

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



PARİLEN C TABANLI ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

SEDAT KURNAZ

DOKTORA TEZİ

PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK

EYLÜL - 2023

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Sedat KURNAZ tarafından hazırlanan “**PARİLEN C TABANLI ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **22.09.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Mehmet Ali AKSAN İnönü Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Haluk KORALAY Gazi Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN TOKEŞER Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Sedat KURNAZ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PARİLEN C TABANLI ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

SEDAT KURNAZ

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK

Bu tez çalışması, MEMS uygulamalarında koruyucu tabaka olarak kullanılan parilen C'nin 2011 yılında piezoelektrik özelliklerinin keşfi sonrasında esnek basınç sensör olarak kullanılabilirliği kapsamaktadır. İlk olarak, parilen C kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle sentezlenmiştir. Ağırlıkça belirli oranlarda poliüretan (PU), poli(metil metakrilat) (PMMA) ve aktif karbon eklenerek, kompozit yapıda numuneler üretilmiştir. Bu numunelerin yapısal, kimyasal, morfolojik ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elektromekanik ölçümler ile piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif özellikleri belirlenerek, algılama performansları incelenmiş ve en iyi performansı gösteren esnek basınç sensörü adayları belirlenmiştir. Belirlenen aday numunelerin formülasyonu dikkate alınarak hazırlanan basınca duyarlı mürekkepler, serigrafi yöntemine uygun olarak tekrardan hazırlanmış ve serigrafi yöntemi ile esnek basınç sensörlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Elektromekanik ölçümler sonucunda düşük basıncı algılama performansına sahip olan parilen C tabanlı numuneler, esnek piezoelektrik basınç sensörü olarak kullanılamayacağı belirlenmiştir. Esnek piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerinin basıncı algıladığı aralık $P < 1,5$ kPa olarak belirlenmiş olup, hassasiyetleri sırasıyla $0,152 \text{ kPa}^{-1}$ ve $0,124 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir.

ANAHTAR KELİMELEER: Basınç, Basınç Sensörü, Dokunsal Sensör, Parilen C, Serigrafi.

Eylül 2023, 147 Sayfa

ABSTRACT

PH.D THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF PARYLENE C BASED FLEXIBLE PRESSURE SENSOR

SEDAT KURNAZ

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK**

This thesis covers the use of parylene C, which is used as a protective layer in MEMS applications, as a flexible pressure sensor after the discovery of its piezoelectric properties in 2011. First, parylene C was synthesized by chemical vapor deposition. Composite samples were prepared by the addition of polyurethane (PU), poly (methyl methacrylate) (PMMA) and activated carbon in certain weight ratios. Structural, chemical, morphological and thermal analyses of the samples were carried out. By electromechanical measurements, piezoelectric, piezoresistive and capacitive properties were determined, sensing performances were analyzed and the best performing flexible pressure sensor candidates were identified. Pressure-sensitive inks prepared by taking into account the formulation of the determined candidate samples were prepared again in accordance with the screen printing method and flexible pressure sensors were produced by screen printing method. The electromechanical measurements show that parylene C-based samples with low pressure sensing performance cannot be used as flexible piezoelectric pressure sensors. The pressure sensing range of the flexible piezoresistive and capacitive pressure sensors was determined as $P < 1.5$ kPa, with sensitivities of 0.152 kPa^{-1} and 0.124 kPa^{-1} , respectively.

KEYWORDS: Pressure, Pressure Sensor, Tactile Sensor, Parylene C, Screen Printed.

September 2023, 147 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan, doktora sürecinin başından beri beni cesaretlendiren, çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Doktora tezi savunmama jüri olarak katılan ve katkıda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet Ali AKSAN, Prof. Dr. Haluk KORALAY, Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN TOKEŞER ve Doç. Dr. Osman ÇİÇEK'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca, desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet Tolga TAŞÇI'ya da şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması sürecinde TUBİTAK 120M636 nolu projenin olanaklarından yararlanılmıştır. Desteklerinden dolayı TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım boyunca destekleriyle beni yalnız bırakmayan arkadaşlarıma ve aileme de sonsuz teşekkür ederim.

SEDAT KURNAZ

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xiv
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİ.....	4
2.1 Esnek Basınç Sensörü Çeşitleri	6
2.1.1 Esnek Piezoelektrik Basınç Sensörü.....	6
2.1.2 Esnek Piezorezistif Basınç Sensörü.....	7
2.1.3 Esnek Kapasitans Basınç Sensörü	8
2.2 Esnek Basınç Sensörü Özellikleri	9
2.2.1 Hassasiyet	10
2.2.2 Doğrusallık ve Tespit Aralığı	10
2.2.3 Tepki ve Gevşeme Süresi	11
2.2.4 Histerisiz	12
2.2.5 Kararlılık ve Dayanıklılık	12
2.3 Esnek Basınç Sensöründe Kullanılan Malzemeler.....	13
2.3.1 Parilen C	13
2.3.2 Poliüretan	14
2.3.3 PMMA	15
2.3.4 Aktif Karbon	15
2.3.5 PET	15
2.4 Esnek Basınç Sensörü Üretim Yöntemi	16
2.4.1 Serigrafi Yöntemi	16
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	18
4. YÖNTEM VE GEREÇLER.....	21
4.1 Parilen C'nin Sentezlenmesi	21
4.2 Basınca Duyarlı Mürekkebin Üretimi	22
4.3 Serigrafi İçin Basınca Duyarlı Mürekkebin Üretimi	24
4.4 Basınç Sensörlerin Üretimi	24
4.4.1 Esnek Altlığın Tasarımı, Üretimi ve Testi.....	24
4.4.2 Serigrafi Yöntemi ile Basınca Duyarlı Mürekkebin Basılması	25
4.5 Karakterizasyon Yöntemleri.....	26
4.5.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi	26
4.5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	27
4.5.3 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) Analizi	28
4.5.4 Termal Özelliklerinin Analizi	28
4.5.5 Elektromekanik Ölçümler	29

4.5.6	Ferroelektrik ve Piezoelektrik Özelliklerin İncelenmesi	30
5.	BULGULAR	31
5.1	Yapısal, Morfolojik, Kimyasal ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi	31
5.1.1	Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi	31
5.1.2	Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi	32
5.1.3	Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi	37
5.1.4	Termal Özelliklerinin İncelenmesi	44
5.2	Elektromekanik Özelliklerinin İncelenmesi	49
5.2.1	Piezoelektrik, Piezorezistif ve Kapasitif Basınç Sensörlerin Elektromekanik Ölçümleri	49
5.2.1.1	Piezoelektrik basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri	50
5.2.1.2	Piezorezistif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri	64
5.2.1.3	Kapasitif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri	78
5.2.2	Serigrafi Yöntemi ile Üretilen Piezorezistif ve Kapasitif Basınç Sensörlerin Elektromekanik Ölçümleri	92
5.2.2.1	Serigrafi yöntemi ile üretilen piezorezistif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri	93
5.2.2.2	Serigrafi yöntemi ile üretilen kapasitif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri	106
5.2.2.3	Serigrafi yöntemi ile üretilen piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerin değişken frekanslardaki elektromekanik ölçümleri	119
5.3	Ferroelektrik ve Piezoelektrik Özelliklerinin İncelenmesi	123
6.	TARTIŞMA VE SONUÇ	125
	KAYNAKLAR	130
	ÖZGEÇMİŞ	144

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Esnek basınç sensörlerinin uygulamaları: akustik algılama, elektronik deri, sağlığı izleme, robotik algılama	4
Şekil 2.2 Piezoelektrik mekanizmasının şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3 Piezoelektrik sensörler için eş değer devre modeli.....	6
Şekil 2.4 Piezorezistif mekanizmasının şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.5 Kapasitif mekanizmasının şematik gösterimi	8
Şekil 2.6 (a) Tespit aralığı ve (b) 0,07–1,39 kPa aralığındaki hassasiyet ve doğrusalılık.....	11
Şekil 2.7 Tepki ve gevşeme süresi	11
Şekil 2.8 Zamana bağlı olarak viskoelastik etki	12
Şekil 2.9 Parilen N, C, D ve HT'nin kimyasal yapısı	14
Şekil 4.1 (a) Parilen C'nin polimerasyonu için üretim düzeneği ve (b) parilen C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu yapısı	21
Şekil 4.2 Basınca duyarlı mürekkebin üretim süreci	22
Şekil 4.3 Aixacct TF Analyzer 2000 Ferroelektrik Ölçüm Ünitesi	30
Şekil 5.1 (a) 100P, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerin XRD grafikleri	31
Şekil 5.2 100P numunesinin (a) 80.000x ve (b) 1.200x büyütme SEM görüntüleri	32
Şekil 5.3 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin 80.000x büyütme SEM görüntüleri.....	33
Şekil 5.4 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin 80.000x büyütme SEM görüntüleri.....	34
Şekil 5.5 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin 80.000x büyütme SEM görüntüleri.....	35
Şekil 5.6 Yanal SEM görüntüleri (a) iletken üzerine kaplanan mürekkebin kalınlığı (1.000x) ve (b) kaplanan iletkenin kalınlığı (800x).....	36
Şekil 5.7 (a) 100P, (b) PU ve (c) PMMA numunelerinin IR spektrumu	38
Şekil 5.8 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin IR spektrumu.....	39
Şekil 5.9 %25 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları	40
Şekil 5.10 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin IR spektrumu.....	41
Şekil 5.11 %50 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları	42
Şekil 5.12 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin IR spektrumu.....	43
Şekil 5.13 %75 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları	44
Şekil 5.14 (a) 100P, PU ve PMMA, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerinin TG termogramları.....	46
Şekil 5.15 (a) 100P, PU ve PMMA, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerinin DSC termogramları	48

Şekil 5.16 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı.....	51
Şekil 5.17 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti	52
Şekil 5.18 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı.....	53
Şekil 5.19 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti	54
Şekil 5.20 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı.....	55
Şekil 5.21 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti	56
Şekil 5.22 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti.....	58
Şekil 5.23 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı	65
Şekil 5.24 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti.....	66
Şekil 5.25 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı	67
Şekil 5.26 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti.....	68
Şekil 5.27 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı	69
Şekil 5.28 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti.....	70
Şekil 5.29 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti	72
Şekil 5.30 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı.....	79
Şekil 5.31 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti	80

Şekil 5.32 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı.....	81
Şekil 5.33 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti	82
Şekil 5.34 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı.....	83
Şekil 5.35 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti	84
Şekil 5.36 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti	86
Şekil 5.37 25P74U1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 0,69 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 0,69 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	94
Şekil 5.38 25P73U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	95
Şekil 5.39 25P69U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	96
Şekil 5.40 50P50U numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	97
Şekil 5.41 50P45U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	98
Şekil 5.42 50P44U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak	

	kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	99
Şekil 5.43	75P23U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	100
Şekil 5.44	75P20U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	101
Şekil 5.45	25P74U1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	107
Şekil 5.46	25P73U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	108
Şekil 5.47	25P69U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	109
Şekil 5.48	50P50U numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	110
Şekil 5.49	50P45U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri	111
Şekil 5.50	50P44U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı	

	olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri.....	112
Şekil 5.51	75P23U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri.....	113
Şekil 5.52	75P20U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri.....	114
Şekil 5.53	75P20U5M numunesinin 1,39 kPa basınç altında (a) 0,2 Hz, (b) 0,1 Hz ve (c) 0,05 Hz frekansa bağlı bağlı direnç değişimi kararlılığı	119
Şekil 5.54	75P20U5M numunesinin (a) 0,2 Hz, (c) 0,1 Hz ve (e) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak 1,39 kPa basınç altında 100 çevrimli bağlı direnç değişimi kararlılığı ve (b) 0,2 Hz, (d) 0,1 Hz ve (f) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi	120
Şekil 5.55	25P74U1C numunesinin (a) 0,2 Hz, (b) 0,1 Hz ve (c) 0,05 Hz frekansa bağlı bağlı kapasitans değişimi kararlılığı	121
Şekil 5.56	25P74U1C numunesinin (a) 0,2 Hz, (c) 0,1 Hz ve (e) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak 1,39 kPa basınç altında 100 çevrimli bağlı kapasitif değişimi ve (b) 0,2 Hz, (d) 0,1 Hz ve (f) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi.....	122
Şekil 5.57	290 µm kalınlıktaki parilen C filminin P-E ve S-E ölçümü	124

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Sensör mekanizmalarına göre avantaj ve dezavantajları	5
Tablo 4.1 Ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi ve viskozite değerleri.....	23
Tablo 4.2 Serigrafi için ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi ve viskozite değerleri	24
Tablo 5.1 PU, PMMA, %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelerinin TGA sonuçları.....	47
Tablo 5.2 PU, PMMA, %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelerinin DSC sonuçları	49
Tablo 5.3 Piezoelektrik sensörlerin hassasiyet değerleri	59
Tablo 5.4 Piezoelektrik sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri	60
Tablo 5.5 Piezorezistif sensörlerin uygulanan basınç aralığında hassasiyet değerleri.....	73
Tablo 5.6 Piezorezistif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri	74
Tablo 5.7 Kapasitif sensörlerin hassasiyet değerleri.....	87
Tablo 5.8 Kapasitif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri	87
Tablo 5.9 Piezorezistif sensörlerin hassasiyet değerleri	102
Tablo 5.10 Piezorezistif sensörlerin kararlılıktaki yüzdelik değişimi.....	103
Tablo 5.11 Piezorezistif sensörlerin doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri.....	104
Tablo 5.12 Piezorezistif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri	104
Tablo 5.13 Kapasitif sensörlerin hassasiyet değerleri.....	115
Tablo 5.14 Kapasitif sensörlerin kararlılıktaki yüzdelik değişimi	116
Tablo 5.15 Kapasitif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri	116
Tablo 5.16 Kapasitif sensörlerin doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri....	118
Tablo 5.17 Farklı frekansta tepki ve gevşeme süreleri, kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve tekrarlanabilirlik hatası	122
Tablo 6.1 Literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılması	127
Tablo 6.2 Endüstriyel sensörler ile karşılaştırılması.....	129

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Fotoğraf 2.1 Serigrafi baskı sistemi	16
Fotoğraf 4.1 (a) çözeltinin beher içerisindeki hali, (b) petri kabına dökülmesi ve kurutma işlemi sonrasındaki hali ve (c) viskozimetre ölçümü	23
Fotoğraf 4.2 Serigrafi uygulaması için çözücülerini uzaklaştırılmış basınca duyarlı mürekkepler	24
Fotoğraf 4.3 (a) Esnek sensörlerin tasarımı, (b) ipek baskı kalıbı ve (c) hazırlanan altlıklar	25
Fotoğraf 4.4 (a) Mürekkebin serigrafi yöntemi ile basılması, (b) sensör boyutları, (c) üç boyutlu gösterimi ve (d) hazırlanan esnek basınç sensörleri	26
Fotoğraf 4.5 Bruker D8 Advance X-ışını difraktometresi	27
Fotoğraf 4.6 FEI Quanta-FEG 250 alan emisyonlu taramalı el222elektron mikroskobu	27
Fotoğraf 4.7 Bruker Alpha II Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi	28
Fotoğraf 4.8 Termogravimetrik analiz sistemi ve diferansiyel taramalı kalorimetre	29
Fotoğraf 4.9 (a) Universal test cihazı ve Keithley 6517B, (b) Wayne Kerr 6500B empedans analizör ve (c) numuneye kuvvet uygulanırken	30

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

C	: Kapasitans
kHz	: Kilohertz
kPa	: Kilopaskal
kV	: Kilovolt
N	: Newton
R	: Direnç
s	: Saniye
µm	: Mikrometre
V	: Gerilim
ΔV	: Gerilimdeki değişim
ΔR/R	: Bağlı direnç
ΔC/C	: Bağlı kapasitans
°C	: Santigrat derece

Kısaltmalar

DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
MEMS	: Mikro-elektro-mekanik sistemler
PET	: Polietilen teraftalat
PMMA	: Poli(metil metakrilat)
PU	: Poliüretan
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
XRD	: X-ışınları difraktometresi

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde robotik ve otomasyon sistemleri hızlı bir gelişim süreci içerisindeyler. Bu sistemlerin temel hedefi, çevre ile olan etkileşimi en yüksek düzeye çıkarabilmektir. Bu hedefe ulaşabilmek için dışarıdan gelen bir uyarıyı (ısı, ışık, nem, ses, basınç, kuvvet, elektrik, gerilim, uzaklık, ivme ve pH gibi fiziksel ya da kimyasal büyüklükleri) işlenebilen ve ölçülebilen elektrik sinyallerine dönüştüren sensörlerden faydalanılmaktadır (Fraden, 2004; Webster ve Eren, 2018). Günümüzde sağlık, otomotiv, robotik, havacılık, makine gibi birçok alanda mekanik sensörler, nem sensörleri, sıcaklık sensörleri, hız sensörleri, dokunma sensörleri, basınç sensörleri gibi sensörler teknolojik uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır (Kretshmar vd. 2005). Bunların içerisinde basınç sensörleri endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla kullanılmasının yanı sıra, üretim veya test sürecinde sistemin durumunun izlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Basınç sensörleri her türlü fiziki kuvvet veya basınç değişimini algılayan ve bu değişimi elektriksel sinyale (akım, gerilim, direnç, kapasitans vb.) çeviren elemanlardır (Zheng ve Fan, 1991). Basınç sensörlerinin mikro-elektro-mekanik sistemlere (MEMS) entegrasyonu ile birlikte robotik, biyomedikal ve diğer elektronik cihazlarda kullanımı sonucu oldukça hassas ve yüksek performans gösteren sensörler geliştirilmektedir (Chen ve Bedekar, 2017). Son yıllarda özellikle insan-makine etkileşimi, elektronik deri, yumuşak robotik uygulamalar ve sağlığın izlenmesinde elde edilen geliştirmeler, basınç sensörlerin esneme, sıkıştırılma, bükülme ve deforme olma yeteneğine sahip olması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Geleneksel sensörlerin bu ihtiyacı karşılayamaması esnek basınç sensörlerin ortaya çıkışında kritik rol oynamıştır (Liu vd. 2022; Niu vd. 2019; Rogers vd. 2010; Zhang vd. 2022). Metal, yarı iletken ve seramik malzemeler kullanılarak üretilen geleneksel basınç sensörlerine kıyasla polimerik malzemelerin kullanımı ile üretilen esnek basınç sensörlerinin esnekliği, gerilebilirliği, hafifliği, düşük maliyetli ve kolay üretim süreci araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Park vd. 2014; Tao vd. 2017). Bu sayede, yüksek hassasiyete sahip esnek basınç sensörlerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadırlar (Sun vd. 2018).

Geleneksel basınç sensörlerin üretiminde nano/mikroteknoloji alanında oldukça fazla kullanılan lithografi, maske hizalama ve dağlama işlemleri sıkça kullanılmaktadır. Üretilen basınç sensörleri katı, esnek ve bükülebilir olmayan yapılardır. Bu sensörlerin esnek ve bükülebilir bir yapıya sahip olabilmesi için polimer tabanlı malzemelerin kullanılmasının yanı sıra üretim teknolojisindeki gelişmeler, araştırmacılarının dikkatini çekmektedir. Düşük maliyetlerde seri üretim gerçekleştirme imkânı sağlayan baskılı elektronik (printed electronic) teknolojisi öne çıkan bir teknoloji olup, basitleştirilmiş üretim süreci, az malzeme sarfiyatı, düşük maliyet ve basit desenleme teknikleri ile plastik altlıklar üzerine esnek ve bükülebilir sensörlerin üretimi çok cazip hale gelmektedir (Khan vd. 2015). Böylelikle, son 20 yılda antenler, güneş hücreleri, sensörler, membran anahtarları ve tuş takımlarının üretilmesi, endüstrinin ihtiyacına cevap olabilmektedirler (Da Cruz, 2015).

Baskılı elektronik teknolojisinde kullanılan serigrafi, mürekkep, gravür ve fleksografik baskı yöntemleri ile esnek, mekanik olarak tasarlanmış devreler ve sensörler üretilmektedir. Baskılı elektronik teknolojisinde kullanılan diğer baskı yöntemleri ile karşılaştırıldığında, serigrafi yöntemi 1940'lı yıllarından beri elektronik devre üretiminde kullanılan en eski yöntemdir. Bu yöntem ile iletken mürekkepler (gümüş, bakır, alüminyum, grafit, karbon vb.) kullanılarak oluşturulan iletim yollarında daha az mürekkep yayılımı görülmektedir. Ayrıca, kısa devre oluşumlarının önlenmesinde de daha başarılı bir yöntemdir (Rodriguez vd. 2016).

Baskılı elektronik teknolojisi kullanılarak, yüksek hassasiyete sahip esnek basınç sensörlerin üretiminde polimer tabanlı malzemelerin seçimi önemlidir. Sıkça kullanılan polistiren (PS), polianilin (PANI), poli (metil metakrilat) (PMMA) ve poliüretan (PU) polimerlerin yanı sıra poli (vinilidin florür) (PVDF), polipropilen (PP), florlu etilen propilen (FEP), döngüsel olefin kopolimer (COC), β glisin ve siklo-glisin-triptofan (siklo-GW) polimerleri de piezoelektrik özellikleri sebebiyle esnek sensör uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır (Gonçalves, 2014; Shi vd. 2022). Piezoelektriğin kökeni, polimerin birim molekülündeki polar asimetriden gelir. Parilen C (poly(chloro-para-xylylene)) tek bir klorlu benzen halkasına sahip olmasından dolayı asimetrik davranış gösterir ve potansiyel bir piezoelektrik malzemedir. Piezoelektrik özellikleri ilk kez 2011 yılında keşfedilmiştir (Duggina ve Jackson,

2021; Kim, 2013, Kim vd. 2014). Parilen C yüksek elektriksel izolasyon, biyouyumluluk ve organik çözücülere karşı kimyasal dayanıklılık göstermesi sebebiyle mikrovalfler, ivmeölçerler, esnek elektrotlar, ilaç salım sistemleri, hücre kültürü altlıkları ve nöral problemler gibi MEMS uygulamalarında koruyucu katman malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Chen vd. 2022; Chindam vd. 2015; Chou vd. 2021; Schwerdt vd. 2018; Song vd. 2021; Zhang vd. 2018).

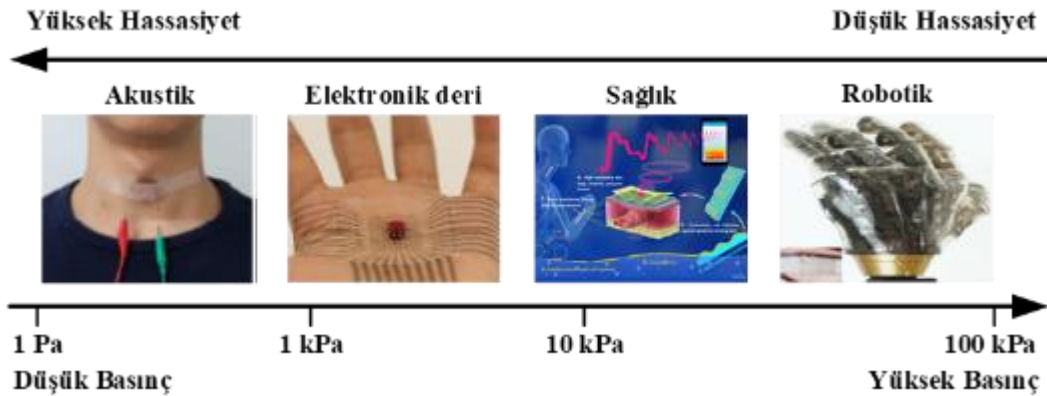
Tez kapsamında, parilen C'nin esnek basınç sensör uygulamalarındaki potansiyel kullanımına odaklanılmıştır. Bu çalışmada parilen C, kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle sentezlenmiş olup, parilen C tabanlı esnek basınç sensörleri üretilmiştir. Belirli oranlarda PU, PMMA ve aktif karbon eklenerek basınca duyarlı mürekkepler hazırlanmış olup, bu mürekkepler ile numuneler üretilmiştir. Bunların yapısal, kimyasal, morfolojik ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elektromekanik ölçümler ile piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif özellikleri belirlenerek, uygulanan basınca karşı hassasiyeti ve tepki verme kapasitesi dikkate alınarak algılama performansları incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda hangi tip (piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif) esnek basınç sensörüne uygun olduğu belirlenerek, potansiyel sensör adayları tespit edilmiştir.

Belirlenen aday numunelerin formülasyonu dikkate alınarak tekrar hazırlanan mürekkepler, baskılı elektronik teknolojisinde kullanılan yöntemlerden biri olan serigrafi yöntemine uygun hale getirilerek, polietilen tereftalat (PET) altlık üzerine basılarak esnek basınç sensörleri üretilmiştir. Elektromekanik ölçümler ile piezorezistif ve kapasitif esnek basınç sensörlerin düşük basınç aralığında (<1,5 kPa) algılama gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

2. ESNEK BASINÇ SENSÖRLERİ

Basınç sensörlerin gelişimi ilk defa Charles S. Smith'in 1954 yılında Germanyum ve Silikonun basınç etkisiyle direncindeki değişimini keşfetmesi ile başlamıştır (Smith, 1954). Endüstriyel, medikal, havacılık, otomotiv, dokunmatik ekran, denizcilik, elektronik, robotik, giyilebilir teknoloji gibi alanlarda geniş kullanıma sahip olmakla birlikte izleme, kontrol ve otomasyon teknolojisinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (Mokofeng, 2016). Basınç sensörlerinin sert, hantal ve kırılğan yapıya sahip olması, son yıllardaki robotik ve giyilebilir teknolojilerde esneme, sıkıştırılma, bükülme ve deforme olmaya olan ihtiyacı karşılamamakta birlikte bu yeteneklere sahip esnek basınç sensörlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

İdeal bir basınç sensörünün kullanımı kolay, yüksek çözünürlüklü, iyi hassasiyet göstermesi, uygulanan basınca hızlı yanıt verebilmesi ve yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olması gerekir (Mokofeng, 2016). Geleneksel basınç sensörlerinin gösterdiği performansı, esnek basınç sensörlerinin de gösterebilmesi ile düşük (<10 kPa), orta (10-100 kPa) ve yüksek (>100 kPa) basınç aralığında yenilikçi çözümlere ulaşılmıştır. Şekil 2.1'de esnek basınç sensörlerine ait uygulamalar yer almakta olup, elektronik deri ve akustik uygulamaları düşük basınç bölgesinde yer almaktadır. İnsan sağlığını izleme ve robotik uygulamalar ise orta ve yüksek basınç değerlerinde ortaya çıkmaktadır (Tessarolo vd. 2018). Basınç ile hassasiyet ters orantılı olmakla birlikte yüksek basınç gerektiren uygulamalarda basıncı algılama hassasiyeti azalırken, düşük basınç gerektiren uygulamalarda basıncı algılama hassasiyeti artmaktadır.



Şekil 2.1 Esnek basınç sensörlerinin uygulamaları: akustik algılama (Wu vd. 2017), elektronik deri (Wang vd. 2018), sağlığı izleme (He vd. 2019), robotik algılama (Kim vd. 2014)

Esnek basınç sensörleri uygulamalarına bağlı olarak basınca duyarlı malzemelerin seçimi ve basıncın yüksek hassasiyet ile algılanması önemli olmakla birlikte sinyal iletim mekanizması da önem arz etmektedir. Sinyal iletim mekanizmasına bağlı olarak kapasitif (Maddipatla vd. 2020), piezoelektrik (Koç ve Akça, 2013) ve piezorezistif (Karmakar vd. 2022) olarak sınıflandırılır. Bu mekanizmayı kullanan esnek basınç sensörlerinin, bazı avantajlara ve dezavantajlara sahip olduğu Tablo 2.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Esnek basınç sensörlerinin kullanılacağı alanlara bağlı olarak, sensör mekanizmaları seçilmesinin yanı sıra avantajları ve dezavantajları iyi tanımlanmalıdır.

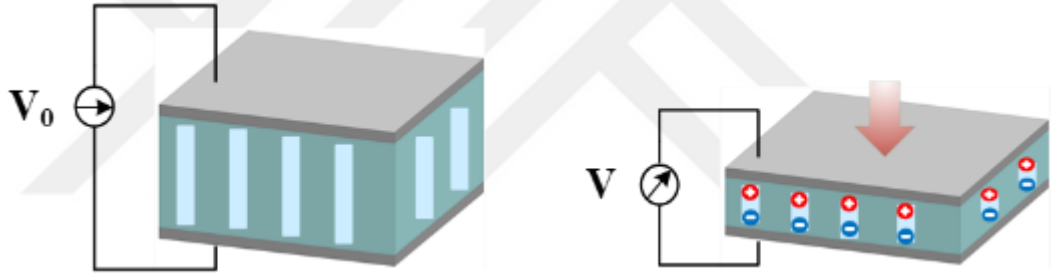
Tablo 2.1 Sensör mekanizmalarına göre avantaj ve dezavantajları (Cinfer, 2022; Korkmaz, 2015; Li vd. 2018)

Sensör Mekanizmaları	Avantajları	Dezavantajları
Piezoelektrik	Esneklik	Yüksek sıcaklık hassasiyeti
	Yüksek hassasiyet	Orta güç tüketimi
	İyi frekans yanıtı	Histeresis
	Basit elektronik yapı	Yüksel çözünürlük
Piezorezistif		Düşük tekrarlanabilirlik
	İyi frekans yanıtı	Histerisiz
	Yüksek hassasiyet	Doğrusal olmayan yanıt
	Düşük sıcaklık hassasiyeti	Yüksek güç tüketimi
	Düşük güç tüketimi	Karmaşık elektronik yapı
Kapasitif	Düşük maliyet	Sinyal kayması
	Düşük gürültü	
	Yüksek hassasiyet	Yüksek histerisiz
	Yüksel çözünürlük	Gürültü hassasiyeti
	Gürültüye karşı dayanıklı	Karmaşık elektronik yapı
	Basit elektronik yapı	
	Düşük karmaşıklık	
	Düşük maliyet	
	Düşük enerji tüketimi	
	Esneklik	
	Geniş ölçüm aralığı	
	Sıcaklıktan bağımsız	

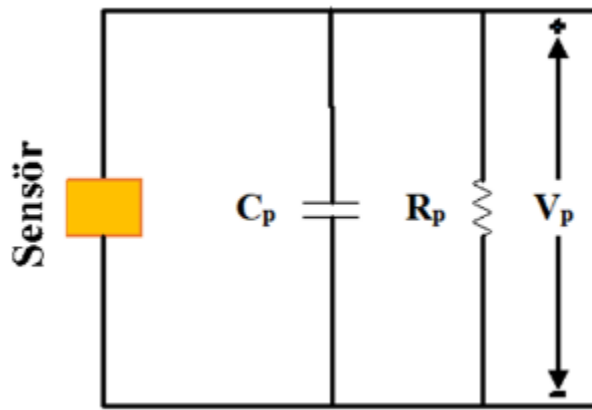
2.1 Esnek Basınç Sensörü Çeşitleri

2.1.1 Esnek Piezoelektrik Basınç Sensörü

Yunancadan türetilen ‘piezo’ kelimesi basınç anlamına gelmekte olup, piezoelektrik ifadesi ise basınç sonucunda oluşan elektrik demektir. Piezoelektrik etki gösteren malzemelerden üretilen piezoelektrik sensörler, mekanik uyarıma (basınç, gerinim ve kuvvet) bağlı olarak ile elektrik yükü biriktirerek elektrik potansiyel oluşturmaktadır. Şekil 2.2’de piezoelektrik mekanizmasının şematik gösterimi ve Şekil 2.3’te eş değer devre modeli yer almakta olup, elektrik potansiyel, mekanik uyarım ile malzeme içerisindeki dipol moment yoğunluğunun polarizasyonundan kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, polarizasyon ile dipol momentin yeniden yapılandırılması veya yeniden yönlendirilmesi mümkün hale gelmektedir (Birkholz, 1995).



Şekil 2.2 Piezoelektrik mekanizmasının şematik gösterimi



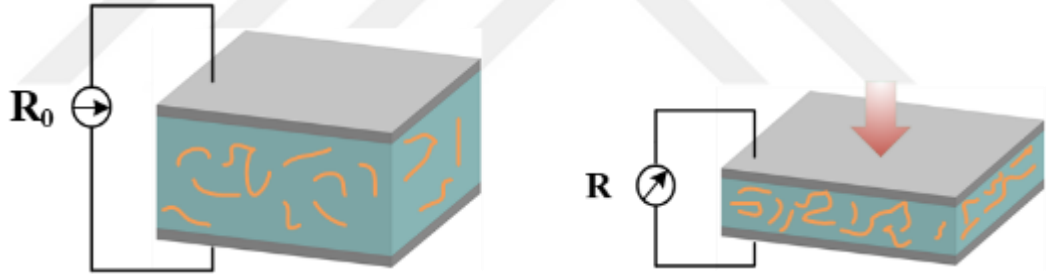
Şekil 2.3 Piezoelektrik sensörler için eş değer devre modeli (URL-1)

İlk kez piezoelektrik özelliğin varlığı Pierre Curie tarafından rochelle tuzu kristalinde 1880 yılında keşfedilmesinden sonra $PbTiO_3$, $BaTiO_3$, PZT, ZnO , SiO_2 vb. malzemelerin piezoelektrik özellikleri keşfedilerek endüstriyel uygulamalarda sıkça

kullanılır hale gelmişlerdir (Tichý vd. 2010). 1969 yılında Kawai tarafından polimer malzeme olan poly(vinylidene flüoride) (PVDF)'te hem piezoelektrik hem de pyroelektrik özelliklerini keşfedilmiştir (Kawai, 1969). Günümüze kadar ki süreçte poli(vinilidenflorür-ko-trifloroetilen) (P(VDF-TrFE)), naylon, poli-L-Laktik asit (PLLA), poli-D-Laktik asit (PDLA), parylene C vb. malzemelerin piezoelektrik özellikleri tanımlanmıştır (Khalifeh, 2020; Kim, 2013; Smith ve Kar-Narayan, 2021). Bu malzemeler kullanılarak üretilen esnek piezoelektrik basınç sensörleri kolay üretim süreci, düşük maliyeti, kolay elektrik sinyali alımı gibi avantajlar sağlaması ile araştırmacıların dikkatini çekmektedir.

2.1.2 Esnek Piezorezistif Basınç Sensörü

Piezorezistif basınç sensörleri mekanik uyarıma bağlı olarak direncindeki değişimi esasına dayanmakta olup, bu değişim sayesinde malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri arasında bağlantı kurulabilmektedir.



Şekil 2.4 Piezorezistif mekanizmasının şematik gösterimi

Şekil 2.4'de piezorezistif mekanizmasının şematik gösterimi yer almaktadır. Bir malzemenin direnci Denklem 2.1'de belirtildiği üzere R direnç, ρ öz direnç, L uzunluk ve A kesit alanıdır. Mekanik uyarım ile birlikte direncindeki, uzunluğundaki ve öz direncindeki meydana gelen değişim Denklem 2.2'de verilmiştir. Burada, R başlangıçtaki direnç, ΔR dirençteki değişim, L başlangıçtaki uzunluk, ΔL uzunluktaki değişim, ρ başlangıçtaki öz direnç, $\Delta \rho$ öz direncindeki değişim ve ν Poisson oranıdır; enine daralmanın boyuna daralmaya oranını tanımlamaktadır (Liu vd. 2018).

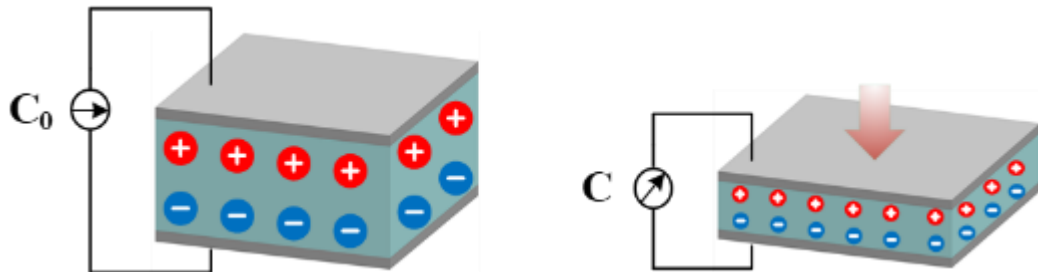
$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

Son yıllarda, yüksek hassasiyete ve düşük enerji tüketimine sahip esnek yapıda piezorezistif malzemeler fazlaca dikkat çekmektedir. Bu malzemeler, iletken malzemelerin elastik matris içerisine eklenmesi ile oluşmaktadır. Mekanik uyarım ile malzemede deformasyona sebep olmakla birlikte iletken yapılardaki değişimler sayesinde hassas esnek basınç sensörleri üretilebilmektedir. İletken malzemeler için karbon tabanlı malzemeler (karbon siyahı, karbon nanotüp, MXene, grafen oksit, grafen vb.), metal tabanlı malzemeler (nanoparçacıklar, gümüş, altın vb.) ve iletken polimerler (polipirrol, polianilin vb.) gibi malzemeler sıkça kullanılmaktadır (Dan vd, 2019; Gao vd. 2019; Han vd. 2019; Jia vd. 2019; Wang vd. 2019; Yao ve Zhu 2014; Zhong vd. 2016; Zhu vd. 2014). Elastik matrise sahip malzemeler olarak ise polimerler (PU, polidimetilsiloksan (PDMS), PMMA, poliakrilik ester vb.), hidrojeller (polivinil alkol, poliakrilamid vb.) ve biyolojik türevli malzemeler (kumaş, pamuk, lif vb.) sıkça kullanılmaktadır (Stassi vd. 2014; Wang vd. 2016; Wei vd. 2016; Xu vd. 2019; Yamashita vd. 2013; Yin vd. 2019). İletken malzemelerin ve elastik matrislerin bir arada kullanıldığı kompozitler ile yüksek hassasiyete ve geniş lineer ölçekte basıncı algılama araştırmaları literatüre kazandırılmaktadır.

2.1.3 Esnek Kapasitans Basınç Sensörü

Kapasitif basınç sensörleri mekanik uyarımı kapasitif sinyallere dönüştüren sensörler olup, Şekil 2.5'te görüldüğü üzere iki elektriksel iletken tabaka arasında konulmuş bir dielektrik tabakadan oluşmaktadır (Hammock vd. 2013).



Şekil 2.5 Kapasitif mekanizmasının şematik gösterimi

Kapasitans (C), serbest uzayın dielektrik geçirgenliği (ϵ_o), dielektrik tabakanın dielektrik geçirgenliği (ϵ_r), iletken elektrot alanı (A) ve iletken elektrotlar arasındaki mesafe (d) arasındaki ilişki Denklem 2.3'te tanımlanmıştır (Chatterjee vd. 2019).

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

Kapasitans değeri dielektrik geçirgenliği ve yüzey alanı ile doğru orantılı olmakla birlikte, elektrotlar arasındaki mesafe ile ters orantılıdır. Homojen dielektrik geçirgenlik dağılımı olan kapasitöre basıncın uygulanması ile elektrotlar arasındaki mesafe azalırken, elektrotların alanı artmaktadır. Böylelikle, kapasitans değişimi meydana gelerek basıncın algılanması gerçekleşir.

