayrıca, basınç uygulandığında dielektrik sabiti de değişir ve bu durum malzeme kalınlığı ve kapasitans değeri arasındaki ilişkiyi karmaşık bir hale getirerek sensörün farklı malzeme katman kalınlıklarında basınca göre kapasitans değişimlerinde doğrusal olmayan bir özellik göstermesine neden olabilir [64,67].



Şekil 23. S2 sensörünün farklı malzeme katman kalınlıklarındaki tasarımlarının sensör kapasitans değeri üzerindeki etkisi.

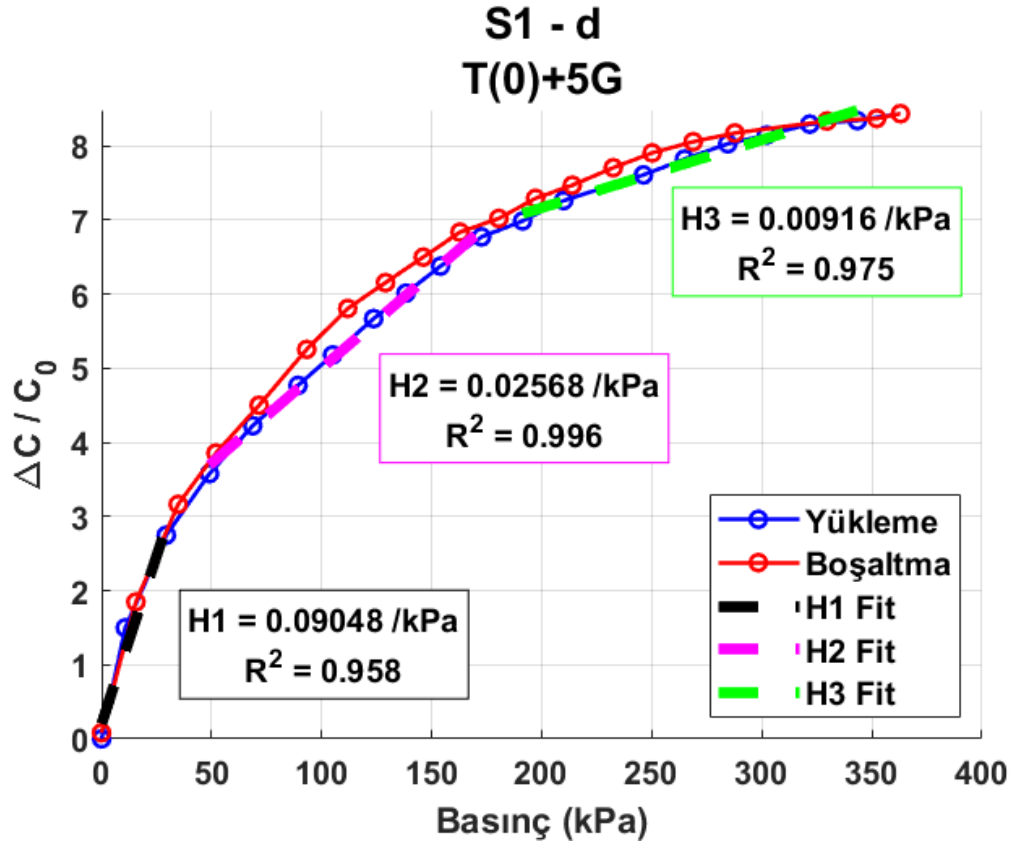
Sensör testlerinin başladığı T0'da sensör üzerine uygulanan basınca karşı S1 – d sensörünün yükleme ve boşaltma testleri sırasında kapasitans artış ve azalış bilgileri Şekil 24-a'da gösterilmektedir. Sensör üzerindeki basınç arttıkça kapasitans artışı görülmektedir. Özellikle 30 kPa basınç değerine kadar olan kısımda kapasitans değişimi yüksek seyretmiştir. 30 kPa – 270 kPa aralığında kapasitans değeri basınca göre yine artış eğilimindedir ancak 0 kPa – 30 kPa aralığındaki kadar hızlı bir artış görülmemiştir. Sensör 270 kPa basınçtan sonra doyuma ulaşmaya başlamış ve basınca karşı sensör duyarlılığı azalmıştır. Grafikte yükleme ve boşaltma arasında fark meydana geldiği açıkça görülmekte olup bu durum T0 zamanında malzemenin elastik özelliğinden dolayı sensörde histerezis varlığına işaret etmektedir [52,53]. Ölçüm sırasında basınç değişimi ve kapasitans dalgalanmalarından kaynaklı ölçüm hataları grafik üzerinde yükleme ve boşaltma eğrilerinin ikisinde de hata çubukları ile gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği üzere ölçüm hata payları düşük çıkmış olup bu durum testin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından önemli bir kriterdir.



Şekil 24. S1-d (T0); a) basınca göre kapasitans değişimi, b) basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

T0'da test edilen sensörün basınca göre kapasitans değişimi, ilk kapasitans değerine göre oranlandırılmış ve sensöre ait hassasiyet ve doğrusallık değerleri hesaplanarak Şekil 24-b'de gösterilmiştir. PDMS sensör tasarımlarının testlerinde elde edilen grafiklere benzer olarak PVA ve Boraks sensör tasarımlarının testlerinde elde edilen grafikler de iki veya üç bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Grafikte H1 bölgesi için 0 – 30 kPa basınç aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık incelenmiştir. H1 bölgesinde alınan noktasal verilere lineer uyumlandırma ile noktaları en iyi şekilde üzerinde taşıyabilecek şekilde bir doğru parçası ($y = 0.10965x + 0.32627$) çizilmiştir. Bu bölgede hassasiyet değeri 0.10965 kPa^{-1} , R^2 değeri 0.921 olarak hesaplanmıştır. Sensör H1 bölgesinde iyi derecede duyarlılığa sahiptir. H1 bölgesi için hesaplanan R^2 değeri (0.921) incelendiğinde sensörün bu bölgede göreceli olarak doğrusal davranış sunduğu görülmektedir. Grafikte H2 bölgesi için 30 – 270 kPa basınç aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık incelenmiştir. Bu basınç aralıklarında doğru parçası denklemi $y = 0.02465x + 2.88687$ olarak bulunmuştur. Bu bölgede hassasiyet değeri 0.02465 kPa^{-1} , R^2 değeri ise oldukça yüksek bir şekilde 0.991 olarak hesaplanmıştır. H2 basınç aralığındaki hassasiyette H1'e göre düşüş görülmüştür ancak sensör doğrusallığı H2'de gözle görülür şekilde artmıştır. Yüksek doğrusallık ($R^2 = 0.991$) sensörün bu basınç aralığında daha güvenilir ve kararlı bir şekilde çalışması anlamına gelmektedir. Grafikte H3 bölgesi için 270 kPa – 350 kPa basınç aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık incelenmiştir. Bu basınç aralıklarında doğru parçası denklemi ise $y = 0.00511x + 7.83326$ olarak bulunmuştur. Bu bölgede hassasiyet değeri 0.00511 kPa^{-1} , R^2 değeri ise 0.958 olarak hesaplanmıştır. Hassasiyet değerinden de anlaşılacağı üzere sensörün bu bölgedeki basınca göre duyarlılığı dikkat çekici biçimde azalmış ve sensör doygunluk seviyesine gelmiştir. Bu bölgede doğrusallık da H2 bölgesine göre azalmış ve sensör doğrusallıktan uzaklaşmaya başlamıştır. Sensörün bu basınç aralığında daha az tepki vermesinin nedeni malzemenin ilgili basınç aralıklarında artık daha fazla deforme olamamasından kaynaklı olabilir.

Sensörün üretiminden beş gün sonra tekrar basınca göre kapasitans verileri alınarak grafik haline getirilmiş ve Şekil 25'te gösterilmiştir. Buradaki amaç daha önce de bahsedildiği üzere hidrojel içeren sensör yapısındaki su kaybından kaynaklı ağırlık kaybının sensör yapısına ve performansına etkisinin incelenmesidir.



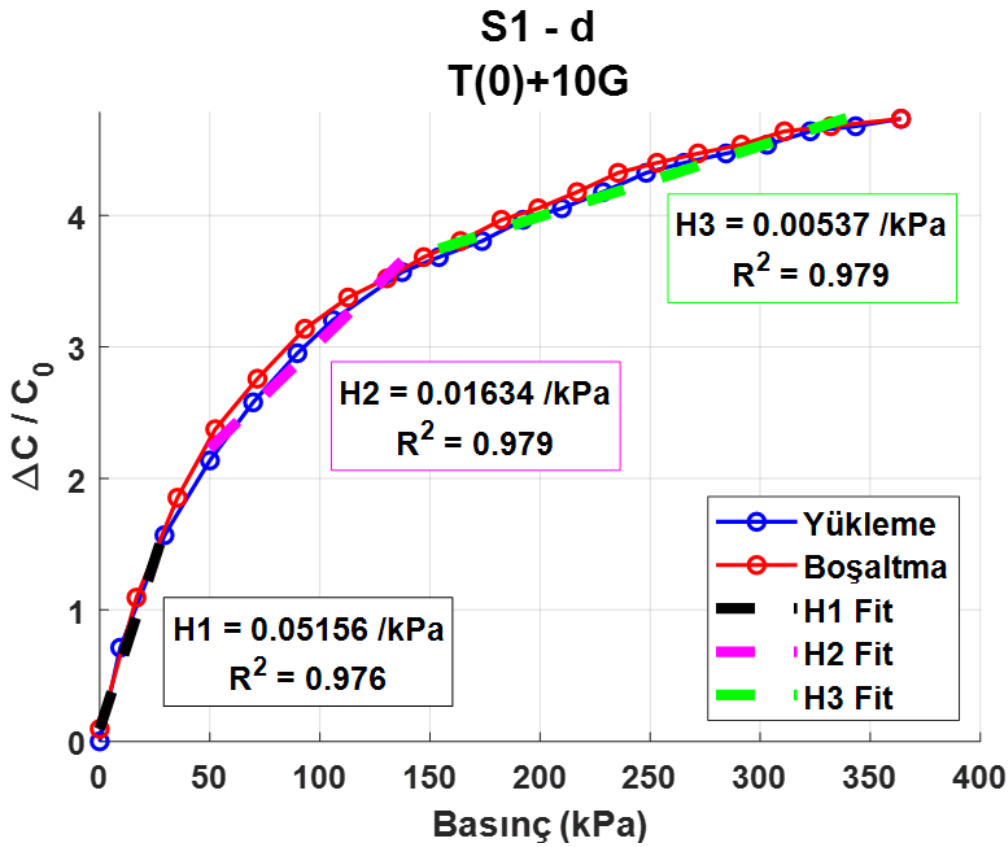
Şekil 25. S1-d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

T0+5G'de basınca göre kapasitans değişimi T0'da alınan ölçüm sonuçlarına göre farklılık göstermiştir ve bir miktar düşüş gerçekleştiği görülmüştür. Bu duruma etken nedenin malzemenin zamanla daha rijit yapıya dönüşmesi nedeniyle sıkıştırma ve deforme olma etkisinin azalması olduğu düşünülmektedir [68,69].

H1 bölgesinde, her ne kadar bölgesel doğrusallık T0'daki H1 bölgesine göre bir miktar artmış görünse de sensörün T0+5G ölçümlerinde belirlenen H1 basınç aralığındaki hassasiyeti T0'a göre düşük çıkmıştır. T0 ölçümüne paralel bir şekilde sensör H2 bölgesinde doğrusal performans yansıtmıştır. H3 bölgesinde sensör hassasiyet yüksek basınç aralıklarında düşük çıkmakla birlikte sensörün doğrusal tepkisi de H2 bölgesine

göre azalmıştır. Genel olarak T0+5G’de doğrusal ve doğrusala yakın bölgeler elde edilmiş ancak kapasitans hassasiyetinin T0 ölçümüne göre bir miktar düştüğü görülmüştür.

Sensör üretimini takip eden onuncu günde (T0+10G) yapılan testler ile elde edilen verilere göre kapasitans değişiminde T0 ve T0+5G’ye göre bir miktar daha düşüş görülmekte olup bu durum yine sensörün kuruma ve buharlaşma etkilerinden dolayı bir miktar ağırlık kaybetmesi ve daha katı forma dönüşmesi ile üzerine uygulanan basıya daha az elastik özellik göstermesinden kaynaklanıyor olabilir. T0+10G hassasiyet ve doğrusallık analizi Şekil 26’da belirtilmiştir.



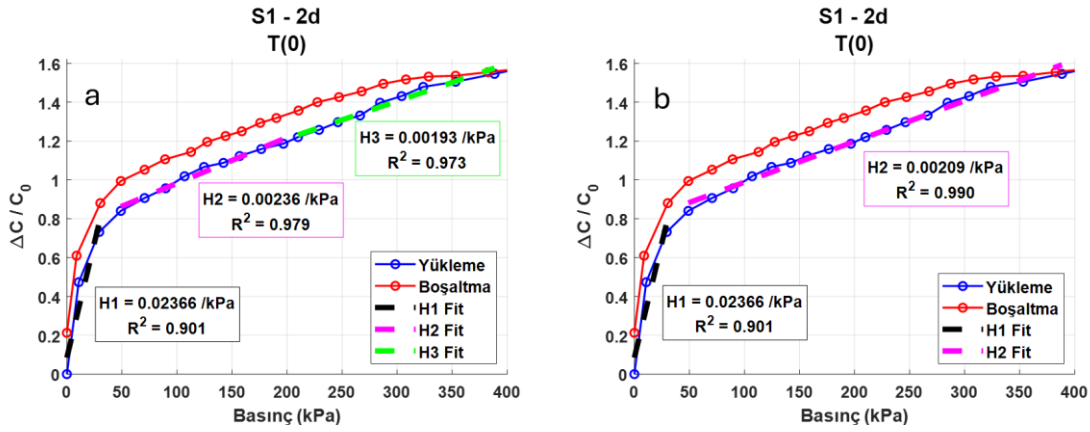
Şekil 26. S1-d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

T0+10G’de elde edilen grafikte sensörün basınca göre kapasitans hassasiyetinin diğer ölçümlere kıyasla azaldığı ve grafik eğrisinin daha yatay seyrettiği görülebilir. Grafikte dikkat edilmesi gereken ilk durum basınç aralıklarının değişmiş olmasıdır. T0 ve T0+5G’ye göre T0+10G ölçüm eğrisi daha yatay seyrettiği için doğrusal olan bölge daha geriye çekilip daralmıştır. Bu durumda üçüncü bölge olan H3’ün aralığı artmıştır ancak sensör o bölgede uygulanan basınca karşı artık çok az tepki verdiği için bölgenin bu

noktada genişlemesi önemsiz kabul edilebilir. T0+10G testinde H1 bölgesinde hesaplanan hassasiyet değerinin önceki ölçümlere göre belirgin bir şekilde azalmış olduğu görülmektedir. Bu bölge için bulunan R^2 değerinden (0.976) sensörün bölge içinde doğrusala yakın bir tutum sunduğu söylenebilir. H2 basınç aralığında hassasiyet belirgin oranda düşmüş, doğrusallık kendini koruma eğilimi seyretnmiştir. H3 bölgesinde sensör hassasiyetinde diğer basınç bölgelerine göre bariz düşüş gerçekleşmiş olduğu görülmektedir ancak genel olarak sensörün doğrusal karakteristiği korunmuştur.

S1-d sensörü ile farklı zamanlarda alınan ölçüm sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde sensör hassasiyetinin zamanla düştüğü, basınca karşı verdiği tepkinin azaldığı ancak doğrusal karakteristiğini korumaya meyletmesi sebebiyle doğrusal modellenebilir yapıya uygun olduğu ve ihtiyaca göre güvenilir çalışma aralıkları sunabileceği değerlendirilmiştir.

S1 – 2d sensörünün sensör testlerinin başlangıç gününde (T0) test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 27’de sunulmuştur. Hassasiyet değeri H1 basınç aralığında 0.02366 kPa^{-1} olarak hesaplanmıştır ve S1-d’nin T0 ölçümüne (0.10965 kPa^{-1}) kıyasla kayda değer derecede düşük çıkmıştır. Ayrıca sensörün doğrusallığı bu basınç aralığında kabul edilebilir seviyede ancak düşük çıkmıştır. Bölgede sensör tam olarak doğrusal değildir ancak doğrusala kısmen yakın nitelik göstermektedir. H2 bölgesinde hassasiyet değeri H1’e oranla yaklaşık 10 kat azalmıştır. Bu durum sensör hassasiyetinin azaldığını ancak bu bölgede sensörün doğrusal çalıştığını ($R^2 = 0.979$) ve doğrusal olarak modellenebilir seviyede olduğunu göstermektedir. H2 bölgesi ile benzer olarak H3 bölgesinde de hassasiyet düşük çıkmıştır ancak sensör doğrusal yapıdadır ve doğrusal denklemlerle ifade edilebilirliği yüksek bir potansiyel taşımaktadır.

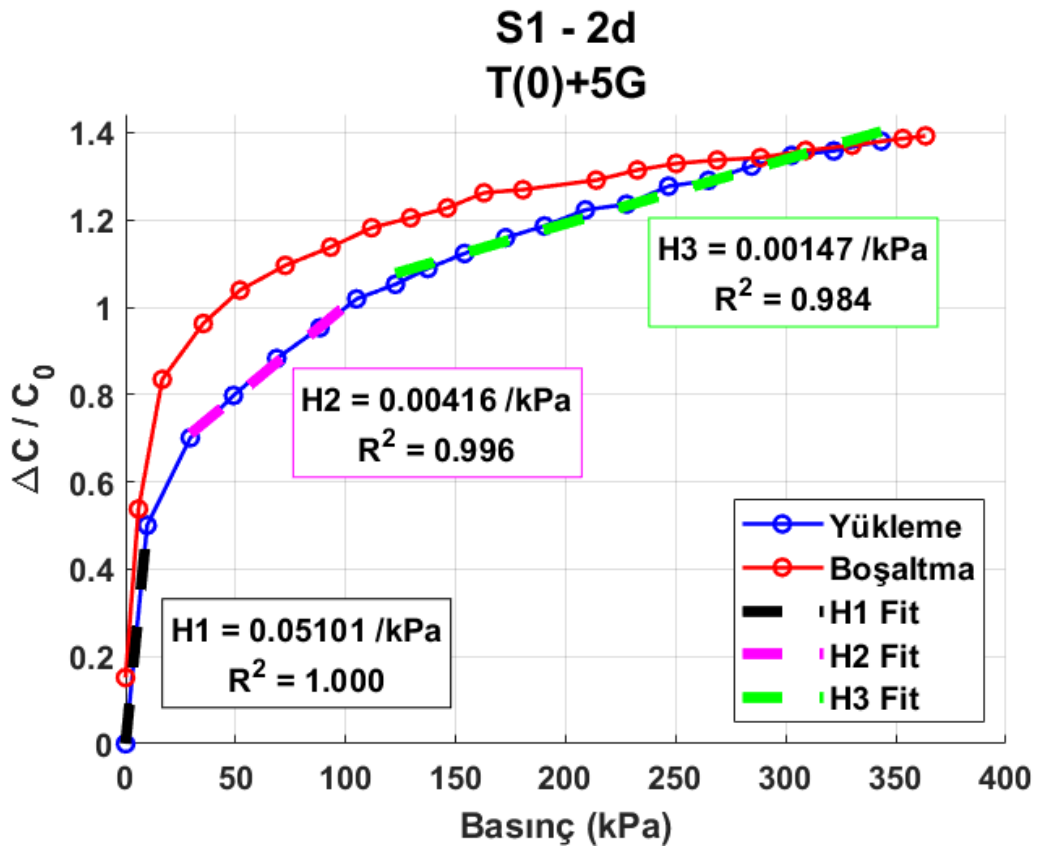


Şekil 27. S1-2d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

T0’da elde edilen S1 – 2d sensörüne ait verilerin iki basınç bölgesine ayrılarak incelenmesi Şekil 27-b’de verilmiştir. Bunun yapılmasındaki en büyük etken Şekil 27-a’daki H2 ($R^2 = 0.979$) ve H3 ($R^2 = 0.973$) bölgelerinin her ikisinin de yüksek ve birbirine yakın doğrusallıkta olmasından kaynaklanmaktadır. H2 ve H3 bölgelerinin tek bir bölgede birleştirilmesi sensörün kullanım ihtiyacına göre [67]’deki çalışma ile paralel olarak daha geniş basınç aralıklarında çalışmaya ve doğrusal olarak modellenebilirliğe müsait olduğunun bir göstergesidir. Grafik, öncesinde de belirtildiği gibi basınç bölgeleri 0 – 30 kPa ve 30 – 400 kPa olmak üzere sırasıyla H1 ve H2 bölgelerine ayrılmışlardır. H1 bölgesi 27-a’daki basınç aralığı ile aynı basınç aralığında olduğu için bu bölge için hassasiyet ve doğrusallık analizi Şekil 27-a’daki ile aynıdır. H2 bölgesindeki hassasiyet değerine bakılacak olursa bu bölge hassas görünmemektedir ve sensör bu bölgede kayda değer seviyede düşük tepkiler vermektedir ancak doğrusallık incelendiğinde 30kPa – 400 kPa aralığı gibi geniş bir basınç aralığında sensörün iyi bir doğrusal nitelik taşımakta olduğu görülmektedir. Bu tür geniş basınç aralıklarında sensörün doğrusal bir modelle ifade edilebilmesi sensörün çalışma performansı, güvenilirliği ve doğruluğu açısından önemli bir etmendir[61].