Esnek kapasitif basınç sensörlerde elektrotların ve dielektrik malzemelerin seçiciliği algılama performansını etkilemektedir. Elektrot olarak ITO, FTO, gümüş, altın, karbon nanotüp, grafen, grafen oksit, siyah karbon, grafit ve iyonik sıvılar gibi ile iletkenlik davranışı gösteren malzemeler kullanılmaktadır (Nie vd. 2015; Wan vd. 2017; Yao ve Zhu, 2014). Dielektrik malzeme olarak da yaygın bir şekilde PDMS, PVDF, P(VDF-TrFE), PMMA, ekoflex, poliüretan gibi malzemeler kullanılmaktadır (Chen vd. 2019; Joo vd. 2015; Kwon vd. 2016; Niu vd. 2019; Xiong, 2020).

2.2 Esnek Basınç Sensörü Özellikleri

Esnek basınç sensörlerinin basıncı algılama performansı hassasiyet, doğrusallık, tespit aralığı, tepki süresi, histerisiz, kararlılık ve dayanıklılık özellikleri ile değerlendirilir. Hassasiyet, doğrusallık ve tespit aralığı esnek basınç sensörlerinin en önemli parametreleri olması ile birlikte uygulanan basıncı yüksek doğrulukla algılamak açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, hızlı tepki süresi ve düşük histerisize sahip olması da kısa sürede uygulanan basıncın doğru bir şekilde algılamasında önem arz etmektedir. Son olarak ise kararlılık ve dayanıklılık ile basıncın doğru bir şekilde algılanmasında, esnek basınç sensörlerine olan güvenilirliği sağlamaktadır.

2.2.1 Hassasiyet

Esnek basınç sensörlerinin performansı tanımlanırken en önemli parametrelerden birisi hassasiyettir. Basıncın yüksek doğrulukta algılanması ve sinyal-gürültü oranı için önemli olan hassasiyet (S), basınç değişimine göre çıkış sinyalindeki bağıl değişime göre hesaplanır. Esnek piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif basınç sensörleri için Denklem 2.4'te sırasıyla verilmiştir (Oh vd. 2017; Xiong vd. 2020; Sun vd. 2019).

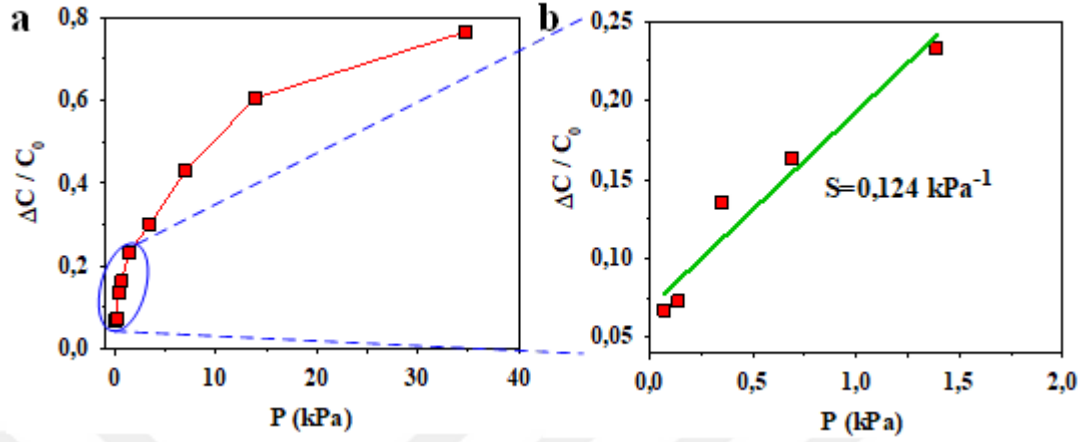
$$S = \frac{\partial V}{\partial P}, \frac{\partial(\Delta R/R)}{\partial P}, \frac{\partial(\Delta C/C)}{\partial P} \quad (2.4)$$

Şekil 2.6'da uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişim grafiği yer almaktadır. Doğrusallığın olduğu basınç aralığında eğimi alınarak hassasiyet hesaplanır. Hassasiyet değerinin büyük olması önemli olmakla birlikte analog sinyalin dijital sinyale dönüştürülmesindeki doğruluğu arttırmaktadır (Tee, 2013). Buda, uygulanan basıncın hassas bir şekilde algılanmasını sağlamaktadır.

2.2.2 Doğrusallık ve Tespit Aralığı

Doğrusallık, uygulanan basınç ile üretilen sinyal (gerilim, direnç ve kapasitans) arasındaki doğrusal ilişkiyi ifade eder. Esnek basınç sensörlerinde geniş doğrusallık aralığı istenen bir durum olup, bu aralıkta basınç yüksek hassasiyetle algılanmaktadır. Sensörler için doğrusallığın düşük hata oranlarında olması önemlidir ki, hassasiyetten elde edilen eğim çizgisi ile ölçülen sinyal arasındaki farkı tanımlamaktadır. Denklem 2.5'te doğrusallık hatası (linearity error veya nonlinear error) verilmektedir. $Max(|\Delta_i|)$, teorik çıkış sinyali ile ölçülen çıkış sinyali arasındaki maksimum sapmayı ifade etmektedir. Y ise ölçüm aralığını ifade etmektedir (Wang vd. 2019). Şekil 2.6'da çıkış sinyali ile uygulanan basıncın doğrusal davranışın olduğu aralık 0,07 kPa ile 1,39 kPa'dır. Tespit aralığı ise esnek basınç sensörlerin yanıt verebileceği basınç aralığını ifade eder (Pang vd. 2018; Sun vd. 2019). Şekil 2.6'da yer alan uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişim grafiği incelendiğinde tespit aralığı 0,07 kPa ile 34,72 kPa arasında yer almaktadır.

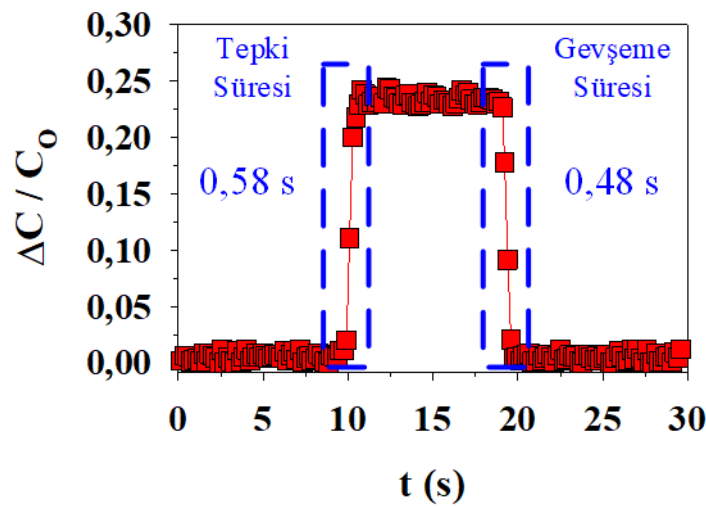
$$\delta_d(\%) = \frac{\pm \max(|\Delta_1| \dots |\Delta_n|)}{Y} \cdot 100 \quad (2.5)$$



Şekil 2.6 (a) Tespit aralığı ve (b) 0,07–1,39 kPa aralığındaki hassasiyet ve doğrusallık

2.2.3 Tepki ve Gevşeme Süresi

Gerçek zamanlı uygulamalarda esnek basınç sensörlerinin, uygulanan basıncın hızlı bir şekilde algılanması için düşük tepki ve gevşeme sürelerine sahip olması kritik önem arz etmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere basıncın uygulanmaya başlaması ile sabitlendiği bölgede çıkış sinyal (gerilim, direnç ve kapasitans) değerlerinde değişim gözlenmesi sonucu geçen süreye tepki süresi (response time) denir. Tam tersi duruma ise gevşeme süresi (relaxation time) denir (Pyo vd. 2021).

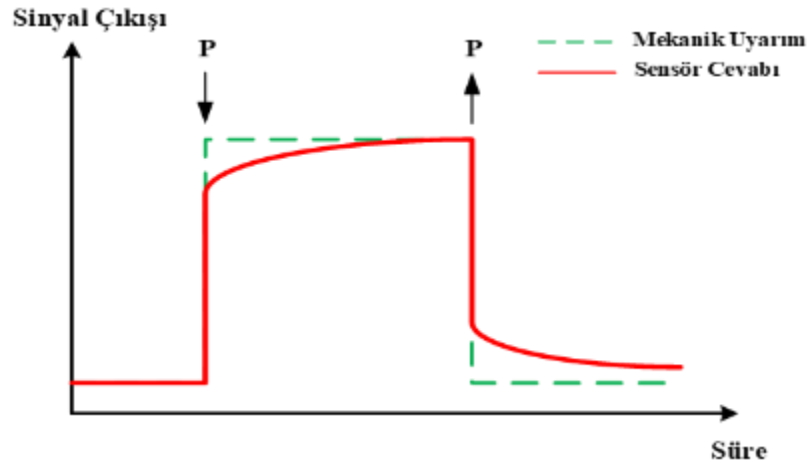


Şekil 2.7 Tepki ve gevşeme süresi

Esnek basınç sensörlerinde kullanılan polimerlerin viskoelastik doğası nedeniyle, uygulanan basıncın polimer zincirlerine olan deformasyonu ve geri kazanımı için gereken süre oldukça uzun ve farklılıklar göstermektedir. Polimerik olmayan malzemeler kullanılarak polimerlerin elastikiyetini arttırmak veya polimer zincirlerinin deformasyonunu azaltmak için elastomer yapılar tasarlanarak, basıncı algılama konusunda tepki ve gevşeme hızları arttırılabilmektedir (Huang vd. 2019; Shu vd. 2015).

2.2.4 Histerisiz

Viskoelastik yapıya sahip malzemelerde, basıncın uygulanması ve uygulanmaması döngüsünde mekanik tersinmezlik ve enerji kayıplarının olmasına histerisiz denir. Histerisiz zayıf arayüzey yapışması, çapraz bağlanma derecesi, malzemenin kalınlığı ve geometrisi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Gent, 2001; O’Sullivan vd. 2003). Şekil 2.8’de esnek sensöre uygulanan basınç davranışına göre sinyal çıkışının da aynı davranışı göstermesi beklenirken, viskoelastik etki sonucunda davranış farklılaşmaktadır. Bu durum, esnek basınç sensöründe histerisiz davranış görülmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.8 Zamana bağlı olarak viskoelastik etki (Tee, 2013)

2.2.5 Kararlılık ve Dayanıklılık

Esnek basınç sensörü uygulamalarında sonuçların güvenilir olması için kararlılık önemli bir parametredir. Algılama aralığı boyunca uygulanan basınca bağlı olarak

sinyal çıkışının belli bir değere sahip ve kararlılık içerisinde olmalıdır. Dayanıklılık, esnek basınç sensörlerinin yorulma testleri sonucunda veya uzun süreli kullanımlarında uygulanan basınca bağlı olarak sinyal çıkışının doğru değerlerde kararlılığını ifade etmektedir (Ji, 2021). Tekrarlanabilirlik ise aynı koşullar altında üretilen sensörlerden elde edilen sinyallerin hassasiyet değerleri içerisinde aynı çıkış sinyallerinin elde edilmesi veya ölçümlerdeki çıkış sinyallerinden aynı değerleri elde etmektir (Fraden, 2010). Tekrarlanabilirlik hata (repeability error) değeri, varyasyon katsayısı (coefficient of variation) olarak da ifade edilmekte olup, Denklem 2.6’da yer alan formül ile hesaplanmaktadır (Kastrounis, 2016).

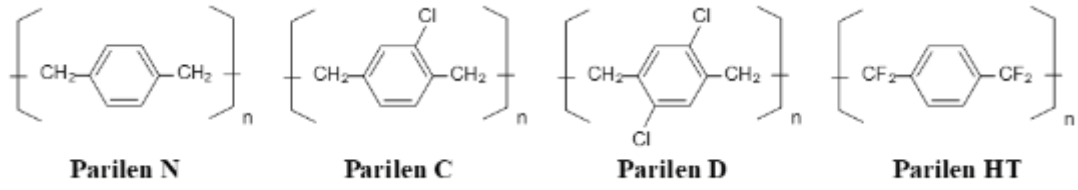
$$\delta_r(\%) = \pm \frac{\text{Standart Sapma}}{\text{Ortalama}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

2.3 Esnek Basınç Sensöründe Kullanılan Malzemeler

2.3.1 Parilen C

Parilen (Parylene), di-para-ksilen (di-para-xylylene) dimeri kullanılarak üretilen termoplastik polimer ailesinin genel adıdır (Gazicki vd. 1985). 1947 yılında İngiltere’de Manchester Üniversitesi’nde çalışan Dr. Michael Mojzesz Szwarc tarafından keşfedildi. 1965 yılında ise Union Carbide Corporation tarafından ticarileştirildi (Maynard vd. 1997). Parilen ailesi 4 adet termoplastik polimerden oluşmaktadır. Bunlar; parilen N (poly(para-xylylene)), parilen D (poly(dichloro-para-xylylene)), parilen C (poly(chloro-para-xylylene)) ve parilen HT (veya parilen F, poly(tetrafluoro-para-xylylene))’dir.

Parilen N, tamamen doğrusal ve kristalitesi yüksek bir polimerdir. Parilen C, parilen-N’ye benzer olan fakat aromatik hidrojenlerden birinin yerine klor atomu olan bir polimerdir. Parilen D, parilen C’ye çok benzemekte olup iki aromatik hidrojenin yerine iki klor atomu yer alır. Parilen HT’de ise parilen N’de yer alan CH₂ yerine CF₂ bileşiği yer almaktadır. Parilen ailesindeki polimerlerin kimyasal yapısındaki benzen halkaları, kimyasal olarak inert yapmaktadır. Ayrıca, polietilen benzeri ara bağlantılara sahip olması ile esnek hale gelmektedir (Chang vd. 2014; Changlin vd. 2008).



Şekil 2.9 Parilen N, C, D ve HT'nin kimyasal yapısı

1966 yılında W.F. Gorham tarafından parilen'in dimer formundan polimer formunun kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak üretilmesi ile endüstriyel uygulamalarda kullanılır hale geldi (Gorham, 1966). Başlıca uygulama alanı ise elektronik aygıtları nem ve korozyondan kaynaklı hasarlara karşı korumaktır. Parilen ailesine ait polimerler içerisinde parilen C ve N, Amerikan Gıda ve İlaç İdaresi (Food and Drug Administration, FDA) tarafından biyouyumlu malzeme ve biyomedikal cihazlarda kullanılabilecek polimer olarak onaylanmıştır. Parilen C, parilen N'den daha yüksek termal kararlılığa, kimyasal ve nem direncine sahiptir. Bu nedenle biyomedikal cihazlar ve çeşitli korozyon önleyici uygulamalar için koruyucu tabaka olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kim, 2013).

2.3.2 Poliüretan

Poliüretan (PU) ilk kez 1937 yılında Otto Bayer tarafından sentezlenmiş olup, üretan gruplarının birleşimiyle oluşan bir polimer sınıfıdır (Lemos vd. 2007). PU, bir poliölün (molekül başına ikiden fazla reaktif hidroksil grubuna sahip bir alkol) bir di-izosiyanat veya bir polimerik izosiyanat ile katalizörler ve katkı maddelerinin varlığında reaksiyona sokularak sentezlenir. İzosiyanat ve poliöl (ikiden fazla hidroksil grup içeren bileşikler) tipleri, kombinasyonları, polimer zincir uzantılarının cinsi, NCO/OH molar oranı, yumuşak segment konsantrasyonu ve poliölün molar ağırlığı gibi parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak özellikle medikal, otomotiv ve endüstriyel uygulamalarında kullanılmak üzere farklı özelliklere sahip PU'lar sentezlenebilmektedir (Cinfer, 2022; Saunders ve Erisch, 1982). PU'ların kolay işlenebilirliği, şekillenebilirliği, hem sert hem esnek yapıda olabilmesi, ayrıca hafif, yüksek aşınma dayanımına sahip olması, endüstriyel alanlarda yüksek oranda kullanılmasını sağlar (Akindoyo vd. 2016; Da Cruz, 2015).

2.3.3 PMMA

Poli (metil metakrilat) (PMMA) termoplastik bir malzeme olup, ilk olarak 1928 yılında Hass ve Rohm tarafından sentezlenmiş ve 1933 yılında ticari ürün haline getirilmiştir (Charles ve Carraher, 2012). PMMA, $(C_5H_8O_2)_n$ şeklinde kimyasal formüle sahiptir. Young modülü yaklaşık 2.8 GPa'dır. PMMA yüksek şeffaflığa sahip, kimyasallara ve darbelere karşı oldukça dayanıklı bir malzemedir. PMMA, sert bir malzeme olmasının yanı sıra düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı sensörler, optik malzemeler, otomotiv ve havacılık endüstrisinde oldukça sık kullanılmaktadır. PMMA, karbon türevleri olan malzemeler (karbon nanotüp, grafen, grafit vb.) arasında ara yüzeydeki davranışı arttıran bir polimer olup, kompozit yapılar oluşturularak yüksek performanslı yapılar oluşturulabilmektedir (Ali vd. 2015; Thakur ve Thakur, 2015).

2.3.4 Aktif Karbon

Aktif karbon ilk olarak 1773 yılında Scheele tarafından keşfedilmiştir. Mikro ve makro gözenekli yapısı, yüksek fiziko-kimyasal kararlılık, yüksek mekanik mukavemet, yüksek yüzey reaktivitesi, iç ve dış yüzeyde bulunan karbon atomlarının oksidasyonu ile elemental karbondan ayırt edilebilen yüksek yüzey alanına sahip karbonlu malzemedir (Yahya vd. 2015). Aktif karbon yapısında %87-97 oranında karbon bulunmakta olup, geri kalan oranı ise hidrojen, oksijen, kükürt ve azottan oluşmaktadır (Küçükgül, 2004).

2.3.5 PET

Termoplastik polyesterler içerisinde en çok kullanılan polietilen tereftalat (PET), 1941 yılında Whinfield ve arkadaşları tarafından sentezlenmiştir. Monomer formunda olan etilen tereftalatın $(C_{10}H_8O_4)$ polimerizasyonundan oluşmaktadır. PET, termoplastikler arasında zayıf asitlere, bazlara ve çoğu çözücülere karşı yüksek dayanım sağlamaktadır. Aynı zamanda, yüksek mukavemet, düşük sürünme, uzamaya ve deformasyona karşı iyi dayanım ile de üstün bir performans göstermektedir. Hafif olmasının yanı sıra paslanmaması, korozyona uğramaması, yüksek ısı ve elektrik izolasyonu sağlaması, esnek ve kolay şekil verilebilme gibi özelliklerinden dolayı

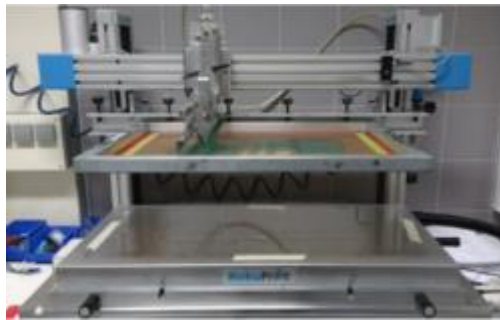
günümüzde kimya, otomotiv, elektronik ve makine endüstrisinde sıkça kullanılan bir malzemedir (Pehlivan vd. 2004).

2.4 Esnek Basınç Sensörü Üretim Yöntemi

Sensör teknolojisinin hızlı bir şekilde gelişimi ile birlikte esnek ve bükülebilir kabiliyetlere sahip sensörlere olan ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Geleneksel sensörlerin üretimin de lithografi, maske hizalama ve dağlama işlemleri gibi yüksek maliyetli cihazlara ihtiyaç söz konusudur. Baskı teknolojinin sensör ve polimer teknolojisine olan katkısı ile birlikte düşük maliyetli, esnek, dayanıklı, bükülebilir ve yüksek hassasiyetli esnek sensörlerin üretilmesi sağlanmıştır. Direkt (fleksografik, gravür, serigrafi ve yumuşak litografi) ve direkt olmayan (lazer baskı, aerosol baskı, mürekkep püskürtmeli baskı) baskı teknolojileri kullanılarak, esnek yapıda gaz, nem, basınç, gerinim ve sıcaklık sensörleri üretilmektedir (Alrammouz vd. 2018; Cheng vd. 2010; Huang vd. 2019; Kulkarni vd. 2013; Nam vd. 2013; Oh vd. 2018; Perelaer vd. 2010; Seyedin vd. 2019; Shen vd. 2019; Søndergaard vd. 2012; Webb vd. 2013).

2.4.1 Serigrafi Yöntemi

Baskı teknolojisinde kullanılan yöntemlerden biri olan serigrafi yöntemi ile esnek, mekanik olarak tasarlanmış devreler ve sensörler üretilebilmektedir. Diğer baskı yöntemleri ile karşılaştırıldığında, serigrafi yöntemi 1940 yıllarından beri elektronik devre üretiminde kullanılan en eski yöntemdir. Serigrafi yöntemi için kullanılan mürekkeplerin çeşitlenmeye başlaması ile kullanım alanları da genişlemeye başlamış olup, başta tekstil olmak üzere otomotiv, seramik, plastik, elektronik, cam, beyaz eşya, ahşap ve mermer sanayilerinde kullanılır hale gelmiştir (Kılınçeri, 2004).



Fotoğraf 2.1 Serigrafi baskı sistemi (Furtado, 2019)

Serigrafi baskı sistemi Fotoğraf 2.1’de görüldüğü üzere basılacak mürekkebin, baskı tasarımının yer aldığı elek niteliğinde olan naylon veya polyesterden özel olarak dokunmuş ipeğin deliklerinden ragle yardımı ile geçirilerek bir altlık (PET, PU, PI, PDMS vb.) üzerine transfer edilir. Mürekkebin geçirilen alanlarının kontrol edilebilmesi ve bunların istenen yüzeylere basılabilme kolaylığının olması serigrafi yönteminin temelini oluşturmaktadır (Kılınçeri, 2004). Bu yöntem iletken mürekkepler (gümüş, bakır, alüminyum, grafit, karbon vb.) kullanılarak oluşturulan iletim yollarında daha az mürekkep yayılımına neden olmasından dolayı kısa devrelerin önlenmesinde daha başarılı bir yöntemdir (Rodriguez vd. 2016).



3. LİTERATÜR ÖZETİ

Parilen malzemeleri kaplama işleminin kolaylığı, kalınlığın kontrol edilebilir olması, O₂ plazma aşındırma işlemine olan uygunluğu ile MEMS uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. 1990'lardan itibaren, parilen tabanlı MEMS teknolojisi özellikle mikroakışkan cihazlar olan peristaltik pompa, elektroliz pompası, elektrosprey uç, mikrovalf, akış sensörleri, mikro akış kontrolcüler gibi uygulamalarda kullanılır hale gelmişlerdir (Licklider vd. 2000; Pang, 2008; Wang ve Tai, 2000; Xie vd. 2001; Xie vd. 2003; Xie vd. 2004).

Wang vd. (2023), çalışmalarında parilen C tabanlı esnek termal dirençli basınç sensörü geliştirmişlerdir. Bu sensörün tepki/gevşeme süreleri 243/882 ms'dir. 0-17,5 kPa basınç aralığında en yüksek bir hassasiyeti (0,012 kPa⁻¹) göstermiştir. 16 kPa'da 5000 çevrim gerçekleştirerek, mükemmel bir kararlılık sergilediğini belirlenmiştir (Wang vd. 2023).

Diğer bir çalışmada ise Shao vd. (2016) esnek bir kapasitif basınç sensörü geliştirmiştir. Parilen C, iki çok duvarlı karbon nanotüp elektrot arasında bir dielektrik katman olarak konumlandırılmıştır. Bu sensör, düşük basınç bölgesi olan 0-758 Pa aralığında 1,33 kPa⁻¹ bir hassasiyete sahiptir (Shao vd. 2016).

Suzuki vd. (2012) çalışmasında silisyum alttaş üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile 6 µm kalınlığında PU kaplamış ve sülfirik asit kullanarak yüzeyi aşındırmıştır. Böylelikle, kaplama kalınlığını 1 µm'ye indirmiştir. PU'un yüzeyinin ölçüm uçları tarafından çizilmesini engellemek için 5 µm kalınlığında parilen ile kaplamakla birlikte silisyum alttaş üzerine kaplanmış PU'nun kapasitif özelliklerini incelemiştir. 0-2,5 kPa basınç algılama aralığında hassasiyeti 1,25 fF kPa⁻¹ olarak hesaplamıştır (Suzuki vd. 2012).

Basıncı algılayacak polimerlerin elektriksel iletkenliklerini değiştirmek için grafit, grafen, karbon nanotüp, metalik nano-mikroparçacıklar, karbon siyahı, aktif karbon gibi malzemeler kullanılmaktadır. Polimer kullanılması ile kompozit yapılar oluşturulmakta olup, polimer zincirlerine iyi yapışma özelliği göstermektedir (Knite

vd. 2002). Karbon tabanlı malzemeler içerisinde aktif karbon, iletken dolgu malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Wang vd. (2018), çalışmalarında karbon siyahı (carbon black, CB) ve PU kullanılarak kompozit yapıda esnek piezorezistif basınç sensörleri geliştirmiştir. Bu sensörler ile en düşük basıncı algıladığı değer 10 Pa'dır. 0,010 kPa ile 800 kPa aralığında basıncı algıladığı ve hassasiyetinin $5,54 \text{ kPa}^{-1}$ olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, yutkunma ve nabızın bu sensörler ile ölçülebildiğini belirtmişlerdir (Wang vd. 2018).

Yin vd. (2021), yaptıkları çalışmada 3 boyutlu yazdırma yöntemini kullanarak örgü (lattice) formunda karbon nanotüp katkılı PU malzeme geliştirmiş ve piezorezistif özelliklerini incelemiştir. Basıncı 0,7 Pa ile 160 kPa aralığında algıladığını tespit etmiştir. 0-130 kPa aralığında lineer davranış gösterdiğini ve hassasiyetin de $1,02 \text{ kPa}^{-1}$ olduğunu hesaplamıştır (Yin vd. 2021).

Li vd. (2019), yaptıkları çalışmada PU köpük yapıyı daldırma yöntemini kullanarak kitosan ile kaplayarak, pozitif yüklü hale getirmiş. Kitosan ile kaplanan PU köpüğünü, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene solüsyonu içerisine daldırma yöntemini kullanma suretiyle kaplayarak, piezorezistif özelliklerini incelemeyi amaçlamıştır. En düşük 9 Pa basıncı algıyabildiğini ve 0-6,5 kPa aralığında $0,014 \text{ kPa}^{-1}$ hassasiyete sahip olduğunu hesaplamıştır. Geliştirdiği sensörü parmağına konumlandırarak, parmak hareketlerini tanımlamaya çalışmıştır. Ayrıca, bazı kelimeleri (hello, OK, pressure) söyleyerek, zamana bağlı olarak akım sinyali elde etmiş ve bu sözcükleri tanımlamaya çalışmıştır (Lin vd. 2019).

Zhang vd. (2022), çalışmalarında çok duvarlı karbon nanotüp katkılı PU mürekkebini baskılı devre kartı (printed circuit board, PCB) üzerine basımını gerçekleştirmiş ve piezoresistif basınç sensörü davranışını incelemiştir. 0-1,5 kPa aralığında $46,66 \text{ kPa}^{-1}$ hassasiyete ve 1,5-7,5 kPa aralığında $6,67 \text{ kPa}^{-1}$ hassasiyete sahip olduğunu göstermişlerdir. (Zhang vd. 2022).

Wu vd. (2016), yaptıkları çalışmada PU köpük yapının yüzeyini karbon siyahı (carbon black, CB) ile kaplayarak, piezorezistif sensör özelliklerinin incelenmesi için iletken yapıda CB/PU köpük üretmiştir. CB'nin mikro çatlak davranışına etkisini ve CB/PU

iletken yapının arayüzey oluşumunun piezorezistif davranışına olan etkisini incelemiştir. 20 ms altında tepki süresini sahip olduğunu hesaplamış olmakla birlikte yutkunma, öksürme ve çiğneme davranışlarını tespit etmenin yanı sıra sesleri de başarılı bir şekilde algıladığını göstermiştir (Wu vd. 2016).

Dunne vd. (2005), çalışmalarında basınca duyarlı PU tabanlı köpük geliştirme ve giyilebilir uygulamaları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu köpük sensör, polipirel kaplı PU köpükten oluşmaktadır. Zaman bağı piezorezistif özellikleri test edilmiştir. Yapılan elektromekanik testler sonucunda solunum, omuz hareketi, sırt hareketi ve kürek kemiğı basıncına karşı ölçülebilir şekilde cevap verdiğini göstermiştir (Dunne vd. 2005).

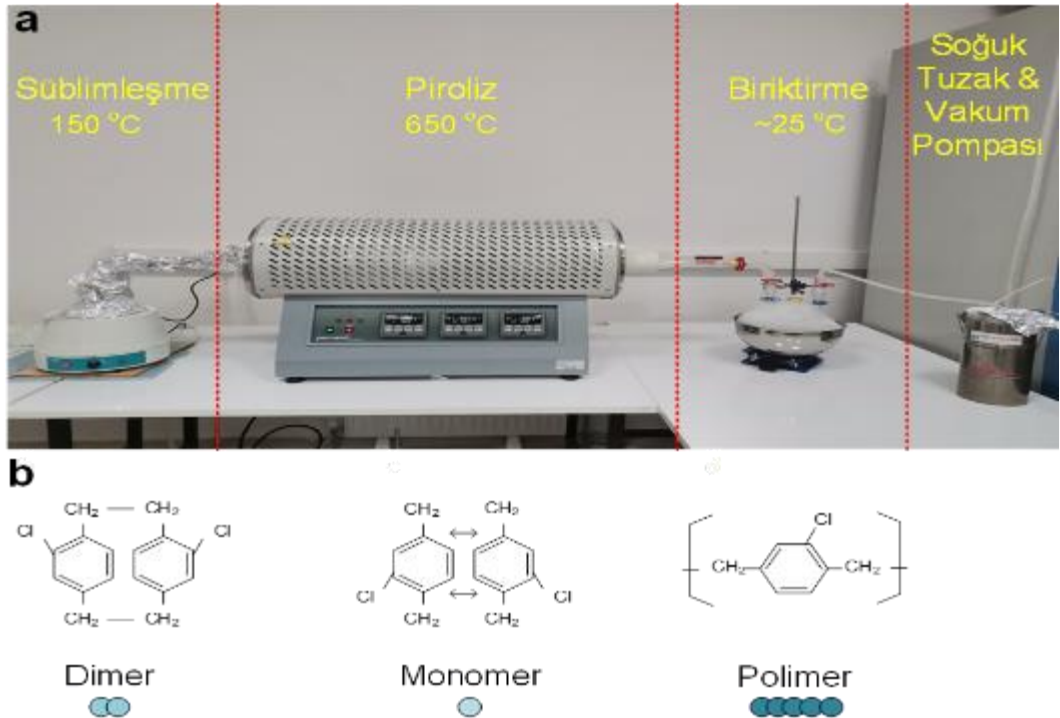
Chen vd. (2019) çalışmasında gümüş nanotellerin elektrot olarak kullanıldığı PMMA ve PEDOT: PSS'dan oluşan kırışık (wrinkle) yapıda bir esnek kapasitif basınç sensörü geliştirmiştir. Bu sensörün, düşük basınç bölgesindeki (0-100 Pa) hassasiyeti $2,76 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir. Yüksek basınç bölgesinde (100-1000 Pa) ise hassasiyeti $1,56 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir. Basıncı algılama süresi de 150 ms'den düşük olup, 12 mg'lık bir ağırlığa karşılık gelen 0,6 Pa basıncı algılayabilmektedir (Chen vd. 2019).

4. YÖNTEM VE GEREÇLER

4.1 Parilen C'nin Sentezlenmesi

Parilen C'nin sentezlenmesi kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Süblimleşme, piroliz, biriktirme ve soğuk tuzak olmak üzere dört aşamada üretim gerçekleştirilmiş olup, Şekil 4.1a'da üretim düzeneği ve Şekil 4.1b'de ise parilen C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu (2D) yapısı yer almaktadır.

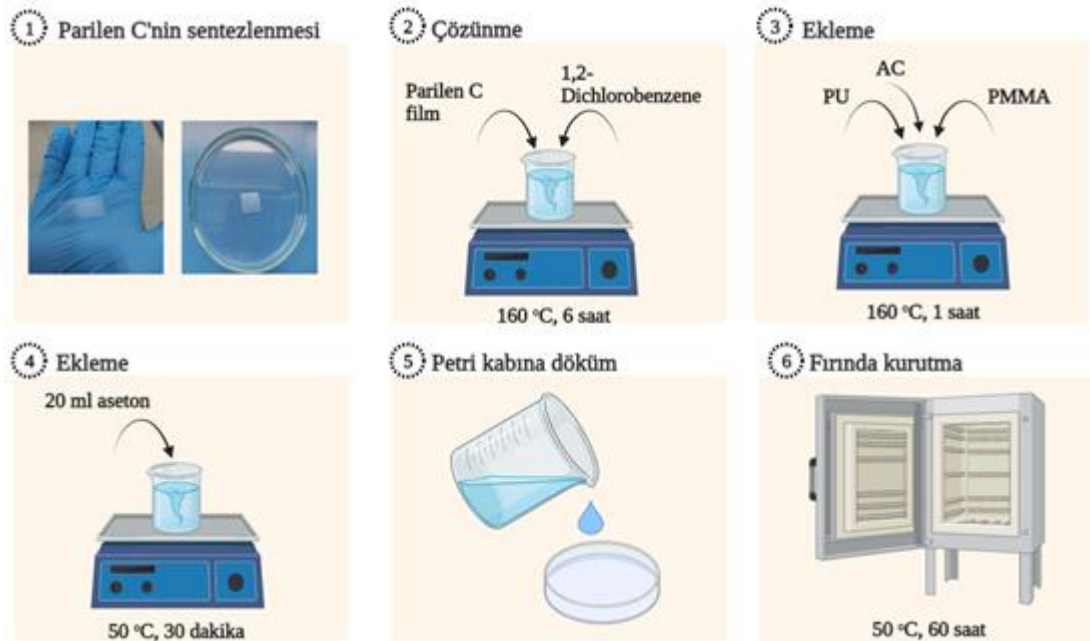
İlk olarak dimer formunda parilen C, üç ağızlı balon içerisine konulmuştur. Balon ısıtıcı yaklaşık 150°C'de ısıtılarak, dimer parilen C'nin süblimleşmesi sağlanmıştır. Vakum altında üretim düzeneğine argon gazı yollanarak, süblimleşen dimer yapı fırın içerisine taşınmış ve 650°C'de piroliz işlemi ile monomer oluşturulması sağlanmıştır. Fırından çıkan gaz monomerlerin oda sıcaklığında polimerizasyonu ile üç ağızlı balon üzerine biriktirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında birikmesi gerçekleşmeyen parilen C'nin sıvı azot tuzağında hapsolması sağlanmıştır. Balon üzerinde biriken parilen C, aseton ile balon üzerinden kaldırılarak çıkarılmıştır.



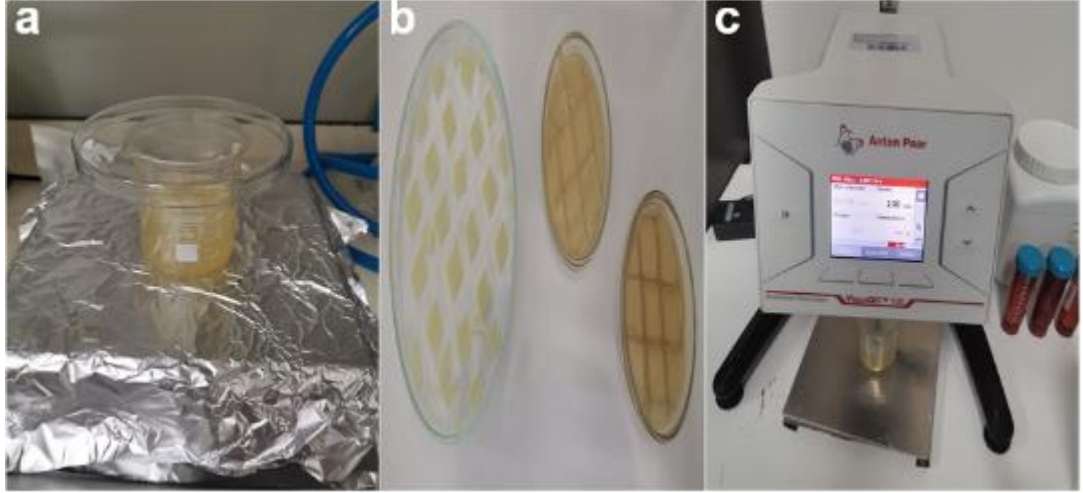
Şekil 4.1 (a) Parilen C'nin polimerasyonu için üretim düzeneği ve (b) parilen C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu yapısı

4.2 Basınca Duyarlı Mürekkebin Üretimi

Sentezlenen parilen C, 50 ml 1,2 diklorobenzen içerisinde 160°C’de 6 saat karıştırarak çözündürülmüştür. Aynı sıcaklıkta, ağırlıkça çeşitli oranlarda PU, PMMA ve aktif karbon eklenerek, çözeltinin 1 saat boyunca homojen karışması sağlanmıştır. Parilen C, PMMA ve PU Hunan Solar Chemical Co. şirketi tarafından tedarik edilmiştir. Aktif karbon’da Tekkim şirketi tarafından tedarik edilmiştir. Çözelti soğutma işlemi esnasında 50°C’de 20 ml aseton eklenerek, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Böylece, PU’nun çözelti içinde daha iyi karışması sağlanmıştır (Şekil 4.2). Fotoğraf 4.1a’da çözeltilerin homojen bir şekilde karışması ile beherdeki hali yer almaktadır. Fotoğraf 4.1b’de hazırlanan çözeltinin petri kabına dökülmüş ve etüv içerisinde 50°C’de 60 saat kurutma sonucundaki hali yer almaktadır. Fotoğraf 4.1c’de hazırlanan çözeltilerin viskozitesi Anton Paar ViscoQC 100 ile ölçülmüştür. Ağırlıkça çeşitli oranlarda hazırlanmış 19 adet numunelerin isimlendirilmesi ve petri kabına dökülmeden önce ölçülen viskozite değerleri Tablo 4.1’de yer almaktadır.



Şekil 4.2 Basınca duyarlı mürekkebin üretim süreci



Fotoğraf 4.1 (a) çözeltinin beher içerisindeki hali, (b) petri kabına dökülmesi ve kurutma işlemi sonrasındaki hali ve (c) viskozimetre ölçümü

Tablo 4.1 Ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi ve viskozite değerleri

Numune Adı	%PAC	%PU	%C	%PMMA	Viskozite (mPa.s)
25P75U	25	75	-	-	362,2
25P74U1C	25	74	1	-	386,5
25P74U1M	25	74	-	1	402,5
25P73U1M1C	25	73	1	1	408,7
25P70U5M	25	70	-	5	379,0
25P69U5M1C	25	69	1	5	426,8
50P50U	50	50	-	-	416,5
50P49U1C	50	49	1	-	418,4
50P49U1M	50	49	-	1	364,6
50P48U1M1C	50	48	1	1	350,7
50P45U5M	50	45	-	5	456,2
50P44U5M1C	50	44	1	5	478,0
75P25U	75	25	-	-	358,7
75P24U1C	75	24	1	-	502,2
75P24U1M	75	24	-	1	467,1
75P23U1M1C	75	23	1	1	318,5
75P20U5PM	75	20	-	5	524,0
75P19U5M1C	75	19	5	1	488,2
100P	100	-	-	-	-

4.3 Serigrafi İçin Basınca Duyarlı Mürekkebin Üretimi

Elektromekanik ölçümleri gerçekleştirilen 19 adet numune içerisinde potansiyel 8 adet numune belirlenmiş olup, yukarıda bahsedilen basınca duyarlı mürekkep üretim yöntemi kullanılarak tekrardan üretilmiştir. Serigrafi uygulamasına hazır hale getirmek için çözücülerini uzaklaştırılarak Fotoğraf 4.2'deki hale getirilmiştir. Tablo 4.2'de serigrafi için ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi ve viskozite değerleri yer almaktadır.



Fotoğraf 4.2 Serigrafi uygulaması için çözücülerini uzaklaştırılmış basınca duyarlı mürekkepler

Tablo 4.2 Serigrafi için ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi ve viskozite değerleri

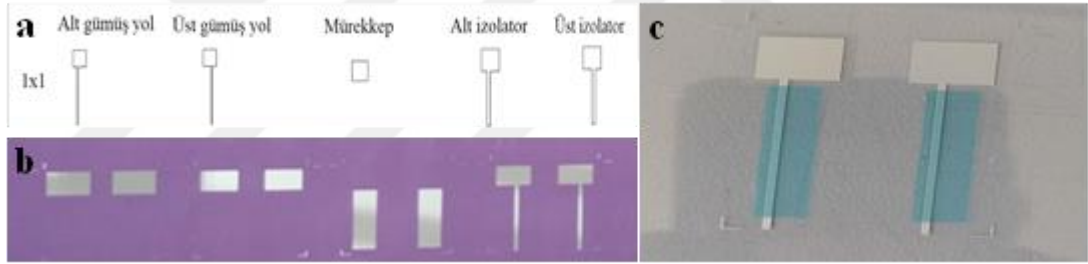
Numune Adı	%PAC	%PU	%AC	%PMMA	Viskozite (mPa.s)
25P74U1C	25	74	1	-	1967,3
25P73U1M1C	25	73	1	1	2173,5
25P69U5M1C	25	69	1	5	2068,2
50P50U	50	50	-	-	2110,7
50P45U5M	50	45	-	5	2371,3
50P44U5M1C	50	44	1	5	2069,0
75P23U1M1C	75	23	1	1	1845,5
75P20U5M	75	20	-	5	2560,2

4.4 Basınç Sensörlerin Üretimi

4.4.1 Esnek Altılığın Tasarımı, Üretimi ve Testi

Polietilen tereftalat (PET) altlık üzerine basınca duyarlı mürekkep kaplanmadan önce gümüş iletim yollarının genişliği ve uzunluğu dikkate alınarak bir esnek basınç sensörü

tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 4.3(a)'da bu tasarımın çizimi ve iletim yolları yer almaktadır. Fotoğraf 4.3(b)'de hazırlanan ipek baskı kalıbı yer almaktadır. Üretilmiş olan mürekkebin ve iletim yolların basılması için cm^2 başına 77, 90 ve 120 örgü bulunan baskı ipeklerine sensör tasarımları aktarılmıştır. Fotoğraf 4.3(c)'de ise tasarımlara göre hazırlanan altlıklar yer almaktadır. Alt ve üst iletim yolları için gümüş boya kullanılmıştır. Baskı ipeği üzerine dökülen gümüş mürekkebin homojen bir şekilde basımı, aynı zamanda açık devre oluşumunu engellemek için 2 katman olacak şekilde ragle ileri-geri hareket ettirilmesi ile PET altlık üzerine aktarılmıştır. Basınca duyarlı mürekkebin konumlanacağı alanlar haricindeki bölgeler, izolasyon verniği ile kaplanılarak alt ve üst izolator bölgeleri oluşturulmuştur. Bu sayede kısa devre oluşumları engellenmiştir. Üretilen altlıklarda açık devre oluşumu multimetre kullanılarak test edilmiş olup, hiçbirinde açık devre oluşumu gözlenmemiştir. Basılan gümüş yolların direncinin 4-8 Ω aralığında değiştiği ölçülmüştür.

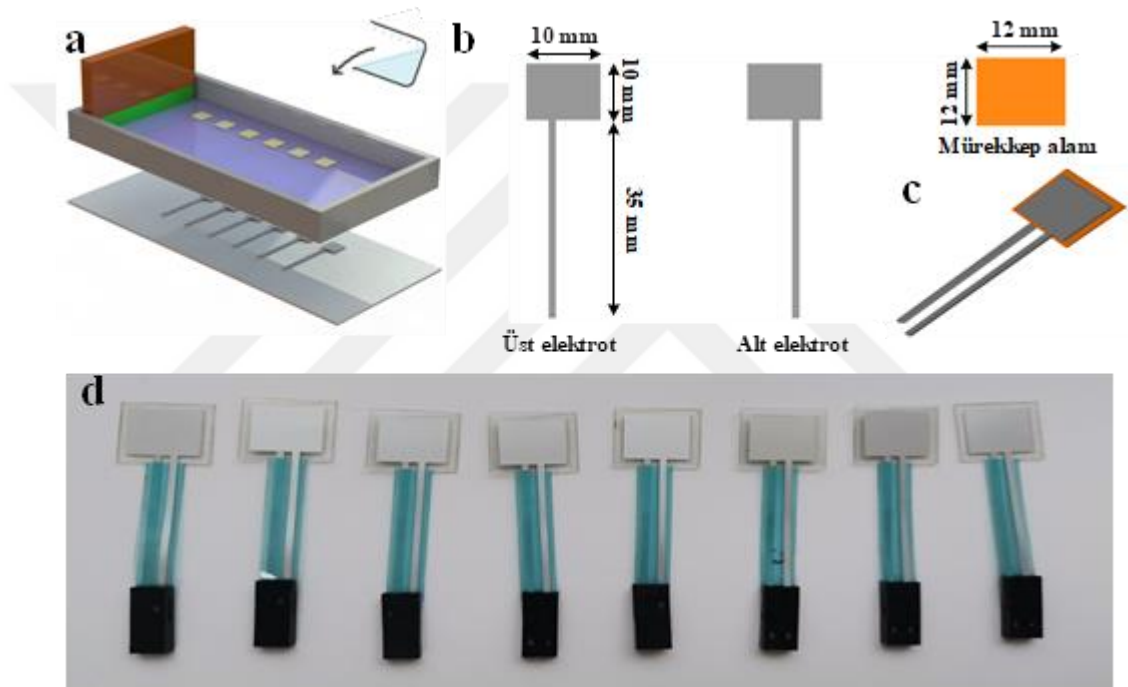


Fotoğraf 4.3 (a) Esnek sensörlerin tasarımı, (b) ipek baskı kalıbı ve (c) hazırlanan altlıklar

4.4.2 Serigrafi Yöntemi ile Basınca Duyarlı Mürekkebin Basılması

Polietilen tereftalat (PET) altlık üzerine gümüş boya kaplanmış ve izolator bölgeleri oluşturulmuş altlıklar, serigrafi uygulaması için Fotoğraf 4.3'da görüldüğü gibi hazır hale getirilmiştir. Fotoğraf 4.2'deki serigrafi uygulaması için çözücülerini uzaklaştırılmış basınca duyarlı mürekkepler, baskı kalitesinin incelenmesi adına üç farklı baskı ipek (77, 90 ve 120 örgü) kullanılarak gümüş iletim yollarına sahip PET altlık üzerine kaplanılmıştır. 77 ve 90 örgü olan baskı ipeklerinin kullanılması ile mürekkebin viskozitesine bağlı olarak homojen bir şekilde PET yüzeyine basılmadığı görülmüştür. Ayrıca; homojen dağılım göstermeyerek sinyalin iletilemeyeceği açık devre oluşumu görülmüştür. Bu sebeple, 120 örgü bulunan baskı ipeği kullanılarak PET altık üzerine mürekkebin basımı gerçekleştirilmiştir. Bu basım sürecinde baskı

ipeği üzerine dökülen mürekkep, 1 katman oluşturacak şekilde ragle kullanılarak PET altlık üzerine aktarılmıştır. Birden fazla katman oluşturacak şekilde ragle kullanımında ise PET yüzeyine aktarılan mürekkebin kalınlığı artmakla birlikte katman katman bir yapı oluşturmaktadır. Bu durum elektriksel sinyallerin iletimi açısından bir bariyer oluşturmakta ve sinyalin sönümlenmesine neden olmaktadır. Mürekkebin kuruması için 50°C’de 6 saat boyunca etüvde bekletilmiş ve sonrasında alt ve üst altlıklar birleştirildi. Son olarak ise elektromekanik ölçümler için kullanılmak üzere gümüş iletim yolu adetine pinler eklenerek, Fotoğraf 4.4’deki hale getirilmiştir.



Fotoğraf 4.4 (a) Mürekkebin serigrafisi yöntemi ile basılması, (b) sensör boyutları, (c) üç boyutlu gösterimi ve (d) hazırlanan esnek basınç sensörleri

4.5 Karakterizasyon Yöntemleri

4.5.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Numunelerin kristal yapılarının belirlenmesi için X-ışını kırınımı analizinden faydalanılmıştır. Bu çalışmadaki X-ışını analizleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan Bruker marka D8 Advance model X-ışınları kırınım difraktometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$)

radasyonu kullanılarak yapılan ölçümler, oda sıcaklığında $2\theta=10-50^\circ$ aralığında ve $1,2^\circ/\text{dak}$ hızında gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 4.5).



Fotoğraf 4.5 Bruker D8 Advance X-ışını difraktometresi

4.5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Numunelerin morfolojik yapısı Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI marka Quanta-FEG 250 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir (Fotoğraf 4.6).



Fotoğraf 4.6 FEI Quanta-FEG 250 alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu

4.5.3 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) Analizi

Numunelerin kimyasal yapıları Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Bruker marka Alpha II model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 4.7). Spektrumlar, 400 cm^{-1} ile 4000 cm^{-1} aralığında 4 cm^{-1} adımlar ile elde edilmiştir.



Fotoğraf 4.7 Bruker Alpha II Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi

4.5.4 Termal Özelliklerinin Analizi

Numunelerin termogravimetrik özelliklerinin belirlenmesi için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan HITACHI marka STA7300 model termogravimetrik analiz sistemi (TGA) kullanılmıştır (Fotoğraf 4.8). Ölçümler, $25\text{--}600^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında azot ortamında $15^\circ\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.

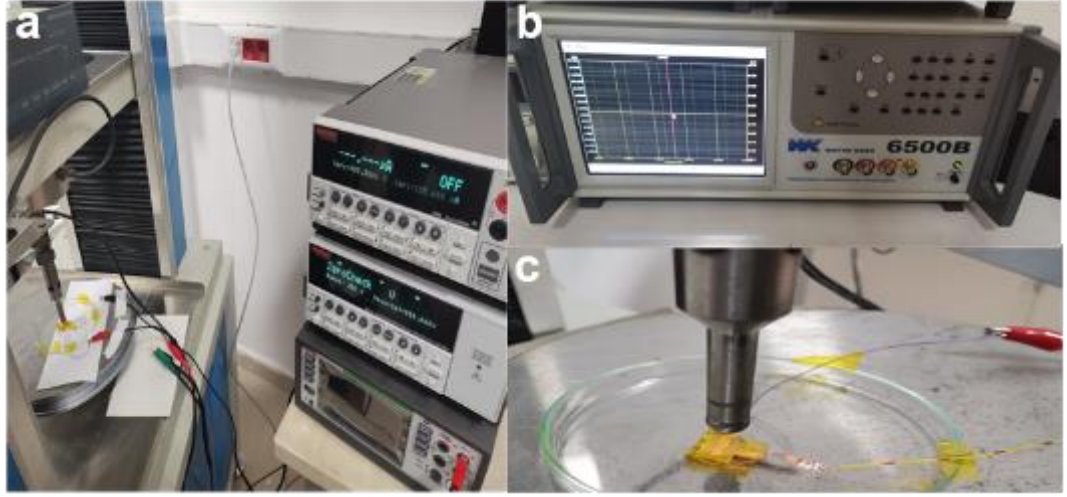
Numunelerin ısı geçiş özelliklerinin belirlenmesi için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan HITACHI marka DSC7020 model diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılmıştır (Fotoğraf 4.8). Ölçümler, $-100\text{--}350^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında azot ortamında $10^\circ\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 4.8 Termogravimetrik analiz sistemi ve diferansiyel taramalı kalorimetre

4.5.5 Elektromekanik Ölçümler

Numunenelerin piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif özelliklerinin tespiti için numunenin alt ve üst yüzeylerine bakır bant yerleştirilmiştir. Alt ve üst katmanların yalıtımı için kapton bant kullanılarak, yalıtım sağlanır. Ölçüme hazırlanan numuneler, 0,01-5 N aralığında kuvvet uygulayan elektromekanik sistem kullanılarak gerilim, direnç ve kapasitans değişimleri tespit edilir. Piezoelektrik ölçümler, Keithley 6517B elektrometre ile gerçekleştirilmiştir. Piezorezistif ölçümlerde numunelerin yüksek direnç göstermesi ($>1 \text{ G}\Omega$) nedeniyle, 5 V altında Keithley 6517B elektrometre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kapasitans ölçümleri için ise 1 MHz ve 1 V AC sinyal uygulanarak Wayne Kerr 6500B empedans analizör kullanılmıştır (Fotoğraf 4.9). Serigrafi yöntemi ile üretilmiş numunelerin (Fotoğraf 4.4(d)) piezorezistif ve kapasitif ölçümleri için Keithley 6517B elektrometre ve Wayne Kerr 6500B empedans analizör ile aynı ölçüm parametreleri kullanılarak, ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 4.9 (a) Universal test cihazı ve Keithley 6517B, (b) Wayne Kerr 6500B empedans analizör ve (c) numuneye kuvvet uygulanırken

4.5.6 Ferroelektrik ve Piezoelektrik Özelliklerin İncelenmesi

Ferroelektrik ve Piezoelektrik davranışları belirlemek için Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde bulunan Seramik Araştırma Merkezindeki Aixacct TF Analyzer 2000 Ferroelektrik Ölçüm Ünitesi (AixPES) kullanılmıştır. Burada, polarizasyon-elektriksel alan (P-E) ve gerinim-elektriksel alan (S-E) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



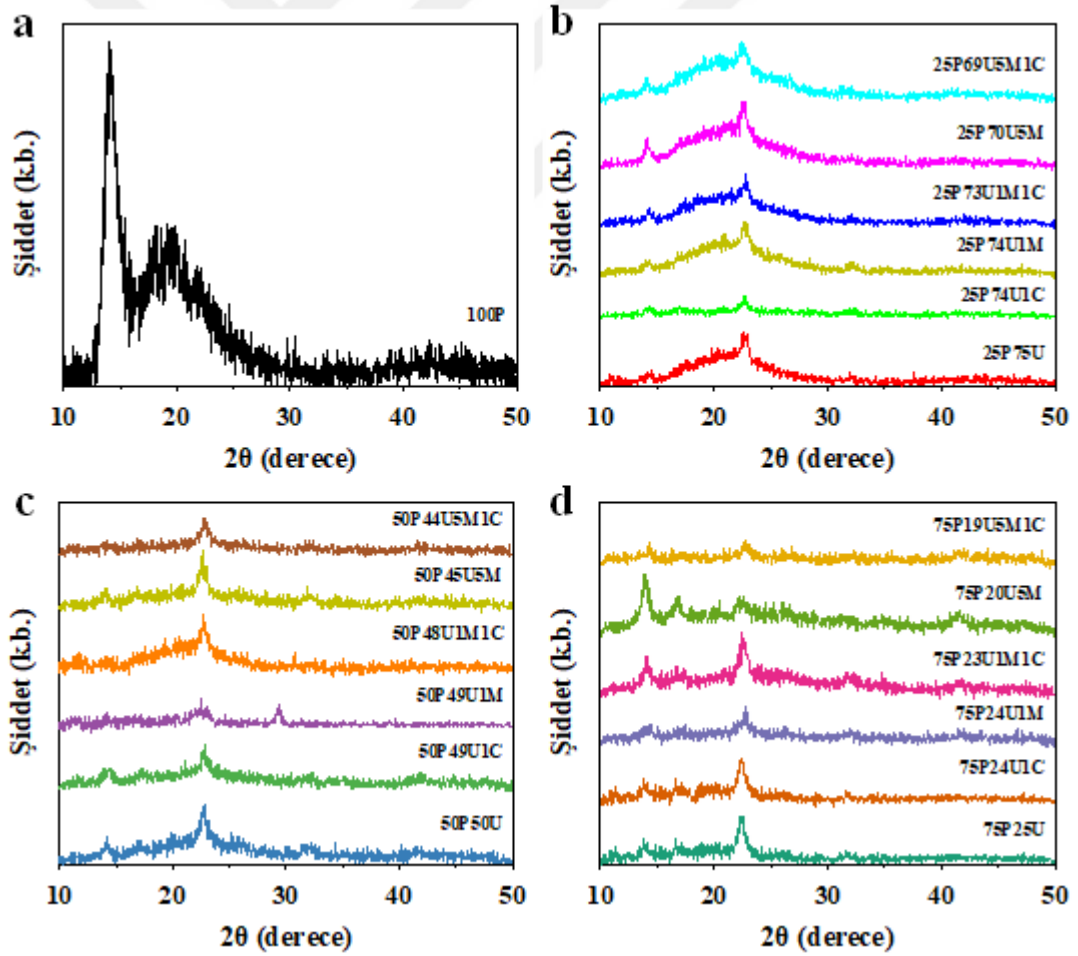
Şekil 4.3 Aixacct TF Analyzer 2000 Ferroelektrik Ölçüm Ünitesi

5. BULGULAR

5.1 Yapısal, Morfolojik, Kimyasal ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi

5.1.1 Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

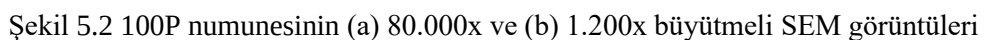
Çalışma kapsamında üretilen parilen C tabanlı numunelerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için X-ışınları kırınımı (XRD) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1(a)'da 100P'nin, Şekil 5.1(b)'de %25 oranında, Şekil 5.1(c)'de %50 oranında ve Şekil 5.1(d)'de %75 oranında parilen C içeren numunelerin kırınım desenleri verilmiştir.

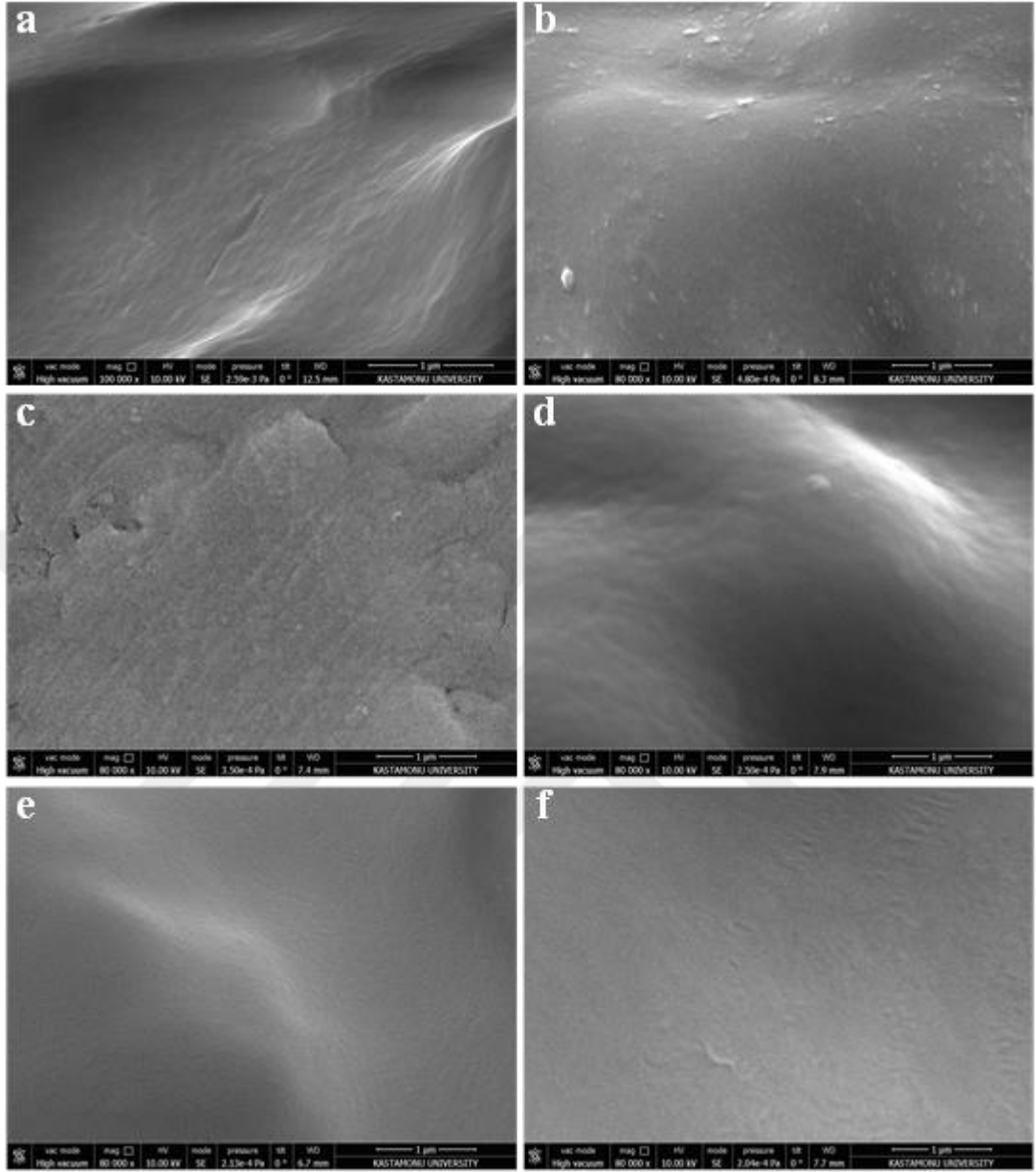


Şekil 5.1 (a) 100P, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerin XRD grafikleri

5.1.2 Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

100P numunesine ait 80.000x ve 1.200x büyütmeli SEM görüntüleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Burada, numunenin yüzeyinde gözenekli bir oluşumu olmadığı görülmektedir (Pang, 2008). Yüzey morfolojisine bakıldığında yoğun ve pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, yüzeyinde nanometre ölçeğinde çatlaklar mevcuttur.

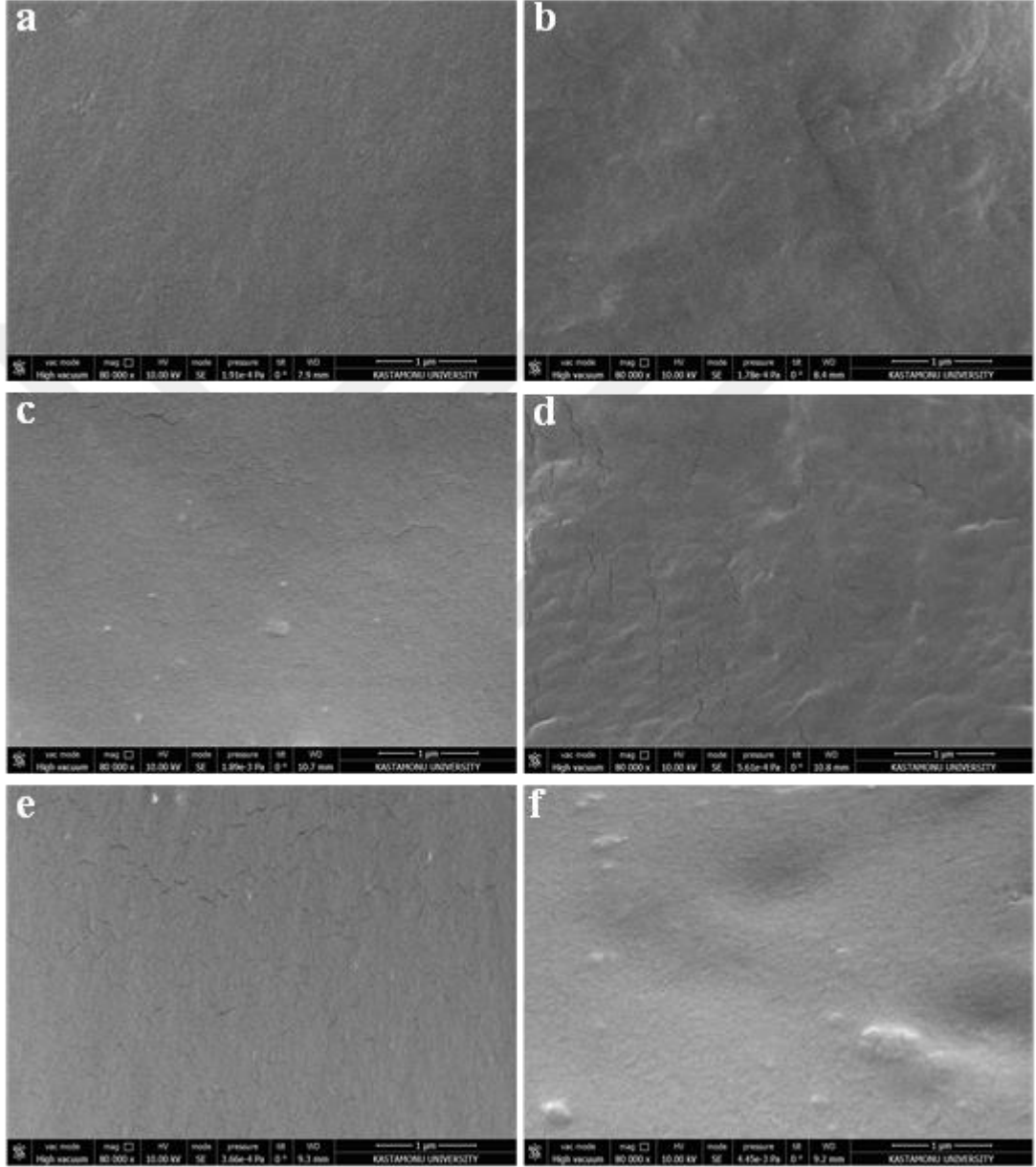




Şekil 5.3 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin 80.000x büyütme SEM görüntüleri

Şekil 5.3'te yer alan %25 oranında parilen C içeren numuneler incelendiğinde, 25P75U numunesinin yüzeyinde pürüzlü bir yapı görülmektedir. 25P74U1C numunesinde, ağırlıkça %1'lik aktif karbonun eklenmesi ile pürüzlü yapının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, aktif karbon parçacıkları yüzeyde dağınık şekilde dağılım göstermekte fakat, bazı bölgelerde ise aglomerasyon oluşumları da görülmektedir. Ağırlıkça %1 PMMA eklenmesi ile üretilen 25P74U1M numunesi çatlak oluşumların varlığı ile birlikte pürüzlü ve gözenekli bir yüzey morfolojisine sahiptir. 25P73U1M1C numunesinde aktif karbon parçacıkların polimer matrisleri

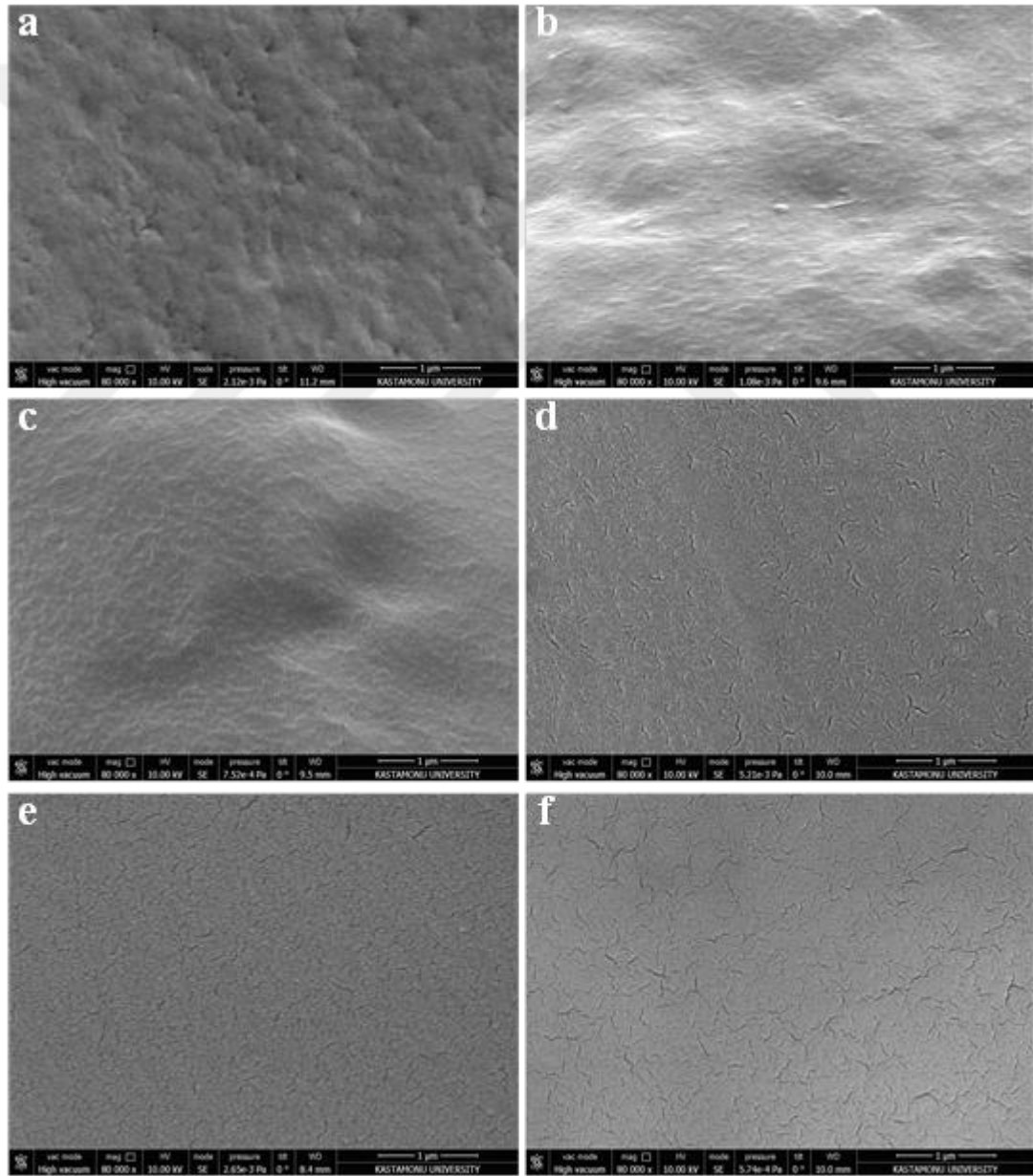
tarafından kaplandığı görülmektedir. %5 PMMA eklenmesi ile üretilen 25P70U5M ve 25P69U5M1C numunelerinde yüzey morfolojisinin iyileştiği, aktif karbon parçacıkların homojen dağılım gösterdiği ve pürüzlülüğün azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.4 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin 80.000x büyütmeli SEM görüntüleri

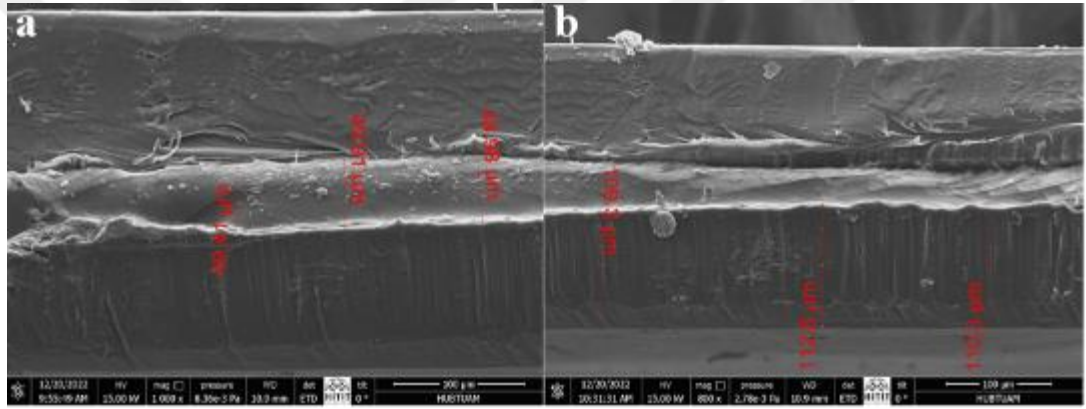
Şekil 5.4'te yer alan %50 oranında parılan C içeren numuneler incelendiğinde, 50P50U numunesinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, yüzeyinden nano seviyede çatlak mevcuttur. Ağırlıkça %1'lik aktif karbonun eklenmesi ile üretilen 50P49U1C numunesi, 50P50U numunesi ile kıyaslandığında

morfolojik yapısının değiştiği ve daha pürüzlü bir hal aldığı gözlenmektedir. Ağırlıkça %1'lik PMMA eklenmesi ile üretilen 50P49U1M numunesinin, 50P50U numunesine göre çatlakların daha görünür hale gelmektedir. 50P48U1M1C numunesinde ise daha pürüzlü ve çatlakların daha da belirginleştiği bir durum görölmektedir. Ağırlıkça %5 PMMA eklenmesi ile üretilen 50P45U5M numunesi çatlak oluşumları artmıştır. 50P44U5M1C numunesinde ise yüzey morfolojisinin iyileştirdiği ve çatlakların küçüldüğü görölmekle birlikte aktif karbon parçacıklarında aglomerasyon oluşumları görölmektedir.



şekil 5.5 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin 80.000x büyütmeli SEM görüntüleri

Şekil 5.5'te yer alan %75 oranında parilen C içeren numuneler incelendiğinde, 75P25U numunesi pürüzlü ve gözenekli bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. 75P24U1C numunesinde aktif karbon parçacıkların eklenmesi ile gözenekli yapının tamamen kaybolduğu ve pürüzlülüğün azaldığı görülmektedir. 75P24U1M numunesinde ağırlıkça %1 PMMA eklenmesi ile pürüzlülüğün azaldığı, gözenekli oluşumların kapandığı görülmektedir. Fakat çatlak oluşumların da başladığı görülmektedir. %1'lik aktif karbon eklenmesi ile üretilen 75P23U1M1C numunesinde pürüzlülüğün oldukça azaldığı ama çatlakların büyüdüğü görülmektedir. 75P23U1M1C ve 75P19U5M1C numunelerinde ise daha uzun çatlaklar görülmektedir.



Şekil 5.6 Yanal SEM görüntüleri (a) iletken üzerine kaplanan mürekkebin kalınlığı (1.000x) ve (b) kaplanan iletkenin kalınlığı (800x)

Serigrafi yöntemi kullanılarak yapılan kaplamalarda, çözünürlük 50 μm 'dan başlamaktadır (Da Cruz vd. 2015). Yani; baskı ipeği üzerine dökülmüş mürekkep, ragle yardımıyla bir seferde en az 50 μm kalınlıkta katman oluşturulmaktadır. Şekil 5.6'da serigrafi yöntemi kullanılarak kaplanan gümüş iletim yolların ve mürekkebin kalınlıklarının tespiti için yanar SEM görüntüleri yer almaktadır. Gümüş iletim yolu üzerine kaplanan mürekkebin ortalama kalınlığı 50 μm 'dir. Ragle yardımıyla 2 katman oluşturacak şekilde PET altlık üzerine kaplanan gümüş iletim yolunun kalınlığı ise 110 μm 'dir.

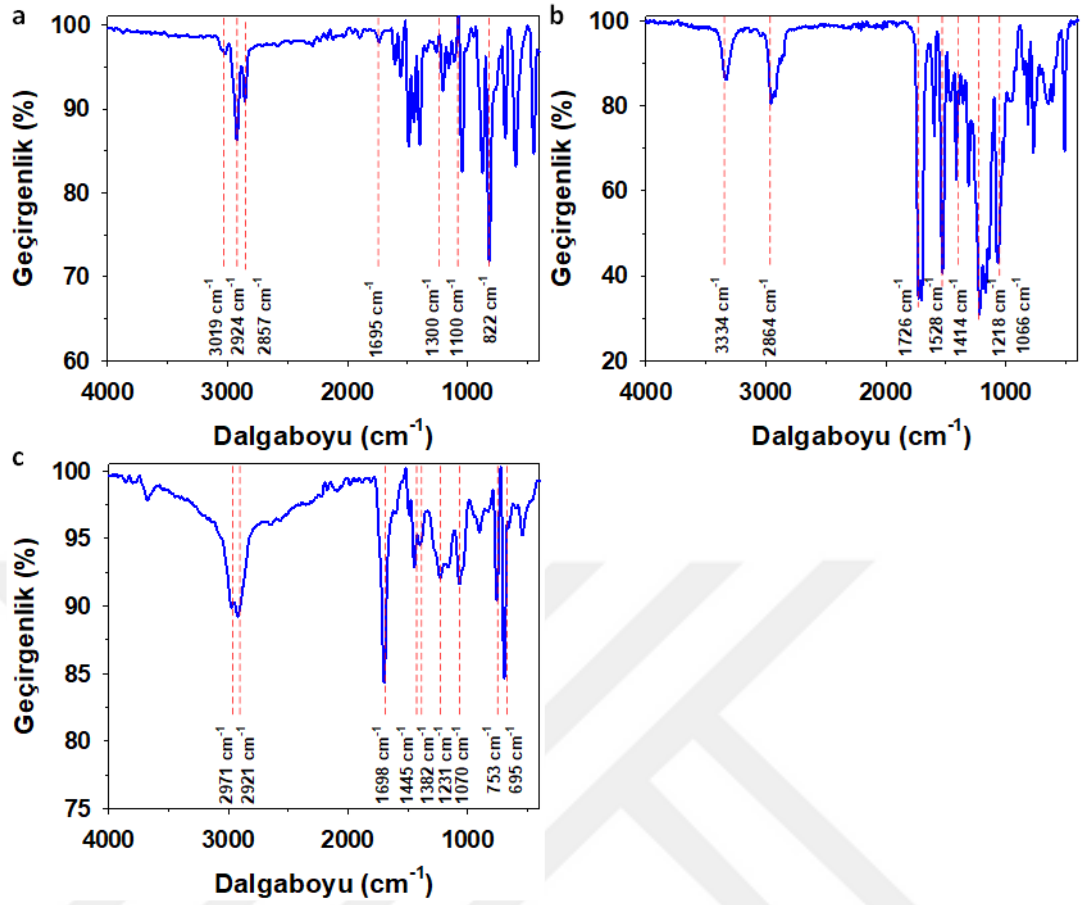
5.1.3 Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi

Şekil 5.7’da farklı oranlarda parilen C, PU, PMMA ve aktif karbon içeren numunelerin kimyasal özelliklerinin analizleri FTIR ölçümleri ile gerçekleştirildi. Bu ölçümlerin IR spektrumları Şekil 5.7-5.13’te verilmiştir.

100P numunesinin Şekil 5.7(a)’daki IR spektrumu incelendiğinde, C-Cl gerilme titreşimi 822 cm^{-1} ’de görülmektedir. C-O titreşimleri 1100 cm^{-1} ile 1300 cm^{-1} aralığında görülmektedir. C=O titreşimleri 1695 cm^{-1} ’de yer almakta olup, üretimden kaynaklı okside olması konusunda bilgi vermektedir. C-H gerilme titreşiminden kaynaklanan soğurma bantları 2924 cm^{-1} ve 2857 cm^{-1} ’de görülmektedir. 3019 cm^{-1} ’de aromatik C-H gerilme titreşimleri görülmektedir. Diğer karakteristik pikler ise alifatik C-H gerilme titreşimlerine aittir (Nowlin vd. 1980).