Sensörün T0+5G’de test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 28’de gösterilmiştir. H1 bölgesinde dikkat çekici husus hassasiyet değerinin 0.05101 kPa^{-1} ve iki ölçüm noktası bulunmasından dolayı R^2 değerinin 1.00 çıkmış olmasıdır. Doğrusallık her ne kadar iyi çıkmış görünse de bu bölge için daha fazla ölçüm verisinin alınması ile daha sağlıklı değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Hassasiyet değeri bu aralıkta S1 – 2d sensörünün T0’da (0.02366 kPa^{-1}) alınan ölçümünde hesaplanan hassasiyet değerinden yüksek

çıkıştır. Değerlerin bu şekilde çıkması sensörün 0 – 10 kPa basınç aralığında iyi bir hassasiyet ile çalışma niteliğinde olduğunu göstermektedir. H2 bölgesinde hassasiyet değeri 0.00416 kPa^{-1} , R^2 değeri olarak 0.996 gibi yüksek doğrusallık hesaplanmış olup bu bölgede sensörün hassasiyeti her ne kadar düşüş yaşamış olsa da sensör doğrusallıktan ödün vermemiştir. H3 bölgesinde sensörün basınç değişimlerine karşı duyarlılığı bu bölgede fark edilir biçimde azalmıştır ancak sensör doğrusal tutum yansıtmaya devam etmiştir.

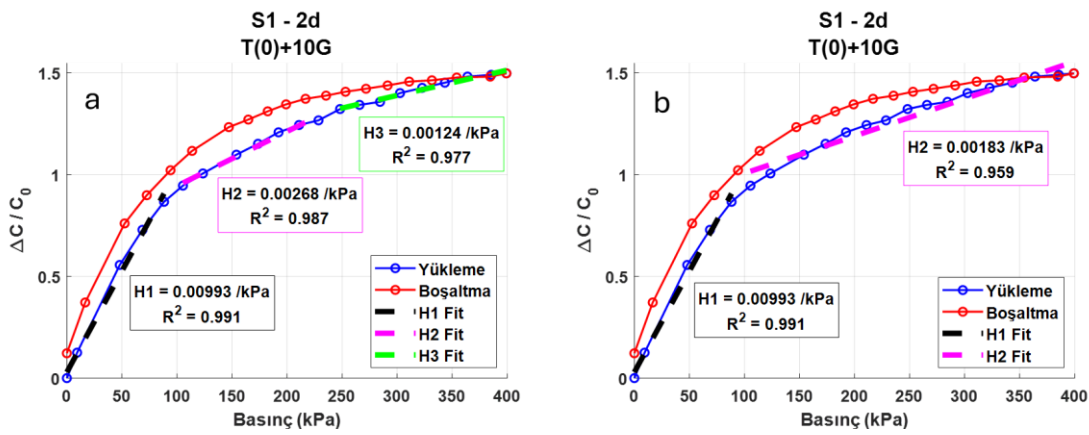


Şekil 28. S1-2d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Sensörün onuncu günde (T0+10G) yapılan testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 29’da gösterilmektedir. Şekil 29’a da sensör üç basınç bölgesinde incelenmiş olup H1 bölgesindeki hassasiyet çok düşük çıkmıştır ve 0.00993 kPa^{-1} olarak bulunmuştur. Bu bölgede doğrusallık 0.991 olarak hesaplanmıştır. H1 bölgesinde sensör düşük hassasiyet, yüksek doğrusal bir karakteristik göstermektedir. H2 bölgesinde hassasiyet değeri H1’e oranla yaklaşık dörtte birine düşmüştür ancak R^2 değeri dikkate alındığında (0.987) sensörün bu bölgede doğrusal seyir göstermeye çalıştığı söylenebilir. H3 bölgesi en düşük

hassasiyete sahiptir. Bu durum S1 – d’de anlatılanlar ile paralel olarak zaman geçtikçe sensör malzemesinin rijit forma dönüşmesi ve fiziksel baskı ile daha az sıkıştırılabilmesi ile açıklanabilir [68–70]. H3 bölgesinde sensör H2 bölgesine benzer şekilde basınca karşı duyarlılığını önemli ölçüde kaybetmiştir ancak lineer özellik devam etmektedir.

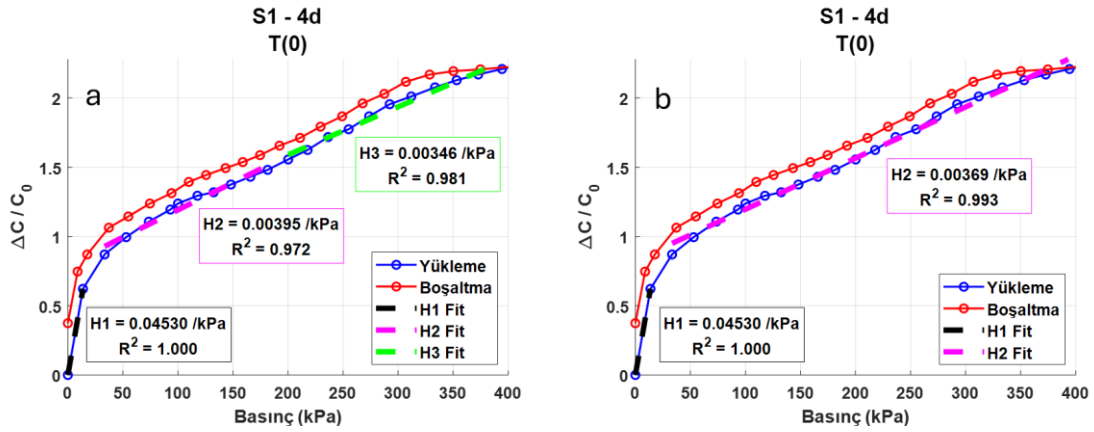
Sensörün iki basınç bölgesinde modellenebileceği Şekil 29-b’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde H2 bölgesindeki sensör hassasiyetinde, üç bölgeli modellemedeki H2 bölgesine göre azalış olduğu görülmektedir ancak iki basınç bölgesi ile modellenen grafikteki H2 bölgesinin daha geniş basınç aralığına sahip olduğu göz ardı edilmemelidir.



Şekil 29. S1-2d (T0+10G); a) üç bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

S1 – 4d sensörünün T0’da gerçekleştirilen testlerinden elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 30’da verilmiştir. H1 bölgesinin hassasiyeti 0.04530 kPa^{-1} , R^2 değeri 1.00 olarak hesaplanarak Şekil 30-a’da gösterilmiştir. Sensör bu bölgede S1-d’nin T0’da ve H1 bölgesindeki hassasiyet değeri (0.10965 kPa^{-1}) ile karşılaştırıldığında daha az hassas, S1-2d’nin T0’da aynı bölge için hesaplanan hassasiyet değerine (0.02366 kPa^{-1}) ile kıyaslandığında ise daha hassas olduğu görülmüştür. R^2 değerinin 1.00 olmasının nedeni H1 bölgesi için seçilen basınç aralığında ölçüm noktası sayısının iki olmasıdır. H2 bölgesi incelendiğinde H1 basınç bölgesine göre hassasiyet değerinin 10 kattan fazla düşmüş olduğu görülmektedir. Bu bölgede sensör doğrusal olarak kabul edilebilir. H3 bölgesinde elde edilen sonuçlar göstermektedir ki sensör duyarlılığının azalması ile basınç tepkilerine sınırlı cevap verilmektedir ancak doğrusallık artış yönünde seyretmiştir. Bu durumda sensörün düşük hassasiyete sahip olduğu ancak bu bölgede doğrusal tepkiler verebilir nitelikte olduğu görülmektedir.

Sensörün T0'da iki basınç bölgesine ayrılarak gerçekleştirilen analizi Şekil 30-b'de gösterilmektedir. Burada amaç önceden de bahsedildiği gibi doğrusal bölge alanını genişletmek hatta mümkünse hassasiyet değerini de birleşen bölgeler için arttırmaktır. Ancak hassasiyet ve doğrusallık arasında hassas bir denge bulunmaktadır. Bu dengede yüksek basınç aralıklarında doğrusallık arzu edilirse hassasiyetten taviz vermeyi gerektirebilir [71,72]. H1 bölgesi, üç bölgeli analizle aynı olarak 0 – 30 kPa basınç aralıklarını kapsamaktadır ve üç bölgeli grafikteki değerlendirme burası için de aynen geçerlidir. H2 bölgesi ise 30 – 400 kPa arasındaki basınç aralığında değerlendirilmekte ve bu bölgede hassasiyet 0.00369 kPa^{-1} , R^2 değeri 0.993 olarak hesaplanmaktadır. Değerlerden de anlaşılacağı üzere sensörün lineer çalıştığı aralık genişletilmiş ancak bu defa hassasiyetten ödün verilmiştir. Sensör kullanım alanına ve ihtiyaç durumuna göre bu denge iyi bir şekilde optimize edilmelidir.

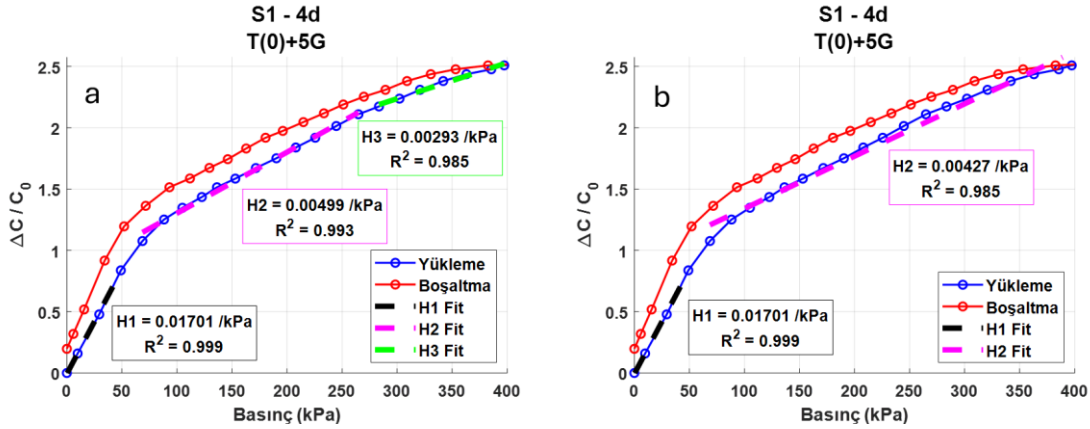


Şekil 30. S1-4d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Beşinci gün ölçümlerinde (T0+5G) S1 – 4d sensörünün basınca göre kapasitans değişim grafiği Şekil 31'de verilmiştir. H1 bölgesi, Şekil 31-a'da belirtildiği üzere 0.01701 kPa^{-1} ile düşük hassasiyet göstermiştir. H2 bölgesinde artan basınç ile hassasiyet düşmüş ancak iyi bir doğrusallık sergilemektedir. H3 basınç aralığında duyarlılık dikkat çekici biçimde azalmış ancak sensör doğrusal özelliğine devam etmektedir.

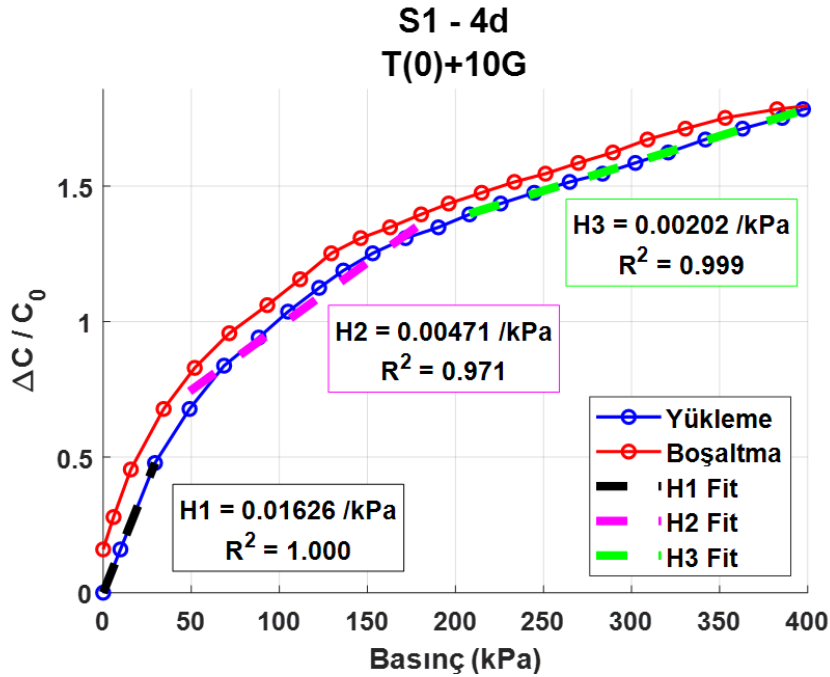
S1 – 4d sensöründen T0+5G'de elde edilen sonuçlar iki basınç bölgesinde de analiz edilmiş ve Şekil 31-b'de verilmiştir. H1 aralığındaki değerlendirmede, üç bölgeli modellemeye H1 bölgesi basınç aralığının aynı olmasından dolayı aynı sonuçlar elde edilmiştir. H2 bölgesi üç basınç bölgeli grafik ile değerlendirilecek olursa, H2

bölgesindeki hassasiyet değerinden feragat ederek H3 ile birleştirilmiş ve 50 – 400 kPa basınç aralıklarında geniş ve lineer bir tepki elde edilmiştir.



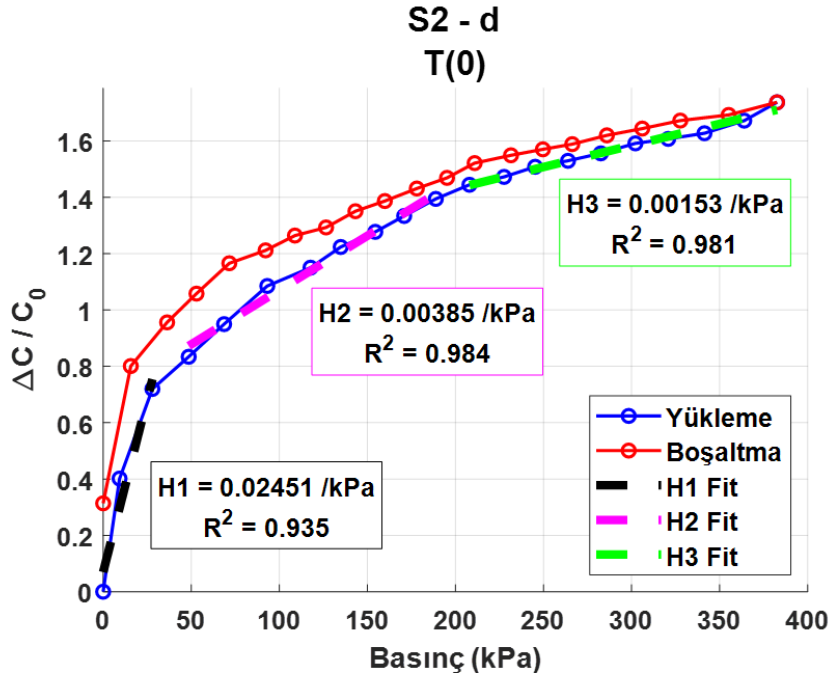
Şekil 31. S1-4d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Sensör T0+10G’de test edilmiş ve sonuçları Şekil 32’de verilmiştir. H1 bölgesinde sensörün hassasiyet konusunda geliştirilebilir olduğu görülmüştür [72]. H2 basınç bölgesinde sensör hassasiyeti artan basınç ile düşüşe geçmiştir ancak sensör kendisini lineer bölgede tutmayı başarmıştır. H3 bölgesinde sensör çok iyi bir lineer trend yakalamıştır. Bu bölgede sensör hassasiyeti bariz bir şekilde düşüş yaşamıştır.



Şekil 32. S1-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Genel olarak S1 sensörüne ait d, 2d ve 4d malzeme katman kalınlıklarındaki tasarımların kapasitans performansları incelendiğinde aynı basınç altındaki kapasitans tepe değerlerinin malzeme katman kalınlığı arttıkça azaldığı görülmüştür. Sensörün düşük basınçlarda iyi tepkiler verebildiği ve doğrusallığın hemen hemen her basınç aralığında iyi oranda sağlanabildiği görülmüştür. Ancak önemle vurgulanması gereken hususlardan birisi de R^2 değerinin düşük basınç değerlerinde yüksek çıkmasının nedenlerinden biri de bazı sensörler için iki ölçüm noktasına dayalı olarak lineer uydurma yapılmasıdır. Çevresel şartların etkisi ile sensörde yaşanan ağırlık kaybı neticesinde sensörün daha kararlı ve oturmuş bir yapıya geçtiği ancak sensör duyarlılığının yavaşladığı tespit edilmiştir. Fark edilen önemli hususlardan biri de sensör malzeme kalınlığının hassasiyet ile ilişkisidir. İnce malzemenin kullanıldığı d kalınlıktaki tasarımda sensör hassasiyeti yüksek çıkmıştır ve kalınlığın artması ile hassasiyet önemli ölçüde azalmıştır. Ancak malzeme kalınlığının arttırılması belli bir kalınlık seviyesinden sonra hassasiyeti olumlu yönde de etkileyebilmektedir. Bu durum esnek kapasitif basınç sensörlerinde iyi hassasiyet değerinin malzemeye göre optimum malzeme kalınlığı ile sağlanabileceğini göstermektedir [64,73,74]. Bu nedenle kullanım alanı veya ihtiyaç durumuna göre tasarlanacak kapasitif basınç sensörünün hassasiyeti malzemedeki PVA: Boraks oranı ve katman kalınlığı ile optimize edilmelidir.

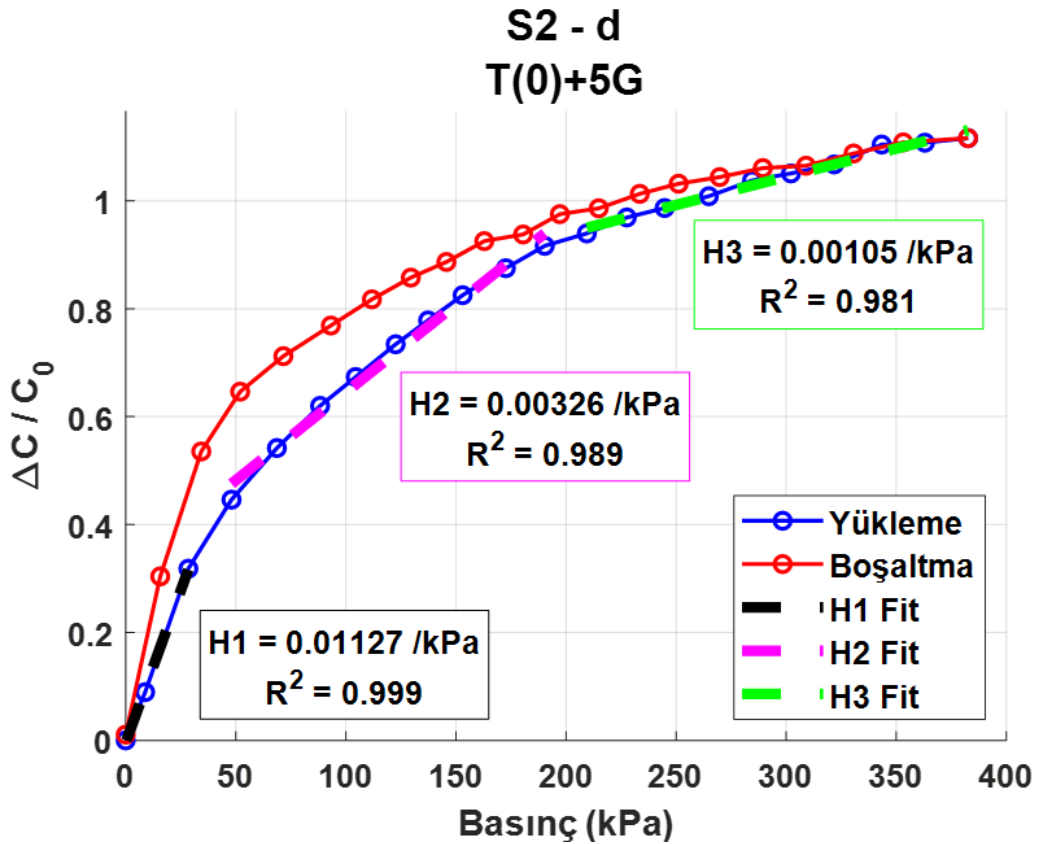


Şekil 33. S2-d (T0); basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

PVA sensör tasarımlarından S2-d sensörünün T0 zamanında gerçekleştirilen testler ile elde edilen sonuçları Şekil 33'te verilmiştir. S2 – d sensörünün T0'daki kapasitans değişiminin S1 – d sensörünün T0'daki kapasitans değişiminden daha küçük çıktığı görülmektedir. Bu duruma neden olan etkenin sensör malzemesindeki PVA ve Boraks karışım oranları olduğu düşünülmektedir. S1 sensörü 1 g Boraks çözeltisi ile hazırlanmışken S2 sensörü 2 g Boraks çözeltisi ile hazırlanmıştır. Malzemedeki Boraks oranı arttıkça, oluşturulan çapraz bağ sayısı da artmakta bu da malzemenin esnekliğini azaltan yönde bir etki yaratmaktadır [75,76]. Bu nedenle S2 sensörü, S1 sensörüne kıyasla, malzemedeki Boraks miktarının daha yüksek olması ve daha çok çapraz bağ yapması nedeniyle daha az esnek yapıda olup basınca karşı malzemenin esneme miktarı daha azdır. H1 bölgesi, T0'da S1-d'nin aynı bölgedeki hassasiyeti (0.10965 kPa^{-1}) ile karşılaştırıldığında hassasiyet değerinin dikkat çekici bir şekilde düşük çıktığı görülmektedir. Sensör bu bölgede göreceli olarak doğrusallığa yakın bir tutum göstermektedir. H2 bölgesinde basınç değerinin artması ile sensör hassasiyeti gözle görülür şekilde azalmıştır ancak sensör doğrusallığı bu bölgede olumlu yönde seyretmiştir. Sensörün bu bölgede H1 bölgesine göre daha doğrusal özellikte olduğu görülmektedir. H3 bölgesinde hassasiyet H2 bölgesine göre yaklaşık olarak yarı yarıya

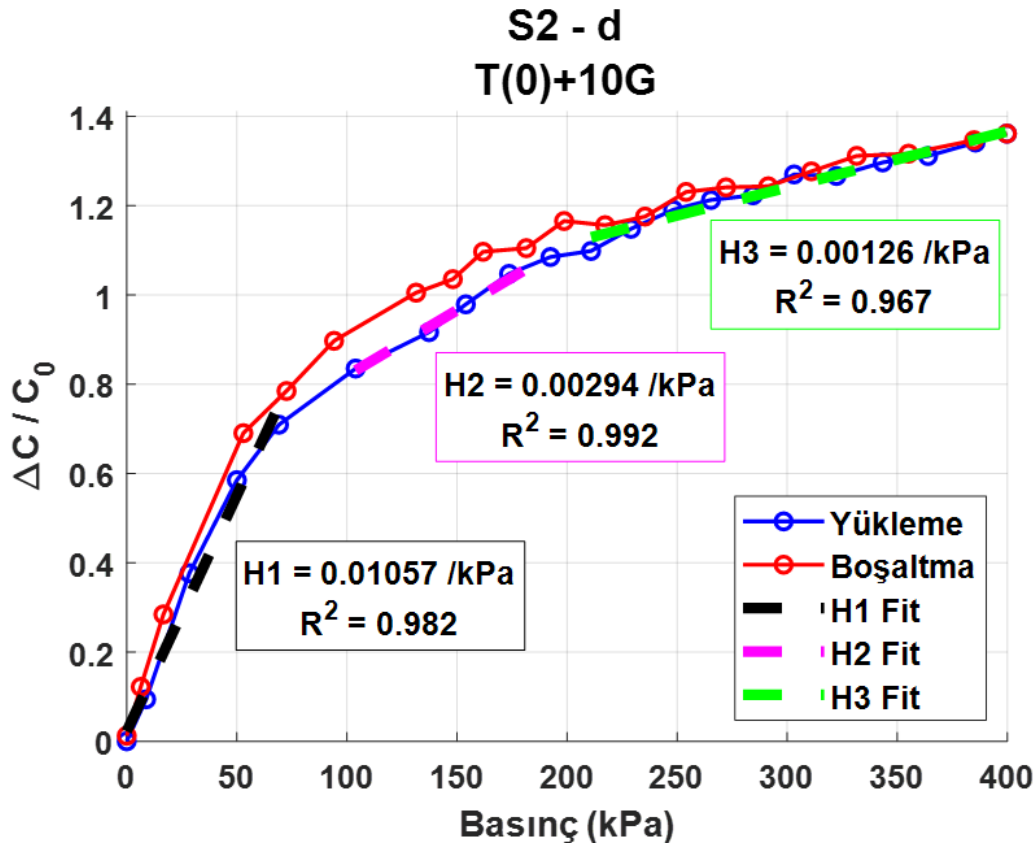
azalmış ve sensörün basınca göre verdiği tepkiler yavaşlamıştır. Bu bölgede sensör doğrusal modelini korumaya devam etmiştir.

S2 – d sensörünün testlerin beşinci gününde (T0+5G) alınan ölçüm sonuçları Şekil 34’te belirtilmiştir. Sensörün T0’da H1 bölgesindeki hassasiyeti (0.02451 kPa^{-1}) ile değerlendirildiğinde T0+5G’de hassasiyet düşük çıkmıştır, R^2 değeri ölçüm sayısının ilgili basınç değerlerinde düşük olmasından dolayı 0.999 çıkmıştır. H2 bölgesinde hassasiyet, artan basınçlarda bariz bir şekilde düşmüştür ancak sensör artan basınçlarda doğrusallığını korumaya devam etmektedir. H3 bölgesinde hassasiyet, yüksek basınçlarda iyice azalmış olup sensörün artan basınç değerlerine karşı kapasitans duyarlılığının durağanlaştığı görülmektedir. Sensör bu bölgede doğrusallık yönünden incelenecek olursa yüksek basınç değerlerinde de sensörün doğrusal performansı nitelendirilebilir. Özellikle doğrusallık değerlendirmesinden çok sayıda ölçüm noktasının yer alması verinin güvenilirliğini arttıracak parametrelerden bir olarak değerlendirilmiştir. H1 bölgesindeki ölçüm sayıları az olduğundan R^2 değerinin yüksek çıkması beklenmektedir, ancak daha hassas ölçümlerle veri sayısının artırılması daha güvenilir sonuçlara yönlendirebilir.



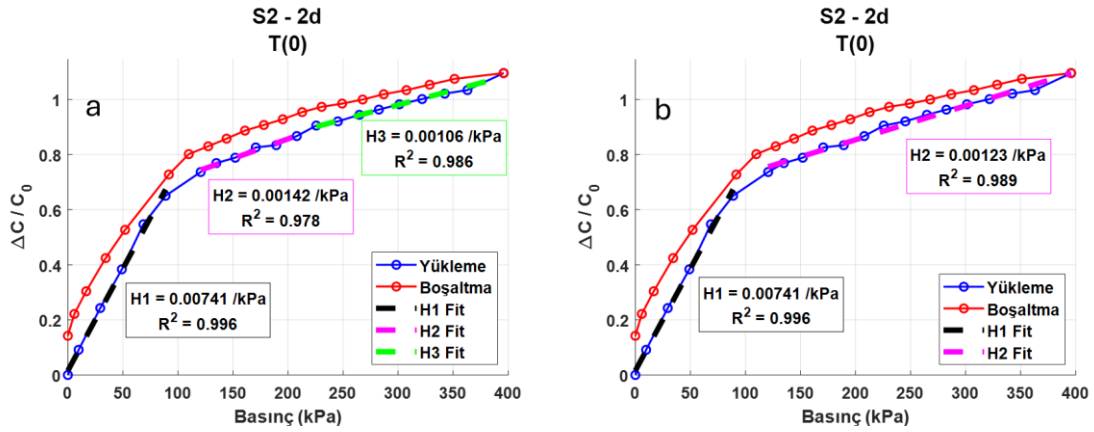
Şekil 34. S2-d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Sensör testlerinin T0+10G zamanında S2 – d sensörüne ait ölçüm sonuçları Şekil 35’te verilmiştir. H1 bölgesinde hesaplanan hassasiyet değeri aynı bölgede T0 (0.02451 kPa⁻¹) ve T0+5G’ye (0.01127 kPa⁻¹) göre daha düşük çıkmıştır ancak H1 bölgesinin T0 ve T0+5G’deki H1 bölgelerinden daha geniş basınç aralığına sahip olduğu göz ardı edilmemelidir. Hesaplanan R² değeri (0.982) ile sensörün H1 bölgesinde doğrusal eğilimde olduğu görülmektedir. H2 basınç aralığında sensör hassasiyeti 0.00294 kPa⁻¹, R² değeri ise 0.992 olarak hesaplanmıştır. Hassasiyet artan basınç aralıklarında düşüş eğilimi göstermiş ancak doğrusallık artarak korunmuştur. T0 (0.00385 kPa⁻¹) ve T0+5G (0.00325 kPa⁻¹) için alınan H2 bölgesindeki hassasiyetler değerlendirildiğinde T0+10G’de alınan hassasiyetin diğerlerinden daha düşük çıktığı ancak sensörün bu bölgede daha doğrusal özellik yansıttığı görülmüştür. H3 bölgesindeki hassasiyet ve doğrusallık hesaplamaları neticesinde sensörün bu basınç aralıklarında düşük hassasiyet gösterdiği ve doğrusala yakın tutum yansıttığı görülmüştür.



Şekil 35. S2-d (T0+10G); basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

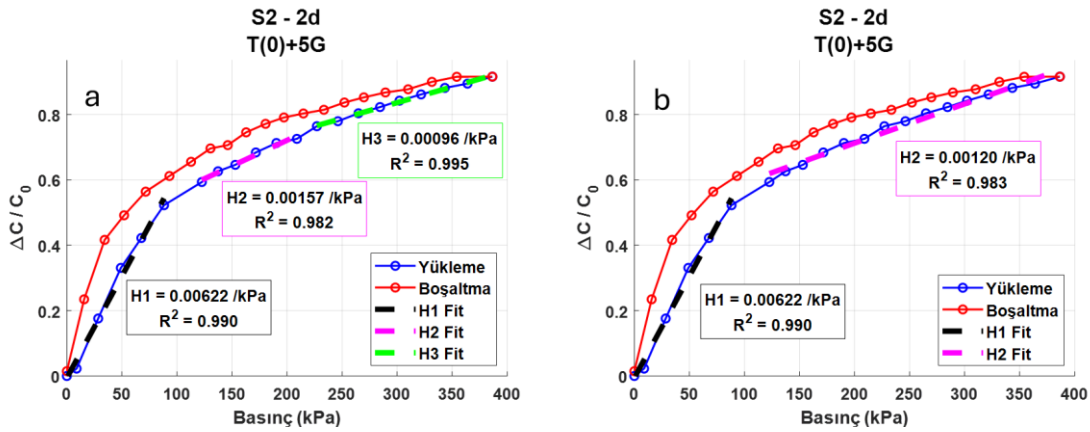
Şekil 36’da S2 – 2d sensörünün T0 başlangıç zamanda yapılan testler sırasında alınan ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekil 36-a’da belirtilen grafikte S2 – 2d sensörünün H1 bölgesindeki hassasiyet değeri, S2 – d sensörünün T0’daki ölçümlerinde H1 bölgesinde hesaplanan hassasiyet değeri (0.02451 kPa^{-1}) ile karşılaştırıldığında hassasiyetin düşük çıktığı görülmüştür ancak bu noktada S2-2d sensörünün H1 aralığının daha geniş basınç aralığına sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 36. S2-2d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

Sensör H1 aralığında iyi derecede doğrusal davranış göstermektedir ($R^2 = 0.996$). H2 bölgesindeki hassasiyet değerinde, H1 bölgesine kıyasla yaklaşık beş katından fazla düşüş görülmüştür. Doğrusallık tutumu da azalmış olmasına rağmen bu aralık için sensörün doğrusala yakın özellik sergilediği söylenebilir. H3 bölgesinde sensör duyarlılığının azalmış olmasına rağmen sensör doğrusallığı artış eğilimi göstermiştir. Sensör basınç değerine göre iki bölgeye ayrılmış ve geniş basınç aralıklarında da çalışma sunabileceği değerlendirilmiş ve iki bölge modeline ait grafik Şekil 36-b’de verilmiştir. H1 bölgesi analizi, üç bölge modellemedeki H1 bölgesi ile aynıdır. H2 bölgesi, üç bölge modelleme ile analiz edildiğinde sensör hassasiyeti artan basınç ile düşmüştür ancak iki bölge modellemede sensör geniş basınç aralıklarında yüksek doğrusallık ile çalışabilmektedir.

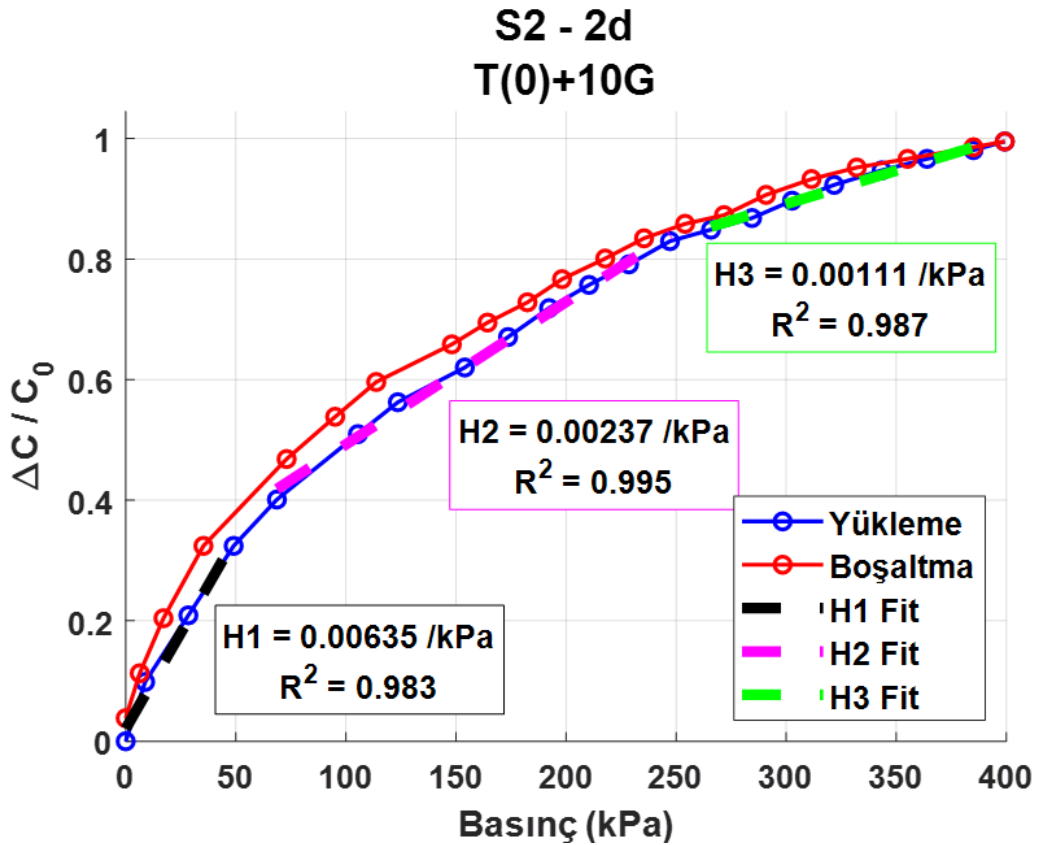
T0+5G zamanında S2 – 2d sensörü ile alınan ölçümlere ait sonuçlar Şekil 37’de belirtilmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere aynı sensörün T0 ölçümüne göre kapasitans değişimi daha düşük seyretmiştir. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi sensör malzemesinin ağırlık kaybederek daha katı bir hale dönüşmüş olduğunun düşünülmesidir. Şekil 36-a’daki grafik incelendiğinde H1 bölgesindeki hassasiyet değeri, aynı sensörün T0’da hesaplanan hassasiyet değerinden (0.00741 kPa^{-1}) daha düşük bulunmuştur. Hesaplanan doğrusallık değeri göz önünde bulundurulduğunda sensör bu basınç aralığında doğrusal özellik göstermektedir. Sensörlerin geniş basınç aralığında kayda değer bir hassasiyetle doğrusal özellik göstermeleri elektronik devre tasarımında önemli kolaylıklar sağlayabilmektedir.



Şekil 37. S2-2d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

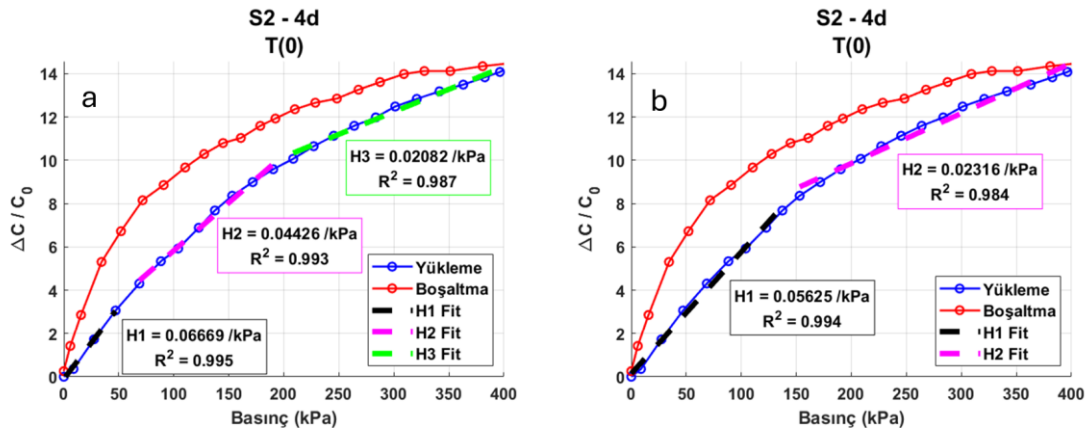
H2 bölgesindeki hassasiyet değeri artan basınç değerlerinde H1 bölgesine göre yaklaşık dört kat düşüş göstermiş olmasına rağmen hesaplanan R^2 (0.982) değerinden de anlaşılacağı üzere sensör doğrusal davranış gösterme eğilimindedir. H3 bölgesinde sensör doğrusallığı her ne kadar iyi olarak nitelendirilse de sensörün bu basınç aralığında düşük duyarlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Sensörün iki bölge modellemesi Şekil 37’b’de verilmiştir. H1 bölgesi üç bölge modellemedeki aynı basınç aralığına sahip H1 bölgesi ile aynı hassasiyet ve doğrusallık değerine sahiptir. H2 bölgesinde ise sensör üç bölge modellemedeki grafik ile karşılaştırıldığında sensör hassasiyeti artan basınç ile düşmüştür. Buna rağmen iki bölge ile modellenmiş grafikte sensör geniş basınç aralıklarında doğrusal bir şekilde çalışabilmektedir.