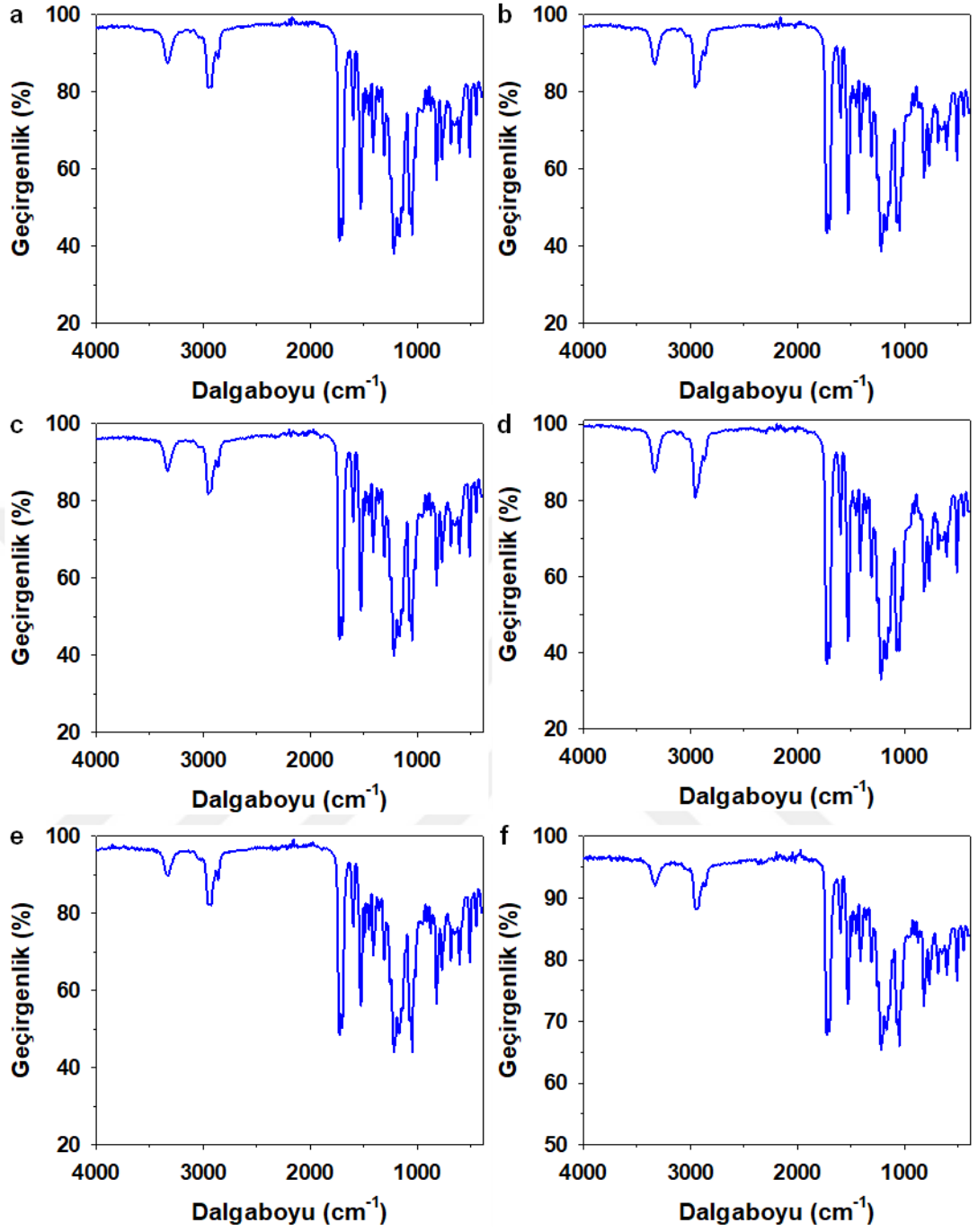
PU numunesinin IR spektrumu 5.7(b)’de verilmiştir. 1066 cm^{-1} ’de C-O-C gerilme titreşimine sahiptir. Üretan bağındaki N-H eğilme ve C-N gerilme titreşimleri 1218 cm^{-1} ve 1528 cm^{-1} ’de görülmektedir. 1726 cm^{-1} ’deki pik C-O gerilme titreşime karşılık gelmektedir. CH_2 ’de gerilme titreşimi 2864 cm^{-1} ’de görülmektedir. 3334 cm^{-1} ’de ise N-H gerilme titreşimleri görülmektedir (Caddeo vd. 2014).

PMMA numunesinin IR spektrumu 5.7(c)’de verilmiştir. 695 cm^{-1} ve 757 cm^{-1} ’de C=O eğilme titreşimine sahip olduğu görülmektedir. 1070 cm^{-1} ’de CH_2 eğilme, 1231 cm^{-1} ’de C-C-O gerilme, 1382 cm^{-1} ’de C- CH_3 eğilme, 1445 cm^{-1} ’de O- CH_3 eğilme, 1698 cm^{-1} ’de C=O gerilme, 2921 cm^{-1} ’de C- CH_3 , C-H gerilme, 2971 cm^{-1} ’de O- CH_3 , C-H gerilme titreşimlerine ait olduğu görülmektedir (Stuart, 2004; Willis vd. 1969).

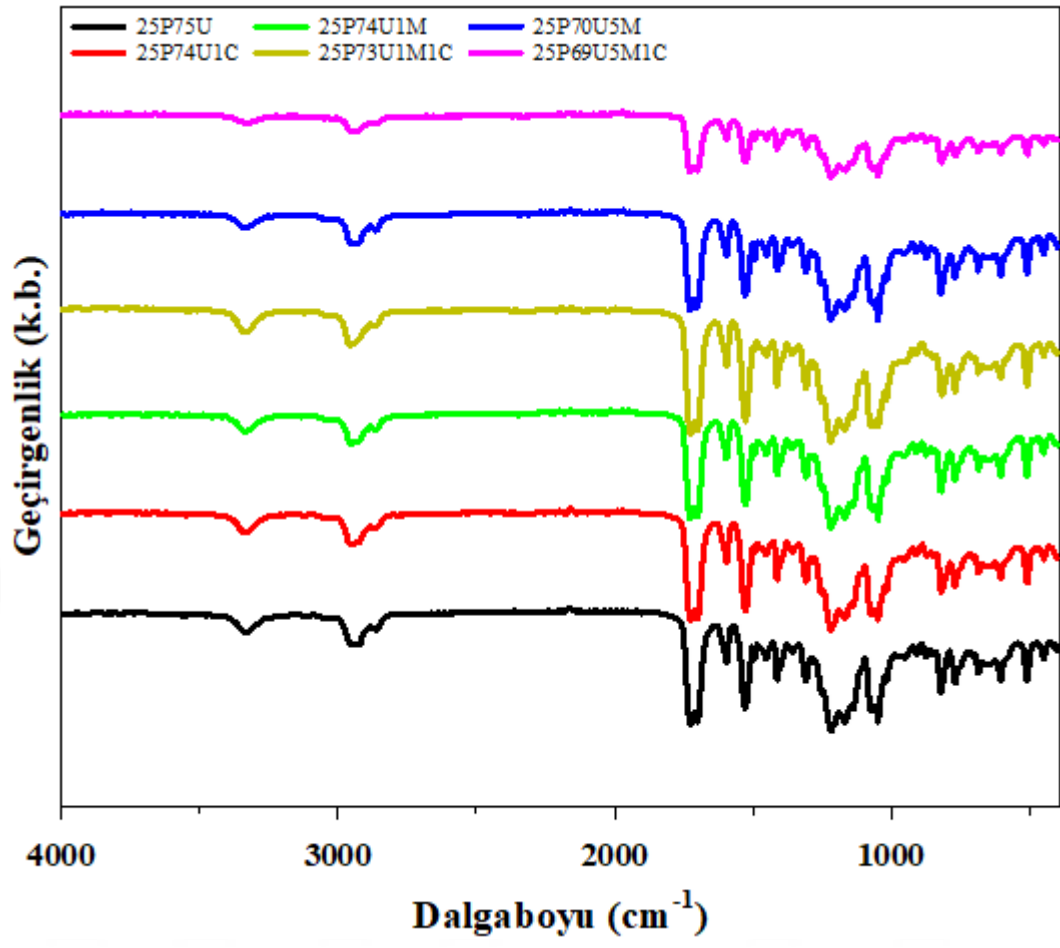


Şekil 5.7 (a) 100P, (b) PU ve (c) PMMA numunelerinin IR spektrumu

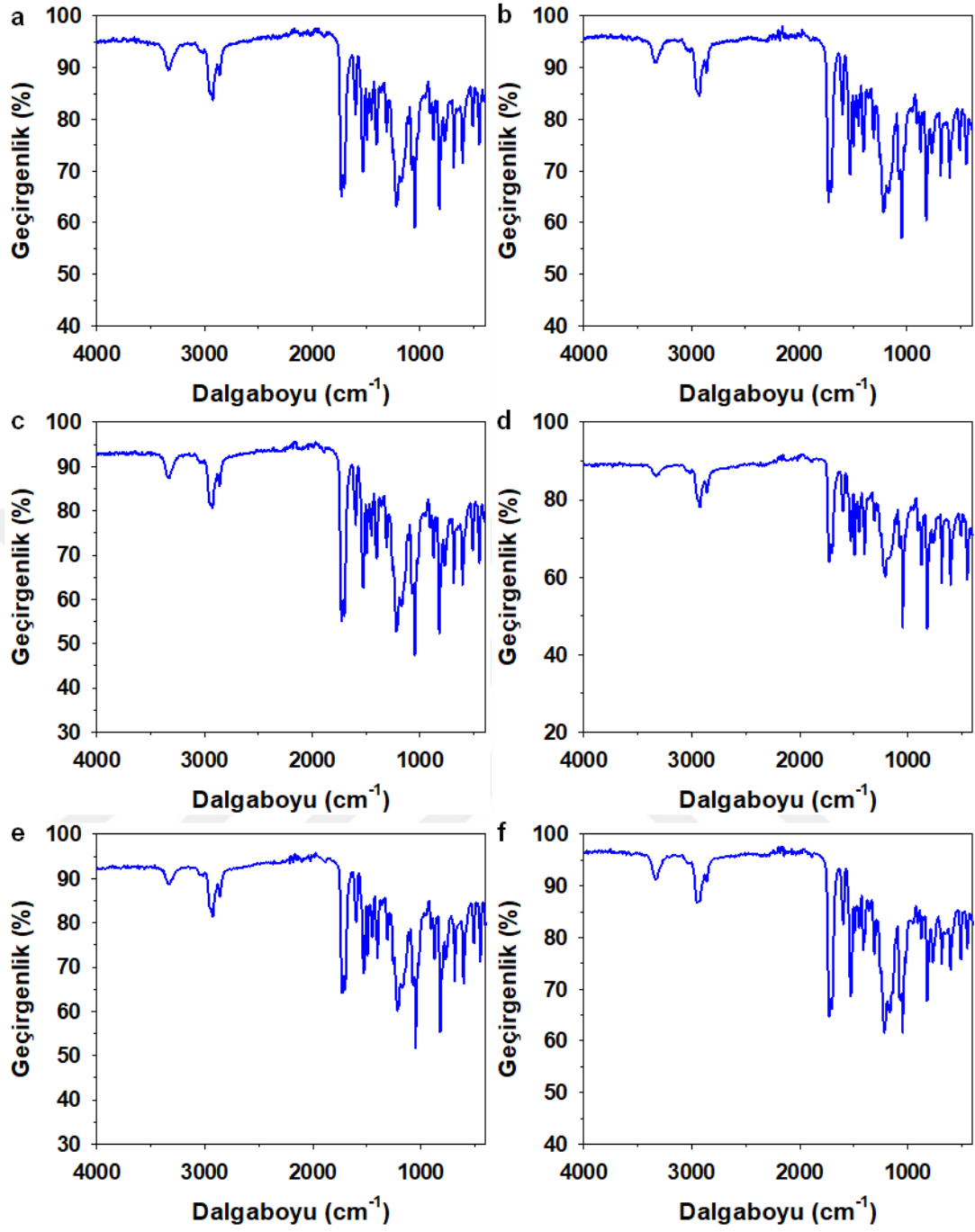
Şekil 5.8, 5.10 ve 5.12’de %25, %50 ve %75 oranında parilen C katkılı numunelerin IR spektrumları, Şekil 5.9, 5.11 ve 5.13’de ise bu IR spektrumları kıyaslamalı olarak yer almaktadır. Bu spektrumların Şekil 5.7’de yer alan 100P, PU ve PMMA ait olan IR spektrumları ile kıyaslandığında, karakteristik piklerin birbiri ile uyduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu pikler, literatür ile de eşleşmektedir.



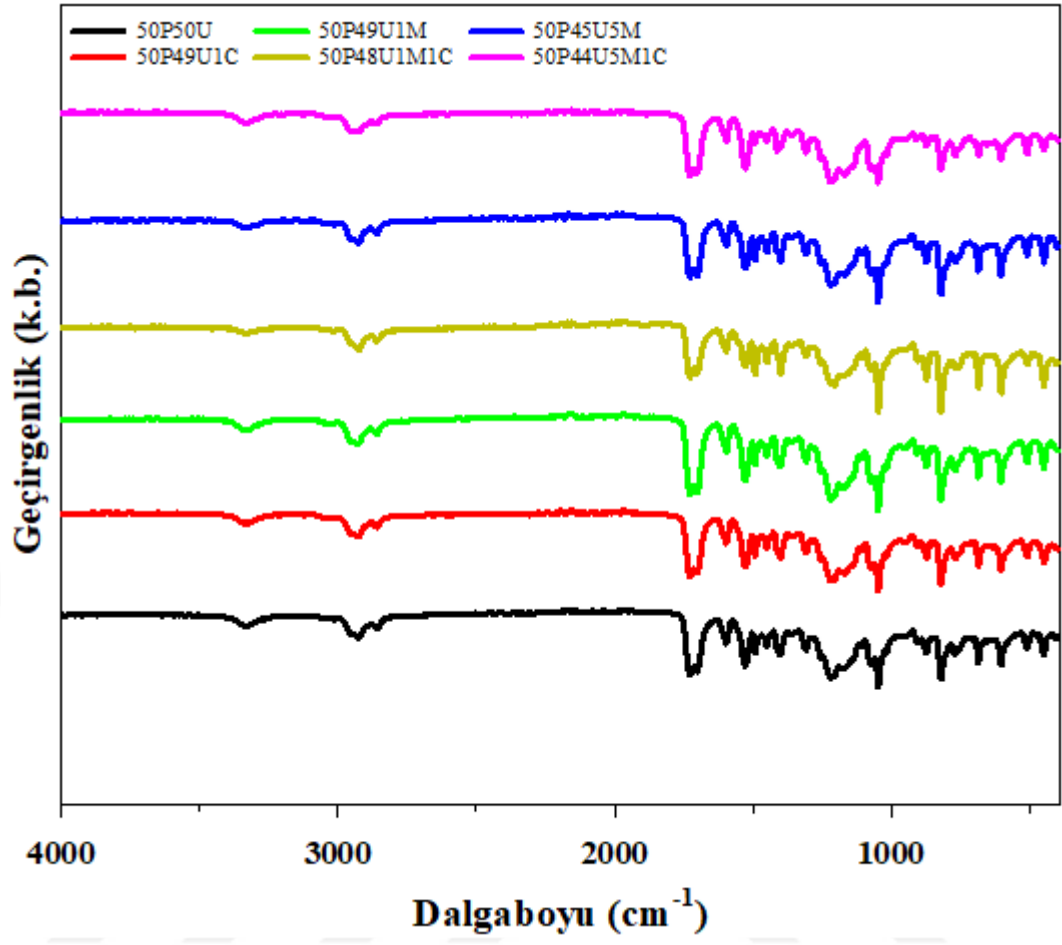
Şekil 5.8 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin IR spektrumu



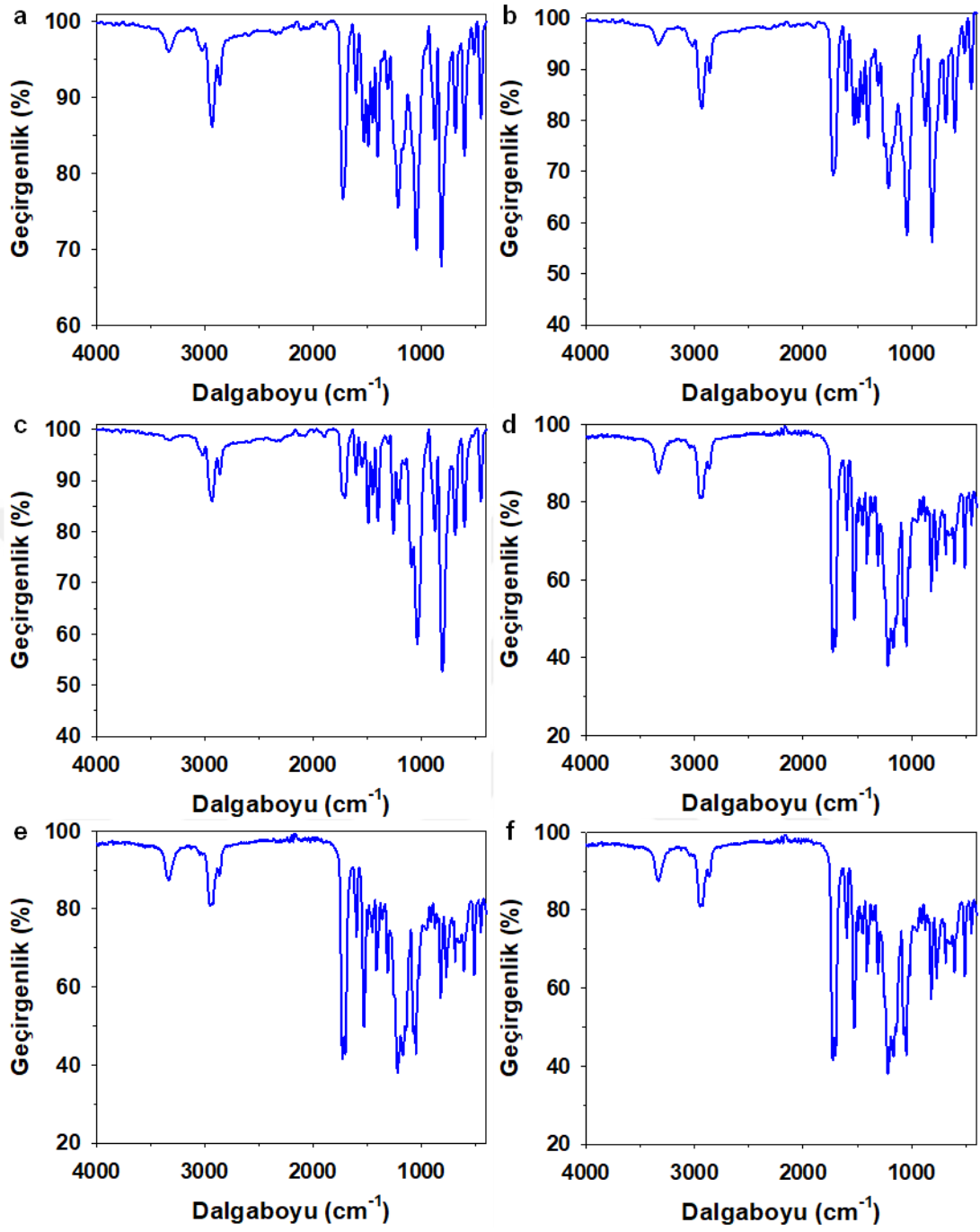
Şekil 5.9 %25 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları



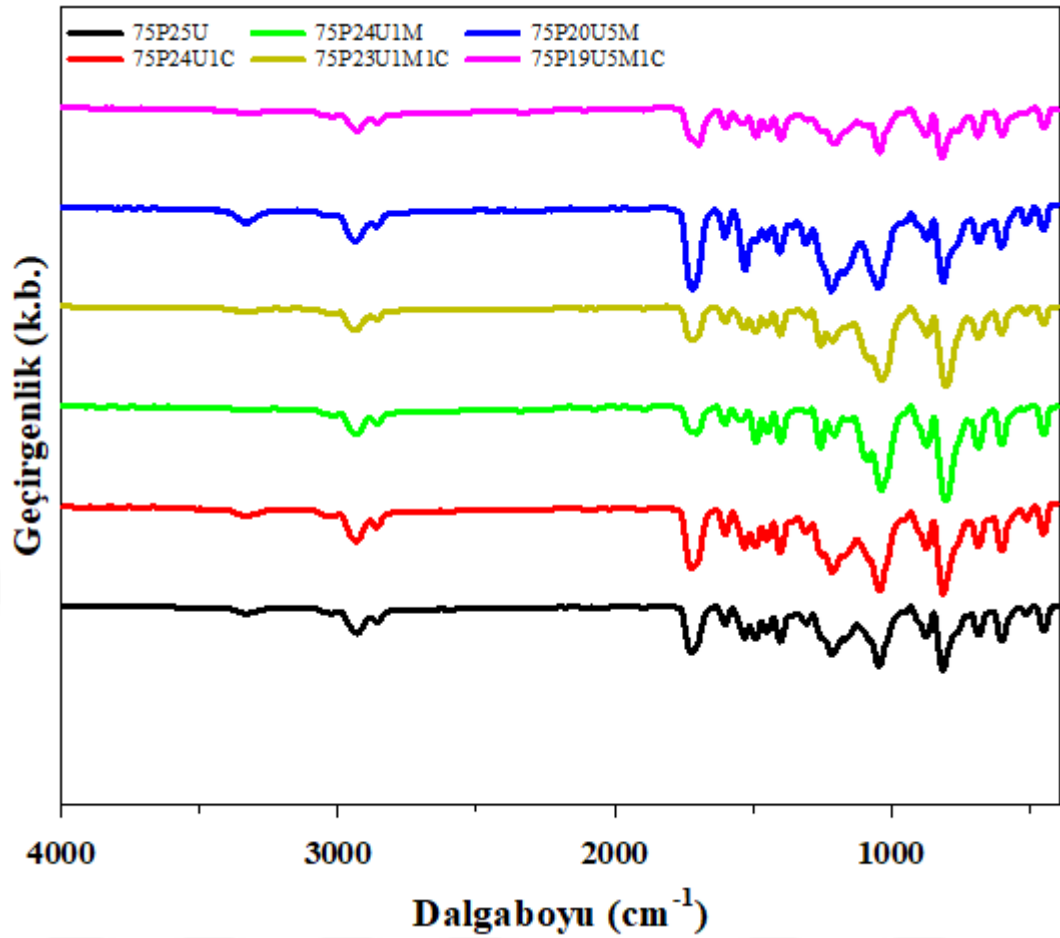
Şekil 5.10 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin IR spektrumu



Şekil 5.11 %50 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları



Şekil 5.12 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin IR spektrumu



Şekil 5.13 %75 oranında parilen C içeren numunelerin IR spektrumları

5.1.4 Termal Özelliklerinin İncelenmesi

Farklı oranlarda parilen C, PU, PMMA ve aktif karbon kullanılarak üretilen numunelerin termal analizleri için azot ortamında TGA ve DSC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14'te TGA termogramları görülmektedir. Tablo 5.1'de %5; %25; %50; %70 oranında kaybın olduğu sıcaklık değerleri ve 580°C'deki yüzdelik kalıntı miktarı yer almaktadır.

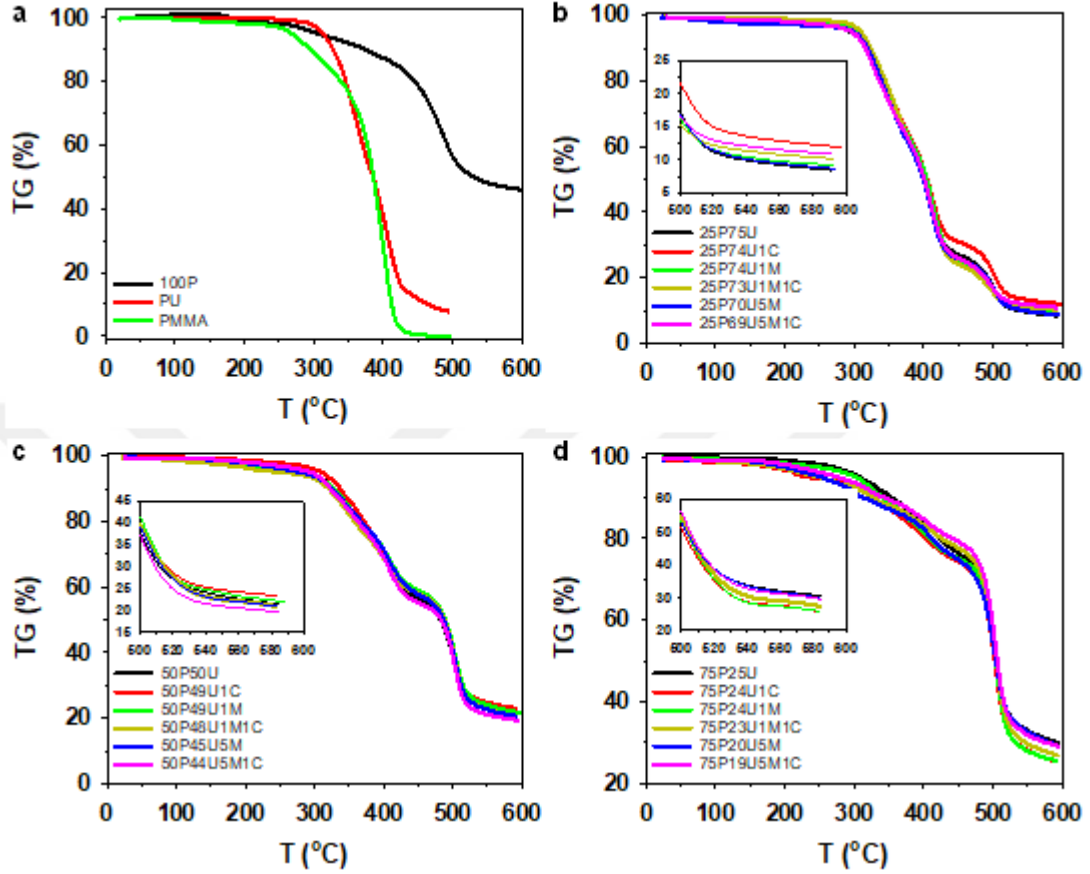
Şekil 5.14(a)'da yer alan 100P numunesinin termogramı incelendiğinde, üç kütle kaybı bölgesi yer almaktadır. Birinci kütle kaybı 150 °C de ile 265°C arasında, ikinci kütle kaybı 265-425°C arasındadır. 290°C'den itibaren numunenin ağırlığı önemli ölçüde değişmektedir (Majid vd. 1989). Son kütle kaybı ise 425-590°C arasında görülmektedir. 580°C'de kalıntı miktarı %46,4'tür. Bu sıcaklıkta azot ortamında parilen C kısmen ayrışmaktadır. Kalıntı miktarının diğer polimerlere göre yüksek

olmasını temel nedeni olarak C-H bağlarının ve benzen halkalarının parçalanması için daha fazla enerjiye gereksinimin olmasıdır. PU numunesinin termogramı incelendiğinde, iki kütle kaybı bölgesi yer almaktadır. İlk kütle kaybı 290°C de ile 425°C arasındadır. Bu aralıkta PU'nun üretan zincirleri termal ayrışması gerçekleşir (Daneshvar vd. 2019). İkinci kütle kaybı da 425-494°C arasında görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte ester grubunun yeterli miktarda kohezyon enerjisine sahip olması sonucu moleküller arasındaki hidrojen bağları kopmaya başlamaktadır (Ismoilov vd. 2019). 494°C'de kalıntı miktarı %7,7'dir. PMMA numunesinin termogramı incelendiğinde, iki kütle kaybı bölgesi vardır. Birinci bölge 255°C de ile 360°C arasındadır. PMMA'nın depolimerizasyonu ile MMA monomerleri oluşmaya başlar ve polimer zincirleri kırılmaya başlar (Patra vd. 2012). İkinci kütle kaybı da 360-430°C arasında görülmektedir. Bu sıcaklık aralığında polimer zincirleri hızla bozunmaya başlar ve çapraz bağların kopmasına ile monomer yapılar sıcaklıkla birlikte buharlaşır (Poomalai vd. 2011). 494°C'de monomer yapıların buharlaşmasının tamamen bittiği ve PMMA'ya ait kalıntının kalmadığı görülmektedir.

Şekil 5.14(b)'de yer alan %25 oranında parilen C içeren numunelerin termogramları incelendiğinde, sıcaklığa göre bozunum davranışı benzerdir. 400-500°C aralığında PU ve PMMA'nın yandığı görülmektedir. 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklardaki termogramın davranışı parilen C ve aktif karbonuna aittir. En düşük kalıntı miktarı 25P75U numunesine ait olup, %8,4'tür. En yüksek kalıntı miktarı da %12,1 ile 25P74U1C numunesine aittir. Ağırlıkça %1 oranında PMMA eklenmesi ile kalıntı miktarı %8,4'ten %9,2'ye arttığı görülmeye rağmen, %5 oranında PMMA eklenmesi ile kalıntı miktarının %8,8'e azaldığı görülmektedir. Aktif karbonun eklendiği her numunede kalıntı miktarının arttığı görülmektedir (Tablo 5.1).

%50 oranında parilen C içeren numunelerin termogramları Şekil 5.14(c)'de yer almaktadır. Bozunum davranışı benzer olup, 400-500 °C aralığında PU ve PMMA'nın yanmaktadır. Bu bölgede yüzdelik olarak PU miktarının %75'ten %50'ye azalması ile yüzdelik bozunumu %15-25'den %55-60'a yükseldiği görülmektedir. Ağırlıkça parilen C oranının artışı ile birlikte kalıntı miktarlarının, %25 oranında PAC içeren numunelere göre arttığı görülmektedir. 50P50U numunesinin kalıntı miktarı

%21,2'dir. PMMA ve aktif karbonun eklenmesi ile kalıntı miktarlarının %19,4'e azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.14 (a) 100P, PU ve PMMA, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerinin TG termogramları

Şekil 5.14(d)'de yer alan %75 oranında parilen C içeren numunelerin termogramları incelendiğinde, benzer bozunum davranışı görülmektedir. PU miktarının ağırlıkça %75'den %25'e azalması ile 120-470°C aralığında bozunumların farklılaştığı görülmektedir. Benzer farklılaşma 510-580°C aralığında da görülmektedir. Ağırlıkça parilen C oranının artışı ile birlikte kalıntı miktarlarının arttığı görülmektedir. Bu da, parilen C'nin daha az miktarda C-H bağlarının ve benzen halkalarının parçalanmasının nedenidir. En düşük kalıntı miktarı 75P24U1C numunesine ait olup, %25,4'tür. En yüksek kalıntı miktarı ise %30,1 ile 75P25U numunesine aittir.

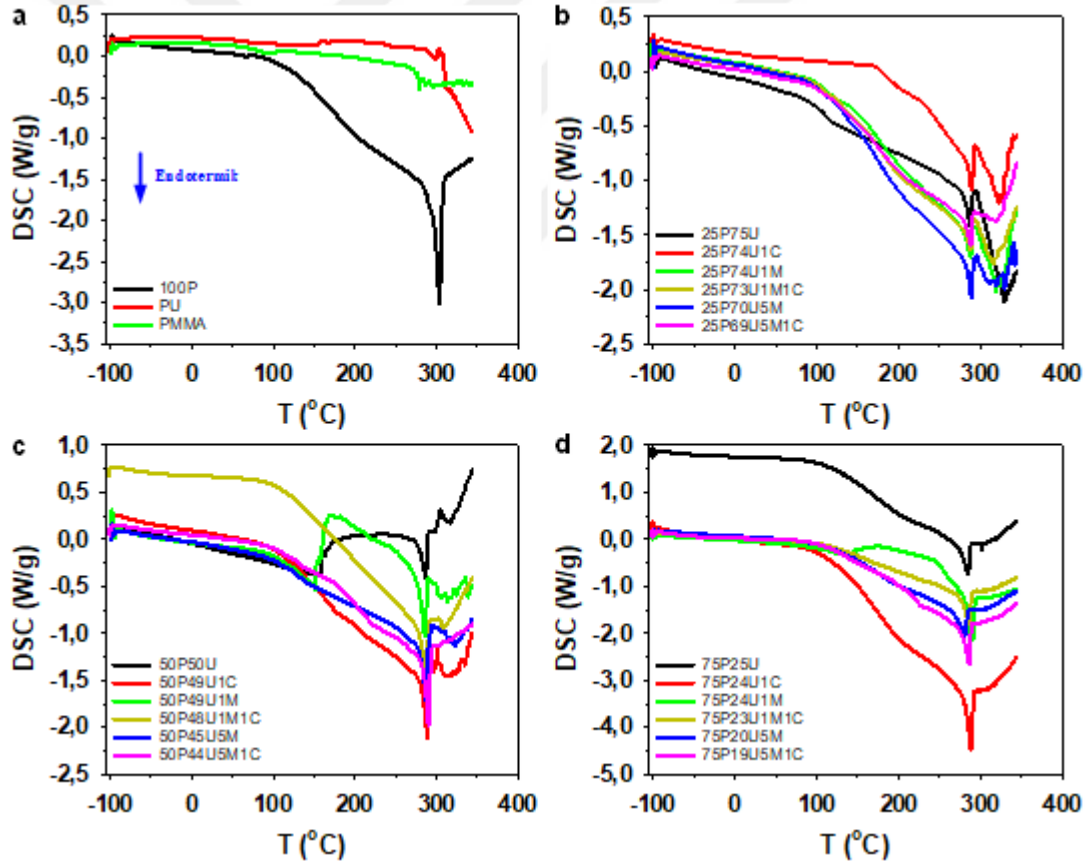
Tablo 5.1 PU, PMMA, %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelerinin TGA sonuçları

Numune Adı	T _{%5} (°C)	T _{%25} (°C)	T _{%50} (°C)	T _{%70} (°C)	Kalıntı miktarı (%) (580°C)
PU	312,5	352,6	385,4	407,7	7,7 (494 °C)
PMMA	268,3	354,2	386,2	399,1	0,0 (494 °C)
25P75U	295,7	350,1	401,1	431,6	8,4
25P74U1C	303,0	354,2	405,3	461,3	12,1
25P74U1M	303,3	354,3	404,3	430,0	9,2
25P73U1M1C	309,9	355,0	400,8	425,9	10,2
25P70U5M	299,6	349,0	399,4	426,4	8,8
25P69U5M1C	296,8	347,8	401,2	429,1	10,9
50P50U	283,9	384,6	482,2	511,4	21,2
50P49U1C	310,8	388,8	488,6	514,4	23,0
50P49U1M	277,9	388,6	489,5	514,9	21,9
50P48U1M1C	253,4	377,6	488,2	512,3	20,7
50P45U5M	280,2	388,7	487,3	511,7	20,6
50P44U5M1C	294,7	381,5	483,0	508,9	19,4
75P25U	308,8	461,1	504,5	592,8	30,1
75P24U1C	234,5	443,9	502,7	533,9	25,4
75P24U1M	302,9	451,7	504,3	532,7	25,6
75P23U1M1C	249,3	470,1	505,2	547,3	27,1
75P20U5M	253,9	448,6	504,2	582,6	29,5
75P19U5M1C	278,1	477,3	506,4	576,2	29,3
100P	309,7	462,0	530,9	-	46,4

Farklı oranlarda PAC, PU, PMMA ve aktif karbonu kullanılarak üretilen numunelerin termal analizleri için DSC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15'te DSC termogramları görülmektedir. Tablo 5.2'de erime sıcaklıkları (T_m) yer almaktadır. Parilen C'nin camısı geçiş sıcaklığı 34-56°C aralığında (Senkevich ve Desu, 1999) olup, Şekil 5.15(a)'daki 100P numunesine ait DSC termogramından elde edilen camısı geçiş sıcaklığı 42,8°C'dir. Karakteristik olarak 100P numunesinin erime sıcaklığı 303,8°C'dir. Literatürdeki erime sıcaklığı ise 296°C'dir (Miserendino vd. 2004). PU'nun erime sıcaklıkları sırasıyla 76,9°C, 131,3°C ve 167,9°C olarak bulunmuştur. PU mekanik olarak yumuşak ve sert segmentlerden oluşur ki, 76,9°C yumuşak

segmentlerin kristal fazı ile ilişkilendirilir. Bu sıcaklık değeri, yüksek interüretan hidrojen bağı konsantrasyonunun sonucudur. Bu konsantrasyonun artması ile termal kararlılık artmaktadır (Barikani vd. 2013; Frick ve Rochman, 2004). Diğer sıcaklıklar ise sert segment ile ilişkili olup, kristal fazlarına sahip olduğunu göstermektedir. PU'nun DSC termogramında camsı geçiş sıcaklığı belirlenememiştir.

PMMA numunesinde 94,1°C ve 131,3°C değerlerinde küçük endotermik pikler yer almaktadır. 279,3°C'deki ana endotermik pik ise erimenin gerçekleştiği sıcaklık olup, literatürdeki erime sıcaklığı (284°C) ile uyumludur (Ferk vd. 2015). Ayrıca, 118,2°C'deki egzotermik pikte kristalleşmenin başladığı sıcaklıktır (Abdelrazek, 2004).



Şekil 5.15 (a) 100P, PU ve PMMA, (b) %25, (c) %50 ve (d) %75 oranında parilen C içeren numunelerinin DSC termogramları

Tablo 5.2’de yer alan PU, PMMA, %25; %50; %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelerinin DSC sonuçları incelendiğinde, erime sıcaklıklarının 280,7°C ile 303,8°C aralığında değiştiği görülmektedir.