S2 – 2d sensör ölçümlerinin T0+10G’de elde edilen sonuçları Şekil 38’te verilmiştir. H1 bölgesinde hassasiyet değeri T0’da H1 basınç bölgesinde hesaplanan basınç değerinden (0.00741 kPa^{-1}) düşük ancak T0+5G’de H1 basınç bölgesindeki hassasiyet değerinden (0.00622 kPa^{-1}) yüksek çıkmıştır. T0+5G’den yüksek çıkmasının sebebi H1 bölgesinde uygulanan basınç aralığının T0+10G’de daha dar aralıklarda alınmasından kaynaklanmaktadır. Bu bölge için doğrusallık T0 ($R^2 = 0.996$) ve T0+5G’ye ($R^2 = 0.990$) göre düşük çıkmış olmasına rağmen sensör bu bölgede doğrusal olarak nitelendirilebilir. H2 bölgesinde hesaplanan hassasiyet değeri H1 bölgesine oranla yaklaşık üçte birine düşmüştür ancak bu bölgede T0 ($R^2 = 0.978$) ve T0+5G ($R^2 = 0.982$) ölçümlerindeki doğrusallıktan daha yüksek bir doğrusallık değeri ile sensör bu basınç aralıklarında lineer yönelim sunmuştur. H3 bölgesi incelendiğinde sensör hassasiyetinin düştüğü, doğrusallığın korunduğu görülmektedir.



Şekil 38. S2-2d (T0+10G); basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

Sensör testlerinin başlangıcında (T0) S2 – 4d sensöründen elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 39’da verilmiştir. Şekil 39-a’daki H1 bölgesi sensör hassasiyet değeri S2-d (0.02451 kPa^{-1}) ve S2 – 2d (0.00741 kPa^{-1}) tasarımlarının T0’da yakın bölgeler ile değerlendirildiğinde S2 – 4d sensörünün hassasiyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum S2 malzemesinin 4d kalınlık ile daha iyi uyum sağladığını ve optimum kalınlık değerinin 4d civarlarında olduğunu gösterebilir nitelik taşımaktadır. Üstelik sensör düşük basınç bölge aralığı olan H1’de $0.995 R^2$ değeri ile iyi bir lineer davranış göstermektedir. H2 bölgesinde basınç değerinin artması ile sensör hassasiyetinde düşüş yaşanmış olsa da bu bölgede tüm sensörler arasında en iyi performansı S2 – 4d sensörü göstermiştir. Sensör bu aralık içinde lineer ($R^2 = 0.993$) seyir yansıtmaya devam etmektedir. Her ne kadar sensör hassasiyeti H3 bölgesi için düşmüş görünse de S2 – d (0.00153 kPa^{-1}) ve S2 – 2d (0.00106 kPa^{-1}) sensör tasarımları ile yakın bölgelerdeki sensör hassasiyeti kıyaslandığında S2 – 4d sensörünün T0’da daha yüksek hassasiyet değerine sahip olduğu görülmektedir. Sensör H3 basınç aralığında doğrusal olarak kabul edilebilir düzeyde karakteristik sunmaktadır.

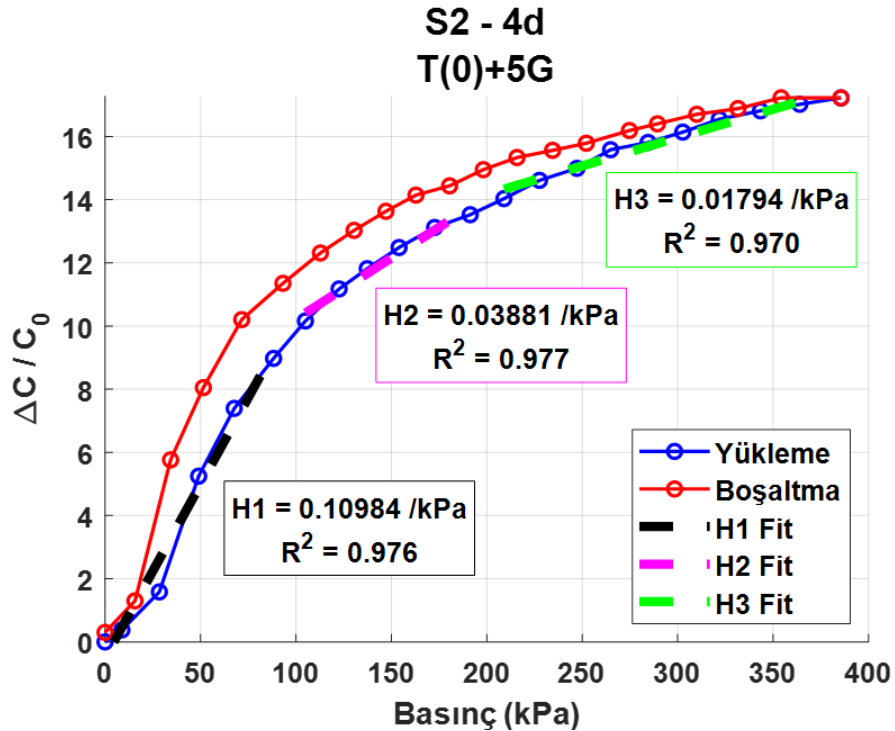


Şekil 39. S2-4d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Sensörün iki bölge modelinde H1 bölgesindeki hassasiyeti 0.05625 kPa^{-1} , R^2 değeri 0.994 olarak hesaplanarak Şekil 39-b’de gösterilmiştir. Sensörün, S2-d ve S2-2d sensörlerine göre hem daha geniş bir basınç aralığında çalışabildiği hem de hassasiyet değeri olarak S2-d (0.00153 kPa^{-1}) ve S2-2d (0.00123 kPa^{-1}) sensöründen daha yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bu bölgede sensörün doğrusal özellikte olduğu nitelendirilebilir. H2 bölgesi sensör hassasiyeti H1 bölgesi sensör hassasiyetine göre düşüş yaşamıştır ancak S2-d (0.00385 kPa^{-1}) ve S2-2d (0.00142 kPa^{-1}) sensörleri göz

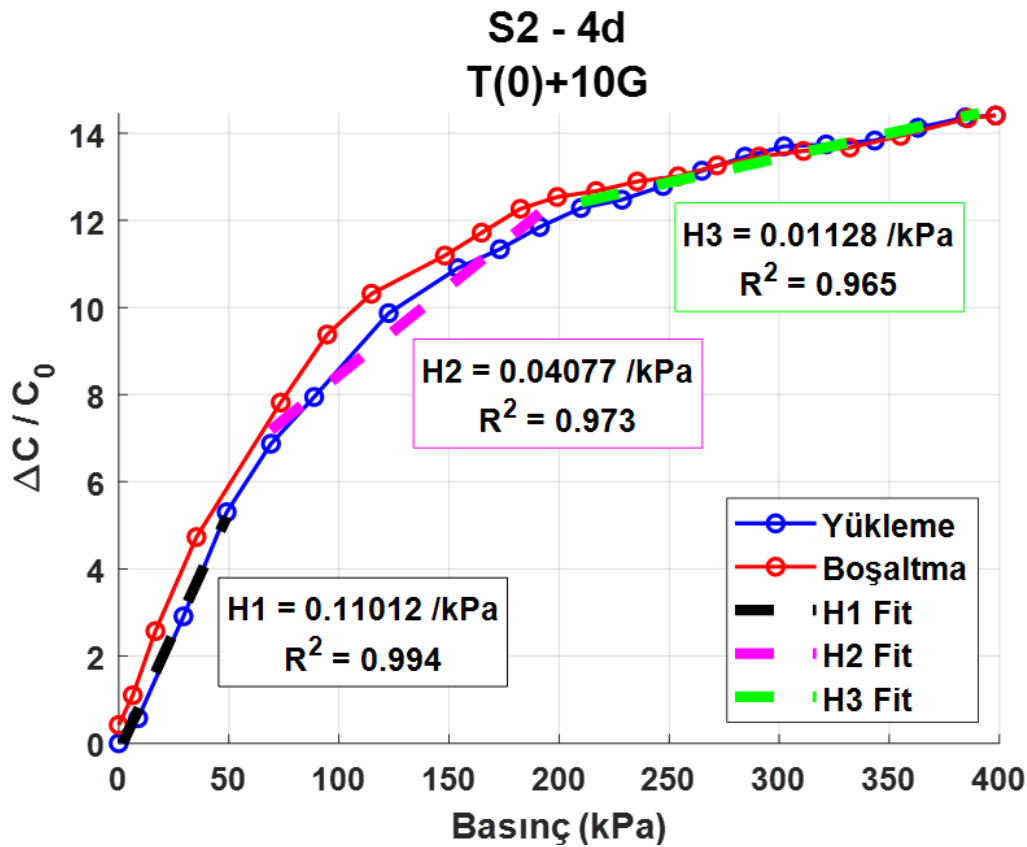
önüne alındığında sensörün bu bölgede S2-d ve S2-2d'den daha iyi hassasiyet performansı sergilediği görülmektedir.

T0+5G'de S2 – 4d sensörünün test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 40'ta verilmiştir. H1 bölgesinde sensör hassasiyet değerinin bu noktaya kadar anlatılan diğer tüm ölçümlere göre bu kadar yüksek çıkması sensör malzemesinin 4d kalınlık ile optimum uyum sağladığını düşündürmektedir [64,73,74]. S2 – 4d sensörü için T0'da hesaplanan hassasiyet değerinin de bu noktaya kadar anlatılan diğer ölçümlerden yüksek çıkması bu durumu desteklemektedir. S1-d, S1-2d, S1-4d, S2-d, S2-2d ölçümlerinde zamana bağlı olarak hesaplanan hassasiyet değeri azalmakta iken S2-4d'de hassasiyet değerinin zamanla arttığı görülmüştür. Bu durum için sensör malzemesi ile sensör kalınlığının optimize edilmiş tasarımında, zamanla sensör malzemesinin ağırlık kaybederek daha kararlı bir yapı sergilediği ve buna bağlı olarak sensör kapasitansındaki hassasiyet değerinin arttırdığı düşünülmektedir. Sensör doğrusallığı için R^2 değeri (0.976) göz önünde bulundurulduğunda bu aralıkta sensörün doğrusala yakın performans sunduğu görülmektedir. H2 ve H3 bölgesi bölgeleri incelendiğinde basıncın artması ile sensör duyarlılığı azalmıştır. Bu bölgelerde sensör doğrusallığını göreceli olarak korumuştur.



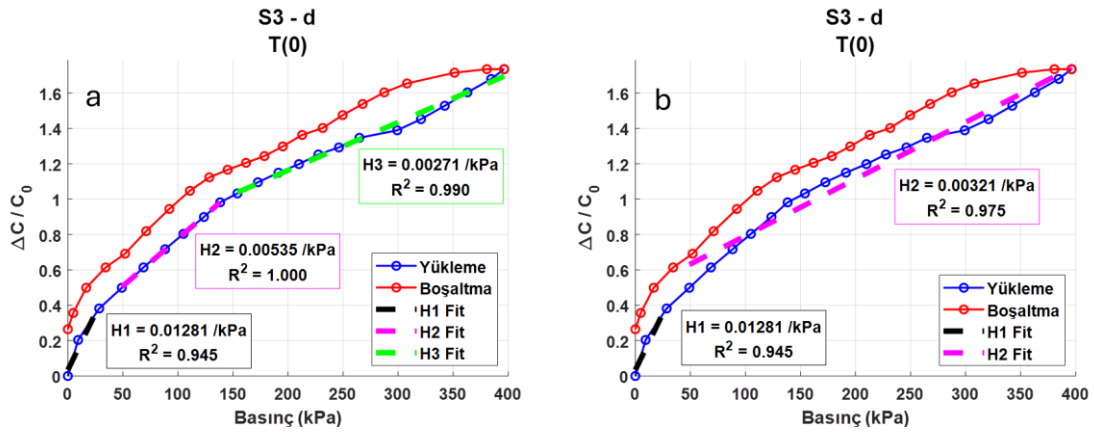
Şekil 40. S2-4d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

Şekil 41’de S2 – 4d sensörünün T0+10G’de test edilmesi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. H1 bölgesi için T0+5G’deki ölçüm sonuçlarındaki görüğe paralel olarak, malzemenin optimum çalıştığı kalınlıklarda tasarım yapılarak sensör optimizasyonu sağlandığında, zamanla malzemenin daha kararlı yapıya geçmesi ile sensör yapısındaki kapasitans hassasiyetinde iyileşmeler olabileceği düşünülmektedir. T0+5G ve T0+10G’den elde edilen sonuçlar bu durumu destekler niteliktedir. Her ne kadar sensör hassasiyeti T0+10G’deki ölçümde T0+5G’den yüksek çıkmış olsa da T0+10G’de H1 bölgesinin 0 – 50 kPa, T0+5G’de ise H1 bölgesinin 0-90 kPa basınç aralıklarında analiz edildiği göz ardı edilmemelidir. Sensör bu bölgede iyi bir doğrusallık ($R^2 = 0.994$) göstermiştir. H2’de hesaplanan hassasiyet değeri aynı bölgede T0’da hesaplanan hassasiyet değerinden (0.04426 kPa^{-1}) düşük çıkmıştır. H2 bölgesinde sensör doğrusala yakın tepki vermiştir. H3 bölgesinde sensör hassasiyeti ve doğrusallığı H2 bölgesine göre azalmıştır.



Şekil 41. S2-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

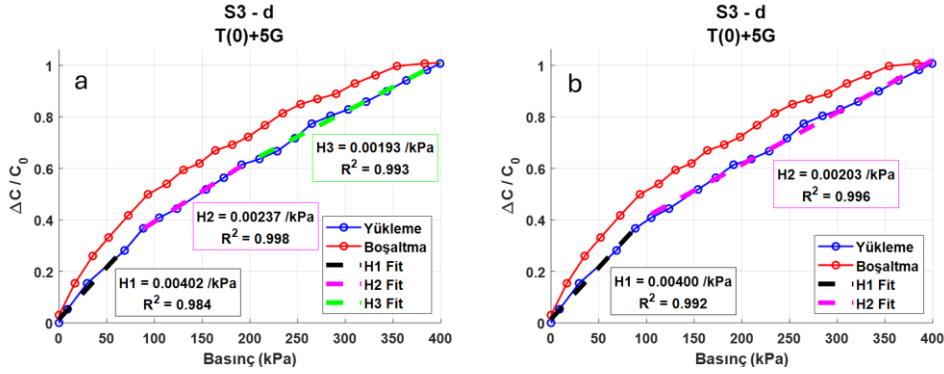
S3 – d sensörünün T0 zamanında alınan ölçümlerine göre Şekil 42-a’da H1 bölgesi hassasiyet değerinin, S1-d (0.10965 kPa^{-1}) ve S2-d (0.02451 kPa^{-1}) sensörlerinin T0’da H1 bölgesi için alınan hassasiyet değerlerinden daha az olduğu görülmüştür. Doğrusallık açısından incelendiğinde bu bölgede S1-d T0 ölçümünden ($R^2 = 0.921$) ve S2-d T0 ($R^2 = 0.935$) ölçümünden yüksek çıkmıştır. Sensör H1 bölgesinde doğrusala yakın eğilimler göstermektedir. H2’de sensör hassasiyeti yaklaşık olarak yarıya düşmüş olsa bile sensör bu bölgedeki ölçüm verilerine göre iyi bir doğrusal ($R^2 = 1.00$) eğilim sergilemiştir. H2 bölgesindeki doğrusallık, bölgede bulunan yedi adet ölçüm noktasına dayandırıldığı için iyi olduğu düşünülmektedir. H3 bölgesi için hassasiyet yaklaşık olarak yarıya düşmüş ancak lineerlik devam etmektedir. Sensörün lineerlik tutumu H2 bölgesine kıyasla bir miktar azalmış olsa da mevcut R^2 değeri (0.990) ile sensör bu bölgede doğrusal olarak nitelendirilebilir.



Şekil 42. S3-d (T0); a) üç bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalize edilmiş kapasitans değişimi.

Sensörün T0’daki sonuçları aynı zamanda iki bölgeye ayrılarak da incelenmiş ve analiz Şekil 42-b’de verilmiştir. H1’de hesaplanan hassasiyet ve doğrusallık değerleri üç bölgeli analiz ile aynı olduğu için üç bölgeli modellemede H1 için yapılan yorumlar bu bölge için de geçerlidir. H2 bölgesi sensör hassasiyetinin yaklaşık olarak üçte birine düştüğü ve sensörün uygulanan basınca karşı olan duyarlılığında azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu bölgede doğrusallık H1 bölgesine göre kısmen artmıştır.

S3 – d sensörünün T0+5G’de alınan ölçüm sonuçları Şekil 43’te verilmiştir. Şekil 43-a’da H1 bölgesinde elde edilen hassasiyet değerinin, S1-d sensörünün T0+5G’de H1 bölgesindeki hassasiyet değeri (0.09048 kPa^{-1}) ve S2-d sensörünün T0+5G’de H1 bölgesi için hesaplanan hassasiyet değerinden (0.01127 kPa^{-1}) daha küçük olduğu görülmüştür.

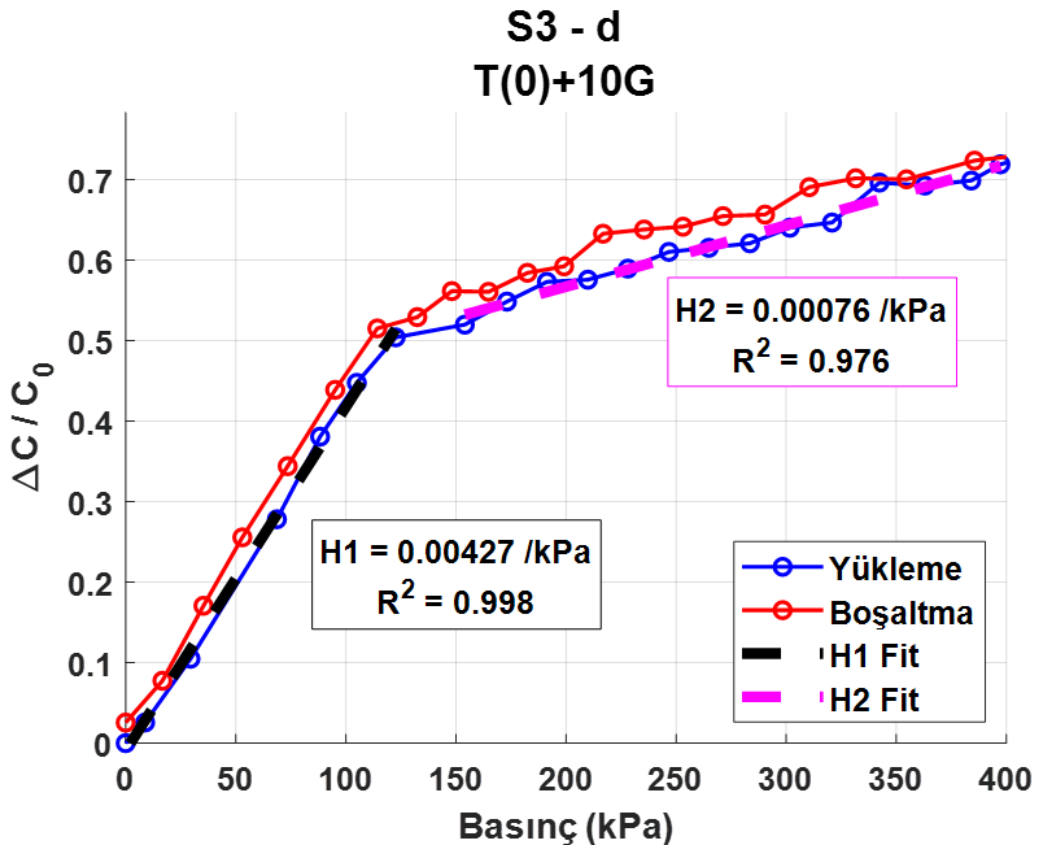


Şekil 43. S3-d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

H1 bölgesinde hesaplanan R^2 değerine göre sensör bu bölgede doğrusal karakteristik göstermektedir. H2 bölgesinde sensör hassasiyeti düşmüş ancak doğrusal yönelim ($R^2 = 0.998$) artmış görünmektedir. H3 bölgesinde doğrusallık korunmuştur ancak önceki ölçümlere de paralel bir şekilde uygulanan basınca karşı sensör hassasiyeti azalmış görünmektedir.

Sensörün iki basınç bölgesinde incelenmesine ait grafik Şekil 43-b’de verilmiştir. H1 bölgesinde sensör lineer karakteristiğe sahip çıkmıştır ancak hassasiyet çok düşük tespit edilmiştir. H2 bölgesinde ise basınç arttıkça sensör hassasiyeti fark edilir biçimde düşmüş ancak lineerlik korunmuştur.

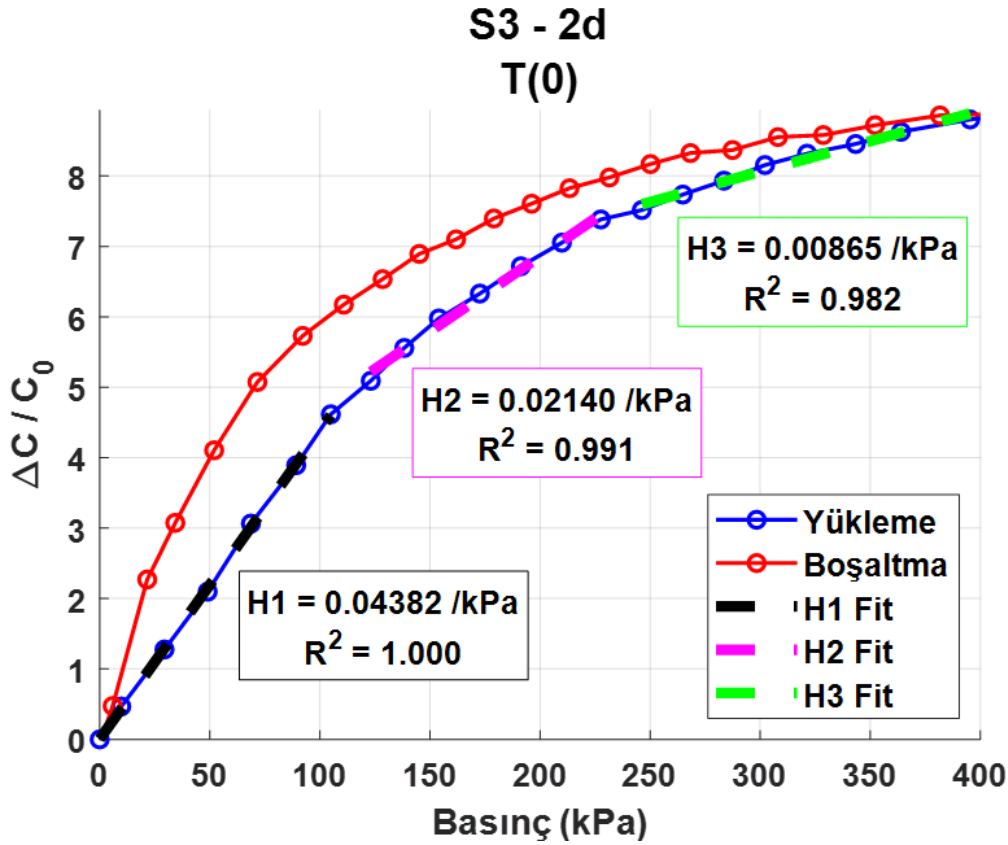
Testlerde T0+10G zamanında S3 – d sensöründen elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 44’te verilmiştir. T0+10G’de elde edilen ölçüm sonucun T0 ve T0+5G’de alınan ölçüm sonuçlarından farkı, grafiğin direkt iki parçaya bölünmeye müsait bir şekilde çıkmış olmasıdır. H1 bölgesinde sensör doğrusallık değeri yüksek çıkmıştır ($R^2 = 0.998$) ancak bu bölgede sensör hassasiyeti düşüktür. H2 bölgesinde ise sensörün hem kapasitans hassasiyeti düşük çıkmıştır hem de H1 bölgesine göre sensör lineer yönelimden uzaklaşmıştır.



Şekil 44. S3-d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

S3-2d sensörünün T0 zamanında yapılan testlerden elde edilen sonucu Şekil 45’te verilmiştir. Sensörün H1 aralığındaki hassasiyet değeri hem geniş aralıkta elde edilmiş yüksek bir değerdir hem de S1-2d (0.02366 kPa^{-1}) ve S2-2d (0.00741 kPa^{-1}) sensörlerinin T0’da H1 bölgesi için alınan hassasiyet değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu aralık için hesaplanan R^2 değeri 1.00 çıkmıştır ancak daha önce de bahsedildiği gibi bölgedeki ölçüm veri sayıları artırılarak sensörün bu bölgede doğrusallık incelemesinin daha sağlıklı bir şekilde yapılabileceği düşünülmektedir. H2’de sensör hassasiyetinin H1’deki

hassasiyet değerine göre yaklaşık olarak yarıya düşmüş olduğu görülmektedir ancak sensör bu bölge aralığına yakın S1-2d (0.00236 kPa⁻¹) ve S2-2d (0.00142 kPa⁻¹) sensörlerinin T0’da alınan ölçüm sonuçlarındaki hassasiyet değerinden daha yüksek bir hassasiyet değerine sahiptir. Dahası, bu bölgede doğrusal tutumunu yansıtmaya devam etmektedir. H3 bölgesinde sensör hassasiyeti azalmış görülmektedir ve doğrusallıkta diğer bölgelere göre düşüş yaşanmıştır.

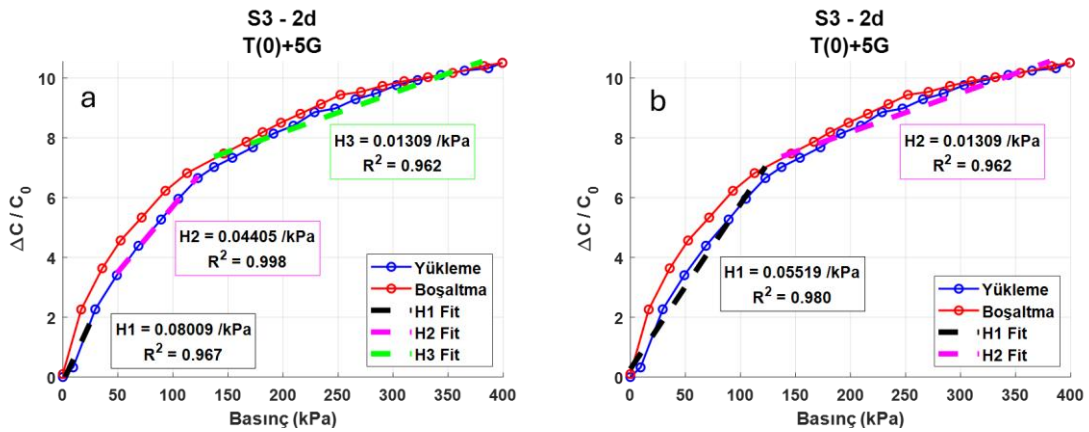


Şekil 45. S3-2d (T0); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

Sensör testlerinin beşinci günde (T0+5G) S3 – 2d sensöründen elde edilen sonuçlar Şekil 46’da verilmiştir. H1 bölgesinde sensör doğrusallığa yakınsayan bir seyir göstermektedir. Aynı sensörün T0’da H1 bölgesi için alınan hassasiyet değeri (0.04382 kPa⁻¹) ile karşılaştırıldığında sensörün T0+5G’de alınan bu bölgedeki hassasiyet değeri diğerinin yaklaşık olarak iki katıdır. S2-4d’nin T0 ve T0+5G’de alınan ölçümlerinde karşılaşılan duruma paralel olarak S3-2d’de sensör hassasiyeti zamanla iyileşme göstermiştir. S3 malzemesinin kullanıldığı sensör tasarımında 2d kalınlıktaki malzemenin sensör ile en iyi uyumu sağlamasından dolayı yüksek hassasiyet değeri alındığı düşünülmektedir.

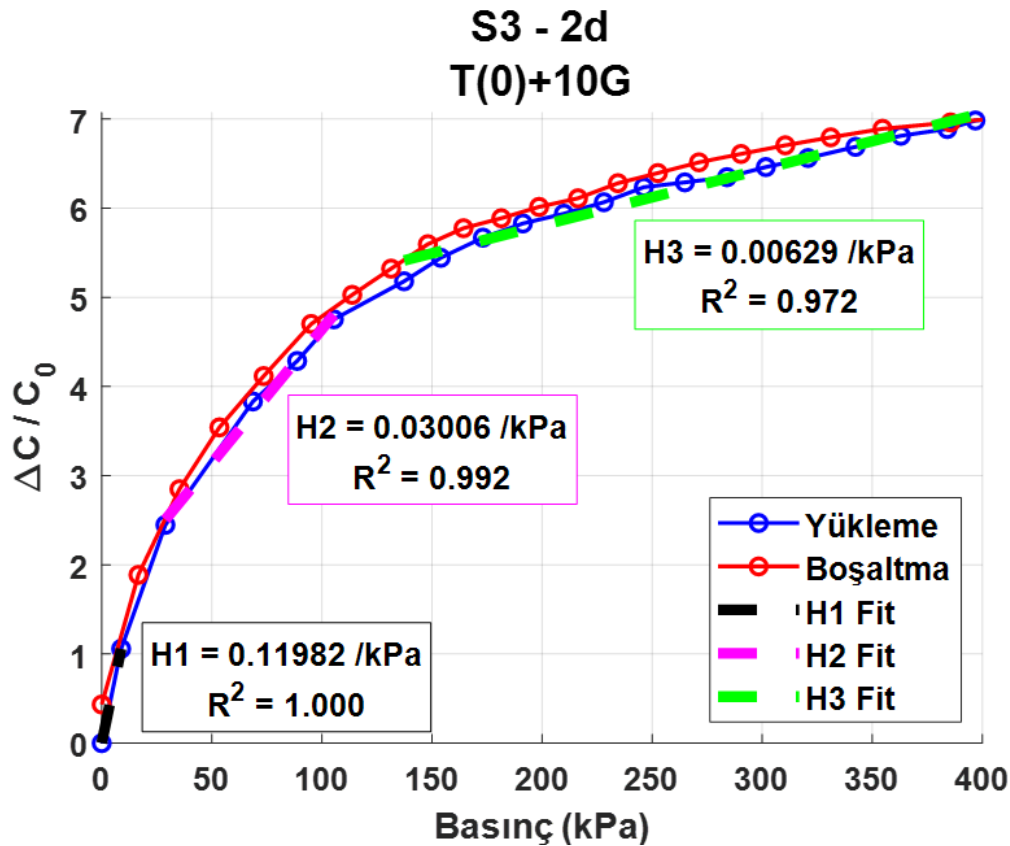
Zamanla hassasiyet değerinin artması durumu için de sensörün kuruması ile sensörde kullanılan malzemenin daha stabil hale gelmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Aynı durum ile S2-4d'nin analizinde de karşılaşılmış ve bu çıkarımı destekler nitelikte sonuçlar alınmıştır. H2 bölgesi hassasiyet değeri H1 bölgesine göre yaklaşık olarak yarı yarıya düşüş gösterse de aynı sensörün T0'da alınan ölçümlerinde benzer basınç aralıklarında hesaplanan hassasiyet değerinden (0.02140 kPa^{-1}) yüksek bir hassasiyet değeri elde edilmiştir. Sensör H2 bölgesinde hesaplanan R^2 (0.998) değeri ile bu bölge için yüksek doğrusal karaktere sahip olduğu görülmektedir. H3 bölgesinde sensör doğrusal karakteristiğini korumaya devam etmiş ancak sensör hassasiyet değeri H2'ye oranla yaklaşık olarak çeyreğine düşmüştür.

Sensör aynı zamanda iki basınç bölgesinde de incelenmiş ve sonuçları Şekil 46-b'de verilmiştir. H1 bölgesinde sensörün hassasiyet değeri üç bölgeli grafiğe göre nispeten düşük çıkmıştır ancak sensörün yaklaşık 0 – 125 kPa arasında lineerliğe yakın bir performans ile kullanılabileceği gösterilmiştir. H2 bölgesi için sensör geniş bir çalışma aralığına yayılmıştır ancak gerek hassasiyetindeki düşüş gerekse de lineerlikten uzaklaşma nedenlerinden dolayı bu aralık için sensör çok efektif bulunmamıştır.



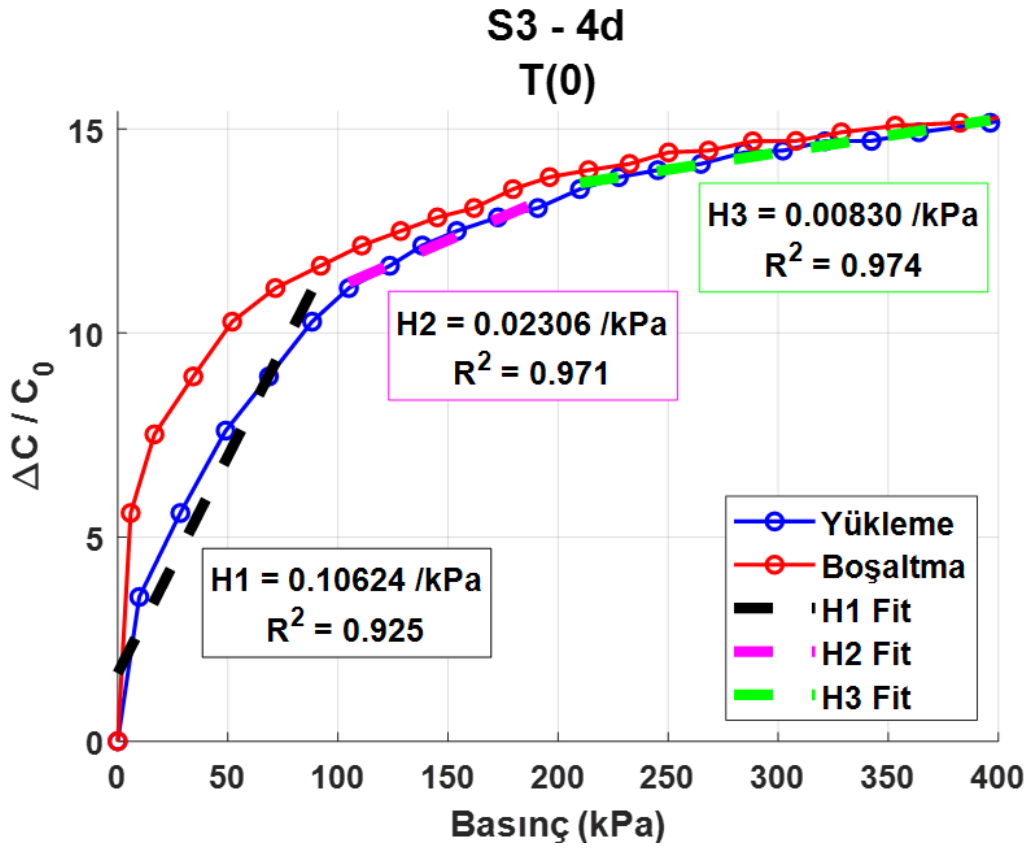
Şekil 46. S3-2d (T0+5G); a) üç bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi, b) iki bölgede basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi.

T0+10G zamanında S3-2d sensörüne ait ölçüm sonuçları Şekil 47’de verilmiştir. H1 bölgesinde, T0+5G’deki ölçüm sonuçlarındaki görüğe paralel olarak, malzemenin optimum çalıştığı kalınlıklarda tasarım yapılarak sensör optimizasyonu sağlandığında, zamanla malzemenin daha kararlı yapıya geçmesi ile sensör yapısındaki kapasitans hassasiyetinde iyileşmeler olabileceği düşünülmektedir. T0+5G ve T0+10G’den elde edilen sonuçlar bu durumu destekler niteliktedir. Bu nedenle S3 malzemesi için en uyumlu malzeme kalınlık değerinin 2d olduğu düşünülmektedir. Üstelik S2 sensöründe de aynı durum tespit edilmiş ve analiz edilerek S2 için 4d malzeme kalınlığının daha iyi uyum sağladığı düşünülmüştür. H1 basınç bölgesi özelinde her ne kadar basınç bölgeleri tüm sensörlerde birebir aynı değer aralığında olmasa da bu bölge için normalleştirilmiş hassasiyete dayalı en iyi performansı S3 – 2d sensörünün T0+10G’de alınan ölçüm sonucu göstermiştir. H2 bölgesinde hassasiyetin kayda değer biçimde düşmüş olmasına karşı sensör bu bölgede doğrusal tepki vermiştir. H3 bölgesinde sensör hassasiyeti ve doğrusallığının H2 bölgesine göre azaldığı görülmüştür.



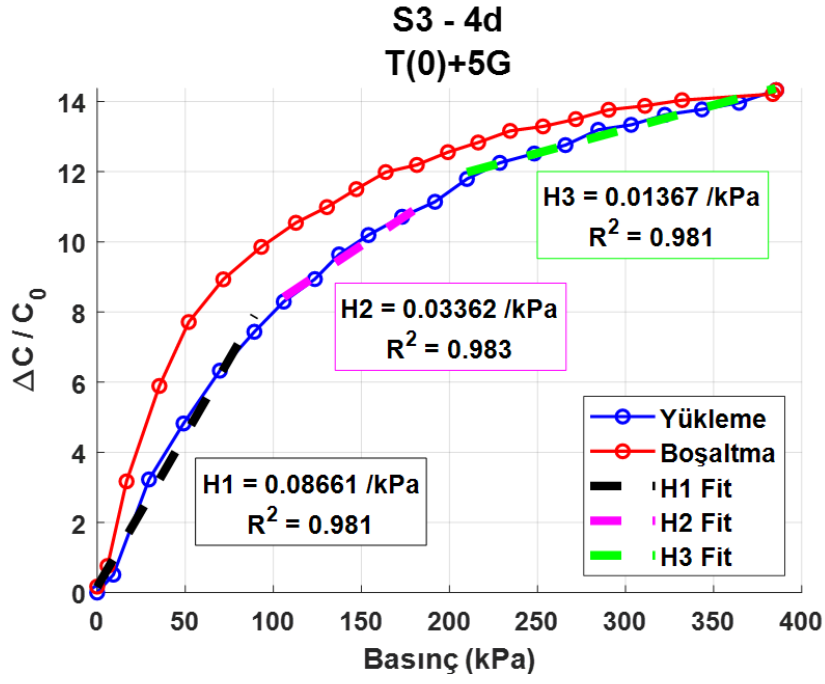
Şekil 47. S3-2d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

S3 – 4d sensörünün T0 zamanında yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçları Şekil 48’de verilmiştir. Hassasiyet değeri H1 bölgesi için S1-4d (0.04530 kPa^{-1}) ve S2-4d (0.04426 kPa^{-1}) sensörlerinden T0’da hemen hemen aynı basınç aralıklarında alınan hassasiyet değerine göre daha yüksek çıkmıştır. Sensör H1’de doğrusallıktan uzaklaşmıştır. H2 bölgesinde hassasiyet H1’e oranla yaklaşık olarak dörtte birine düşmüştür ancak sensörün doğrusallığı olumlu yönde etkilenmiştir. H3 bölgesinde sensör hassasiyetini önemli ölçüde kaybetmiştir. Burada sensörün doğrusala yakın tutum sergilediği görülmektedir.