Tablo 5.2 PU, PMMA, %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelerinin DSC sonuçları

Numune Adı	T _m (°C)
PU	167,9
PMMA	279,3
25P75U	288,1
25P74U1C	289,6
25P74U1M	287,9
25P73U1M1C	287,9
25P70U5M	289,1
25P69U5M1C	288,1
50P50U	286,8
50P49U1C	288,9
50P49U1M	286,1
50P48U1M1C	287,9
50P45U5M	287,7
50P44U5M1C	290,8
75P25U	284,7
75P24U1C	288,3
75P24U1M	290,4
75P23U1M1C	285,8
75P20U5M	280,7
75P19U5M1C	286,1
100P	303,8

5.2 Elektromekanik Özelliklerinin İncelenmesi

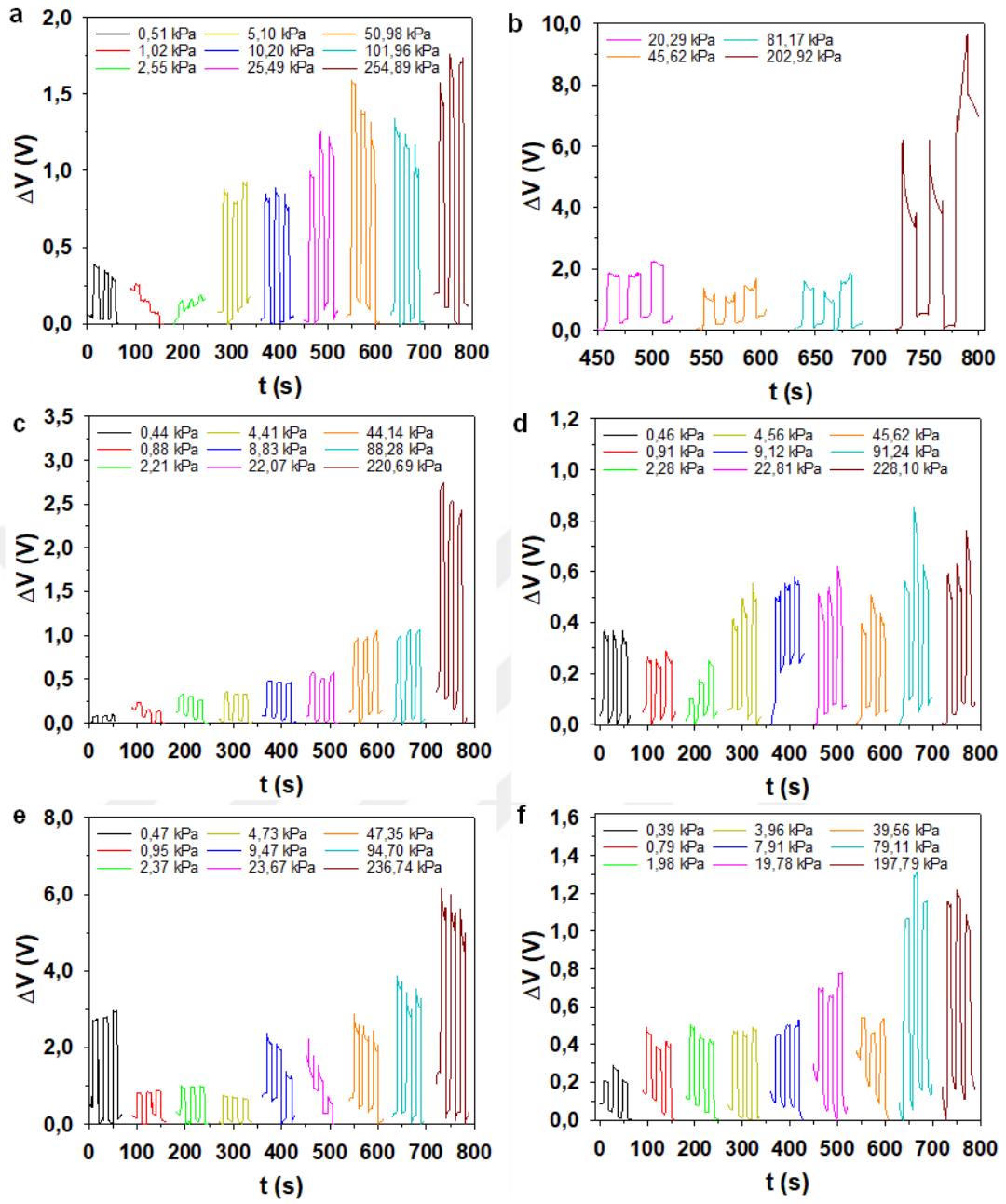
5.2.1 Piezoelektrik, Piezorezistif ve Kapasitif Basınç Sensörlerinin Elektromekanik Ölçümleri

%25; %50; %75 ve %100 oranında parilen C içeren 19 adet numuneye 0,01 N; 0,02 N; 0,05 N; 0,1 N; 0,2 N; 0,5 N; 1 N; 2 N ve 5 N kuvvetlerine karşılık gelen basınç değerleri uygulanarak piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif değişimleri kaydedildi. Bu numunelerin basınç karşısındaki performansı tanımlanırken, hassasiyet (S) önemli parametrelerden birisidir. Bu parametre, uygulanan basınca göre bağıl gerilim, direnç ve kapasitans değişikliğinin eğrisinin eğimi alınarak hesaplanır (Denklem 2.4) (Lee vd. 2018; Lu vd. 2018; Sun vd. 2019). Hassasiyeti belirlemek için basıncı algılama aralığının belirlenmesi gerekir ki, bu aralıkta sensörün çalışma limiti tanımlanır. Bu

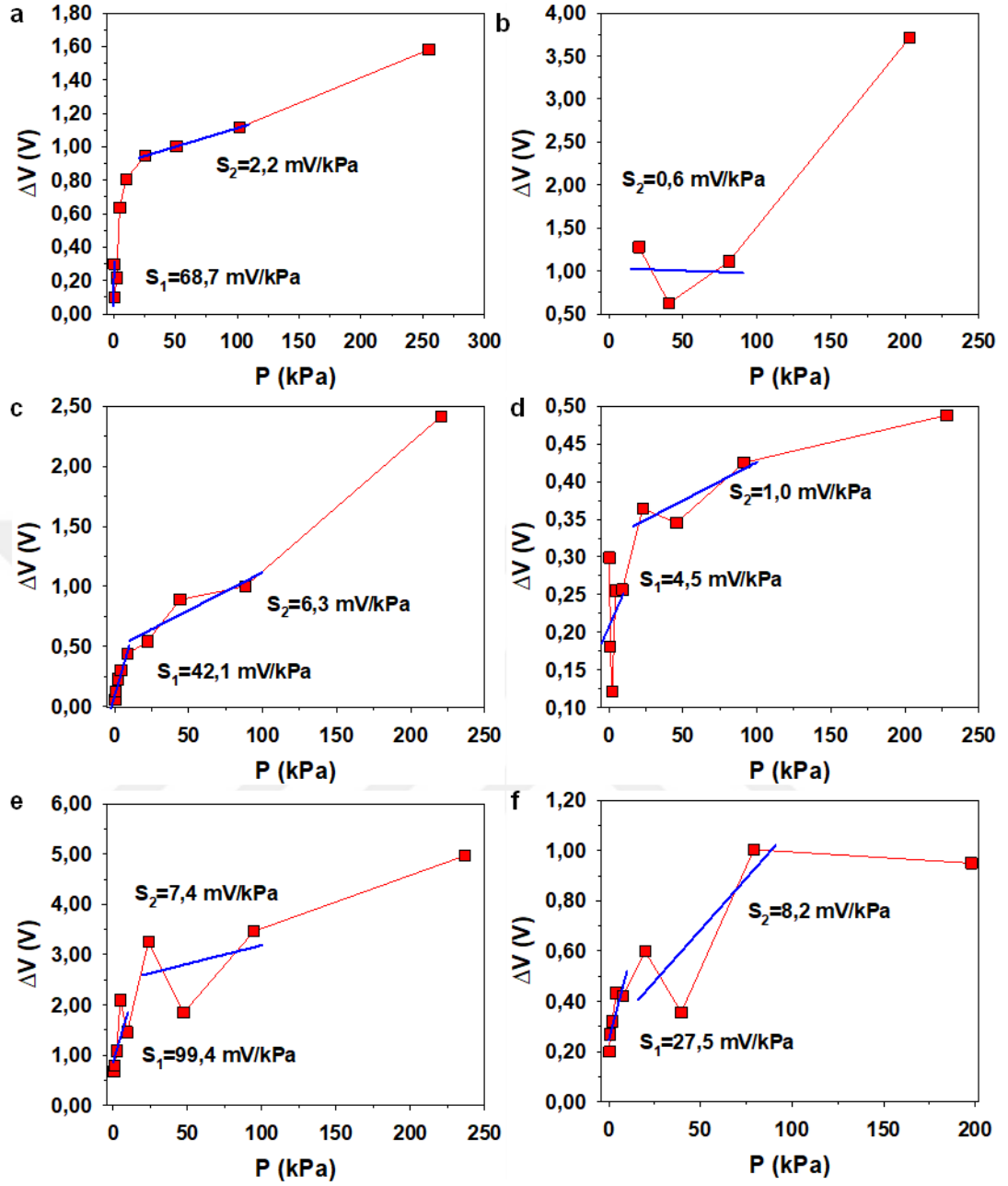
Çalışmada, basınç algılama bölgeleri olarak $P < 10 \text{ kPa}$ ve $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ iki bölge tanımlandı ve hassasiyet performansları incelendi.

5.2.1.1 Piezoelektrik basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri

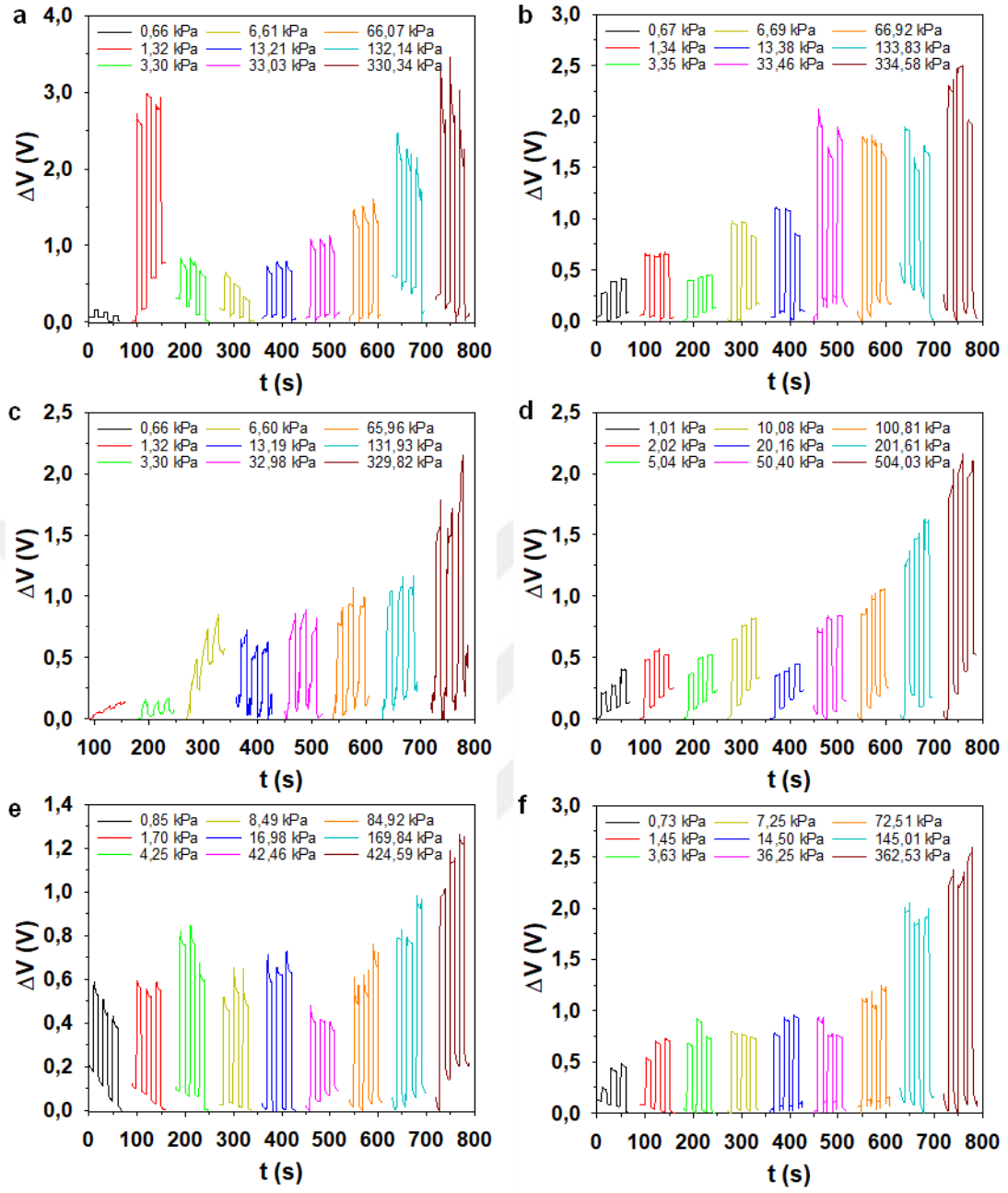
Tez kapsamında üretilen %25; %50; %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere 0,01 N; 0,02 N; 0,05 N; 0,1 N; 0,2 N; 0,5 N; 1 N; 2 N ve 5 N kuvvetlerine karşılık gelen basınç değerleri uygulanarak 10 adet çevrim gerçekleştirildi. Her bir çevrim, numuneye basınç uygulanması ve hemen ardından uygulanan basının geri alınması süreçlerinden oluşmaktadır. evrim sürecinde numunenin karakteristik özellikleri ortaya çıkarılarak, basınç altındaki gerilim değişimindeki kararlılığı tespit edilmektedir (Kapoor vd. 2018; Takamatsu vd. 2012). 3'er çevrimi içeren zamana göre gerilim değişimi grafikleri ve uygulanan basına karşı hassasiyet grafikleri şekil 5.16-5.22'de yer almaktadır. Uygulanan basına göre numunenin hassasiyeti Denklem 2.4'e göre hesaplanmış ve hesaplanan hassasiyet değerleri $P < 10 \text{ kPa}$ ve $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ olmak üzere iki basınç algılama aralığında Tablo 5.3'de verilmektedir. Tablo 5.4'te ise her bir uygulanan basına göre çevrimlerden elde edilen tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır.



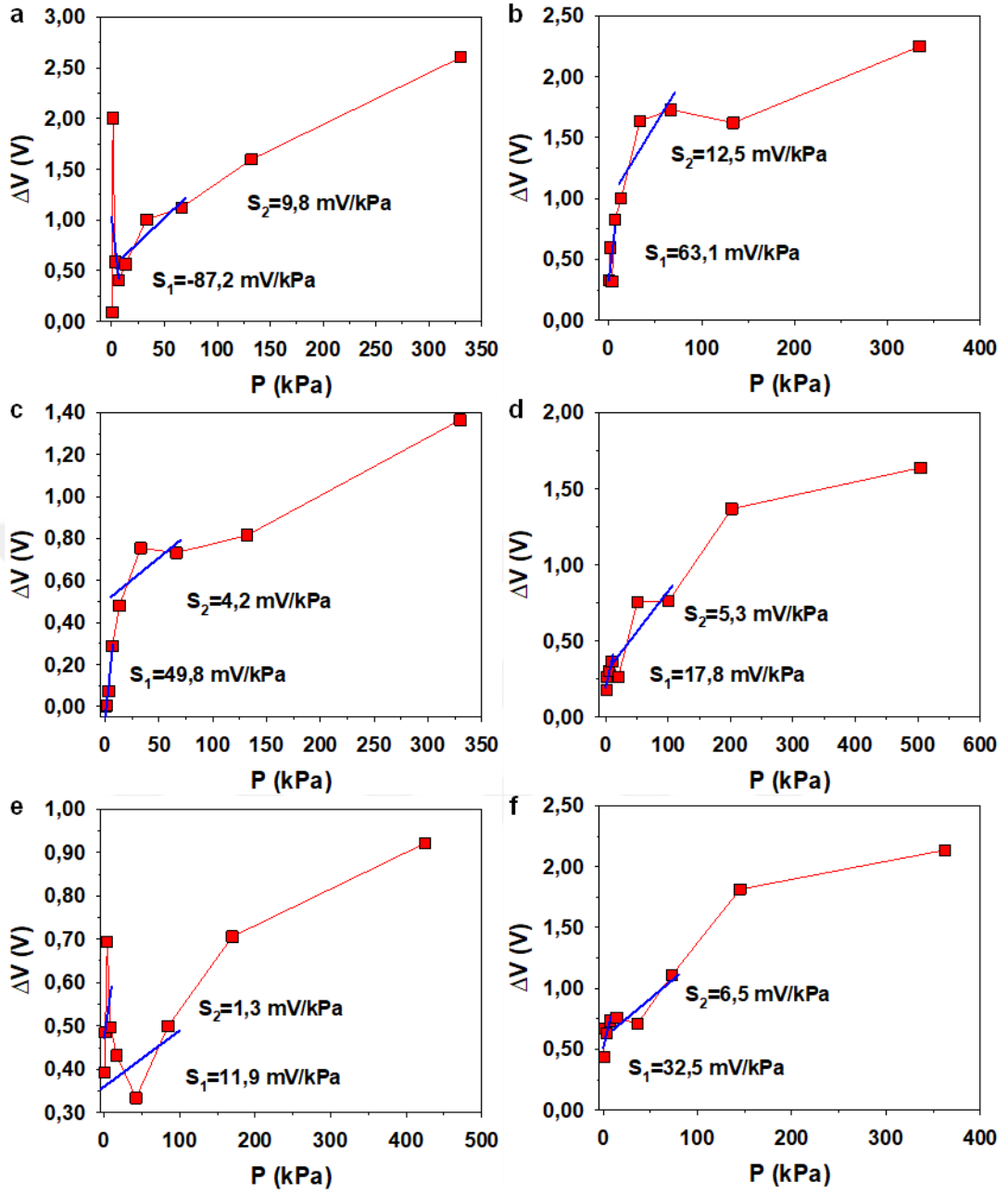
Şekil 5.16 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı



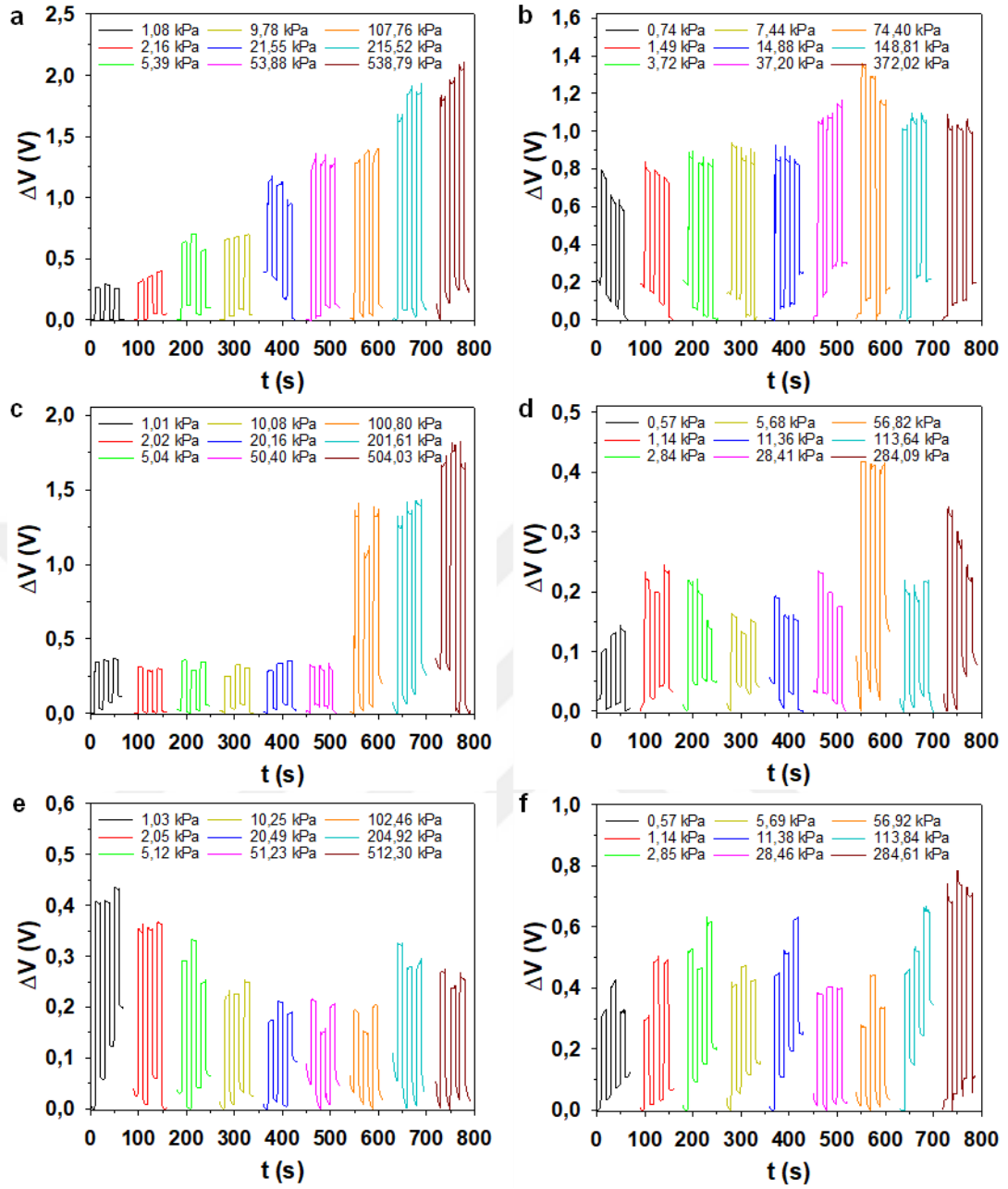
Şekil 5.17 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti



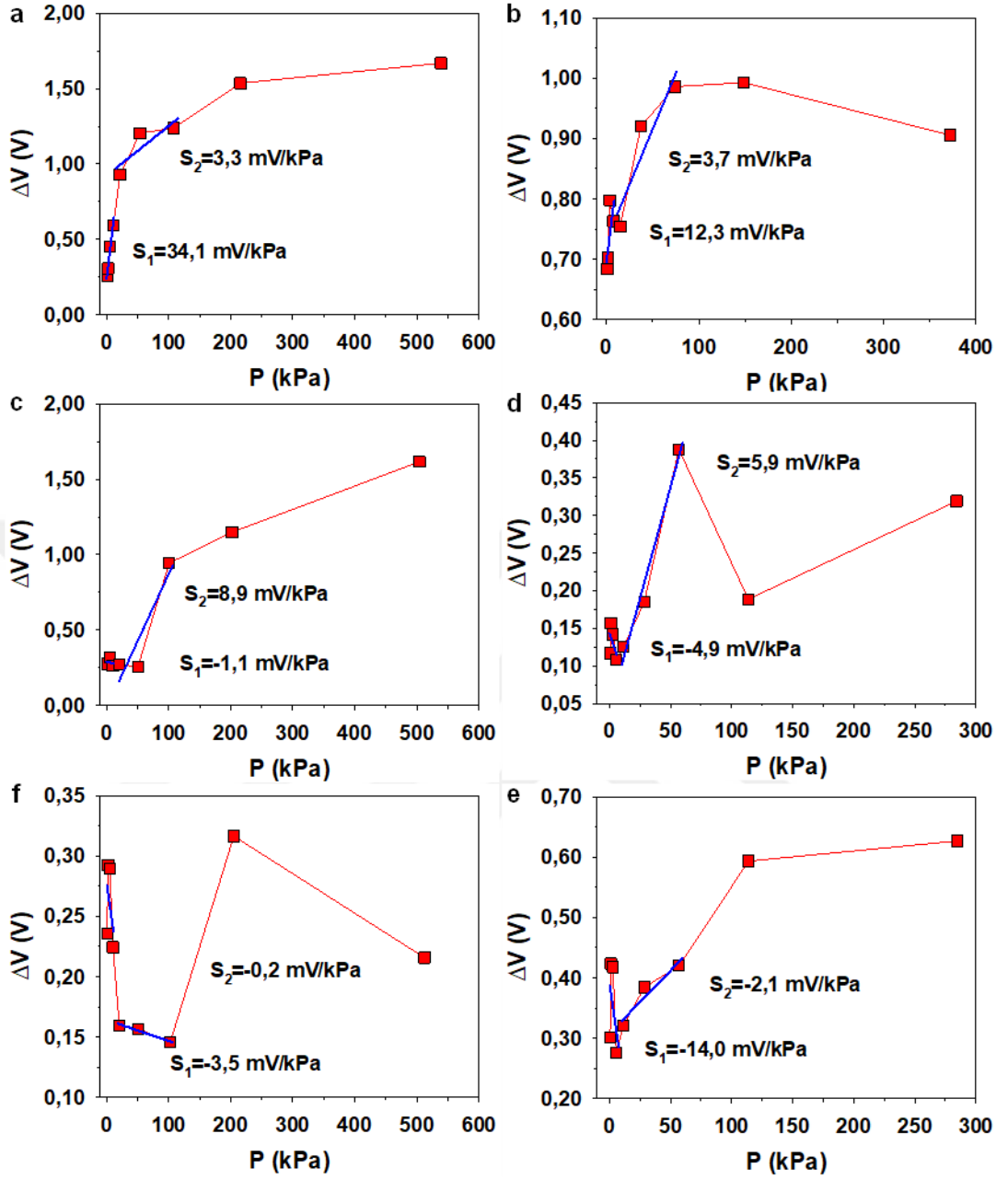
Şekil 5.18 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı



Şekil 5.19 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti



Şekil 5.20 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı



Şekil 5.21 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti

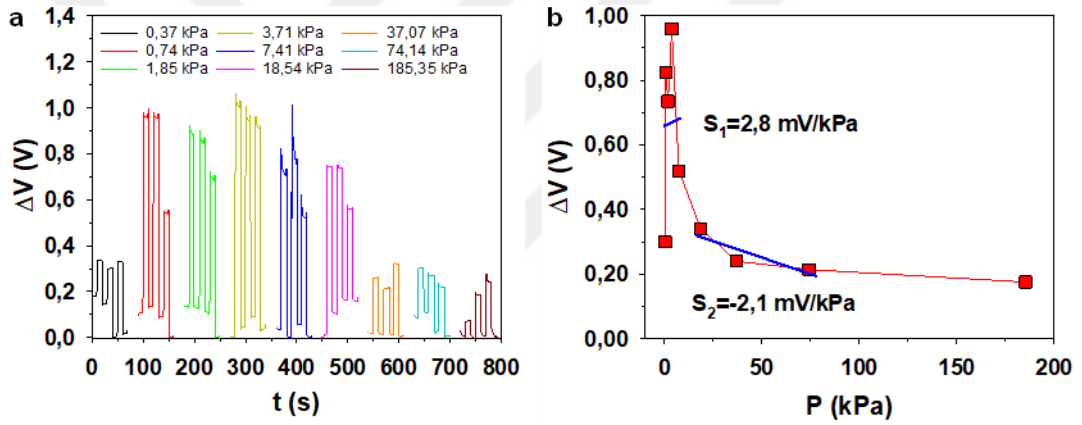
Şekil 5.16'da yer alan %25 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli gerilim değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, uygulanan basınç değerlerine göre gerilim değişimleri en çok 25P74U1C ve 25P70U5M numunelerinde görülmektedir. 25P75U numunesi ile karşılaştırıldığında, aktif karbonun veya PMMA'nın eklenmesi durumunda gerilim değişimleri artarken, aktif karbon ve PMMA'nın eklendiği numunelerde ise gerilim değişimlerinin azaldığı görülmektedir. Bu grafiklerinde çevrim stabilitesinin ve tekrar edilebilirliğinin olmadığı gözlenmektedir. Uygulanan

basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.17’de yer almaktadır. Tablo 5.3’de yer alan $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet ve R^2 değerlerine bakıldığında, bu değerlerin $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesindeki değerlere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, uygulanan basıncın algılanamadığının göstergesidir. $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet değerleri incelendiğinde, 25P75U ve 25P70U5M numunelerinin $68,7 \text{ mV/kPa}$ ve $99,4 \text{ mV/kPa}$ değerleri ile yüksek hassasiyete sahip olduğu görülmektedir. Fakat R^2 değerlerinin $0,8324$ ve $0,4054$ olması nedeniyle, uygulanan basıncı algılamada düşük bir performans gösterdiği görülmektedir. Tablo 5.5’de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, 25P75U ve 25P70U5M numunelerinin 1 s altında tepki verdiği görülmektedir. Diğer numunelerin tepki süreleri ise $1,27 \text{ s}$ ile $1,51 \text{ s}$ aralığında uygulanan basınca tepki vermektedir.

%50 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli gerilim değişimi kararlılığı grafikleri Şekil 5.18’de yer almaktadır. En yüksek gerilim değişimi 50P50U numunesine aittir. Aktif karbon ve PMMA’nın eklenmesi ile gerilim değişimi değerlerinin azaldığı görülmesinin yanı sıra tüm numunelerde çevrim stabilitesinin ve tekrar edilebilirliğinin olmadığı gözlenmektedir. Tablo 5.3’de yer alan $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet değerleri kıyaslandığında, 50P49U1C ve 50P49U1M numunelerin $63,1 \text{ mV/kPa}$ ve $49,8 \text{ mV/kPa}$ olarak yüksek hassasiyete sahip olduğu görülmektedir. Bu numunelerin R^2 değerleri de $0,4907$ ve $0,9639$ ’dır. 50P49U1M numunesinin R^2 değerlerinin yüksek olmasına rağmen, Şekil 5.18(c)’de yer alan kararlılık grafiğine bakıldığında basıncı algılama performansının oldukça düşük olduğu görülmektedir. $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet değerleri incelendiğinde, düşük hassasiyet değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 5.4’te yer alan %50 oranında parilen C içeren numunelerin tepki ve gevşeme süreleri, %25 oranında parilen C içeren numunelere göre düşük olduğu görülmektedir. Yani, %50 oranında parilen C içeren numuneler uygulanan basınca daha hızlı tepki vermektedir. Tüm numuneler 1 s altında tepki vermektedirler.

Şekil 5.20’de yer alan %75 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli gerilim değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, en yüksek gerilim değişimi 75P25U numunesindedir. Diğer numunelerde ise uygulanan basınç değerlerine karşı gerilim değişimlerinin düşük seviyede olduğu görülmektedir. Uygulanan basıncın artışı ile

birlikte gerilim değişimlerinde düzenli bir artış olmasına rağmen, aynı basınç altındaki 3 çevrimli gösterimde stabilitenin olmadığı görülmektedir. Bu da, %75 oranında parilen C içeren numunelerin basıncı algılama konusunda performansının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.21’de yer almaktadır. Tablo 5.3’de yer alan hassasiyet değerleri incelendiğinde, 75P25U numunesinin $P < 10$ kPa bölgesinde $34,1$ mV/kPa hassasiyete ve $0,9807$ R^2 değerine sahip olduğu görülmektedir. Fakat sabit basınç altında yer alan çevrimdeki stabilitenin olmaması, bu numunenin basınç sensörü uygulamalarında kullanılmayacağını göstergesidir. Tablo 5.4’te yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, %25 ve %50 oranındaki numunelere kıyasla daha hızlı tepki verdiği görülmektedir.



Şekil 5.22 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti

%100 oranında parilen C içeren numunenin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı Şekil 5.22(a)’da verilmiştir. Şekil 5.22(b)’de uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti görülmekte olup, $P < 10$ kPa ve 10 kPa $< P < 100$ kPa bölgesindeki hassasiyetleri $2,8$ mV/kPa ve $-2,1$ mV/kPa’dır. Uygulanan basınca göre tepki süreleri $0,40$ s ve gevşeme süreleri $0,19$ s’dir.

%25; %50; %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere ait uygulanan farklı basınç değerlerindeki karakteristik özellikleri Şekil 5.16-5.22 ve Tablo 5.3-5.4’de verilmiştir. Tüm bu sonuçlar düşünüldüğünde, numunelerin basıncı algılama özelliklerini tespit etmek için yapılan elektromekanik ölçümler sonucunda düşük performans gösterdiği veya hiç performans gösteremediği görülmektedir. Böylelikle,

parilen C tabanlı numunelerin esnek piezoelektrik basınç sensörü olarak kullanılamayacağı gözlenmiştir.

Tablo 5.3 Piezoelektrik sensörlerin hassasiyet değerleri

Numune Adı	P<10 kPa		10 kPa<P<100 kPa	
	S (mV/kPa)	R ²	S (mV/kPa)	R ²
25P75U	68,7	0,8324	2,2	0,9989
25P74U1C	-	-	0,6	0,0033
25P74U1M	42,1	0,9307	6,3	0,7896
25P73U1M1C	4,5	0,0498	1,0	0,7198
25P70U5M	99,4	0,4054	7,4	0,0926
25P69U5M1C	27,5	0,7114	8,2	0,5736
50P50U	-87,2	0,0756	9,8	0,8005
50P49U1C	63,1	0,4907	12,5	0,7274
50P49U1M	49,8	0,9639	4,2	0,5427
50P48U1M1C	17,8	0,8418	5,3	0,7022
50P45U5M	11,9	0,1038	1,3	0,2848
50P44U5M1C	32,5	0,5461	6,5	0,7698
75P25U	34,1	0,9807	3,3	0,7117
75P24U1C	12,3	0,4860	3,7	0,8582
75P24U1M	-1,1	0,0378	8,9	0,8488
75P23U1M1C	-4,9	0,2496	5,9	0,9737
75P20U5M	-3,5	0,1704	-0,2	0,9701
75P19U5M1C	-14,0	0,1737	2,1	0,8228
100P	2,8	0,0010	-2,1	0,7504

Tablo 5.4 Piezoelektrik sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P75U	0,51	1,29±0,10	1,35±0,01
	1,02	1,33±0,20	1,04±0,01
	2,55	1,55±0,60	1,73±0,40
	5,10	1,31±0,05	1,21±0,01
	10,20	1,31±0,07	1,39±0,01
	25,49	1,39±0,10	1,27±0,05
	50,98	1,27±0,06	1,20±0,01
	101,96	1,15±0,05	1,21±0,01
	254,89	1,27±0,05	1,33±0,05
	ORTALAMA	1,32±0,14	1,30±0,06
25P74U1C	0,41	-	-
	0,81	-	-
	2,03	-	-
	4,06	-	-
	8,12	-	-
	20,29	0,46±0,11	0,34±0,01
	45,62	0,63±0,11	0,29±0,05
	81,17	1,09±0,38	0,55±0,01
	202,92	0,39±0,01	0,28±0,05
	ORTALAMA	0,64±0,15	0,37±0,03
25P74U1M	0,44	1,39±0,01	0,93±0,20
	0,88	1,28±0,05	1,33±0,05
	2,21	1,51±0,11	1,27±0,06
	4,41	1,39±0,01	1,34±0,06
	8,83	1,38±0,01	1,28±0,01
	22,07	1,51±0,06	1,33±0,05
	44,14	1,45±0,05	1,28±0,05
	88,28	1,62±0,05	1,39±0,01
	220,69	1,45±0,05	1,45±0,05
	ORTALAMA	1,43±0,04	1,29±0,06
25P73U1M1C	0,46	1,93±0,44	1,34±0,06
	0,91	1,73±0,19	1,39±0,01
	2,28	1,43±0,11	1,33±0,05
	4,56	1,44±0,05	1,33±0,05
	9,12	1,45±0,05	0,86±0,17
	22,81	1,44±0,06	1,38±0,01
	45,62	1,34±0,05	1,27±0,06
	91,24	1,38±0,01	1,33±0,05
	228,10	1,44±0,06	1,21±0,09
	ORTALAMA	1,51±0,11	1,27±0,06

Tablo 5.4'ün devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P70U5M	0,47	0,35±0,10	1,10±0,10
	0,95	0,63±0,20	0,80±0,05
	2,37	0,69±0,10	0,58±0,05
	4,73	0,63±0,10	0,69±0,10
	9,47	0,92±0,05	0,29±0,05
	23,67	0,29±0,05	0,17±0,01
	47,35	0,58±0,05	0,23±0,05
	96,70	0,75±0,05	0,23±0,05
	236,74	0,75±0,05	0,29±0,05
	ORTALAMA	0,62±0,08	0,49±0,06
25P69U5M1C	0,39	1,51±0,15	1,06±0,10
	0,79	1,40±0,17	1,17±0,05
	1,98	1,63±0,05	1,51±0,15
	3,96	1,57±0,10	1,51±0,06
	7,91	1,65±0,06	1,64±0,05
	19,78	1,69±0,60	1,64±0,11
	39,56	1,99±0,25	1,46±0,50
	79,11	1,96±0,30	1,40±0,01
	197,79	1,74±0,09	1,51±0,06
	ORTALAMA	1,68±0,20	1,43±0,12
50P50U	0,66	0,29±0,05	0,23±0,05
	1,32	0,69±0,10	0,35±0,01
	3,30	0,75±0,06	0,23±0,05
	6,60	0,63±0,10	0,29±0,05
	13,19	0,80±0,10	0,17±0,01
	32,98	0,86±0,09	0,29±0,05
	65,96	0,86±0,10	0,23±0,05
	131,93	0,58±0,05	0,35±0,01
	329,82	0,69±0,90	0,29±0,10
	ORTALAMA	0,68±0,17	0,27±0,04
50P49U1C	0,67	0,91±0,11	0,29±0,11
	1,34	0,86±0,19	0,23±0,05
	3,35	0,69±0,19	0,23±0,05
	6,69	0,58±0,15	0,23±0,05
	13,38	0,81±0,20	0,17±0,01
	33,46	0,60±0,05	0,17±0,01
	66,92	0,52±0,01	0,17±0,01
	133,83	0,69±0,09	0,29±0,05
	334,58	0,81±0,20	0,40±0,05
	ORTALAMA	0,72±0,13	0,24±0,04

Tablo 5.4'ün devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
50P49U1M	0,66	0,81±0,11	0,58±0,05
	1,32	0,75±0,05	0,52±0,01
	3,30	1,21±0,26	0,80±0,11
	6,60	0,63±0,05	0,75±0,05
	13,19	0,81±0,29	0,40±0,05
	32,98	0,57±0,11	0,46±0,11
	65,96	0,69±0,09	0,29±0,05
	131,93	0,98±0,15	0,35±0,01
	329,82	0,58±0,15	0,35±0,01
	ORTALAMA	0,78±0,14	0,50±0,05
50P48U1M1C	1,01	0,81±0,11	0,58±0,05
	2,01	0,93±0,06	0,34±0,01
	5,04	0,69±0,09	0,23±0,05
	10,08	0,57±0,11	0,17±0,01
	20,16	0,63±0,06	0,28±0,05
	50,40	0,46±0,05	0,29±0,05
	100,81	0,41±0,05	0,35±0,01
	201,61	0,46±0,05	0,17±0,01
	504,03	0,46±0,05	0,17±0,01
	ORTALAMA	0,60±0,07	0,29±0,03
50P45U5M	0,85	0,81±0,05	0,46±0,05
	1,70	0,81±0,05	0,34±0,01
	4,25	0,86±0,09	0,23±0,05
	8,49	0,93±0,05	0,29±0,05
	16,98	0,74±0,05	0,29±0,05
	42,46	0,69±0,09	0,17±0,01
	84,92	0,69±0,10	0,23±0,05
	169,84	0,52±0,09	0,35±0,01
	424,59	0,40±0,06	0,40±0,05
	ORTALAMA	0,71±0,07	0,30±0,04
50P44U5M1C	0,73	0,75±0,20	0,17±0,01
	1,45	1,27±0,20	0,29±0,05
	3,63	0,98±0,05	0,29±0,05
	7,25	0,98±0,05	0,35±0,01
	14,50	0,69±0,01	0,23±0,05
	36,25	0,52±0,10	0,17±0,01
	72,51	0,40±0,05	0,23±0,05
	145,01	0,35±0,01	0,29±0,05
	362,53	0,40±0,05	0,23±0,05
	ORTALAMA	0,70±0,08	0,25±0,04

Tablo 5.4'ün devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P25U	1,08	0,92±0,05	0,22±0,05
	2,16	0,86±0,09	0,34±0,10
	5,39	0,64±0,06	0,28±0,05
	10,78	0,68±0,09	0,29±0,05
	21,55	0,86±0,30	0,29±0,11
	53,88	0,75±0,14	0,17±0,01
	107,76	0,46±0,05	0,28±0,05
	215,52	0,64±0,11	0,17±0,01
	538,79	0,40±0,05	0,17±0,01
	ORTALAMA	0,69±0,12	0,23±0,05
75P24U1C	0,74	0,93±0,20	0,17±0,01
	1,49	0,75±0,15	0,23±0,05
	3,72	1,04±0,09	0,17±0,01
	7,44	0,69±0,10	0,17±0,01
	14,88	0,52±0,01	0,23±0,05
	37,20	0,40±0,05	0,23±0,05
	74,40	0,41±0,05	0,29±0,05
	148,81	0,34±0,01	0,23±0,05
	372,02	0,34±0,01	0,17±0,01
	ORTALAMA	0,60±0,07	0,22±0,03
75P24U1M	1,01	0,93±0,11	0,29±0,06
	2,02	0,92±0,06	0,22±0,05
	5,04	0,75±0,04	0,23±0,05
	10,08	0,86±0,10	0,23±0,06
	20,16	0,63±0,05	0,17±0,01
	50,40	0,51±0,01	0,17±0,01
	100,81	1,04±0,18	0,22±0,06
	201,61	0,63±0,06	0,23±0,05
	504,03	0,57±0,15	0,23±0,05
	ORTALAMA	0,76±0,08	0,22±0,04
75P23U1M1C	0,57	0,87±0,09	0,29±0,05
	1,14	0,34±0,09	0,23±0,05
	2,84	0,58±0,20	0,17±0,01
	5,68	0,46±0,05	0,23±0,05
	11,36	0,46±0,10	0,29±0,05
	28,41	0,40±0,05	0,23±0,05
	56,82	0,52±0,10	0,17±0,01
	113,64	0,29±0,05	0,29±0,05
	284,09	0,52±0,10	0,23±0,05
	ORTALAMA	0,49±0,08	0,24±0,04