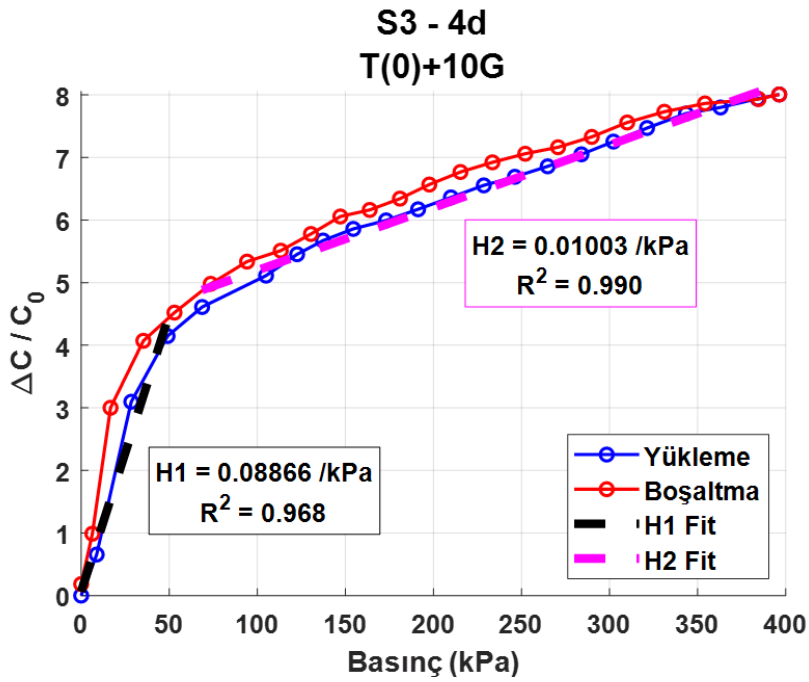
Şekil 48. S3-4d (T0); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

Beşinci gün testlerinde (T0+5G), S3 – 4d sensörüne ait ölçüm sonuçları Şekil 49’da verilmiştir. Aynı sensörün H1 bölgesi için hassasiyet değeri T0’da H1 bölgesi için hesaplanan hassasiyet değerine (0.10624 kPa^{-1}) göre düşüş göstermiştir. Doğrusallığın bu bölge için sağlandığı görülmektedir. H2 bölgesinde hassasiyet değeri artan basınç altında düşüşe uğramış, doğrusallık durumu ise nispeten iyileşme göstermiştir. H3 bölgesinde sensör hassasiyeti, basıncın artması ile kayda değer bir şekilde düşmüştür. Sensörün bu basınç aralığında doğrusallık gidişatını devam ettirdiği görülmüştür.



Şekil 49. S3-4d (T0+5G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

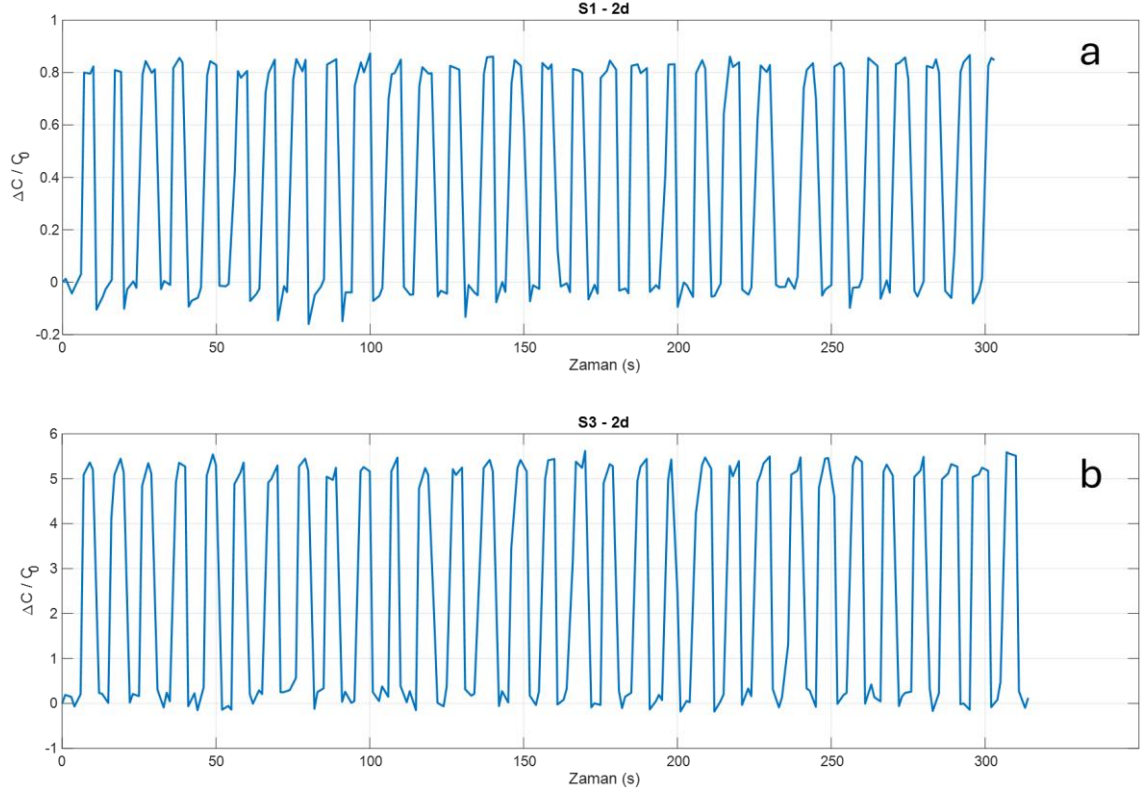
S3 – 4d sensörü T0+10G zamanında elde edilen ölçümler ile iki basınç bölgesinde incelenmiştir. Şekil 50’de, H1 bölgesinde sensörün doğrusallığa yakınsadığı görülmektedir ancak bu bölgedeki hassasiyet değeri düşük çıkmıştır. H2’de ise hassasiyet değeri sekiz kat azalmıştır ancak sensör doğrusallığı artmıştır.



Şekil 50. S3-4d (T0+10G); basınca göre normalleştirilmiş kapasitans değişimi

3.3.2.3. DEĞİŞKEN MALZEME KATMAN KALINLIKLARINDA ZAMANA GÖRE UYGULANAN SABİT BASINCA PVA BORAKS SENSÖRÜNÜN TEPKİSİ

Aynı katman kalınlığına sahip PVA Boraks sensörlerinin T0+10G’de, 10 saniyelik periyotlarda üzerlerine 100 kPa basınç uygulanması ile zamana göre basınç değişimleri incelenmiş olup elde edilen grafik Şekil 51’de belirtilmiştir.



Şekil 51. Aynı katman kalınlığına sahip sensör tasarımlarının 10 saniyelik periyotlardaki 100 kPa sabit bası değerlerine göre kapasitans değişimi. a) S1-2d, b) S3-2d.

Testler, S1 ve S3 hidrojel­leri için 2d malzeme katman kalınlığına sahip sensör tasarımları ile gerçekleştirilmiştir. Testler, sensörler üzerine 5 saniye bası uygulanıp 5 saniye çekilerek gerçekleştirilmiştir. Grafikteki gösterimlerde bazı periyotlardaki kayma ve bozulmalar, bası işleminin bir kontrolcü kullanılmadan kronometre ile manuel gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 51’deki grafiklerden de görüldüğü üzere 10 saniyelik periyotlar ile sensörler üzerine 100 kPa’lık basınç uygulandığında en iyi değişimi S3-2d sağlamaktadır. Bu durum S3-2d sensörünün diğer sensöre göre 100 kPa basınç altında daha efektif ve yüksek hassasiyet ile çalıştığını göstermektedir. Ayrıca sensördeki kapasitans değişimlerinin her bası uygulandığında aynı kalması sensörlerin

T0+10G’de düşük histerezise sahip olmasına ve kararlı yapıya geçtiğine işaret ediyor olabilir [65,66,68,69].

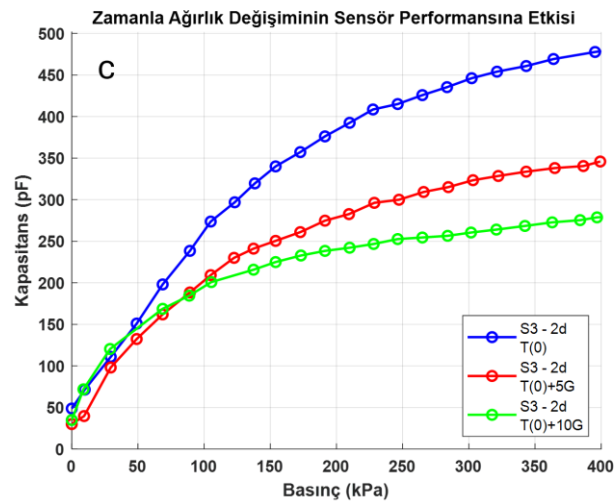
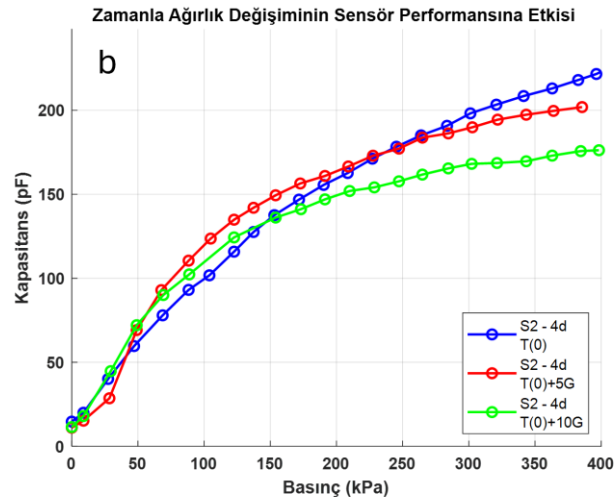
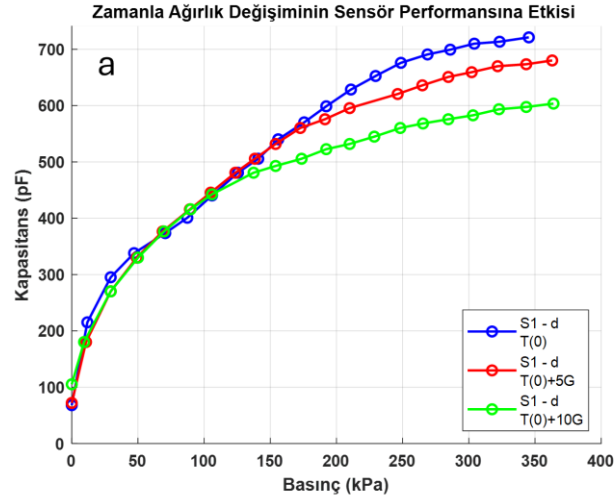
3.3.2.4. SENSÖRÜN ODA SICAKLIĞINDA BEKLETİLMESİYLE FARKLI GÜNLERDE ALINAN ÖLÇÜMLERİN KAPASİTANS DEĞİŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

PVA Boraks hidrojelinin malzeme katmanı olarak kullanıldığı S1, S2 ve S3 sensör tasarımlarında farklı zamanlarda sensörler üzerine bası uygulayarak yapılan testlerde sensör performansının zamanla değiştiği görülmüştür. Bu değişimi anlayabilmek adına S1, S2 ve S3 hidrojel karışımlarından, sensör üretiminin yapıldığı ilk gün olan T0’da 5 gramlık numuneler alınarak petri kabı içerisinde muhafaza edilmiştir. T0+5G ve T0+10G testlerinde bu ağırlıklar hassas terazi ile ölçülüp not edilmiştir.

S1-d, S2-4d ve S3-2d sensörlerinin T0, T0+5G ve T0+10G’de gerçekleştirilen bası testlerine ait basınçla göre kapasitans değişim sonuçları Şekil 52’de verilmiştir. Şekil 52-a’da S1-d sensörünün T0 zamanında yaklaşık 350 kPa basınç altında 720 pF kapasitans değerine ulaştığı görülmektedir. T0+5G testi öncesinde S1 numunesinin ağırlığı ölçüldüğünde numunenin, ağırlığının yaklaşık %34 azalarak 3.298 grama düştüğü görülmüştür. Ağırlıktaki düşüş sebebinin PVA ve Boraks hidrojelindeki su miktarından olduğu düşünülmektedir. S1-d sensörü T0+5G’de aynı basınç altında test edildiğinde sensör kapasitansının 685 pF değerine düştüğü görülmüştür. Sensörde farklı basınç aralıkları için hassasiyet incelendiğinde T0+5G’de ölçülen hassasiyet değeri genel olarak T0’da ölçülen hassasiyet değerinden düşük çıkmıştır. Ayrıca sensörün T0’daki yumuşak yapısının bir miktar sertleştiği not edilmiştir. T0+10G testleri öncesinde numune bir kere daha ölçülmüş ve numunenin üretiminden itibaren geçen on gün içerisinde ağırlığından yaklaşık %90 kayıp vererek 0.496 gram ağırlığa düştüğü görülmüştür. T0+10G’de, T0 ve T0+5G’de uygulanan basınç değerlerinde S1-d sensörü ile yapılan test sonucunda ise sensörün kapasitans değeri 600 pF çıkmıştır. Farklı basınç aralıklarında hassasiyeti incelendiğinde T0+10G’de ölçülen hassasiyet değeri genel olarak T0 ve T0+5G’de ölçülen hassasiyet değerlerinden düşük çıkmıştır [68,69]. Sensörün T0+10G testlerine kadar bir miktar daha sertleşmiş olduğu görülmüştür.

S2-4d sensörünün T0’da maksimum uygulanan basınç ile yaklaşık 230 pF kapasitans değeri verdiği Şekil 52-b’de görülmektedir. S2 numunesinin ağırlığı T0+5G’de ölçüldüğünde numunenin %34.8 oranında düşüş ile 3.256 gram çıktığı görülmüştür. S2-

4d sensörüne T0+5G’de yine maksimum uygulanan basınca karşı sensör kapasitansının 200 pF çıktığı görülmüştür. Sensörün düşük basınçlarda hassasiyetinin T0+5G’de yaklaşık 1.5 katına çıktığı görülmüştür. S2 hidrojelinden üretilen diğer sensörler incelenmiş ancak onlarda bu durumun tam tersi olarak zamanla hassasiyette düşüş gözlenmiştir. Ayrıca sensör su kaybettiği için sensöre dokunulduğunda bir miktar sertleştiği hissedilmiştir. T0+10G’de sensör ağırlığı ölçüldüğünde sensörün zamanla ağırlık kaybetmesine bağlı olarak yaklaşık %85.9 oranında kayıp ile 0.702 grama düştüğü görülmüştür. T0+10G’de aynı basınç değerlerinde S2-4d sensörü tekrar test edilmiş ve sensörün kapasitans değeri 175 pF çıkmıştır. Sensörün hassasiyeti farklı basınç aralıkları için incelendiğinde T0+10G’de ölçülen hassasiyet değeri de çok şaşırtıcıdır. Sensörün düşük basınç değerlerindeki hassasiyetinin T0+10G’de de arttığı görülmüştür. S2 malzemesinden üretilen diğer sensörler de incelenmiş ancak onlarda yine bu durumun tam tersi olarak zamanla hassasiyette düşüş gözlenmiştir. Zamanla sensörün su kaybetmesinden dolayı sensörün daha sert bir forma dönüştüğü, kırılğan bir yapı haline geldiği görülmüştür. Bu durum S2 malzemesi için 4d kalınlığının optimum olabileceğine ve zamanla malzemedeki su kaybının hassasiyet performansını olumlu yönde etkileyebileceğine işaret edebilir [64,73,74]. Şekil 52-c’de S3-2d sensörü T0’da 400 kPa basınç değeri ile test edilmiş ve sensörün 475 pF kapasitans değeri verdiği görülmüştür. Ölçümlerin beşinci gününde (T0+5G) S3 numunesi tartıldığında, ağırlığından %35.2 kayıp verdiği ve 3.240 grama düştüğü görülmüştür. S3-2d sensörü aynı basınç değeri ile tekrar test edildiğinde sensör kapasitansının 350 pF değerinde olduğu görülmüştür. Sensörün farklı basınç aralıklarında hassasiyeti incelendiğinde ise ilginç bir durum ile karşılaşmıştır. Düşük basınç değerlerinde hassasiyet T0+5G’de yaklaşık 2 katına çıktığı görülmüştür. Diğer S3 sensör tasarımları da incelenmiş ancak onlarda zamanla hassasiyette düşüş gözlenmiştir. T0+10G’de, sensör numunesinin ağırlığı ölçülmüş ve zamanla ağırlığından yaklaşık %85.6 kayıp vererek 0.718 grama düştüğü görülmüştür. S3-2d sensörü, aynı basınç değerlerinde test edildiğinde sensör kapasitans değerinin 275 pF çıktığı görülmüştür. Sensör hassasiyeti farklı basınçlara göre incelenmiş ve hassasiyetin T0+10G’de düşük basınç seviyelerinde T0+5G’deki ölçüme benzer biçimde arttığı görülmüştür. S3 hidrojelinden üretilen diğer sensörler de incelenmiş ancak onlarda sensör hassasiyetinde artış görülmemiştir.



Şekil 52. Zamanla sensor malzemesindeki ağırlık değişiminin sensör performansına etkisi: a) S1-d kapasitif basınç eğrileri, b) S2-4d kapasitif basınç eğrileri, c) S3-2d kapasitif basınç eğrileri.

Sensörde kullanılan malzemenin zamanla ağırlığını kaybetmesi ve daha rijit yapıya dönüşmesinin sensör performansını etkilediği anlaşılmıştır [58,68,69]. Zamanla ağırlıktaki değişim S2-4d ve S3-2d sensörleri haricindeki sensörler için kapasitans ve hassasiyetin düşüşü ile sonuçlanmıştır. Ayrıca S2-4d ve S3-2d sensörlerindeki durum için; farklı malzemeye sahip sensörlerin hassasiyetinin malzeme kalınlığı ile optimize edilmesi gerektiği, her malzemenin en iyi performansı gösterecek bir malzeme katman kalınlığı değeri ile hassasiyetinin ayarlanabileceği düşünülmektedir [64,73,74]. Tüm bunlara ek olarak zamanla ağırlıktaki değişimin, malzemeyi daha rijit bir forma dönüştürüp hidrojel yapısının ve dolayısıyla elastik özelliklerinin değişmesini sağlayarak sensör yükleme ve boşalma eğrileri üzerindeki histerezis etkisini azalttığı düşünülmektedir [65,66].

3.3.3. SENSÖR DİZİSİNDE BASINCA GÖRE HARİTALANDIRMA

Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan S3-2d sensör dizisi üzerine 1 cm^2 yüzey alanına sahip plastik blok yerleştirilerek blok üzerine 200 gram ağırlığa sahip denge kalibrasyon ağırlığı bırakılarak sensör dizisindeki her bir hücrenin kapasitans değerine göre gri skalalandırma (İng. gray scale) ile haritalandırma işlemi yapılmıştır. Kapasitans değerlerinin güvenilirliğini sağlamak amacıyla tıpkı PDMS testlerinde olduğu gibi 104 pF kapasitans değerine sahip bir adet ticari kapasitör sensörde ölçümü yapılan hücreye paralel bağlanmıştır. Veri setlerini karşılaştırabilmek adına haritalandırmada gri skala tüm grafikler için aynı değerleri gösterecek şekilde hazırlanmıştır.

Şekil 53'te; 8x8 sensör dizisi üzerine uygulanan basınca göre kapasitans değerlerinin gri skalalandırma ile haritalandırılması verilmiştir. Haritalandırmada satırlar R, sütunlar C harfi ile belirtilmiştir. Şekil 53-a'da sensör dizisi üzerine herhangi bir basınç uygulanmamışken dizideki hücrelerin kapasitans değerlerinin 10 pF – 24 pF arasında olduğu görülmektedir.