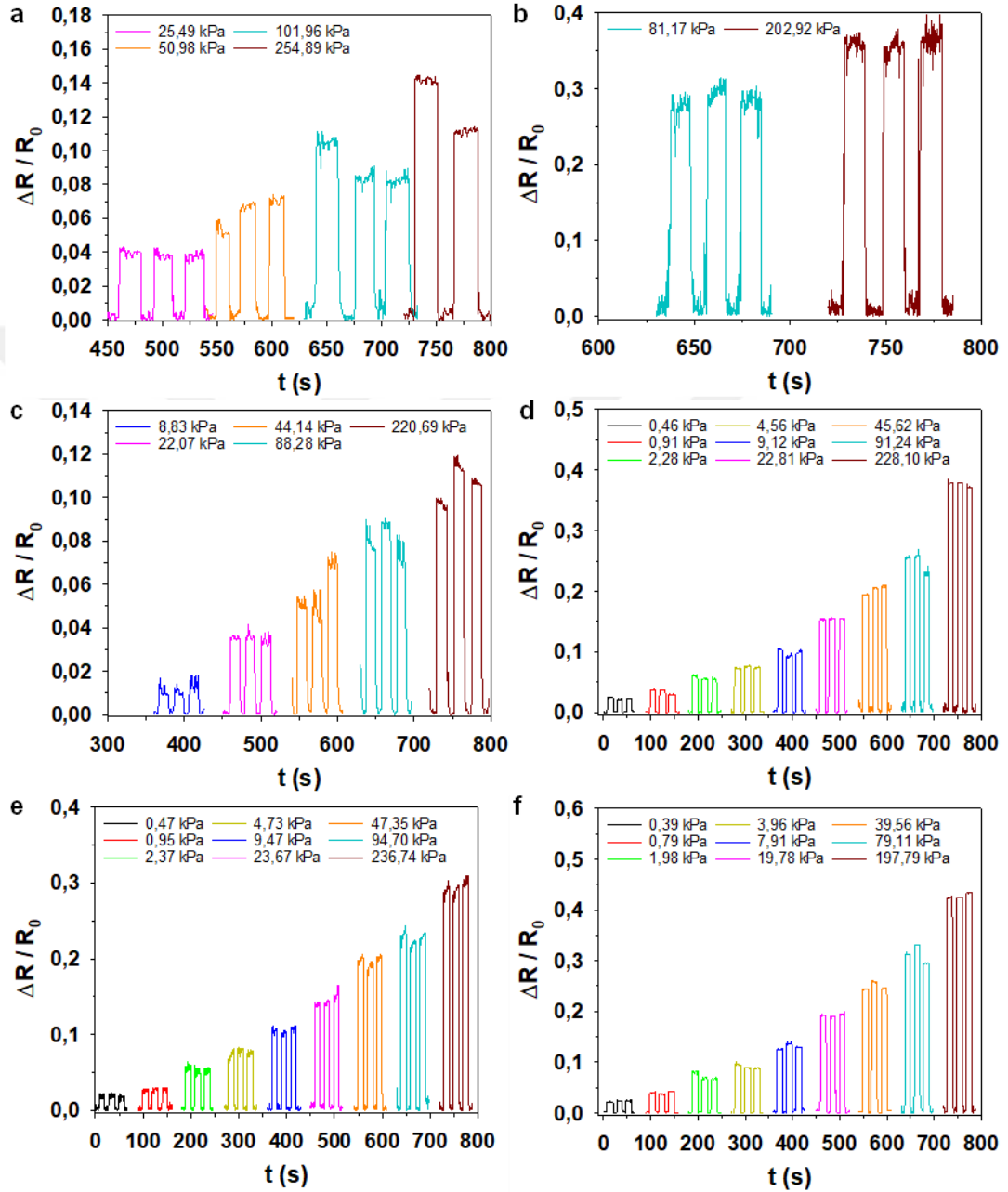
Tablo 5.4'ün devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P20U5M	1,02	0,40±0,05	0,17±0,01
	2,05	0,35±0,01	0,17±0,01
	5,12	0,41±0,10	0,23±0,05
	10,25	0,46±0,10	0,17±0,01
	20,49	0,52±0,01	0,34±0,01
	51,23	0,29±0,05	0,17±0,01
	102,46	0,29±0,05	0,35±0,01
	204,92	0,29±0,01	0,29±0,05
	512,30	0,40±0,01	0,17±0,01
	ORTALAMA	0,38±0,04	0,23±0,02
75P19U5M1C	0,57	0,74±0,04	0,17±0,01
	1,14	0,51±0,09	0,34±0,01
	2,85	0,45±0,10	0,23±0,05
	5,69	0,51±0,09	0,17±0,01
	11,38	0,57±0,10	0,17±0,01
	28,46	0,57±0,06	0,17±0,01
	56,92	0,57±0,10	0,34±0,01
	113,84	0,39±0,10	0,17±0,01
	284,61	0,46±0,05	0,17±0,01
	ORTALAMA	0,53±0,08	0,21±0,02
100P	0,37	0,35±0,01	0,17±0,01
	0,74	0,23±0,05	0,17±0,01
	1,85	0,49±0,08	0,17±0,01
	3,71	0,52±0,09	0,17±0,01
	7,41	0,52±0,10	0,17±0,01
	18,54	0,34±0,01	0,23±0,05
	37,07	0,40±0,06	0,23±0,05
	74,14	0,34±0,01	0,23±0,05
	185,35	0,40±0,10	0,34±0,01
	ORTALAMA	0,40±0,06	0,19±0,02

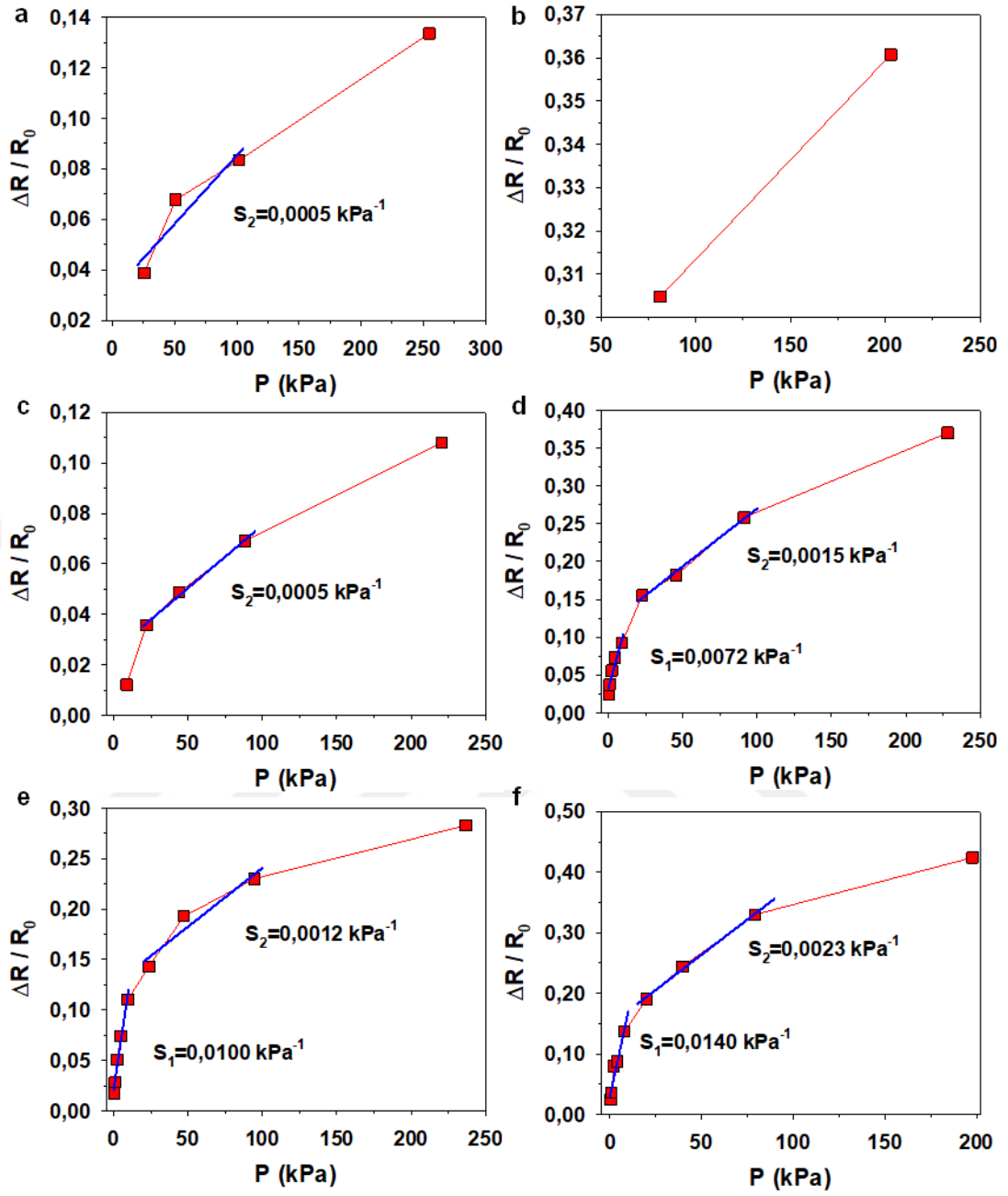
5.2.1.2 Piezorezistif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri

Tez kapsamında üretilen %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere 0,01 N; 0,02 N; 0,05 N; 0,1 N; 0,2 N; 0,5 N; 1 N; 2 N ve 5 N kuvvetlerine karşılık gelen basınç değerleri uygulanarak 10 adet çevrim gerçekleştirildi. 3'er çevrimi içeren zaman göre bağıl direnç değişimi grafikleri ve uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.23-5.29'da yer almaktadır. Uygulanan basınca göre numunenin hassasiyeti Denklem 2.4'e göre hesaplanmış ve hesaplanan hassasiyet

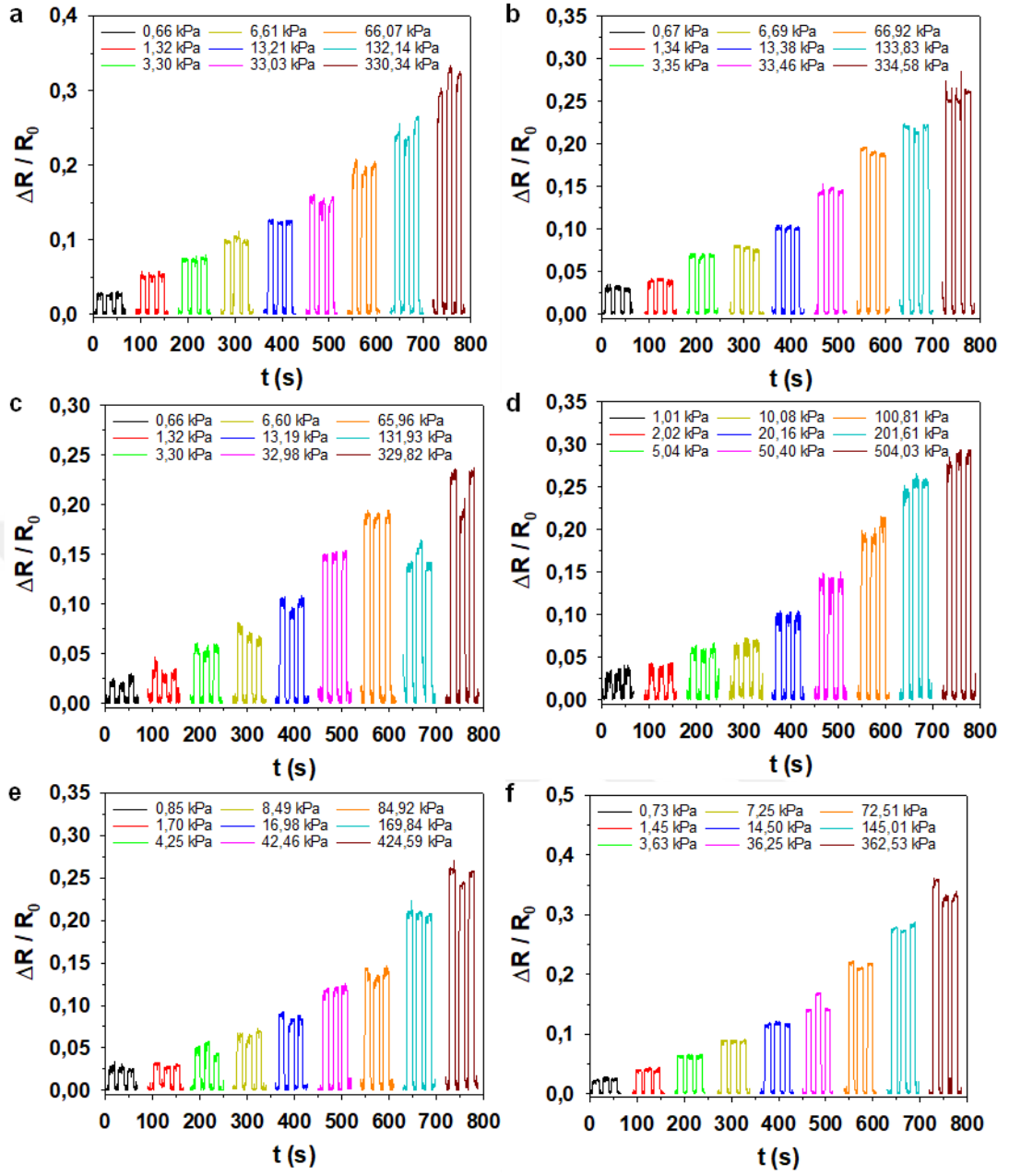
değerleri $P < 10$ kPa ve $10 \text{ kPa} < P < 100$ kPa olmak üzere iki basınç aralığında Tablo 5.5’de verilmektedir. Tablo 5.6’da ise her bir uygulanan basınca göre çevrimlerden elde edilen tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır.



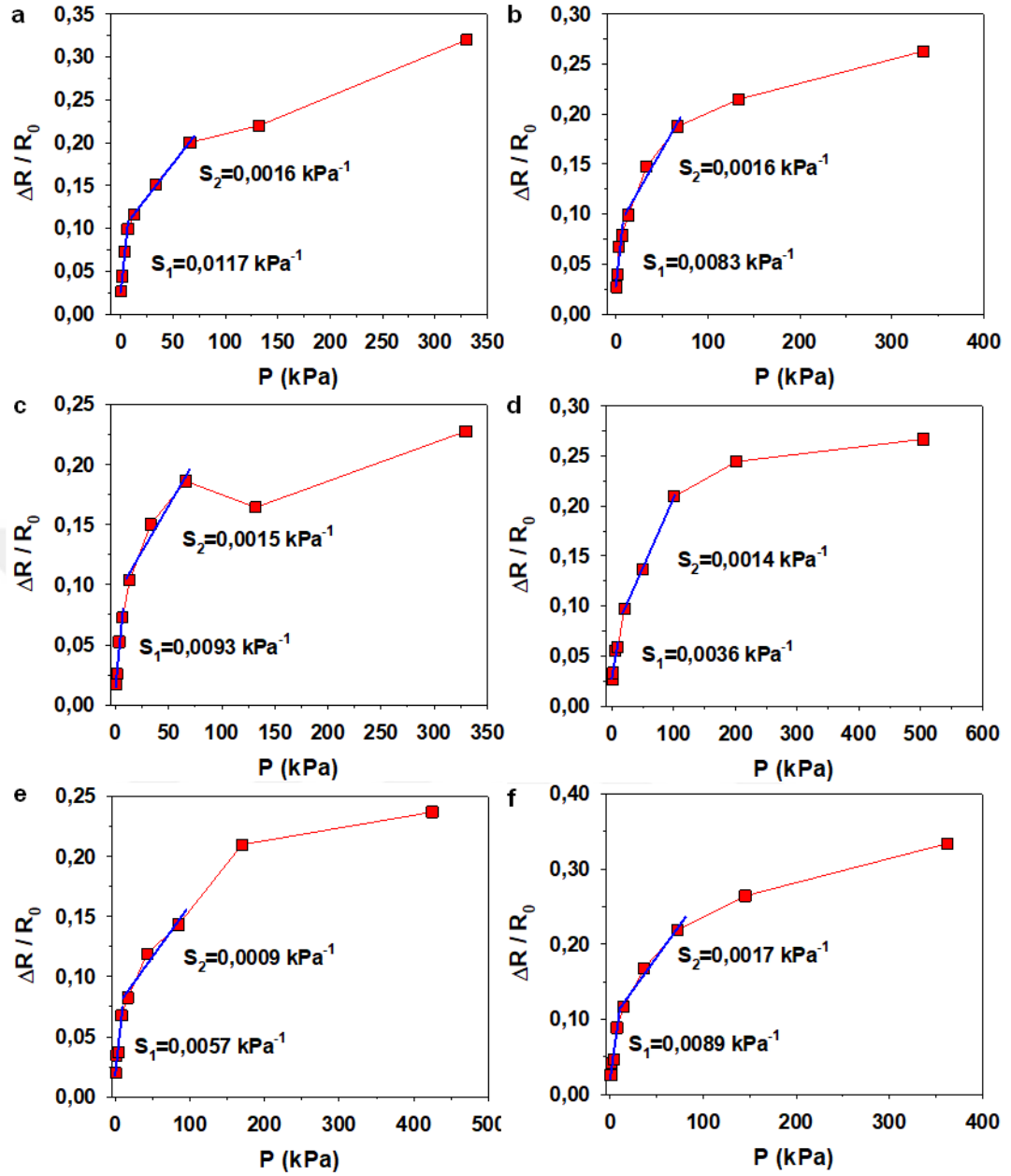
Şekil 5.23 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı



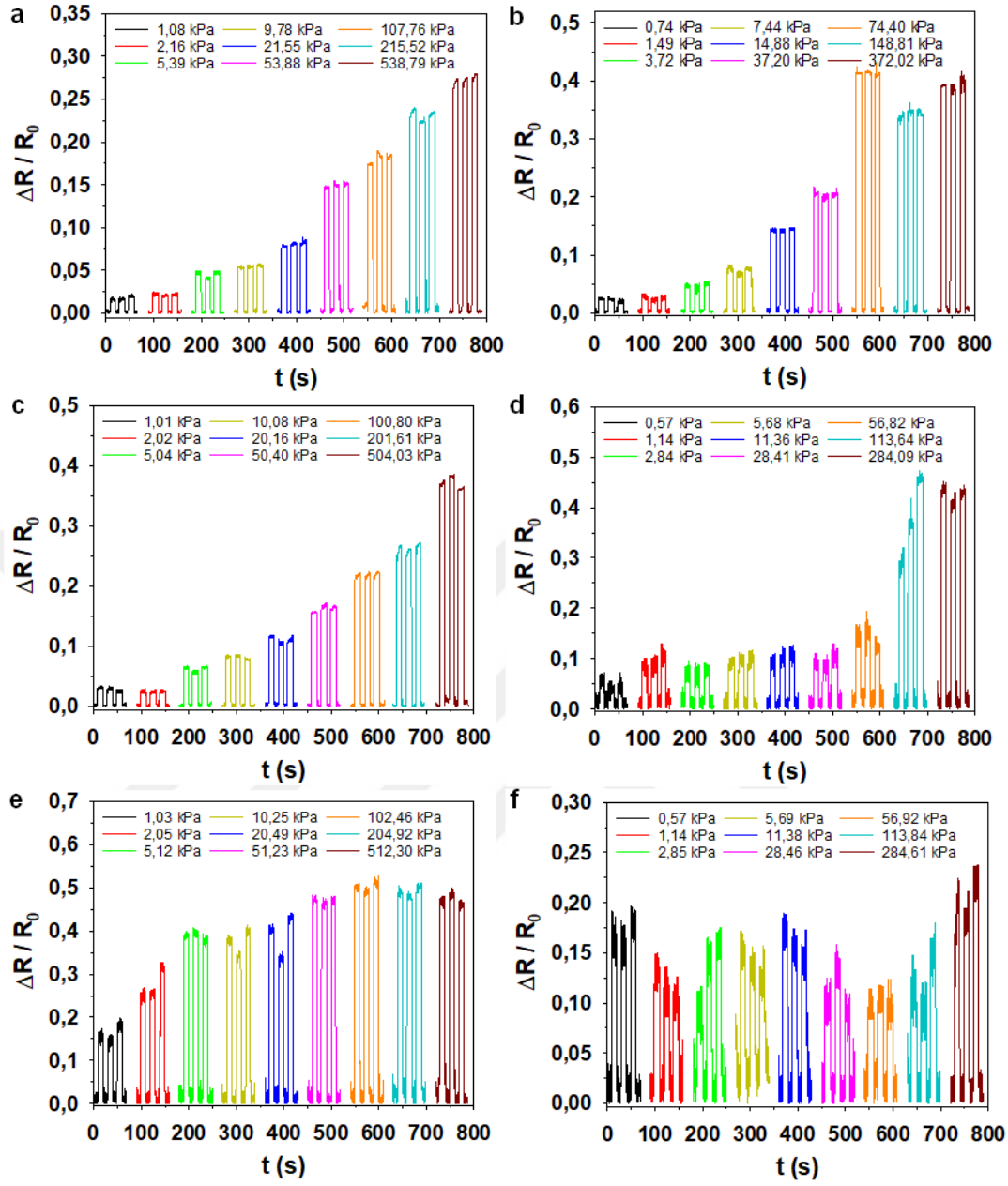
Şekil 5.24 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti



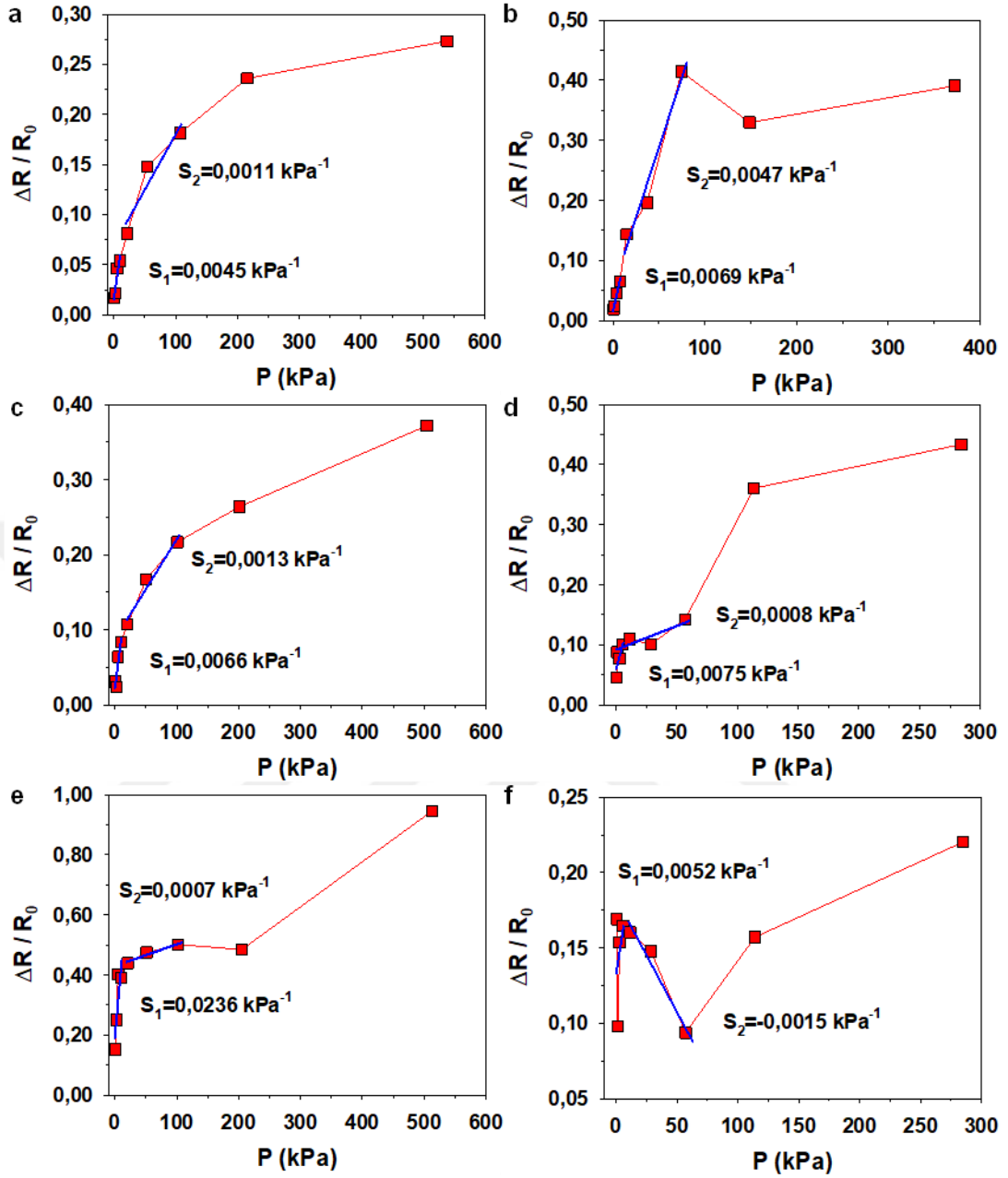
Şekil 5.25 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı



Şekil 5.26 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti



Şekil 5.27 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi kararlılığı



Şekil 5.28 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti

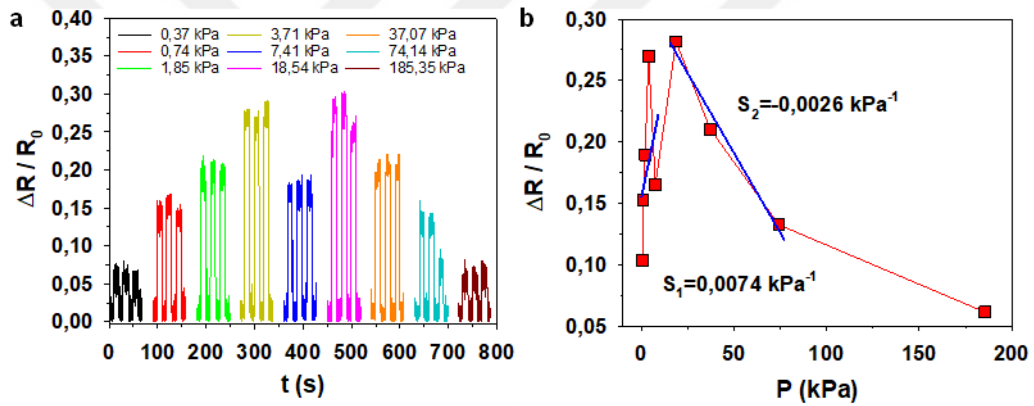
Şekil 5.23’de yer alan %25 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli bağıl direnç değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, uygulanan her basıncı 25P75U, 25P74U1C ve 25P74U1M numunelerin algılamadığı görülmektedir. Diğer numunelerin artan basınç değerlerini algıladığı görülmekte olup, çevrim stabilitesi ve tekrar edilebilirliği görülmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.24’te yer almaktadır. Tablo 5.5’de yer alan $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet ve R^2 değerlerine bakıldığında, bu değerlerin $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesindeki

değerlere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. 10 kPa<P<100 kPa aralığında uygulanan basıncı algılamadığı görülmektedir. Buna karşın 25P73U1M1C, 25P70U5M ve 25P69U5M1C numunelerinin P<10 kPa bölgesinde basıncı algıladığı görülmektedir. Hassasiyet değerleri, sırasıyla, 0,0072 kPa⁻¹, 0,0100 kPa⁻¹ ve 0,0140 kPa⁻¹'dir. R² değerleri de 0,90'ın üstündedir. 25P73U1M1C, 25P70U5M ve 25P69U5M1C numunelerinin Tablo 5.6'da yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, ortalama sürelerin 0,26 s ile 1,55 s aralığında dağılım göstermesine rağmen sürelerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

%50 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli bağıl direnç değişimi kararlılığı grafikleri Şekil 5.25'te görülmektedir. Tüm numunelerinin yüksek basınç altındaki çevrimlerinde kararlılığın azaldığı görülmekte iken, düşük basınç altındaki çevrimlerde yüksek kararlılık olduğu belirlenmiştir. Fakat, 50P49U1M numunesinin uygulanan basınç değerlerinde tekrar edilebilirliğin olmadığı gözlenmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.26'da yer almaktadır. Tablo 5.5'de yer alan 10 kPa<P<100 kPa bölgesindeki hassasiyet değerlerine bakıldığında, 0,009 ile 0,0017 kPa⁻¹ aralığında olduğu görülmektedir. Bu değer aralığının, sensör performansının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. P<10 kPa bölgesindeki hassasiyet değerleri incelendiğinde, tüm numuneler içerisinde 50P50U numunesinin hassasiyet değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Hassasiyeti 0,0117 kPa⁻¹, R² değeri ise 0,9494'dür. Tablo 5.6'da yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, %25 oranında parilen C içeren numunelere göre daha hızlı tepkiye sahip olduğu görülmektedir. Yüzdece ağırlık olarak parilen C'nin %25'den %50'ye artması ve PU'nun %75'den %50'ye azalması ile tepki ve gevşeme süreleri azalarak, basınca karşı tepkisi hızlanmıştır.

Şekil 5.27'de yer alan %75 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli gerilim değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, 75P25U, 75P24U1C ve 75P24U1M numunelerin çevrim kararlılığının olduğu görülmektedir. Diğer numunelerde ise çevrim kararlılığının olmadığı görülmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.28'de yer almaktadır. Tablo 5.5'de yer alan 10 kPa<P<100 kPa bölgesindeki hassasiyet değerlerine bakıldığında, 0,007 kPa⁻¹ ile 0,0047 kPa⁻¹ aralığında olduğu için basınç algılamada düşük performans göstermektedir. P<10 kPa bölgesindeki değerlere

bakıldığında 75P25U, 75P24U1C ve 75P24U1M numunelerin çevrim kararlılığına sahip olmasına rağmen hassasiyetleri sırasıyla $0,0045 \text{ kPa}^{-1}$, $0,0069 \text{ kPa}^{-1}$ ve $0,0066 \text{ kPa}^{-1}$ 'dır. R^2 değerleri de 0,90'ın üstündedir. Bu numunelerin düşük hassasiyet değerlerine sahip olması sebebiyle, basıncı algılama performansı düşüktür. 75P20U5M numunesinin hassasiyet ve R^2 değeri, $0,0236 \text{ kPa}^{-1}$ ve 0,6699'dur. Hassasiyet değerinin yüksek olmasına karşın, Şekil 5.28(e)'deki bağıl direnç değişim kararlılığı grafiğindeki çevrimin tekrar edilebilirliğinin olmaması ve R^2 değerinin düşük olması basıncı algılamada iyi bir performans gösteremediği anlamına gelmektedir. Tablo 5.6'da yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, ortalama sürelerin 0,19 s ile 0,50 s aralığında olduğu hesaplanmıştır. Bu sürelerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.29 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti

%100 oranında parilen C içeren numunenin artan basınç değerlerine göre direnç değişimi kararlılığı Şekil 5.29(a)'da verilmiştir. Şekil 5.29(b)'de uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti görülmekte olup, Tablo 5.5'e bakıldığında $P < 10 \text{ kPa}$ ve $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyetleri $0,0074 \text{ kPa}^{-1}$ ve $-0,0026 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir. $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesinde 3,71 kPa basıncına kadar bağıl direnç değişimi lineer olarak artarken, daha yüksek basınç değerlerinde bağıl direnç değişiminin azaldığı görülmektedir. Bu durum, negatif hassasiyet görülmesine neden olmuştur. Uygulanan basınca göre tepki süresi 0,37 s ve gevşeme süresi 0,36 s olup, hata payı aralığında aynı tepki süreleri vermiştir (Tablo 5.6)

%25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere ait uygulanan farklı basınç değerlerindeki karakteristik özellikleri Şekil 5.23-5.29 ve Tablo 5.5-5.6’da verilmiştir. Elektromekanik ölçümlerden elde edilen bağıl direnç değişimi, hassasiyet, çevrimlerdeki kararlılığı, tepki süreleri, R^2 değerlerinin yanı sıra yapısal, morfolojik, kimyasal ve termal özelliklerinin incelenmesi sonucunda 25P69U5M1C, 50P50U ve 75P20U5M numuneleri potansiyel esnek piezorezistif basınç sensörü adaylarıdır.

Tablo 5.5 Piezorezistif sensörlerin uygulanan basınç aralığında hassasiyet değerleri

Numune Adı	P<10 kPa		10 kPa<P<100 kPa	
	S (kPa ⁻¹)	R ²	S (kPa ⁻¹)	R ²
25P75U	-	-	0,0005	0,8744
25P74U1C	-	-	-	-
25P74U1M	-	-	0,0005	0,9955
25P73U1M1C	0,0072	0,9123	0,0015	0,9930
25P70U5M	0,0100	0,9707	0,0012	0,9268
25P69U5M1C	0,0140	0,9196	0,0023	0,9965
50P50U	0,0117	0,9494	0,0016	0,9973
50P49U1C	0,0083	0,8813	0,0016	0,9608
50P49U1M	0,0093	0,9611	0,0015	0,9528
50P48U1M1C	0,0036	0,8069	0,0014	0,9994
50P45U5M	0,0057	0,9328	0,0009	0,9345
50P44U5M1C	0,0089	0,8924	0,0017	0,9612
75P25U	0,0045	0,9509	0,0011	0,8971
75P24U1C	0,0069	0,9752	0,0047	0,9628
75P24U1M	0,0066	0,9077	0,0013	0,9632
75P23U1M1C	0,0075	0,5504	0,0008	0,6853
75P20U5M	0,0236	0,6699	0,0007	0,9472
75P19U5M1C	0,0052	0,1330	-0,0015	0,9597
100P	0,0074	0,1226	0,0026	0,9729

Tablo 5.6 Piezorezistif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P75U	0,51	-	-
	1,02	-	-
	2,55	-	-
	5,10	-	-
	10,20	-	-
	25,49	0,92±0,11	1,09±0,50
	50,98	0,67±0,04	0,50±0,07
	101,96	0,79±0,10	1,29±0,11
	254,89	0,71±0,22	0,33±0,08
	ORTALAMA	0,77±0,12	0,80±0,19
25P74U1C	0,41	-	-
	0,81	-	-
	2,03	-	-
	4,06	-	-
	8,12	-	-
	20,29	-	-
	40,58	-	-
	81,17	0,89±0,29	0,44±0,19
	202,92	1,22±0,40	0,33±0,16
	ORTALAMA	1,06±0,35	0,39±0,18
25P74U1M	0,44	-	-
	0,88	-	-
	2,21	-	-
	4,41	-	-
	8,82	0,55±0,14	1,34±0,17
	22,07	0,56±0,06	1,56±0,20
	44,14	0,78±0,20	1,96±0,14
	88,28	0,44±0,06	1,67±0,01
	220,69	0,50±0,01	1,23±0,20
	ORTALAMA	0,58±0,09	1,55±0,14
25P73U1M1C	0,46	0,61±0,05	0,73±0,24
	0,91	1,00±0,10	0,38±0,05
	2,28	0,83±0,25	0,50±0,01
	4,56	0,61±0,14	0,27±0,05
	9,12	0,72±0,24	0,39±0,14
	22,81	1,05±0,31	0,22±0,05
	45,62	0,44±0,14	0,50±0,19
	91,24	0,55±0,05	0,55±0,20
	228,10	0,22±0,05	0,78±0,11
	ORTALAMA	0,67±0,15	0,49±0,12

Tablo 5.6'nın devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P70U5M	0,47	-	-
	0,95	-	-
	2,37	0,33±0,09	0,22±0,05
	4,74	0,33±0,01	0,22±0,05
	9,47	0,33±0,01	0,33±0,01
	23,67	0,22±0,05	0,33±0,01
	47,35	0,33±0,01	0,22±0,05
	94,70	0,44±0,10	0,22±0,05
	236,74	0,50±0,09	0,28±0,10
	ORTALAMA	0,35±0,05	0,26±0,05
25P69U5M1C	0,40	0,45±0,05	0,84±0,44
	0,79	0,55±0,50	0,22±0,05
	1,98	0,73±0,15	0,17±0,01
	3,96	1,28±0,28	0,16±0,01
	7,91	0,50±0,09	0,22±0,05
	19,78	1,50±0,50	0,95±0,20
	39,56	0,72±0,14	0,27±0,11
	79,11	0,89±0,14	1,39±0,43
	197,78	0,61±0,11	0,61±0,19
	ORTALAMA	0,81±0,22	0,54±0,17
50P50U	0,66	-	-
	1,32	0,33±0,01	0,44±0,05
	3,30	0,39±0,05	0,50±0,01
	6,61	0,67±0,09	0,39±0,05
	13,21	0,55±0,05	0,39±0,05
	33,03	0,28±0,05	0,28±0,05
	66,07	0,44±0,10	0,22±0,05
	132,14	0,22±0,05	0,33±0,09
	330,34	0,28±0,05	0,22±0,05
	ORTALAMA	0,40±0,06	0,35±0,05
50P49U1C	0,67	0,27±0,05	0,39±0,05
	1,34	0,22±0,05	0,39±0,05
	3,35	0,50±0,01	0,33±0,09
	6,69	0,33±0,09	0,33±0,01
	13,38	0,27±0,05	0,44±0,05
	33,46	0,50±0,09	0,56±0,05
	66,92	0,49±0,09	0,55±0,05
	133,83	0,44±0,11	0,27±0,05
	334,58	0,39±0,05	0,66±0,01
	ORTALAMA	0,38±0,05	0,44±0,05

Tablo 5.6'nın devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
50P49U1M	0,66	-	-
	1,32	-	-
	3,30	0,39±0,10	0,22±0,05
	6,60	0,22±0,05	0,33±0,09
	13,19	0,33±0,09	0,33±0,01
	32,98	0,49±0,10	0,27±0,05
	65,96	0,33±0,01	0,22±0,05
	131,93	0,27±0,05	0,99±0,40
	329,82	0,43±0,05	0,51±0,10
	ORTALAMA	0,35±0,06	0,41±0,09
50P48U1M1C	1,01	-	-
	2,02	-	-
	5,04	0,28±0,05	0,50±0,01
	10,08	0,28±0,05	0,28±0,05
	20,16	0,33±0,09	0,39±0,05
	50,40	0,28±0,05	0,39±0,05
	100,81	0,39±0,05	0,55±0,05
	201,61	0,33±0,09	0,72±0,05
	504,03	0,72±0,05	0,55±0,05
	ORTALAMA	0,37±0,06	0,48±0,05
50P45U5M	0,85	0,22±0,05	0,50±0,09
	1,70	0,33±0,09	0,39±0,11
	4,25	0,33±0,01	0,33±0,09
	8,49	0,28±0,05	0,33±0,09
	16,99	0,28±0,05	0,39±0,11
	42,46	0,56±0,15	0,17±0,01
	84,92	0,49±0,01	0,39±0,05
	169,84	0,49±0,10	0,49±0,09
	424,59	0,77±0,10	0,56±0,05
	ORTALAMA	0,41±0,07	0,39±0,08
50P44U5M1C	0,73	0,17±0,01	0,39±0,05
	1,45	0,23±0,05	0,50±0,09
	3,63	0,61±0,30	0,61±0,05
	7,25	0,22±0,05	0,39±0,05
	14,50	0,44±0,10	0,72±0,10
	36,25	0,33±0,01	0,44±0,05
	72,51	0,39±0,05	0,55±0,10
	145,01	0,16±0,01	0,39±0,01
	362,53	0,38±0,10	0,33±0,01
	ORTALAMA	0,33±0,08	0,48±0,06