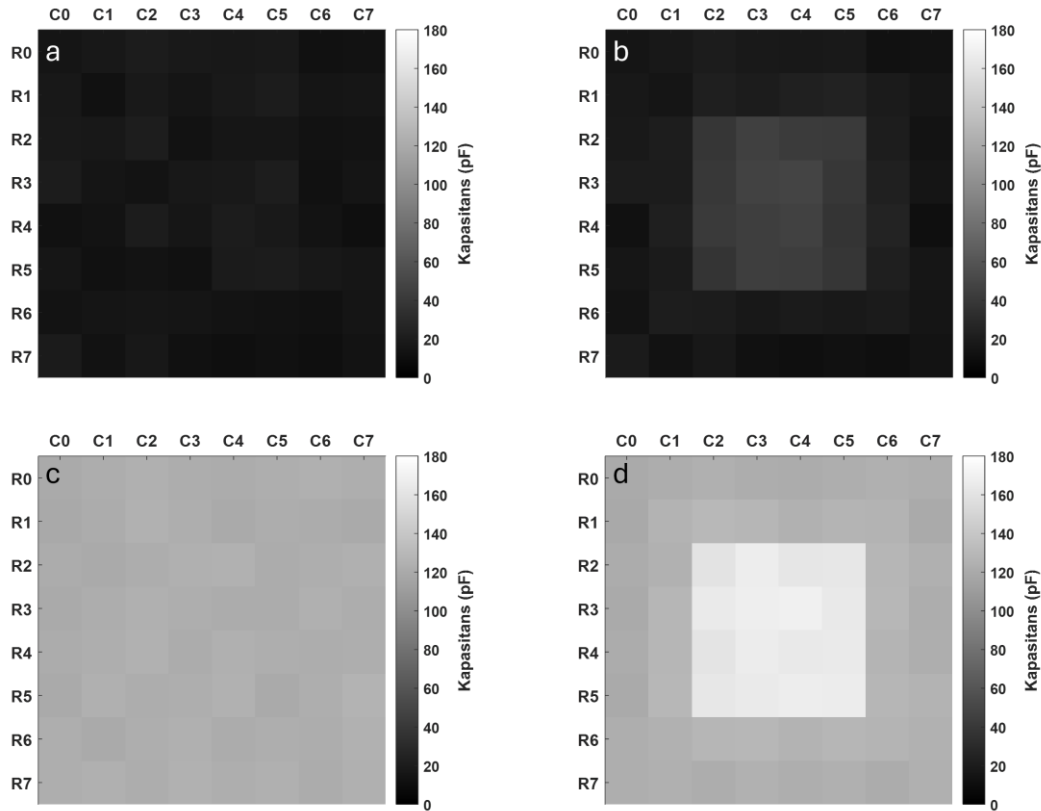
Şekil 53-b'de 1 cm^2 yüzey alanına sahip plastik blok R2-R5 ve C2-C5 hücreleri arasına yerleştirilmiş ve üzerine 200 gram ağırlığa sahip denge kalibrasyon ağırlığı bırakılarak sensör dizisindeki her bir hücrenin kapasitans değeri ölçülmüş olup, basınç uygulanan bölgedeki hücrelerin kapasitans değerlerinin 37 pF – 48 pF arasında olduğu görülmüştür.

Şekil 53-c'de ölçülen değerlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla diziyeye 104 pF kapasitans değerine sahip bir ticari kapasitör paralel bağlanmış olup sensör dizisi üzerine

basınç uygulanmadığı haldeki dizideki hücrelerin kapasitans değerleri 119 pF – 126 pF arasında ölçülmüştür.

Şekil 53-d’de paralel bağlı kapasitörün olduğu dizide 1 cm² yüzey alanına sahip plastik blok yine R2-R5 ve C2-C5 hücreleri arasına yerleştirilmiş ve üzerine 200 gram ağırlığa sahip denge kalibrasyon ağırlığı bırakılarak sensör dizisindeki her bir hücrenin kapasitans değeri ölçülmüş olup, basınç uygulanan bölgedeki hücrelerin kapasitans değerlerinin 159 pF – 172 pF arasında olduğu görülmüştür.

Haritalandırmadan da görüldüğü üzere ölçüm değerlerinin basınç uygulanan hücrelerde yakın değerlerde çıkması, sensör malzeme kalınlığının sensör dizisi boyunca yaklaşık olarak eşit kalınlıkta olduğunu ve uygulanan sabit basınç ile kontaklar arasındaki malzeme katmanının eşit bir şekilde sıkıştırıldığına işaret etmektedir. Bununla ilgili, [77]’da eşit katman kalınlıklarında üretilemeyen malzemeden oluşan sensöre ait kapasitans ölçümlerindeki sapmalar rapor edilmiştir.



Şekil 53. 8x8 esnek kapasitif basınç sensörü dizisinin haritalandırılması: a) basınç uygulanmamış ilk durum, b) 1cm² yüzeye 200 g (19.62 kPa) basınç uygulanması, c) paralel bağlı kapasitör ile basınç uygulanmamış ilk durum, d) paralel bağlı kapasitör ile 1cm² yüzeye 200 g (19.62 kPa) basınç uygulanması.

4. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında esnekliği, kararlılığı, yüksek doğruluğu, imalat kolaylığı ve düşük maliyeti ile öne çıkan esnek kapasitif basınç sensörleri ele alınarak, kapasitif basınç sensörlerinin hassasiyet ve doğrusallık parametreleri incelenmiştir. Kapasitif sensörlerde kullanılan malzemelerin yapı ve değişken sertlik gibi özelliklerinin sensör hassasiyetinin artırılması ve sensör doğrusallığının araştırılması konusunda kritik etkilerinin olduğu düşünülerek, esneklik, ayarlanabilir sertlik, ısıya dayanıklılık gibi özellikler ile ön plana çıkan Polidimetilsiloksan (PDMS) ve yine benzer özelliklere sahip Polivinil alkol (PVA) ve Boraks karışımı olmak üzere iki farklı çeşit malzemenin farklı sertliklerde ve farklı kalınlıklardaki sensör tasarımları oluşturulmuş, kapasitif sensör dizisi fabrikasyonu yapılmış ve ölçüm düzeneği kurularak kapasitif basınç sensör dizisi üzerindeki hassasiyet ve sensör performansına olan etkisi incelenmiştir.

PVA Boraksın katkısız ve eklenti mikro ve nano parçacık içermeyen formu incelendiği için üretilen PDMS malzemelerinin hiçbirine herhangi bir katkılama yapılmamış olup, sensör tasarımları eklenti içermemektedir. Ayrıca, malzemeler arasında daha etkili değerlendirme yapabilmek adına fabrikasyonu yapılan sensörlerdeki malzeme kalınlıkları da aynı olacak şekilde tasarlanmıştır.

PDMS katmana sahip sensör tasarımları üzerinde yapılan testlerde sensör hassasiyeti ve doğrusallığının baz ve kür ajanı oranlarına göre ayarlanabildiği görülmüştür [56]. PDMS üretiminde baz oranının artırılması ile daha yumuşak ve daha elastik malzemeler elde edilmiş olup malzemenin elastik özelliği sayesinde sensör üzerine uygulanan basınç değerine göre sensör daha çok sıkıştırılabildiği için sensör hassasiyet ve doğrusallık değerleri karışımdaki baz ve kür ajanı oranına göre değişim göstermiştir [56]. Karışım oranlarının etkilerine ek olarak sensör malzemesinin katman kalınlığının da sensör hassasiyet ve doğrusallığı üzerine etkili olduğu ve farklı malzeme katman kalınlığı oranlarında sensör hassasiyet ve doğrusallığının değiştiği görülmüştür. Testlerde hassasiyet ve doğrusallık analizleri için ölçüm noktaları üç basınç alanına bölünmüş olup PDMS tabanlı sensör tasarımlarının genel olarak yaklaşık 0 – 10 kPa basınç aralığında hassasiyet gösterdiği ve bu sensör tasarımlarının düşük basınçlar için kullanımlarının uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak dikkat edilmesi gereken husus ilgili basınç aralıklarında ölçüm sayısının az olduğudur. Daha fazla ölçüm aralıklarına imkân sağlayacak bir ölçüm sisteminin geliştirilmesiyle düşük basınç aralıkları hakkında daha

net bilgilendirme yapılabilir. PDMS sensör hassasiyeti ve doğrusallığına etki eden bir diğer unsur ise malzemenin katkılanma durumudur. PDMS içerisine katkılanan iletken polimer, metal nanoparçacık veya karbon bazlı malzemeler ile sensörün hassasiyeti arttırılmaktadır [78,79]. Tez kapsamında PDMS malzemesi, PVA ve Boraks içerisine katkılama yapılmadığı için katkılama yapılmadan üretilmiştir. Bu nedenle PDMS sensör hassasiyeti düşük çıkmıştır. Bir diğer husus ise esnek basınç sensörlerinde hassasiyet ve doğrusallığı iyileştirmek için malzemede gözenekli yapı veya mikro yapılar kullanılmaktadır [79,80]. Tez kapsamında PVA Boraks fabrikasyonu bu yapılarda üretilmediği için PDMS tabanlı sensörlerde de kullanılmayarak yalın sensörlerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. PDMS tabanlı sensörlerdeki hassasiyet değerlerinin düşük çıkma nedenlerinden birinin de bu olduğu söylenebilir.

Testler sonucunda PDMS katmana sahip sensör tasarımlarında en iyi hassasiyet gösteren tasarım 0 – 2 kPa basınç aralığında 0.05848 kPa^{-1} hassasiyet değeri ile 20:1 karışım oranı ve 2d malzeme katman kalınlığına sahip sensör tasarımı olmuştur. 0 – 20 kPa basınç aralığında ise 0.02227 kPa^{-1} hassasiyet değeri ile yine 20:1 karışım oranı ve d malzeme katman kalınlığına sahip sensör tasarımı dikkat çekmektedir. Malzeme katman kalınlığı d olan sensör tasarımında R^2 değeri 0.984 olarak hesaplanmışken, 2d malzeme katman kalınlığına sahip olan sensör tasarımında R^2 değeri 0.965 olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar hassasiyet değeri 20:1 karışım oranlı 2d malzeme katman kalınlığına sahip sensör tasarımında daha yüksek çıkmış olsa da gerek sensörün hassasiyet gösterdiği basınç aralığının genişliği gerekse de bu basınç aralıklarında sensörün doğrusal karakteristiğinin daha belirgin olması nedeniyle PDMS sensör tasarımları arasında en iyi sensörün 20:1 karışım oranında ve d malzeme katman kalınlığındaki sensör tasarımı olduğu söylenebilir.

PDMS ile benzer olarak malzeme karışım oranlarının değişimi PVA Boraks sensörlerinin hassasiyet ve doğrusallık değerlerini değiştirmiştir. PVA ve Boraks ile oluşturulan hidrojel yapı içerisinde Boraks malzemesinin oranının arttırılması ile malzeme içerisinde daha çok çapraz bağ kurulmuş olup bu durum malzemenin elastik yapısını etkileyerek sensör hassasiyeti ve doğrusallığını değiştirmiştir [76]. Sensör hassasiyet ve doğrusallığının değişmesinde sensörde kullanılan malzeme katman kalınlığı da etkili olmuştur. Sensör malzeme katman kalınlığı ile sensör hassasiyeti ve doğrusallığı arasında direkt ters bir orantının olmadığı görülmüş, en iyi hassasiyet ve doğrusallığın elde edilebilmesi için sensörde kullanılan malzemeye göre sensör malzeme katman kalınlığının optimize

edilmesi gerektiği anlaşılmıştır [64,73,74]. Ayrıca, PVA ve Boraks malzemesi yüksek su miktarı içeriğine sahip olmasından dolayı, sensörün zamanla ağırlığının kaybetmesinin sensör performansını değiştirdiği görülmüştür. Zamanla ağırlık kaybı, PVA Boraks malzeme katmanına sahip sensörlerde en yüksek basınçtaki tepe kapasitans değerlerinde düşüşe neden olurken, malzemenin daha rijit yapıya dönüşmesi ile kararlılığının oluşmasının sensör performansını artırıcı etkilerinin de olduğu anlaşılmıştır [68,69].

PVA Boraks sensör testlerinde hassasiyet ve doğrusallık analizlerinin yapılabilmesi için ölçüm noktaları iki veya üç basınç alanına bölünmüş olup PVA Boraks tabanlı sensör tasarımlarının yaklaşık 0 – 100 kPa basınç aralığında hassasiyet gösterdiği ve bu sensör tasarımlarının düşük basınçlar için kullanımlarının uygun olabileceği değerlendirilmiştir.

Testler sonucunda PVA Boraks malzeme katmanına sahip sensör tasarımlarında en iyi hassasiyet gösteren tasarım 0 – 28 kPa basınç aralığında 0.11982 kPa^{-1} hassasiyet değeri ile S3 karışım oranlı 2d malzeme katman kalınlığına sahip olan S3-2d sensör tasarımı olmuştur. Üstelik sensörün bu basınç aralığında R^2 değeri 1.00 çıkmış ve bu basınç aralığında iyi doğrusal karakteristik ortaya koymuştur [49]. Sensörün bu basınç aralığında R^2 değerinin yüksek çıkmasının sebebinin bölgedeki veri sayısının yeterli miktarda olmamasından kaynaklanabileceği de göz ardı edilmemelidir. 0 – 50 kPa basınç aralığında 0.11012 kPa^{-1} hassasiyet değeri ile S2 karışım oranlı 4d malzeme katman kalınlığına sahip olan S2-4d sensör tasarımı da dikkat çekmektedir. Sensörün bu basınç aralığındaki R^2 değeri 0.994 olarak hesaplanmış olup sensör bu aralıkta gayet iyi bir doğrusal performans sunmuştur. Kullanım amacına göre değişebilmekle birlikte her iki sensörün de diğer PVA Boraks sensör tasarımlarına göre daha hassas ve daha doğrusal çalıştığı söylenebilir. Düşük basınç aralıklarında kullanılacaksa S3-2d sensörünün tercih edilmesi hassasiyet ve doğrusallık özellikleri açısından ideal görünmektedir. Nispeten daha geniş basınç aralıklarında kullanılmak istenirse S2-4d sensörü de yine iyi hassasiyet ve doğrusallık ile çalışabilir görünmektedir.

PVA Boraks malzeme katmanına sahip sensörler ile PDMS malzeme katmanına sahip sensörler karşılaştırıldığında PVA Boraks sensörlerinin daha yüksek basınç aralıklarında daha yüksek hassasiyet ve doğrusal tutum göstererek çalışabileceği anlaşılmıştır. Hassasiyet ve doğrusallığın incelendiği testlerde PVA Boraks sensörlerinin basınç aralıkları iki bölgeye ayrılabilirken PDMS sensörlerinin basınç aralıkları en az üç bölgeye ayrılabilmiştir. Bu durum PVA Boraks sensörlerinin çalışma basınç aralığının PDMS sensörlere göre daha geniş bir aralıkta olduğunu göstermektedir. Ayrıca PVA

Boraks hidrojelini kendisini iyileştirme özelliğine sahip olup sensör dielektriğinin hasar gören bölgesinin çapraz bağlar kurulması ile onarılması sayesinde sensör kendini iyileştirebilmektedir [32]. Bu özelliği ile de PVA Boraks hidrojelinin, PDMS elastomerinden üstün niteliklere sahip olduğu görülmektedir. Üstelik PVA Boraks hidrojelinin üretimi PDMS malzemesi üretiminden daha az maliyetle, daha az eforla kolaylıkla yapılabilir.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar değerlendirildiğinde, PVA Boraks hidrojelinin iletken polimer, metal nanoparçacık veya karbon bazlı malzemeler ile katkılanarak sensör performansına etkileri araştırılabilir ve etki değeri yüksek olabilecek bir konudur. Ayrıca PVA Boraks fabrikasyonunda süngerimsi, gözenekli yapıların kullanımının sensör performansını artırıcı yönde etkileri olabileceği düşünülmektedir. Sensör performansını etkileyen bir diğer unsur ise sensör kontaklarında kullanılan metalin oksitlenme durumudur. Tez kapsamında yapılan çalışmalar sırasında uzun süre açık hava ortamında bekletilen sensörlerin malzeme ile kontak yapısı arasında oksitlenme meydana geldiği ve rengin yeşile döndüğü görülmüştür. Esnek sensörlerde oksitlenme durumu; ölçüm sinyalinin azalması, sinyal gürültüsünün artması ve iletim kararsızlığına neden olduğu için sensör performansının artırılması hedeflenen çalışmalarda dikkat edilmesi gereken bir konudur. Esnek sensör malzeme katmanı olarak hidrojel kullanıldığında, hidrojin jelimsi yapısından dolayı malzeme kontaklar arasından dışarıya taşınabilmektedir. Bu nedenle malzemenin kontaklar arasında mühürlenmesinin hem sensörün ölçüm stabilitesini pozitif yönde etkileyeceği hem de hidrojin kurumasını önleyici bir etki yaratacağı düşünülmektedir. Gelecekte yapılabilecek sensör çalışmaları kapsamında özellikle sensör testlerinde sensörün çözünürlüğü (İng. resolution) incelenerek sensör üzerine uygulanan birbirine çok yakın basınç değerlerinde sensörün tepkisi ile en küçük ölçülebilir artışa karşılık gelen basınç miktarı ve sensör üzerine uygulanan kuvvet ile sensörün geçici durum tepkileri araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] C. Xu, J. Chen, Z. Zhu, M. Liu, R. Lan, X. Chen, W. Tang, Y. Zhang, H. Li, Flexible Pressure Sensors in Human–Machine Interface Applications, *Small* 20 (2024). <https://doi.org/10.1002/sml.202306655>.
- [2] C. Fang, T. Fu, Y. Shi, Flexible Capacitive Pressure Sensors and Their Applications in Human-Machine Interactions, in: 2023 2nd International Symposium on Sensor Technology and Control, ISSTC 2023, 2023. <https://doi.org/10.1109/ISSTC59603.2023.10280832>.
- [3] M. Arjun Hari, L. Rajan, Advanced Materials and Technologies for Touch Sensing in Prosthetic Limbs, *IEEE Trans Nanobioscience* 20 (2021). <https://doi.org/10.1109/TNB.2021.3072954>.
- [4] S. Chen, J. Qi, S. Fan, Z. Qiao, J.C. Yeo, C.T. Lim, Flexible Wearable Sensors for Cardiovascular Health Monitoring, *Adv Healthc Mater* 10 (2021). <https://doi.org/10.1002/adhm.202100116>.
- [5] S.P. Lee, G. Ha, D.E. Wright, Y. Ma, E. Sen-Gupta, N.R. Haubrich, P.C. Branche, W. Li, G.L. Huppert, M. Johnson, H.B. Mutlu, K. Li, N. Sheth, J.A. Wright, Y. Huang, M. Mansour, J.A. Rogers, R. Ghaffari, Highly flexible, wearable, and disposable cardiac biosensors for remote and ambulatory monitoring, *NPJ Digit Med* 1 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41746-017-0009-x>.
- [6] Z. Zhang, R. Su, F. Han, Z. Zheng, Y. Liu, X. Zhou, Q. Li, X. Zhai, J. Wu, X. Pan, H. Pan, P. Guo, Z. Li, Z. Liu, X. Zhao, A soft intelligent dressing with pH and temperature sensors for early detection of wound infection, *RSC Adv* 12 (2022). <https://doi.org/10.1039/d1ra08375a>.
- [7] J. Ham, A.K. Han, M.R. Cutkosky, Z. Bao, UV-laser-machined stretchable multi-modal sensor network for soft robot interaction, *Npj Flexible Electronics* 6 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00225-0>.
- [8] S. Xian, Y. Xu, Y. Li, Z. Wu, X. Xie, Z. Wu, X. Yang, Y. Zhong, Flexible Triboelectric Sensor based on Catalyst-Diffusion Self-Encapsulated Conductive Liquid-Metal-Silicone Ink for Somatosensory Soft Robotic System, *Adv Funct Mater* (2024). <https://doi.org/10.1002/adfm.202412293>.

- [9] T. Seesaard, C. Wongchoosuk, Flexible and Stretchable Pressure Sensors: From Basic Principles to State-of-the-Art Applications, *Micromachines* (Basel) 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14081638>.
- [10] J.C. Lin, P. Liatsis, P. Alexandridis, Flexible and Stretchable Electrically Conductive Polymer Materials for Physical Sensing Applications, *Polymer Reviews* 63 (2023). <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2059673>.
- [11] Y. Zhao, J. Zhou, C. Jiang, T. Xu, K. Li, D. Zhang, B. Sheng, Highly Sensitive and Flexible Capacitive Pressure Sensors Combined with Porous Structure and Hole Array Using Sacrificial Templates and Laser Ablation, *Polymers* (Basel) 16 (2024). <https://doi.org/10.3390/polym16162369>.
- [12] T. Yu, Y. Tao, Y. Wu, D. Zhang, J. Yang, G. Ge, Heterogeneous Multi-Material Flexible Piezoresistive Sensor with High Sensitivity and Wide Measurement Range, *Micromachines* (Basel) 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14040716>.
- [13] J. Zhang, Z. Wang, Y. Huang, X. Pi, Y. Wu, Q. Shi, Flexible piezoelectric sensor based on polyacrylonitrile/MWCNT/MXene composites films for human physiological health detection, *J Appl Polym Sci* 141 (2024). <https://doi.org/10.1002/app.55009>.
- [14] A. Shiwei, X. Gao, C. Lu, D. Yao, M. Lu, M. Zhang, Y. Sun, H. Fang, D. Li, Self-Powered Flexible Sensor Based on Triboelectric Nanogenerators for Noncontact Motion Sensing, *IEEE Sens J* 22 (2022). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3178210>.
- [15] P.K. Sharma, J.Y. Chung, Evaluation of Polydimethylsiloxane (PDMS) as a Substrate for the Realization of Flexible/Wearable Antennas and Sensors, *Micromachines* (Basel) 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14040735>.
- [16] R. Liu, H. Liu, T. Lyu, K. Chen, Z. Wang, Y. Tian, Tri-state recyclable multifunctional hydrogel for flexible sensors, *J Appl Polym Sci* 139 (2022). <https://doi.org/10.1002/app.52928>.
- [17] S. Kim, H. Shin, K. Song, Y. Cha, Flexible piezoelectric sensor array for touch sensing of robot hand, in: 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots, UR 2019, 2019. <https://doi.org/10.1109/URAI.2019.8768644>.

- [18] N. Li, Q. Wang, C. He, J. Li, X. Li, C. Shen, B. Huang, J. Tang, H. Yu, S. Wang, L. Du, W. Yang, R. Yang, D. Shi, G. Zhang, 2D Semiconductor Based Flexible Photoresponsive Ring Oscillators for Artificial Vision Pixels, *ACS Nano* 17 (2023). <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06921>.
- [19] Y. Gu, X. Wang, W. Gu, Y. Wu, T. Li, T. Zhang, Flexible electronic eardrum, *Nano Res* 10 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1470-1>.
- [20] R. Faleh, S. Bedoui, A. Kachouri, Review on smart electronic nose coupled with artificial intelligence for air quality monitoring, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems* 5 (2020). <https://doi.org/10.25046/aj050292>.
- [21] Y. Yu, P.C. Joshi, J. Wu, A. Hu, Laser-Induced Carbon-Based Smart Flexible Sensor Array for Multiflavors Detection, *ACS Appl Mater Interfaces* 10 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsaami.8b12626>.
- [22] T. Gan, Capacitive Flexible Pressure Sensors and Their Application, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455305038>.
- [23] R. Li, Q. Zhou, Y. Bi, S. Cao, X. Xia, A. Yang, S. Li, X. Xiao, Research progress of flexible capacitive pressure sensor for sensitivity enhancement approaches, *Sens Actuators A Phys* 321 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112425>.
- [24] X. Wang, Y. Zhang, T. Zhang, G. Fu, Y. Zhu, Y. Liu, Modeling and Relative Permittivity Modulation of Cu/PDMS Capacitive Flexible Sensor for Pressure Sensing, *Sensors* 25 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25030637>.
- [25] A. Nyabadza, M. Vázquez, S. Coyle, B. Fitzpatrick, D. Brabazon, Review of Materials and Fabrication Methods for Flexible Nano and Micro-Scale Physical and Chemical Property Sensors, *Applied Sciences* 11 (2021) 8563. <https://doi.org/10.3390/app11188563>.
- [26] A. Kumar Sharma, A. Kumar Sharma, R. Sharma, P. Sharma, S. Singh, Multifunctional Transparent Conductive Flexible Sensor Based on Graphene/Polyaniline/Graphene Sandwich Composite on PDMS Substrate, *IEEE Sens J* 24 (2024) 25328–25336. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3418851>.

- [27] Z. Wang, A.A. Volinsky, N.D. Gallant, Crosslinking effect on polydimethylsiloxane elastic modulus measured by custom-built compression instrument, *J Appl Polym Sci* 131 (2014). <https://doi.org/10.1002/app.41050>.
- [28] N. Ji, J. Luo, W. Zhang, J. Sun, J. Wang, C. Qin, Q. Zhuo, L. Dai, A Novel Polyvinyl Alcohol-Based Hydrogel with Ultra-Fast Self-Healing Ability and Excellent Stretchability Based on Multi Dynamic Covalent Bond Cross-Linking, *Macromol Mater Eng* 308 (2023). <https://doi.org/10.1002/mame.202200525>.
- [29] P. Sun, Q. Li, Tension-Responsive Graphene Oxide Conductive Hydrogel with Robust Mechanical Properties and High Sensitivity for Human Motion Monitoring, *Macromol Mater Eng* 308 (2023). <https://doi.org/10.1002/mame.202200529>.
- [30] J.N. Liu, Q. He, M.Y. Pan, K. Du, C. Bin Gong, Q. Tang, An energy-saving, bending sensitive, and self-healing PVA-borax-IL ternary hydrogel electrolyte for visual flexible electrochromic strain sensors, *J Mater Chem A Mater* 25 (2022). <https://doi.org/10.1039/d2ta06667j>.
- [31] M. Wang, J. Bai, K. Shao, W. Tang, X. Zhao, D. Lin, S. Huang, C. Chen, Z. Ding, J. Ye, Poly(vinyl alcohol) Hydrogels: The Old and New Functional Materials, *Int J Polym Sci* 2021 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/2225426>.
- [32] F. Seidi, Y. Jin, J. Han, M.R. Saeb, A. Akbari, S.H. Hosseini, M. Shabanian, H. Xiao, Self-healing Polyol/Borax Hydrogels: Fabrications, Properties and Applications, *Chemical Record* 20 (2020). <https://doi.org/10.1002/tcr.202000060>.
- [33] N.A. Demidenko, A. V. Kuksin, V. V. Molodykh, E.S. Pyankov, L.P. Ichkitidze, V.A. Zaborova, A.A. Tsymbal, S.A. Tkachenko, H. Shafaei, E. Diachkova, A.Y. Gerasimenko, Flexible Strain-Sensitive Silicone-CNT Sensor for Human Motion Detection, *Bioengineering* 9 (2022). <https://doi.org/10.3390/bioengineering9010036>.
- [34] S. Wu, Z. Hu, N. Jiang, J. Zhai, Y. Liu, Z. Wang, C. Kang, Y. Wang, Flexible Temperature Sensor Array Based on PEDOT:PSS Inkjet Printing, *IEEE Sens J* 24 (2024) 22249–22258. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3407790>.

- [35] S. Adorinni, P. Rozhin, S. Marchesan, Smart hydrogels meet carbon nanomaterials for new frontiers in medicine, *Biomedicines* 9 (2021). <https://doi.org/10.3390/biomedicines9050570>.
- [36] D.H. Lee, C.H. Chuang, M.O. Shaikh, Y.S. Dai, S.Y. Wang, Z.H. Wen, C.K. Yen, C.F. Liao, C.T. Pan, Flexible piezoresistive tactile sensor based on polymeric nanocomposites with grid-type microstructure, *Micromachines (Basel)* 12 (2021). <https://doi.org/10.3390/mi12040452>.
- [37] T.H. da Costa, J. Choi, Fabrication and Patterning Methods of Flexible Sensors Using Carbon Nanomaterials on Polymers, *Advanced Intelligent Systems* 2 (2020). <https://doi.org/10.1002/aisy.201900179>.
- [38] S. Ying, J. Li, J. Huang, J.H. Zhang, J. Zhang, Y. Jiang, X. Sun, L. Pan, Y. Shi, A Flexible Piezocapacitive Pressure Sensor with Microsphere-Array Electrodes, *Nanomaterials* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13111702>.
- [39] P. Sharma, N. Jackson, Spin-Spray Deposition of Spin on Glass Using MEMS Atomizer, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021: pp. 681–684. <https://doi.org/10.1109/MEMS51782.2021.9375169>.
- [40] C. Pitsalidis, A.M. Pappa, S. Hunter, M.M. Payne, J.E. Anthony, T.D. Anthopoulos, S. Logothetidis, Electrospray-processed soluble acenes toward the realization of high-performance field-effect transistors, *ACS Appl Mater Interfaces* 7 (2015) 6496–6504. <https://doi.org/10.1021/am508162m>.
- [41] Y. Mou, C. Wang, S. Liu, L. Liu, J. Duan, Flexible Vibration Sensors with Omnidirectional Sensing Enabled by Femtosecond Laser-Assisted Fabrication, *Polymers (Basel)* 17 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17020211>.
- [42] S. Cao, R. Li, M. Panahi-Sarmad, T. Chen, X. Xiao, A Flexible and Highly Sensitive Capacitive Pressure Sensor With Microstructured Dielectric TPU Layer Based on Mesh Fabric as Template, *IEEE Sens J* 22 (2022). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3207005>.
- [43] Y. Joo, J. Yoon, Y. Hong, Elastomeric nanowire composite for flexible pressure sensors with tunable sensitivity, *Journal of Information Display* 17 (2016) 59–64. <https://doi.org/10.1080/15980316.2016.1158745>.

- [44] C. Lv, S. Wei, Y. Li, T. Lv, Q. Li, Y. Liu, M. Xie, A Flexible Capacitive Pressure Sensor with Improved Sensitivity Over a Broad Pressure Range, in: Proceedings of IEEE Sensors, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. <https://doi.org/10.1109/SENSORS60989.2024.10784769>.
- [45] J. Yao, C. Qu, Z. Chen, Y. Zhang, Y. Xu, High-Sensitive Wearable Capacitive Pressure Sensor with Hemispherical Porous Electrode, ACS Appl Electron Mater 6 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c00210>.
- [46] K. Zhao, J. Han, Y. Ma, Z. Tong, J. Suhr, M. Wang, L. Xiao, S. Jia, X. Chen, Highly Sensitive and Flexible Capacitive Pressure Sensors Based on Vertical Graphene and Micro-Pyramidal Dielectric Layer, Nanomaterials 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13040701>.
- [47] Q. Yu, J. Zhang, Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on a Double-Sided Microstructure Porous Dielectric Layer, Micromachines (Basel) 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14010111>.
- [48] Z. Feng, Q. He, X. Wang, Y. Lin, J. Qiu, Y. Wu, J. Yang, Capacitive Sensors with Hybrid Dielectric Structures and High Sensitivity over a Wide Pressure Range for Monitoring Biosignals, ACS Appl Mater Interfaces 15 (2023) 6217–6227. <https://doi.org/10.1021/acsaami.2c21885>.
- [49] D. Zhang, A Coefficient of Determination for Generalized Linear Models, American Statistician 71 (2017). <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1256839>.
- [50] X. Lu, X. Xie, Q. Gao, H. Hu, J. Yang, H. Wang, S. Wang, R. Chen, Design of biomimetic human-skin-like tactile flexible sensor, Sensor Review 39 (2019) 397–406. <https://doi.org/10.1108/SR-01-2018-0007>.
- [51] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications Fifth Edition, San Diego, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>.
- [52] W. Cheng, L. Yu, D. Kong, Z. Yu, H. Wang, Z. Ma, Y. Wang, J. Wang, L. Pan, Y. Shi, Fast-response and low-hysteresis flexible pressure sensor based on silicon nanowires, IEEE Electron Device Letters 39 (2018). <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2835467>.
- [53] D. Jiang, Z. Fang, J. Chen, Q. Zhang, N. Sang, T. Zheng, C. Zhang, G. Yang, Y. Liu, Improving Perception Accuracy of Flexible Capacitive Stretchable Sensors

- Using Piecewise Power-Law Model, *IEEE Sens J* 24 (2024) 21436–21446. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3398137>.
- [54] A. Tewari, H. Huerta, G. Chinga-Carrasco, L.K. Hindersland, S. Ranta, F. Pettersson, R. Österbacka, M. Toivakka, Low-cost dielectric sheets for large-area floor sensing applications, *Flexible and Printed Electronics* 7 (2022). <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac968b>.
- [55] S.W. Kim, G.Y. Oh, K.I. Lee, Y.J. Yang, J.B. Ko, Y.W. Kim, Y.S. Hong, A Highly Sensitive and Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on Alignment Airgap Dielectric, *Sensors* 22 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22197390>.
- [56] S. Masihi, M. Panahi, D. Maddipatla, A.J. Hanson, A.K. Bose, S. Hajian, V. Palaniappan, B.B. Narakathu, B.J. Bazuin, M.Z. Atashbar, Highly Sensitive Porous PDMS-Based Capacitive Pressure Sensors Fabricated on Fabric Platform for Wearable Applications, *ACS Sens* 6 (2021). <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02122>.
- [57] N. Naserifar, S.S. Yerneni, L.E. Weiss, G.K. Fedder, Inkjet Printing of Curing Agent on Thin PDMS for Local Tailoring of Mechanical Properties, *Macromol Rapid Commun* 41 (2020). <https://doi.org/10.1002/marc.201900569>.
- [58] Y. Kumaresan, O. Ozioko, R. Dahiya, Effect of Dielectric and Stiffness of Soft Material between the Electrodes of a Capacitive Pressure Sensor on its Performance, in: *FLEPS 2020 - IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems*, 2020. <https://doi.org/10.1109/FLEPS49123.2020.9239583>.
- [59] C. Ni, S. Shang, J. Xu, M. Jin, H. Jiang, R. Bai, M. Wang, B. Ji, T. Hu, W. Yang, Y. Hu, Y. Cheng, H. Hong, L. Dong, Flexible capacitive pressure sensor with optimized interdigital AgNWs electrodes for wide-range pressure monitoring, *IEEE Sens J* (2024). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3486089>.
- [60] A. Pokatilov, A. Satrapinski, T. Kübarsepp, O. Märten, Verification of performance of commercial LCR meters, in: *CPEM Digest (Conference on Precision Electromagnetic Measurements)*, 2010. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2010.5545242>.

- [61] M. Krzywinski, N. Altman, Points of Significance: Error bars, *Nat Methods* 10 (2013). <https://doi.org/10.1038/nmeth.2659>.
- [62] Y. Jung, T. Lee, J. Oh, B.G. Park, J.S. Ko, H. Kim, J.P. Yun, H. Cho, Linearly Sensitive Pressure Sensor Based on a Porous Multistacked Composite Structure with Controlled Mechanical and Electrical Properties, *ACS Appl Mater Interfaces* 13 (2021) 28975–28984. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c07640>.
- [63] L. Lv, T. Liu, T. Jiang, J. Li, J. Zhang, Q. Zhou, R. Dhakal, X. Li, Y. Li, Z. Yao, A highly sensitive flexible capacitive pressure sensor with hierarchical pyramid micro-structured PDMS-based dielectric layer for health monitoring, *Front Bioeng Biotechnol* 11 (2023). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1303142>.
- [64] K. Keshyagol, S. Hiremath, V. H. M, A. Kini U, N. Naik, P. Hiremath, Optimizing Capacitive Pressure Sensor Geometry: A Design of Experiments Approach with a Computer-Generated Model, *Sensors* 24 (2024). <https://doi.org/10.3390/s24113504>.
- [65] W. Kim, A. Javey, O. Vermesh, Q. Wang, Y. Li, H. Dai, Hysteresis caused by water molecules in carbon nanotube field-effect transistors, *Nano Lett* 3 (2003). <https://doi.org/10.1021/nl0259232>.
- [66] J. Melcher, Y. Daben, G. Arlt, Dielectric Effects of Moisture in Polyimide, *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 24 (1989). <https://doi.org/10.1109/14.19863>.
- [67] Y. Shi, X. Lü, J. Zhao, W. Wang, X. Meng, P. Wang, F. Li, Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on Microstructured Composite Dielectric Layer for Broad Linear Range Pressure Sensing Applications, *Micromachines (Basel)* 13 (2022). <https://doi.org/10.3390/mi13020223>.
- [68] B.S. Kang, S.E. Moon, J.H. Kim, S.M. Kang, Broad-Range Supersensitive and Transparent Patterned Hydrogel-Based Pressure Sensor with Long-Term Stability, *ACS Appl Polym Mater* (2025). <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c03561>.
- [69] J. Huang, R. Zhou, Z. Chen, Y. Wang, Z. Li, X. Mo, N. Gao, J. He, C. Pan, Highly stable and reliable capacitive strain sensor for wearable electronics based on anti-dry hydrogel electrode, *Materials Today Physics* 35 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2023.101123>.

- [70] J. Zeng, Y. Wang, X. Liu, Y. Fang, L. Liang, Y. Zhang, Effect of microstructure on sensitivity of flexible capacitive pressure sensor, in: 2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology, ICEPT 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. <https://doi.org/10.1109/ICEPT59018.2023.10492312>.
- [71] C. Lv, C. Tian, J. Jiang, Y. Dang, Y. Liu, X. Duan, Q. Li, X. Chen, M. Xie, Ultrasensitive Linear Capacitive Pressure Sensor with Wrinkled Microstructures for Tactile Perception, *Advanced Science* 10 (2023). <https://doi.org/10.1002/advs.202206807>.
- [72] H. Yuan, Q. Zhang, T. Zhou, W. Wu, H. Li, Z. Yin, J. Ma, T. Jiao, Progress and challenges in flexible capacitive pressure sensors: Microstructure designs and applications, *Chemical Engineering Journal* 485 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149926>.
- [73] V. Rajandran, A.R. Marlinda, A.D. Azam, M. Shalauddin, A.A. Saifizul, S.M. Hafiz, S. Azlinda, Optimization of Graphene infused Natural Rubber Sensing Film and Polydimethylsiloxane for Flexible Pressure Sensor, *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 16 (2023). <https://doi.org/10.58915/ijneam.v16iDECEMBER.418>.
- [74] Q. Hou, M. Liang, R. Liu, W. Wang, Performance study of flexible capacitive pressure sensor based on dielectric structures, in: *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3530-2_65.
- [75] T. Taniguchi, K. Urayama, Linear dynamic viscoelasticity of dual cross-link poly(Vinyl alcohol) hydrogel with determined borate ion concentration, *Gels* 7 (2021). <https://doi.org/10.3390/gels7020071>.
- [76] H.L. Lin, Y.F. Liu, T.L. Yu, W.H. Liu, S.P. Rwei, Light scattering and viscoelasticity study of poly(vinyl alcohol)-borax aqueous solutions and gels, *Polymer (Guildf)* 46 (2005) 5541–5549. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.04.074>.
- [77] T.H.N. Dinh, P.Y. Joubert, E. Martincic, E. Dufour-Gergam, Non-invasive capacitive pressure sensor: Microfabrication process and first electro-mechanical characterization, in: *DTIP 2014 - Symposium on Design, Test, Integration and*

Packaging of MEMS/MOEMS, 2014.
<https://doi.org/10.1109/DTIP.2014.7056694>.

- [78] Z. Sun, Y. Li, Z. Lin, Y. Zhang, J. Huang, X. Chen, P. Lu, Z. Gong, Flexible acetylene black/PDMS capacitive pressure sensor with enhanced sensitivity based on percolation principle, in: 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2674126>.
- [79] H. Yu, C. Guo, X. Ye, Y. Pan, J. Tu, Z. Wu, Z. Chen, X. Liu, J. Huang, Q. Ren, Y. Li, Wide-Range Flexible Capacitive Pressure Sensors Based on Dielectrics with Various Porosity, *Micromachines* (Basel) 13 (2022). <https://doi.org/10.3390/mi13101588>.
- [80] R. Ma, Y. Zhao, H. Chen, Z. Zeng, Y. Li, R. Wang, F. Liu, Highly Sensitive Flexible Capacitive Pressure Sensor with Porous Hierarchical Structure Realized by a Microwave Curing Method, *Adv Eng Mater* 26 (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202301412>.