Tablo 5.6'nın devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P25U	1,08	0,28±0,05	0,16±0,01
	2,16	0,44±0,11	0,27±0,11
	5,39	0,38±0,05	0,33±0,09
	9,78	0,38±0,05	0,27±0,05
	21,55	0,38±0,05	0,22±0,05
	53,88	0,27±0,05	0,39±0,10
	107,76	0,44±0,05	0,27±0,05
	215,52	0,49±0,01	0,22±0,05
	538,79	0,61±0,11	0,22±0,05
	ORTALAMA	0,41±0,06	0,26±0,06
75P24U1C	0,74	0,27±0,11	0,22±0,05
	1,49	0,27±0,11	0,33±0,09
	3,72	0,27±0,19	0,22±0,05
	7,44	0,44±0,05	0,56±0,05
	14,88	0,39±0,05	0,28±0,11
	37,20	0,39±0,05	0,39±0,05
	74,40	0,33±0,09	0,33±0,01
	148,81	0,33±0,09	0,33±0,01
	372,02	0,44±0,10	0,27±0,05
	ORTALAMA	0,35±0,09	0,33±0,05
75P24U1M	1,01	0,33±0,09	0,16±0,01
	2,02	0,44±0,05	0,22±0,05
	5,04	0,39±0,05	0,22±0,05
	10,08	0,22±0,05	0,22±0,05
	20,16	0,28±0,05	0,17±0,01
	50,40	0,28±0,05	0,17±0,01
	100,81	0,39±0,05	0,22±0,05
	201,61	0,39±0,11	0,17±0,01
	504,03	0,33±0,09	0,16±0,01
	ORTALAMA	0,34±0,07	0,19±0,03
75P23U1M1C	0,57	-	-
	1,14	-	-
	2,84	0,33±0,01	0,17±0,01
	5,68	0,50±0,09	0,17±0,01
	11,36	0,33±0,16	0,22±0,05
	28,41	0,28±0,05	0,39±0,10
	56,82	0,22±0,05	0,17±0,01
	113,64	0,36±0,07	0,22±0,05
	284,09	0,33±0,09	0,33±0,09
	ORTALAMA	0,34±0,07	0,24±0,05

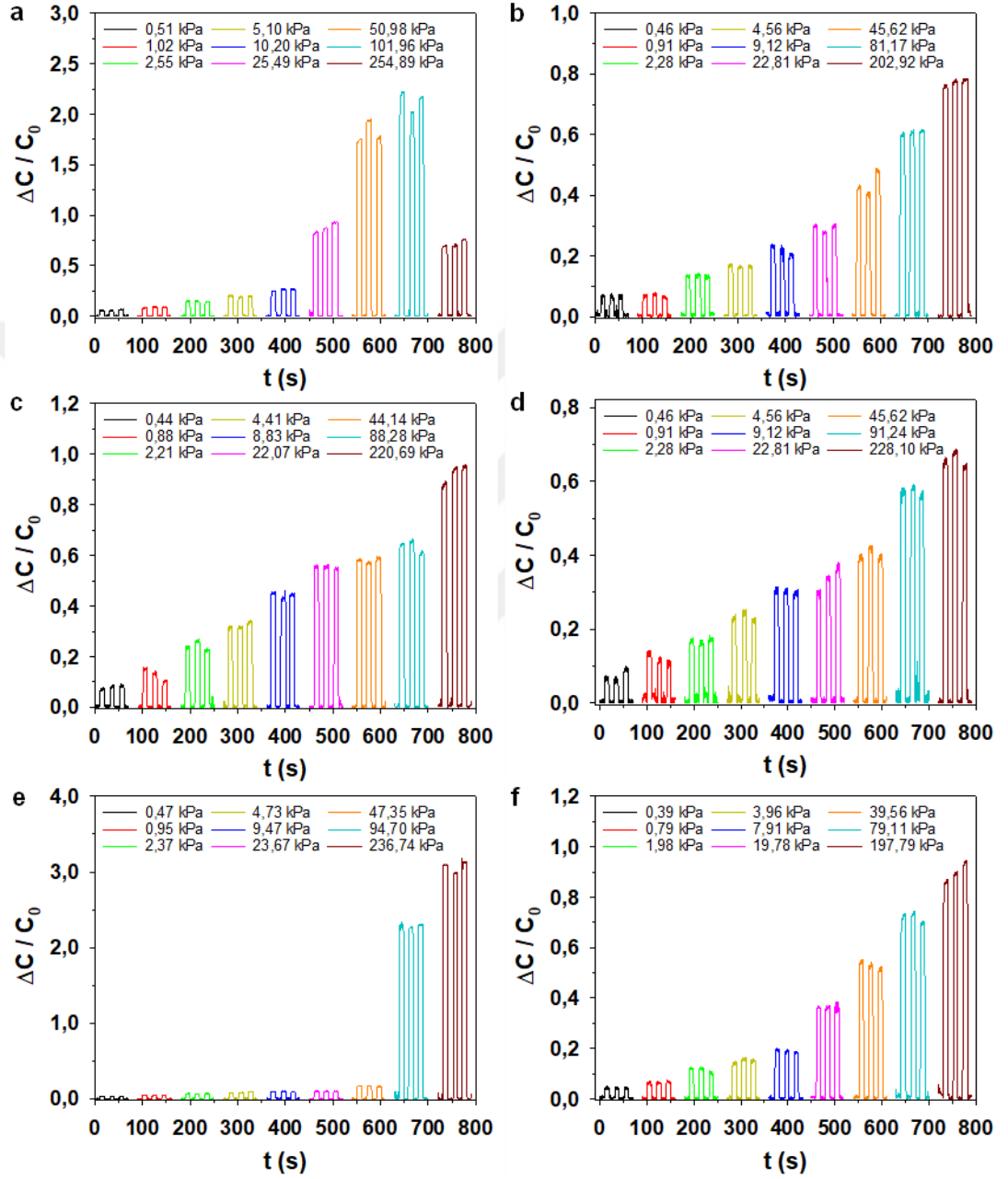
Tablo 5.6'nın devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P20U5M	1,02	0,56±0,05	0,45±0,10
	2,05	0,33±0,09	0,22±0,05
	5,12	0,49±0,10	0,72±0,20
	10,25	0,17±0,01	0,56±0,10
	20,49	0,49±0,09	0,33±0,10
	51,23	0,39±0,05	0,72±0,10
	102,46	0,56±0,05	0,33±0,09
	204,92	0,28±0,05	0,49±0,01
	512,30	0,39±0,05	0,61±0,10
	ORTALAMA	0,42±0,06	0,50±0,09
75P19U5M1C	0,57	0,28±0,05	0,39±0,10
	1,14	0,22±0,05	0,39±0,10
	2,85	0,22±0,05	0,39±0,05
	5,69	0,22±0,05	0,44±0,10
	11,38	0,16±0,01	0,50±0,09
	28,46	0,33±0,09	0,33±0,09
	56,92	0,39±0,05	0,33±0,09
	113,84	0,17±0,01	0,50±0,10
	284,61	0,22±0,05	0,50±0,01
	ORTALAMA	0,27±0,05	0,42±0,08
100P	0,37	-	-
	0,74	-	-
	1,85	0,66±0,10	0,39±0,10
	3,71	0,41±0,04	0,39±0,05
	7,41	0,40±0,10	0,28±0,05
	18,54	0,33±0,10	0,44±0,05
	37,07	0,33±0,09	0,33±0,01
	71,14	0,27±0,05	0,27±0,10
	185,35	0,22±0,05	0,49±0,01
	ORTALAMA	0,37±0,08	0,36±0,05

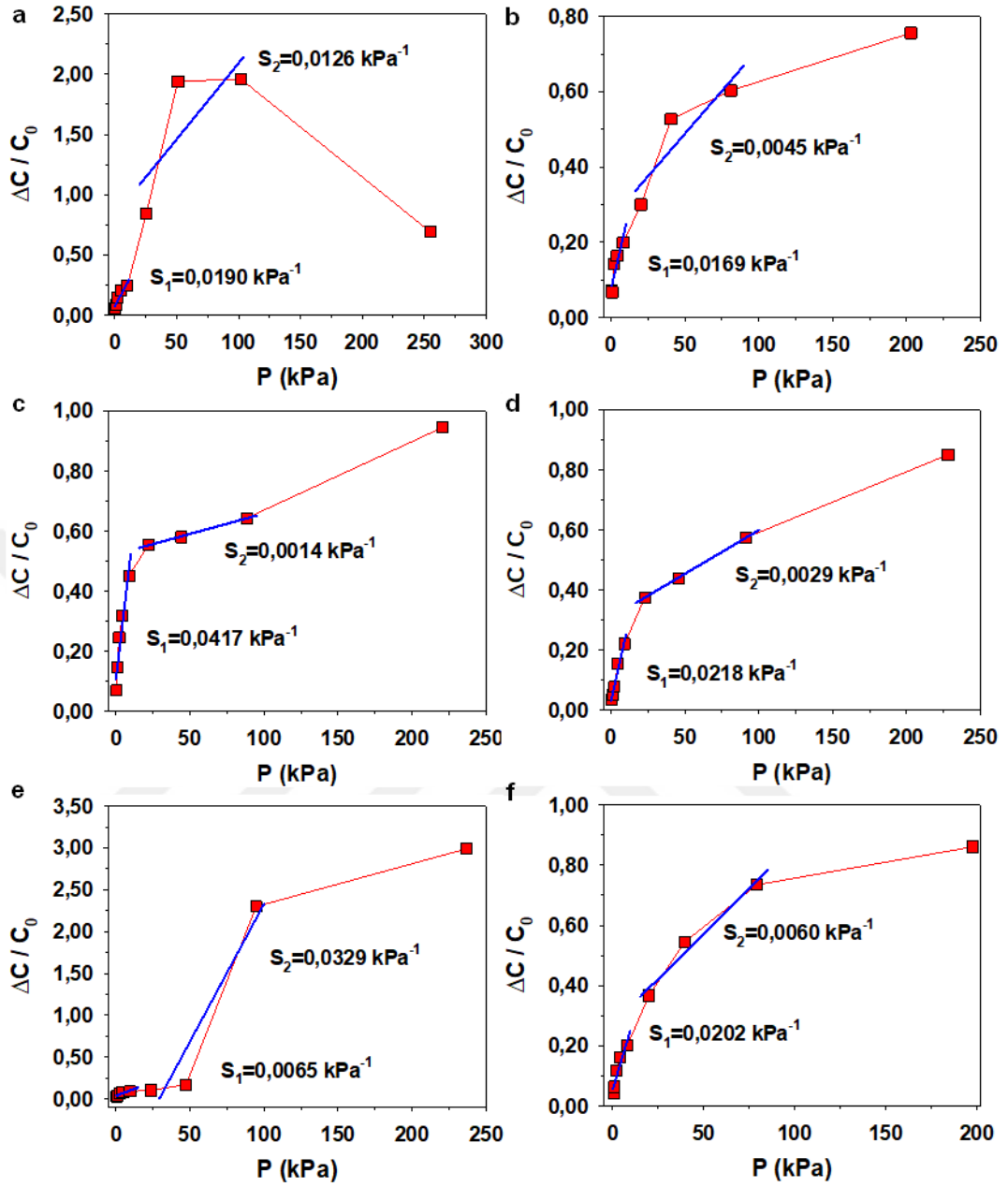
5.2.1.3 Kapasitif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri

Üretilen %25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere 0,01 N; 0,02 N; 0,05 N; 0,1 N; 0,2 N; 0,5 N; 1 N; 2 N ve 5 N kuvvetlerine karşılık gelen basınç değerleri uygulanarak 10 adet çevrim gerçekleştirildi. 3'er çevrimi içeren zaman göre bağıl kapasitans değişimi grafikleri ve uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.30-5.36'da yer almaktadır. Uygulanan basınca göre numunenin hassasiyeti Denklem 2.4'e göre hesaplanmış ve hesaplanan hassasiyet değerleri $P < 10$ kPa ve 10

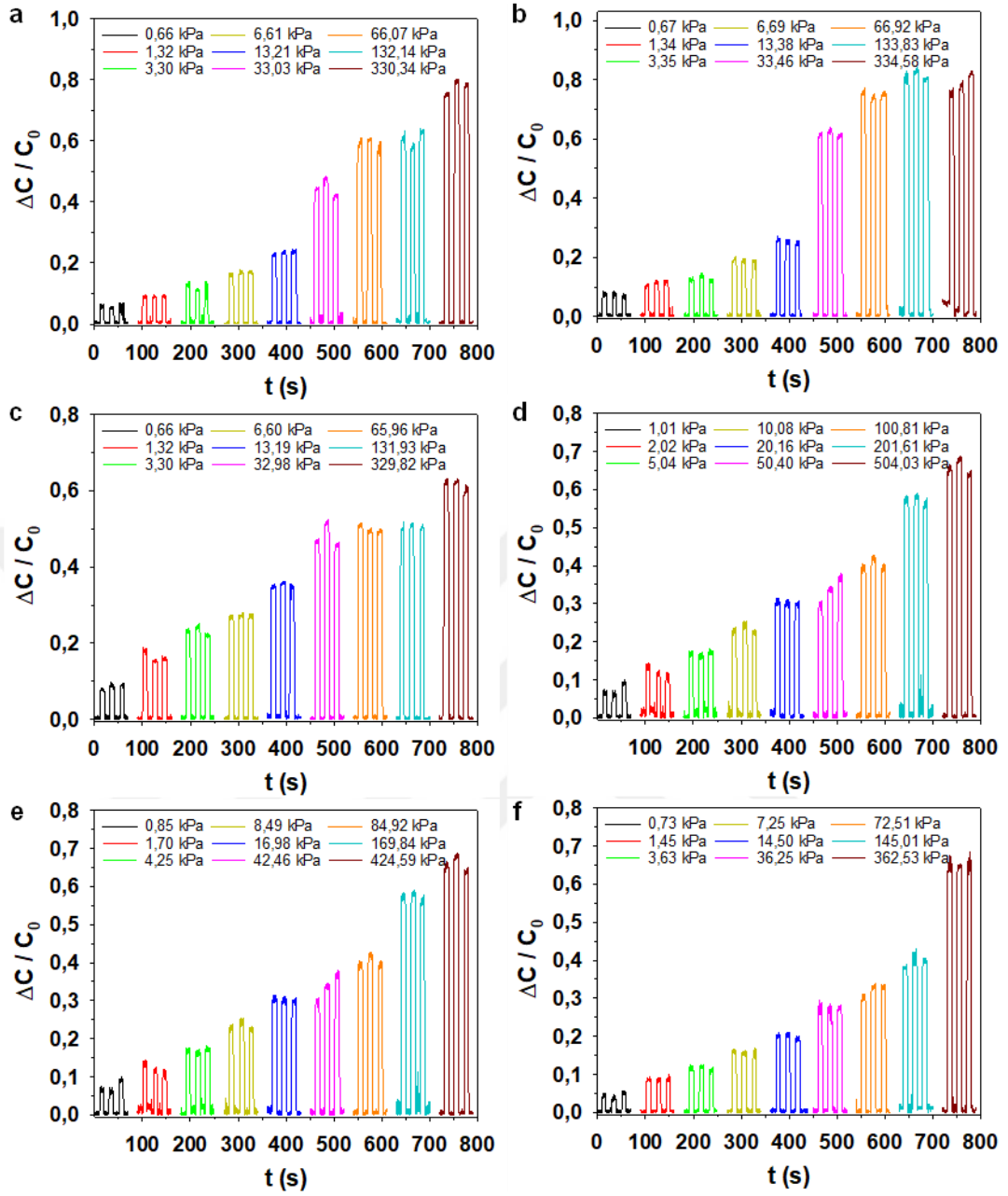
kPa<P<100 kPa olmak üzere iki basınç aralığında Tablo 5.7’de verilmektedir. Tablo 5.8’de ise her bir uygulanan basınca göre çevrimlerden elde edilen tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır.



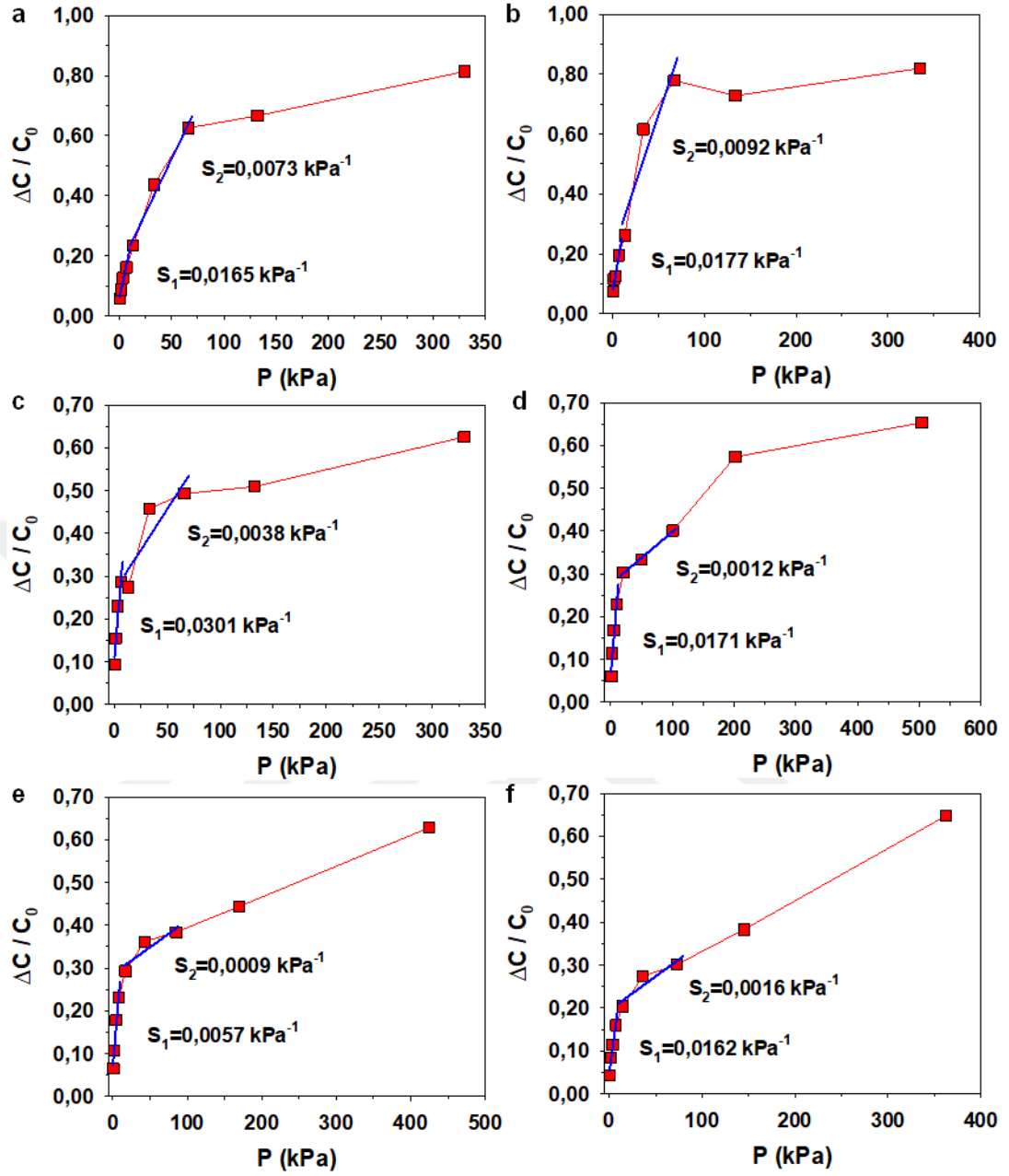
Şekil 5.30 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı



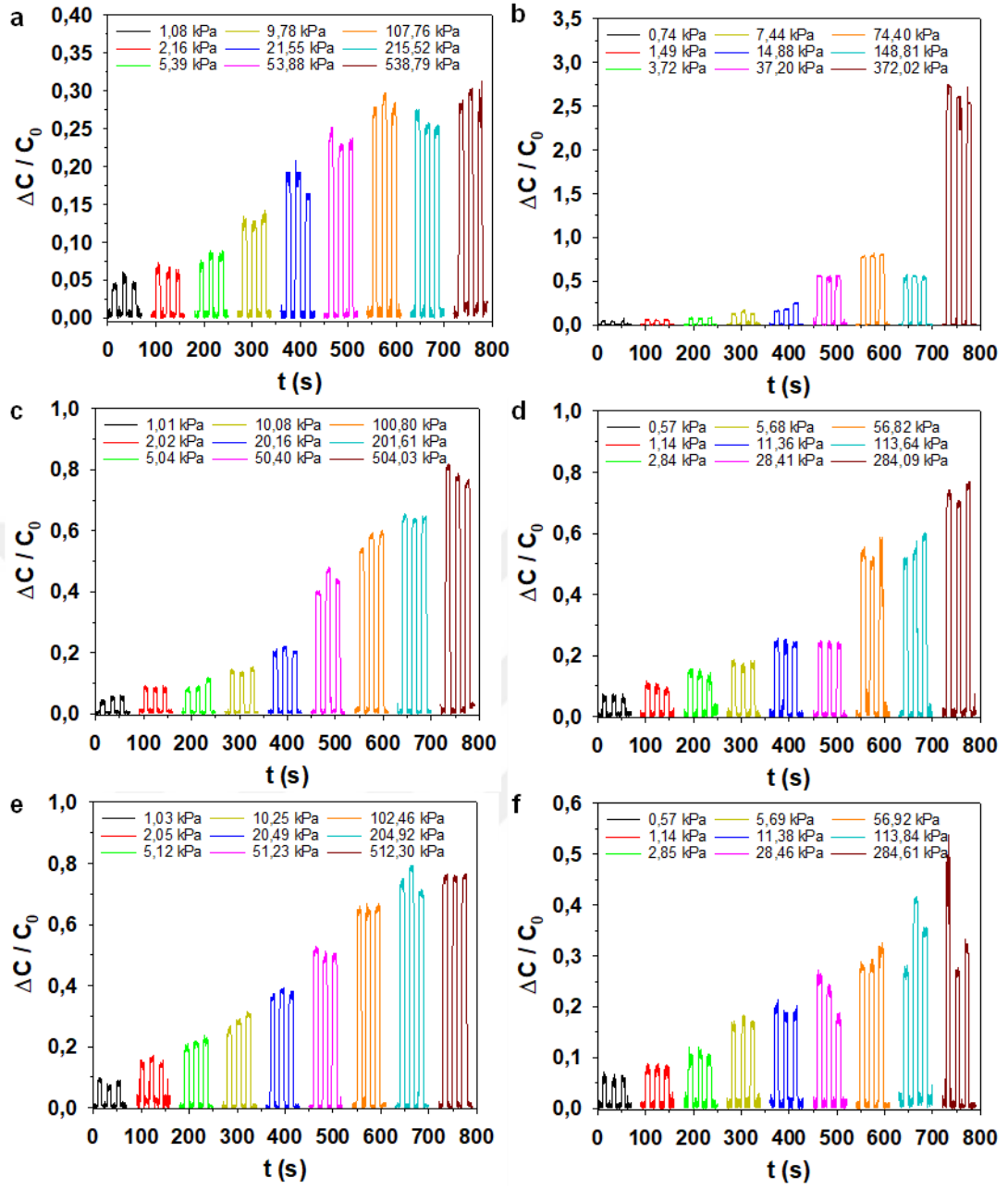
Şekil 5.31 (a) 25P75U, (b) 25P74U1C, (c) 25P74U1M, (d) 25P73U1M1C, (e) 25P70U5M ve (f) 25P69U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti



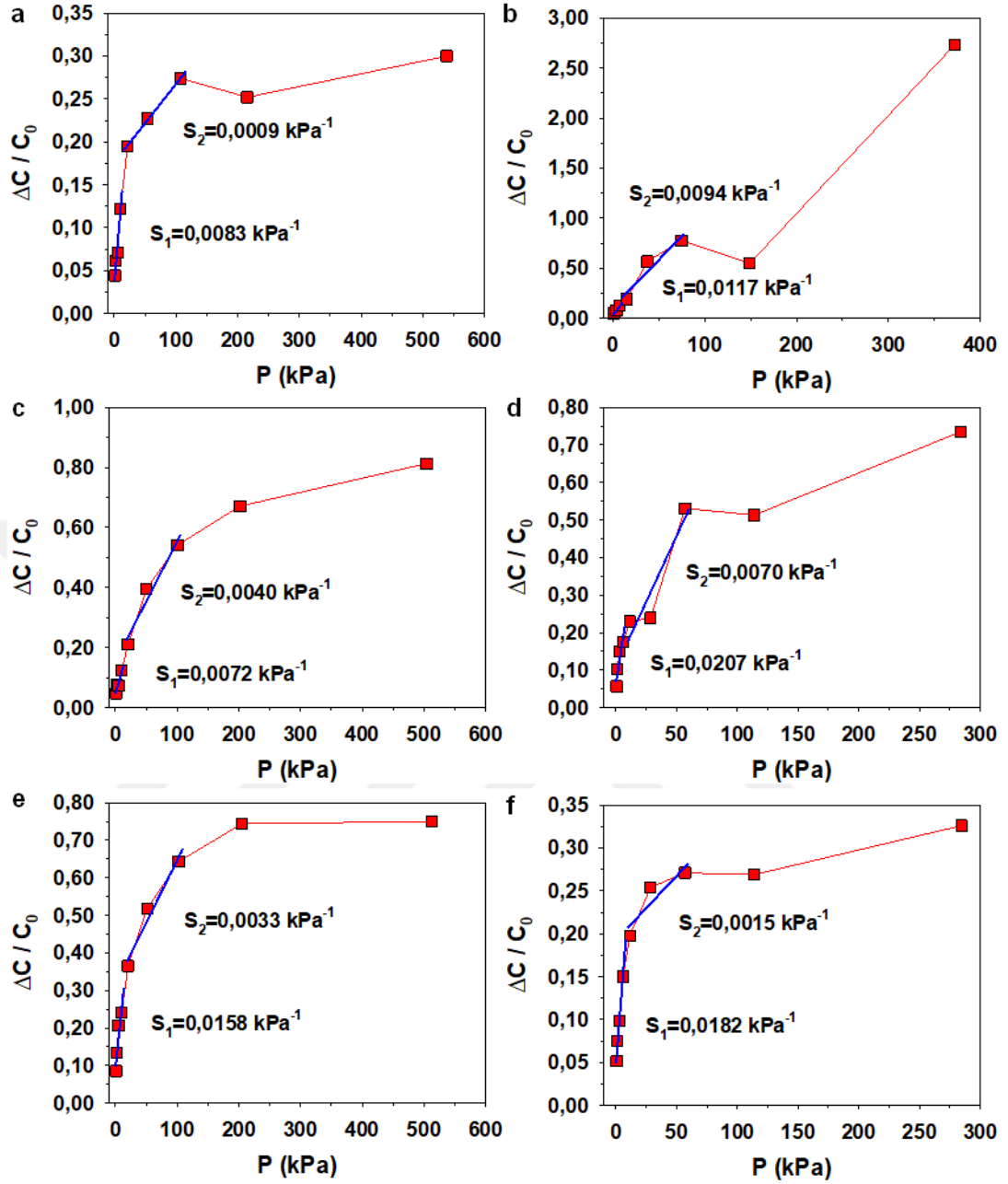
Şekil 5.32 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı



Şekil 5.33 (a) 50P50U, (b) 50P49U1C, (c) 50P49U1M, (d) 50P48U1M1C, (e) 50P45U5M ve (f) 50P44U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti



Şekil 5.34 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı



Şekil 5.35 (a) 75P25U, (b) 75P24U1C, (c) 75P24U1M, (d) 75P23U1M1C, (e) 75P20U5M ve (f) 75P19U5M1C numunelerinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti

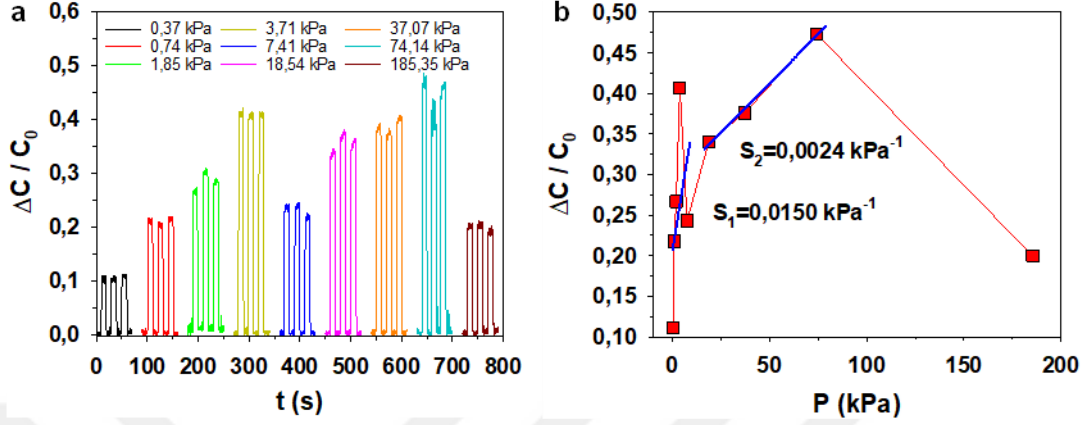
Şekil 5.30’da yer alan %25 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli bağıl kapasitans değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, Şekil 5.30(a) ve Şekil 5.30(e)’de yer alan 25P75U ve 25P70U5M numunelerde uygulanan basınca göre ani bağıl kapasitans değişimi olduğu görülmektedir. Diğer numunelerde ise uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimindeki artış, lineer şekilde davranış sergilemektedir. Bu grafiklerde çevrim stabilitesi ve tekrar edilebilirliği gözlenmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.31’de yer

almaktadır. $P < 10$ kPa bölgesindeki hassasiyet değerleri önceki piezoelektrik ve piezorezistif basınç sensörlerine göre oldukça yüksektir (Tablo 5.7). %25 oranında parilen C içeren numuneler içerisinde 25P74U1M numunesi $0,0417 \text{ kPa}^{-1}$ ile en yüksek hassasiyet değerine ve $0,9247$ ile R^2 değerine sahiptir. $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyet ve R^2 değerlerine bakıldığında, 25P75U ve 25P70U5M numunelerinin hassasiyet değerleri $0,0126 \text{ kPa}^{-1}$ ve $0,0329 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir. R^2 değerleri de $0,5868$ ve $0,9096$ 'dır. Tablo 5.8'de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, $0,38 \text{ s}$ ile $0,78 \text{ s}$ aralığında basınca tepki vermektedir.

%50 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli bağıl kapasitans değişimi kararlılığı grafikleri Şekil 5.32'de görülmektedir. Bu grafiklerde çevrim stabilitesi ve tekrar edilebilirliği gözlenmektedir. Şekil 5.33'de yer alan uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri incelendiğinde, $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgede hassasiyet değerleri düşük olduğu için basıncı algılamadığı görülmektedir. $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesinde ise 50P45U5M numunesi en düşük hassasiyet değerine sahiptir. 50P50U, 50P49U1C, 50P48U1M1C ve 50P44U5M1C numunelerin hassasiyet değerleri yakın değerler olup, $0,0162 \text{ kPa}^{-1}$ ile $0,0177 \text{ kPa}^{-1}$ aralığındadır (Tablo 5.7). En yüksek hassasiyet değeri ise $0,0301 \text{ kPa}^{-1}$ ile 50P49U1M numunesine aittir. Tablo 5.8'de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, $0,43 \text{ s}$ ile $0,81 \text{ s}$ aralığında basınca tepki vermektedir. %25 oranında parilen C içeren numunelerin basınca algılama süreleri ile hemen hemen aynıdır.

Şekil 5.34'de yer alan %75 oranında parilen C içeren numunelerin 3 çevrimli gerilim değişimi kararlılığı grafikleri incelendiğinde, yüksek basınç değerlerine kadar uygulanan basıncı algıladığı ve bağıl kapasitans değişiminde bir artış olduğu görülmektedir. Uygulanan basınca karşı hassasiyet grafikleri Şekil 5.35'de yer almaktadır. Tablo 5.7'de yer alan hassasiyet değerleri incelendiğinde, $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesinde düşük hassasiyete sahip olduğu görülmektedir. $P < 10 \text{ kPa}$ bölgesinde ise en düşük hassasiyet $0,0072 \text{ kPa}^{-1}$ ile 75P24U1M iken, en yüksek hassasiyet $0,207 \text{ kPa}^{-1}$ ile 75P23U1M1C'dir. R^2 değerleri de $0,8832$ ve $0,8400$ 'dür. En yüksek R^2 değerleri de $0,9896$ ile 75P24U1C ve $0,9840$ ile 75P19U5M1C numunelerine aittir. Tablo 5.8'de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, $0,34 \text{ s}$ ile $0,77 \text{ s}$

aralığında basınca tepki vermektedir. %25 ve %50 oranında parilen C içeren numunelerin basınca algılama süreleri ile yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 5.36 100P numunesinin (a) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı ve (b) uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti

%100 oranında parilen C içeren numunenin artan basınç değerlerine göre gerilim değişimi kararlılığı Şekil 5.36(a)'da verilmiştir. Şekil 5.36(b)'de uygulanan basınca göre gerilim değişimi ve hassasiyeti görülmekte olup, $P < 10 \text{ kPa}$ ve $10 \text{ kPa} < P < 100 \text{ kPa}$ bölgesindeki hassasiyetleri 0.0150 kPa^{-1} ve 0.0024 kPa^{-1} 'dir. Uygulanan basınca göre tepki süresi 0,54 s ve gevşeme süresi 0,54 s'dir (Tablo 5.8).

%25, %50, %75 ve %100 oranında parilen C içeren numunelere ait uygulanan farklı basınç değerlerindeki karakteristik özellikleri Şekil 5.30-5.36 ve Tablo 5.7-5.8'de verilmiştir. Elektromekanik ölçümlerden elde edilen bağıl direnç değişimi, hassasiyet, çevrimlerdeki kararlılığı, tepki süreleri, R^2 değerlerinin yanı sıra yapısal, morfolojik, kimyasal ve termal özelliklerinin incelenmesi sonucunda 25P74U1C, 25P73U1M1C, 25P69U5M1C, 50P50U, 50P45U5M, 50P44U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M numuneleri potansiyel esnek kapasitif basınç sensörü adaylarıdır.

Tablo 5.7 Kapasitif sensörlerin hassasiyet değerleri

Numune Adı	P<10 kPa		10 kPa<P<100 kPa	
	S (kPa ⁻¹)	R ²	S (kPa ⁻¹)	R ²
25P75U	0,0190	0,8801	0,0126	0,5868
25P74U1C	0,0169	0,8390	0,0045	0,7947
25P74U1M	0,0417	0,9247	0,0014	0,9979
25P73U1M1C	0,0218	0,9685	0,0029	0,9998
25P70U5M	0,0065	0,8336	0,0329	0,9096
25P69U5M1C	0,0202	0,8855	0,0060	0,2725
50P50U	0,0165	0,9390	0,0073	0,9729
50P49U1C	0,0177	0,9300	0,0092	0,8797
50P49U1M	0,0301	0,9060	0,0038	0,7551
50P48U1M1C	0,0171	0,9339	0,0012	0,9957
50P45U5M	0,0209	0,9364	0,0013	0,8238
50P44U5M1C	0,0162	0,9247	0,0016	0,8527
75P25U	0,0083	0,9488	0,0009	0,9988
75P24U1C	0,0117	0,9896	0,0094	0,9092
75P24U1M	0,0072	0,8832	0,0040	0,9554
75P23U1M1C	0,0207	0,8400	0,0070	0,8799
75P20U5M	0,0158	0,8715	0,0033	0,9616
75P19U5M1C	0,0182	0,9840	0,0015	0,8166
100P	0,0150	0,1648	0,0024	0,9953

Tablo 5.8 Kapasitif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P75U	0,51	0,55±0,10	0,61±0,06
	1,02	0,49±0,06	0,43±0,06
	2,55	0,49±0,06	0,43±0,06
	5,10	0,43±0,06	0,49±0,06
	10,20	0,44±0,05	0,55±0,01
	25,49	0,67±0,10	0,49±0,06
	50,98	0,30±0,06	0,61±0,06
	101,96	0,43±0,06	0,37±0,01
	254,89	0,37±0,10	0,61±0,10
	ORTALAMA	0,46±0,07	0,51±0,05

Tablo 5.8'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P74U1C	0,41	-	-
	0,81	-	-
	2,03	0,37±0,01	0,61±0,06
	4,06	0,43±0,06	0,61±0,06
	8,12	0,67±0,30	0,73±0,01
	20,29	0,55±0,01	0,79±0,10
	40,58	0,61±0,10	0,61±0,10
	81,17	0,61±0,06	0,61±0,10
	202,92	0,49±0,06	0,61±0,10
	ORTALAMA	0,53±0,09	0,65±0,08
25P74U1M	0,44	-	-
	0,88	0,49±0,06	0,55±0,10
	2,21	0,30±0,06	0,73±0,10
	4,41	0,43±0,06	1,03±0,06
	8,83	0,49±0,10	0,73±0,01
	22,07	0,43±0,06	0,85±0,10
	44,14	0,49±0,06	0,61±0,10
	88,28	0,37±0,01	0,97±0,06
	220,69	0,43±0,10	0,73±0,10
	ORTALAMA	0,43±0,06	0,78±0,08
25P73U1M1C	0,46	-	-
	0,91	-	-
	2,28	0,30±0,06	0,46±0,05
	4,56	0,37±0,10	0,49±0,06
	9,12	0,43±0,06	0,97±0,10
	22,81	0,55±0,01	0,85±0,20
	45,62	0,49±0,10	0,55±0,10
	91,24	0,55±0,01	0,73±0,10
	228,10	0,36±0,01	0,36±0,01
	ORTALAMA	0,44±0,05	0,63±0,09
25P70U5M	0,47	-	-
	0,95	-	-
	2,37	0,43±0,06	0,30±0,06
	4,74	0,49±0,06	0,37±0,10
	9,47	0,37±0,01	0,36±0,01
	23,67	0,43±0,06	0,37±0,10
	47,35	0,49±0,06	0,49±0,10
	94,70	0,49±0,06	0,37±0,01
	236,74	0,30±0,06	0,37±0,01
	ORTALAMA	0,43±0,06	0,38±0,06

Tablo 5.8'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P69U5M1C	0,40	-	-
	0,79	-	-
	1,98	0,55±0,10	0,49±0,10
	3,96	0,43±0,06	0,67±0,10
	7,91	0,49±0,06	0,79±0,06
	19,78	0,57±0,02	0,61±0,10
	39,56	0,67±0,06	1,09±0,20
	79,11	0,73±0,01	0,79±0,20
	197,79	0,55±0,01	0,55±0,10
	ORTALAMA	0,57±0,05	0,73±0,12
50P50U	0,66	-	-
	1,32	0,55±0,01	0,61±0,06
	3,30	0,49±0,06	0,55±0,10
	6,61	0,49±0,06	0,85±0,06
	13,21	0,49±0,06	1,04±0,20
	33,03	0,55±0,01	0,73±0,10
	66,07	0,55±0,01	0,85±0,06
	132,14	0,91±0,10	0,55±0,10
	330,34	0,73±0,01	0,55±0,10
	ORTALAMA	0,60±0,04	0,72±0,10
50P49U1C	0,67	-	-
	1,34	0,37±0,10	0,55±0,01
	3,35	0,30±0,06	0,49±0,06
	6,69	0,37±0,01	0,55±0,10
	13,38	0,55±0,10	0,79±0,10
	33,46	0,49±0,06	0,91±0,10
	66,92	0,30±0,06	0,79±0,10
	133,83	0,49±0,06	0,67±0,06
	334,58	0,55±0,01	0,85±0,10
	ORTALAMA	0,43±0,06	0,70±0,08
50P49U1M	0,66	-	-
	1,32	0,61±0,06	0,61±0,10
	3,30	0,49±0,06	0,73±0,10
	6,60	0,43±0,06	0,91±0,10
	13,19	0,73±0,10	0,98±0,06
	32,98	0,61±0,06	0,85±0,10
	65,96	0,61±0,06	0,61±0,06
	131,93	0,43±0,06	0,67±0,06
	329,82	0,67±0,30	1,04±0,10
	ORTALAMA	0,57±0,10	0,81±0,09

Tablo 5.8'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
50P48U1M1C	1,01	-	-
	2,02	-	-
	5,04	0,30±0,06	0,61±0,06
	10,08	0,43±0,06	0,61±0,06
	20,16	0,49±0,06	0,85±0,06
	50,40	0,49±0,06	0,98±0,10
	100,81	0,67±0,10	0,91±0,10
	201,61	0,49±0,06	0,67±0,10
	504,03	0,61±0,10	0,73±0,10
	ORTALAMA	0,50±0,07	0,77±0,08
50P45U5M	0,85	-	-
	1,70	0,49±0,06	0,73±0,10
	4,25	0,79±0,20	0,67±0,06
	8,49	0,55±0,10	0,79±0,06
	16,98	0,48±0,05	0,67±0,06
	42,46	0,49±0,06	0,67±0,10
	84,92	0,49±0,06	0,79±0,20
	169,84	0,43±0,06	0,91±0,01
	424,59	0,43±0,06	0,67±0,10
	ORTALAMA	0,52±0,08	0,73±0,09
50P44U5M1C	0,73	-	-
	1,45	0,49±0,06	0,37±0,01
	3,63	0,43±0,06	0,49±0,06
	7,25	0,37±0,01	0,79±0,10
	14,50	0,49±0,06	0,73±0,10
	36,25	0,49±0,06	1,03±0,06
	72,51	0,43±0,06	0,61±0,10
	145,01	0,73±0,10	1,09±0,10
	362,53	0,61±0,06	0,79±0,06
	ORTALAMA	0,51±0,06	0,74±0,07
75P25U	1,08	-	-
	2,16	-	-
	5,39	0,43±0,06	0,49±0,10
	9,78	0,49±0,06	0,49±0,06
	21,55	0,61±0,20	0,67±0,06
	53,88	0,43±0,06	0,79±0,10
	107,76	0,37±0,01	0,79±0,06
	215,52	0,43±0,06	0,67±0,06
	538,79	0,37±0,01	0,79±0,06
	ORTALAMA	0,45±0,07	0,67±0,07

Tablo 5.8'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P24U1C	0,74	-	-
	1,49	-	-
	3,72	0,37±0,01	0,43±0,06
	7,44	0,43±0,06	0,61±0,06
	14,88	0,37±0,10	0,61±0,10
	37,20	0,98±0,10	0,73±0,01
	74,41	0,61±0,10	0,55±0,10
	148,81	0,61±0,40	0,61±0,06
	372,02	0,67±0,06	0,37±0,10
	ORTALAMA	0,58±0,12	0,56±0,07
75P24U1M	1,01	-	-
	2,02	0,49±0,06	0,61±0,06
	5,04	0,43±0,06	0,49±0,10
	10,08	0,43±0,06	0,55±0,10
	20,16	0,43±0,06	0,91±0,10
	50,40	0,67±0,10	0,98±0,06
	100,81	0,49±0,06	1,04±0,06
	201,61	0,49±0,06	0,85±0,06
	504,03	0,30±0,06	0,73±0,10
	ORTALAMA	0,47±0,07	0,77±0,08
75P23U1M1C	0,57	-	-
	1,14	-	-
	2,84	0,30±0,10	0,43±0,06
	5,68	0,49±0,06	0,30±0,06
	11,36	0,49±0,06	0,49±0,06
	28,41	0,43±0,06	0,49±0,06
	56,82	0,37±0,10	0,43±0,06
	113,64	0,55±0,01	0,55±0,01
	284,09	0,37±0,01	0,43±0,10
	ORTALAMA	0,43±0,05	0,45±0,06
75P20U5M	1,02	-	-
	2,05	-	-
	5,12	0,43±0,06	0,85±0,06
	10,25	0,37±0,10	0,67±0,06
	20,49	0,43±0,06	0,61±0,06
	51,23	0,73±0,10	0,55±0,010
	102,46	0,55±0,20	0,55±0,10
	204,92	0,67±0,10	0,55±0,010
	512,30	0,49±0,10	0,55±0,010
	ORTALAMA	0,52±0,09	0,62±0,08

Tablo 5.8'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P19U5M1C	0,57	-	-
	1,14	0,36±0,01	0,42±0,10
	2,85	0,36±0,10	0,36±0,10
	5,69	0,43±0,06	0,49±0,06
	11,38	0,30±0,06	0,43±0,06
	28,46	0,49±0,10	0,49±0,10
	56,92	0,37±0,10	0,55±0,10
	113,84	0,49±0,06	0,43±0,06
	284,61	0,49±0,06	0,55±0,01
	ORTALAMA	0,41±0,07	0,34±0,07
100P	0,37	0,67±0,10	0,73±0,10
	0,74	0,30±0,10	0,67±0,10
	1,85	0,30±0,06	0,73±0,10
	3,71	0,49±0,06	0,43±0,06
	7,41	0,49±0,06	0,79±0,10
	18,54	0,73±0,20	0,67±0,06
	37,08	0,55±0,10	0,49±0,06
	74,14	0,30±0,06	0,49±0,06
	185,35	0,49±0,06	0,61±0,06
	ORTALAMA	0,54±0,09	0,54±0,08

5.2.2 Serigrafi Yöntemi ile Üretilen Piezorezistif ve Kapasitif Basınç Sensörlerinin Elektromekanik Ölçümleri

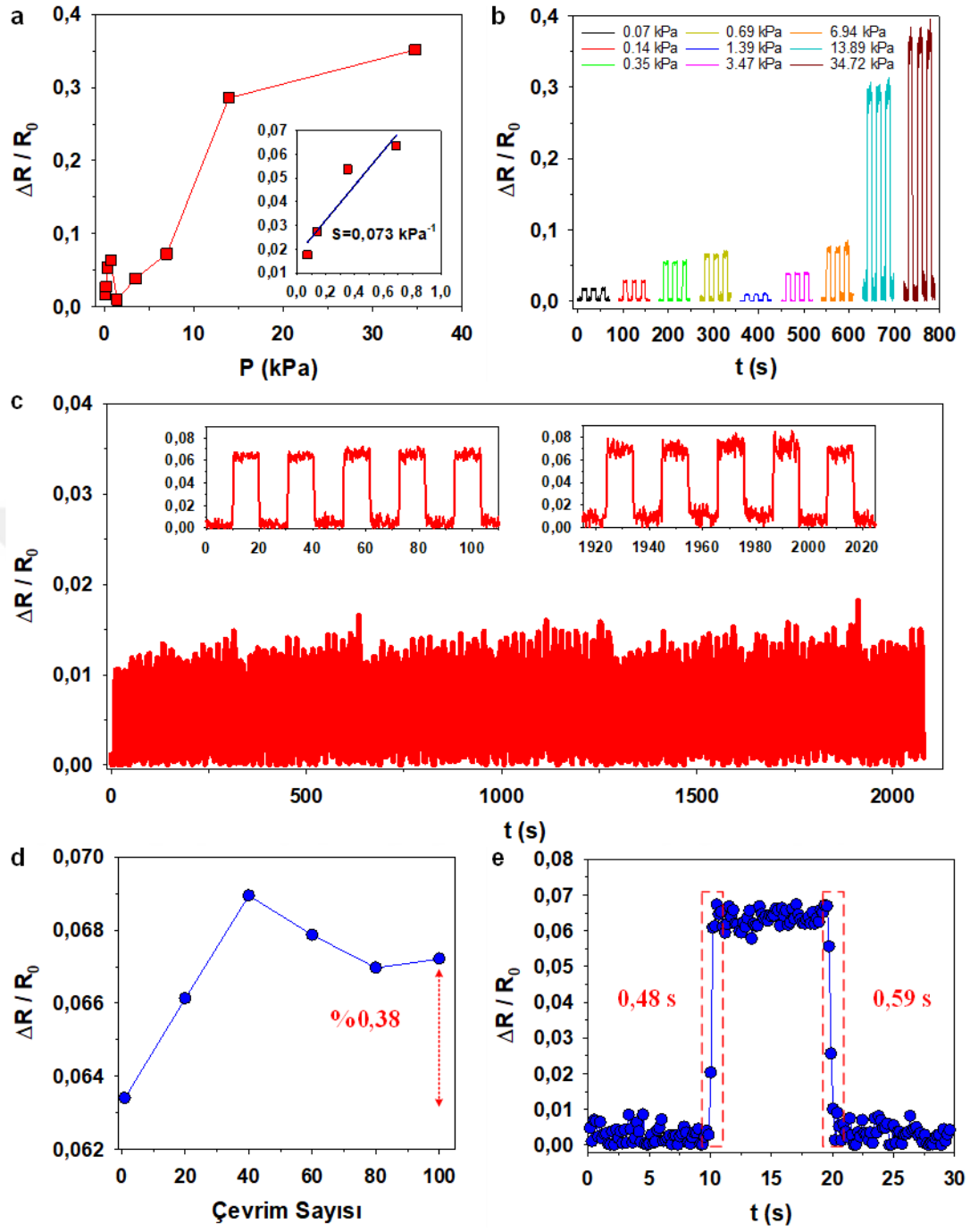
Yukarıda üretilmiş 19 numunenin elektromekanik ölçümleri gerçekleştirilmiş olup, karakteristik özellikleri olan piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif davranışları incelenmiştir. Tüm bu numunelerin, piezoelektrik basınç sensörü uygulamalarına uygun olmadığı elde edilen veriler ışığında tespit edilmiş olup, piezorezistif ve kapasitif davranışlarını tanımlamak için gerçekleştirilen elektromekanik ölçümler sonucunda $P < 10$ kPa aralığında basıncı yüksek hassasiyetle algıladığı tespit edilmiştir.

Esnek piezorezistif ve kapasitif basınç sensörü uygulamaları için ise 8 adet potansiyel numune tespit edilmiştir. Bunlar; 25P74U1C, 25P73U1M1C, 25P69U5M1C, 50P50U, 50P45U5M, 50P44U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M'dır. Bu numuneler için tekrardan mürekkepler üretilerek, serigrafi yöntemine uygun hale getirilmiştir. Gümüş iletken yol ile kaplı PET yüzeyine serigrafi yöntemi kullanılarak mürekkebin basımı gerçekleştirilmiş ve esnek basınç sensörleri haline getirilmiştir.

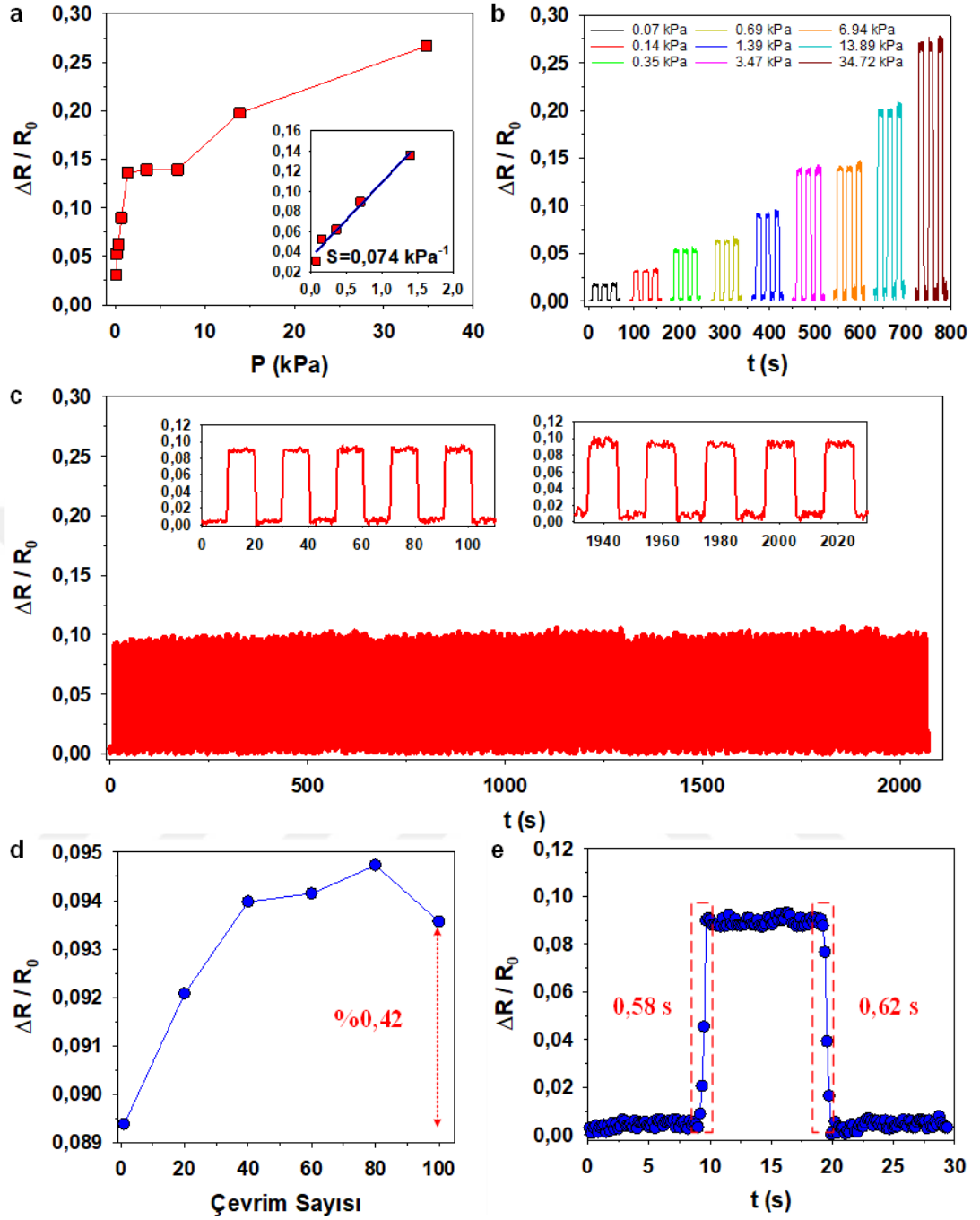
Çalışma kapsamında serigrafi yöntemi kullanılarak üretilen 8 adet parilen C içeren numunelere 0,01 N; 0,02 N; 0,05 N; 0,1 N; 0,2 N; 0,5 N; 1 N; 2 N ve 5 N kuvvetlerine karşılık gelen 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanarak, piezorezistif ve kapasitif değişimleri tespit edilmiştir. Bu değişimlerden yola çıkarak, basınç algılama bölgesi tespit edilmeye, hassasiyeti, çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi, basıncı algılama süreleri, doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

5.2.2.1 Serigrafi yöntemi ile üretilen piezorezistif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri

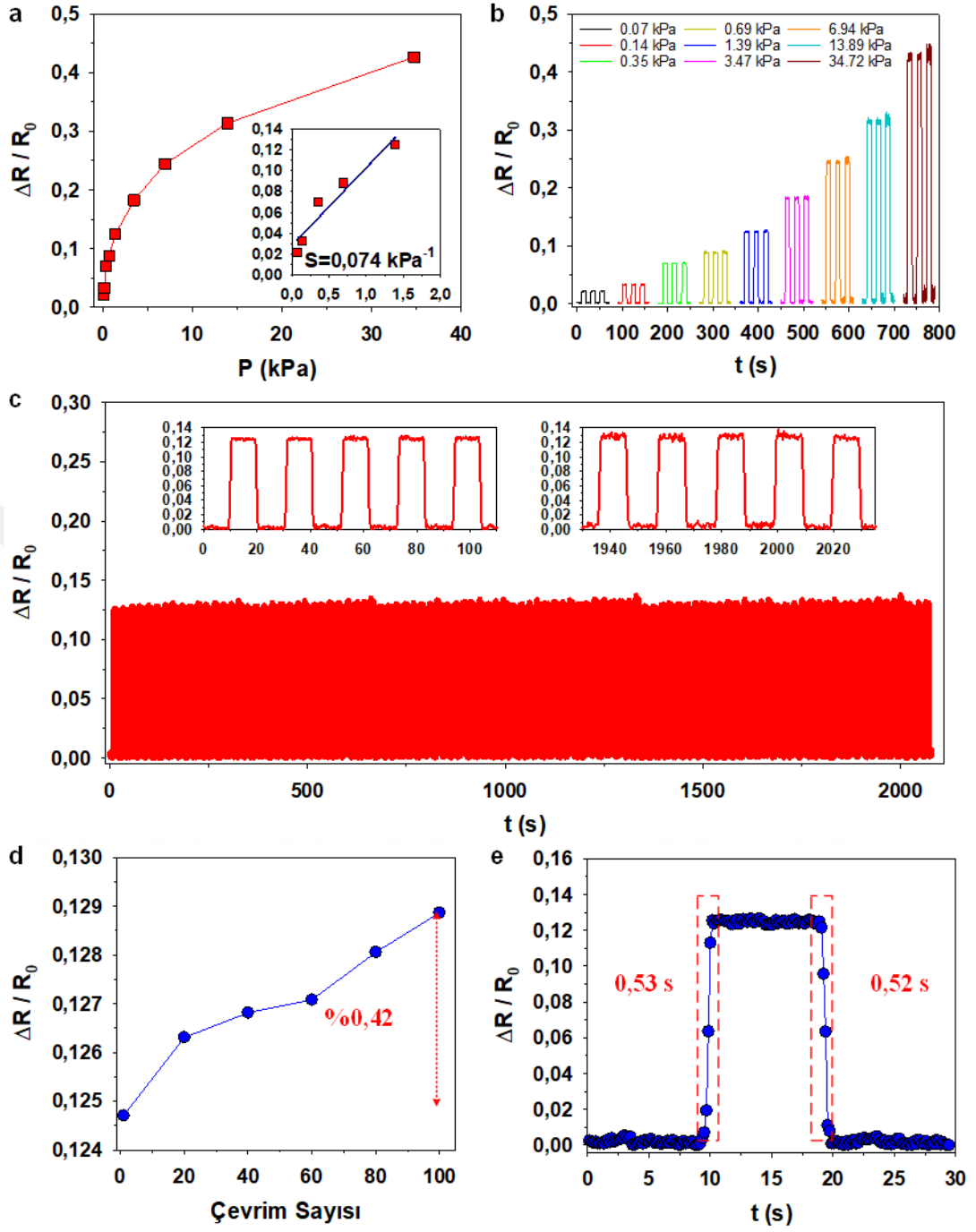
Şekil 5.37-5.44'de yer alan grafiklerde %25, %50 ve %75 oranında parilen C içeren numuneler hazırlanmış olup, 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanarak bağıl direnç değişim kararlılığı, hassasiyeti, sabit basınç altında 100 çevrimdeki bağıl direnç değişimi, çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik sapması, ortalama tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır. Uygulanan basınca göre hassasiyeti Denklem 2.4'e göre hesaplanmış ve Tablo 5.9'da verilmiştir. Sabit basınç altında 100 çevrim sonucunda bağıl direnç değişimindeki kararlılığın tespit edilmesini sağlayan kararlılıktaki yüzdelik değişim değerleri Tablo 5.10'da yer almaktadır. Elde edilen veriler dikkate alınarak, Denklem 2.5 ve 2.6'ya göre hesaplanmış doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri Tablo 5.11'te yer almaktadır. Tablo 5.12'de ise her bir numuneye farklı basınç değerlerinin uygulanması sonucu elde edilen ortalama tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır.



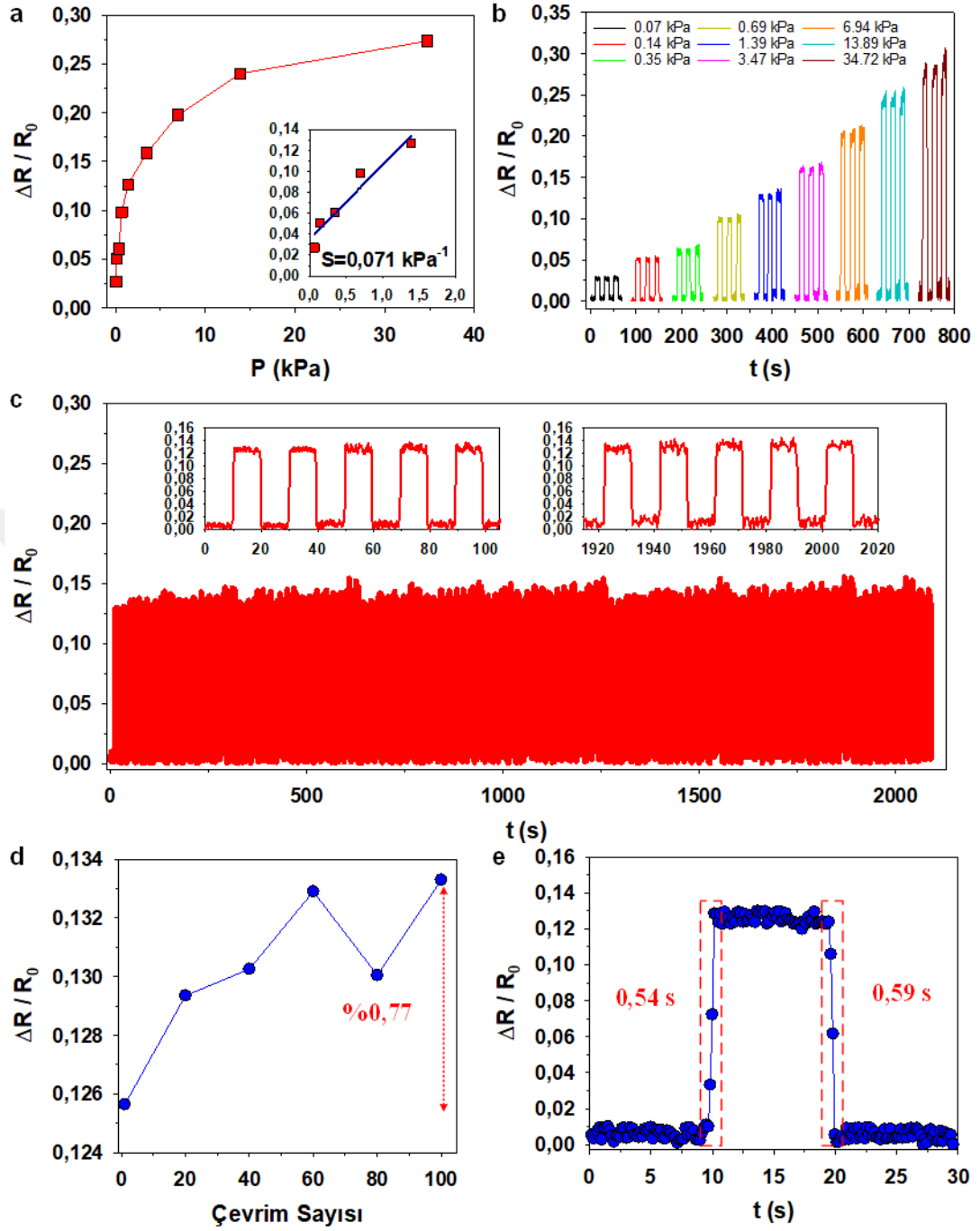
Şekil 5.37 25P74U1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 0,69 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 0,69 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



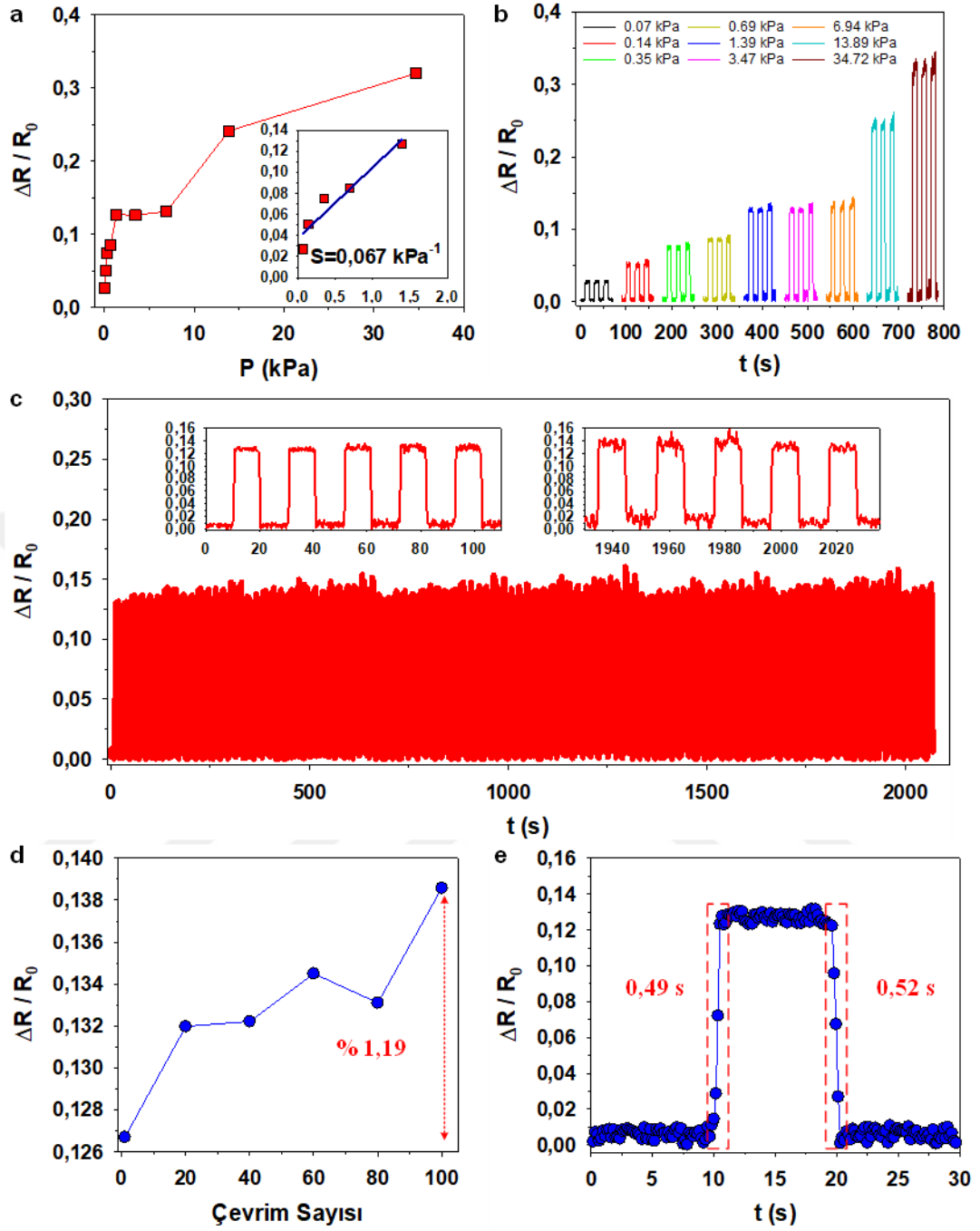
Şekil 5.38 25P73U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



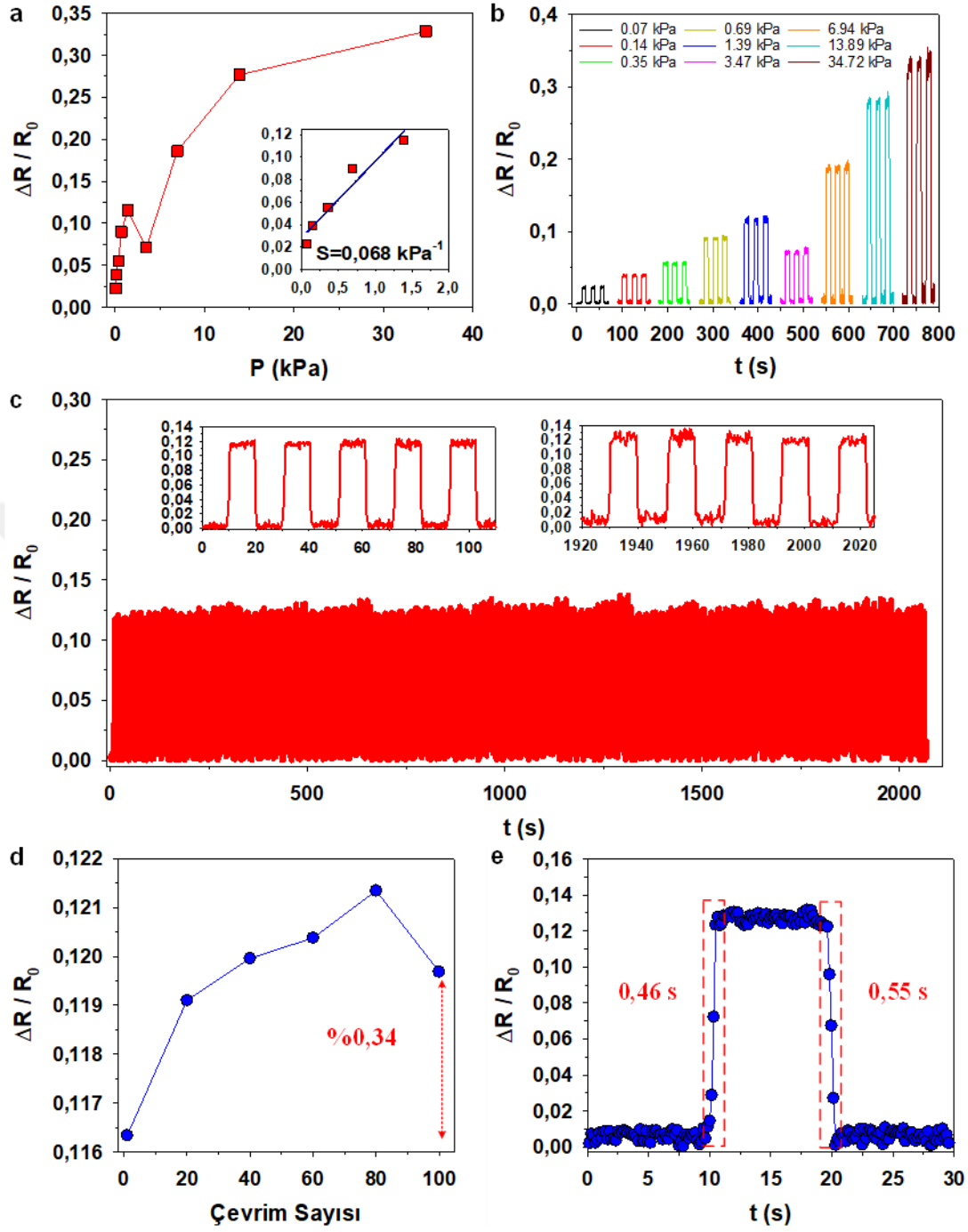
Şekil 5.39 25P69U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



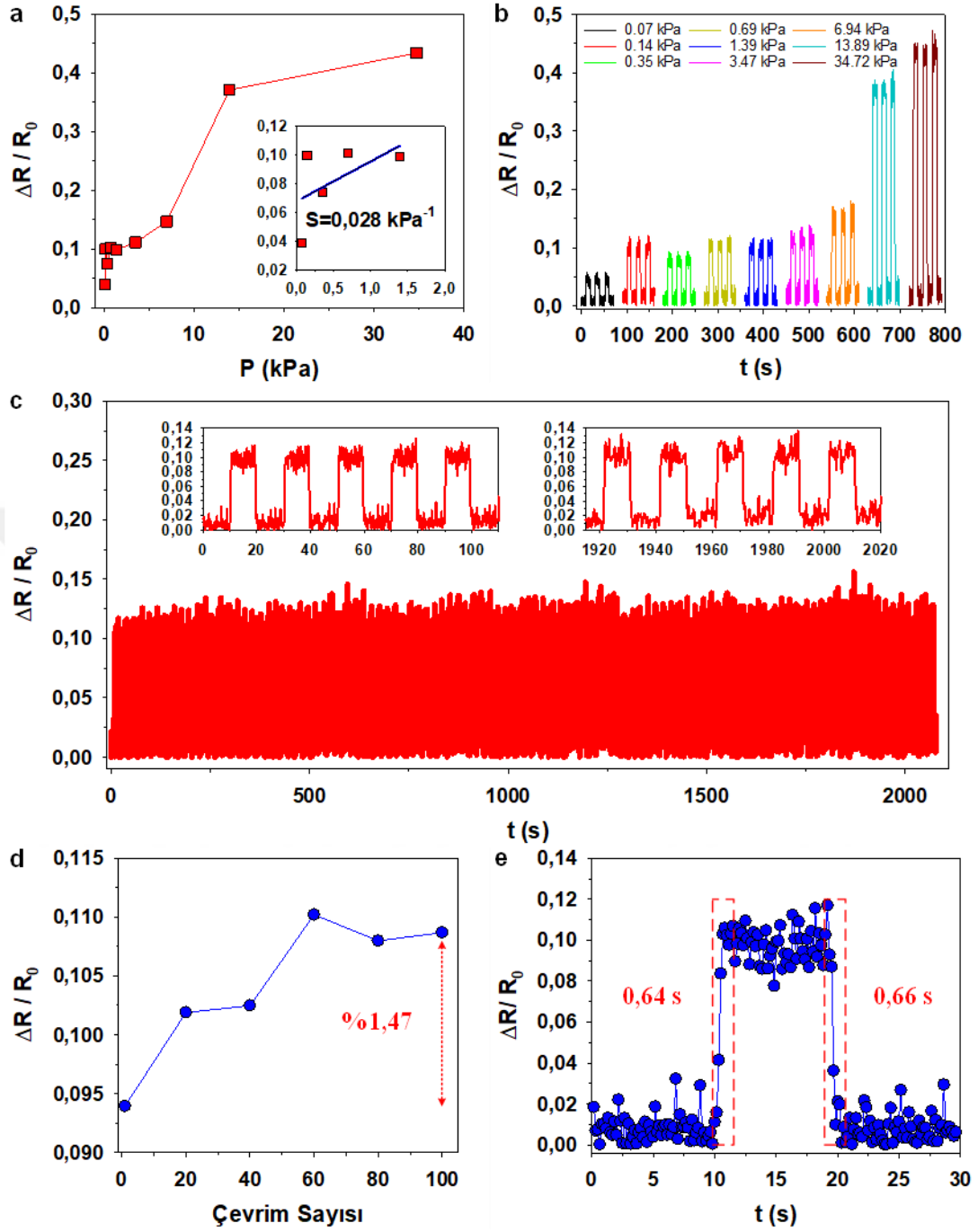
Şekil 5.40 50P50U numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



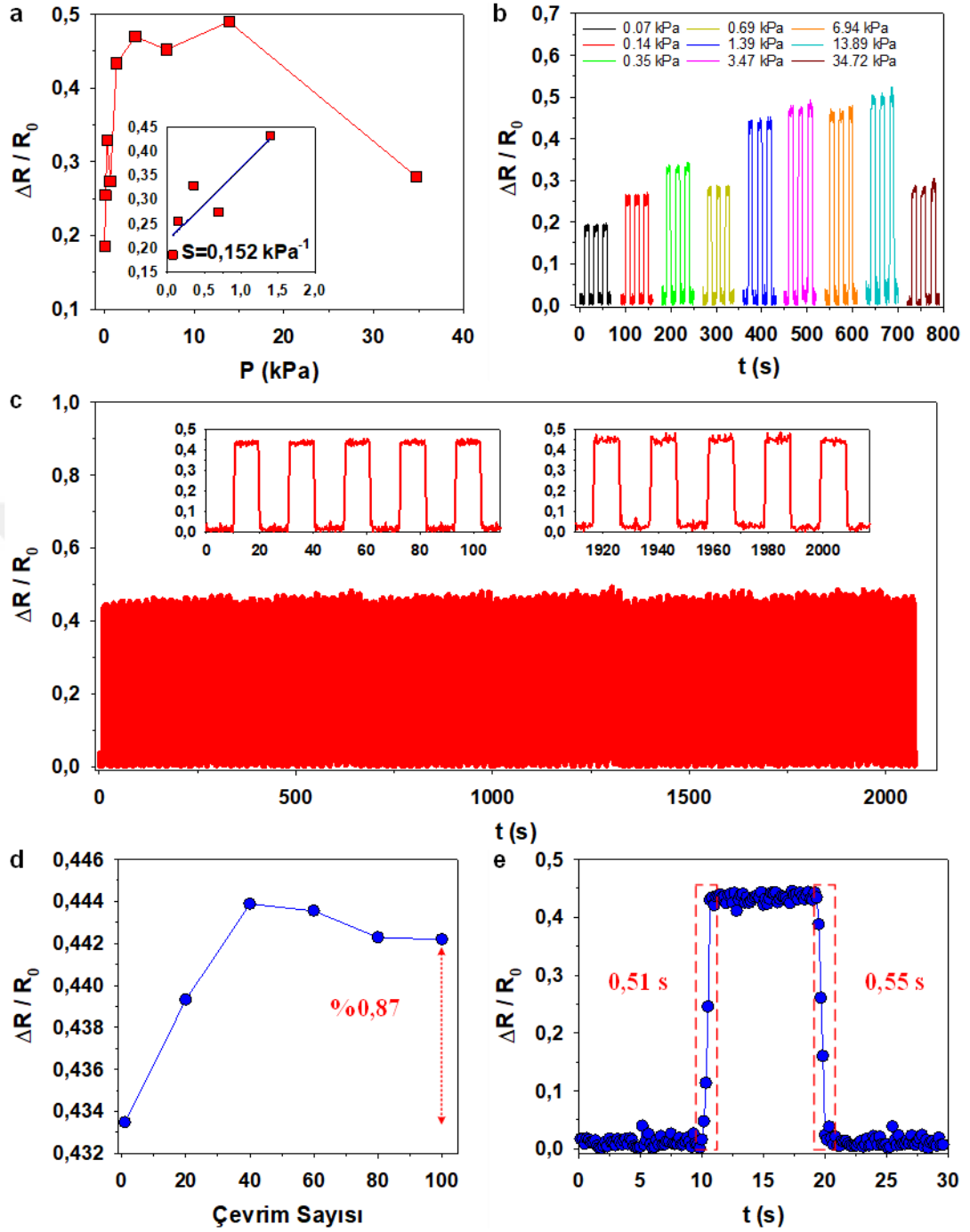
Şekil 5.41 50P45U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.42 50P44U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.43 75P23U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.44 75P20U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı direnç değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri

Şekil 5.37-5.44'deki grafiklerin (a) şıklarında uygulanan basınca göre bağlı direnç değişimleri ve hassasiyetleri yer almaktadır. Bunlar incelendiğinde, $P < 2$ kPa basınç altında 25P74U1C, 25P73U1M1C, 25P69U5M1C, 50P50U, 50P45U5M ve 50P44U5M1C numunelerin hassasiyetleri ortalama $0,070 \text{ kPa}^{-1}$ olduğu görülmektedir.

En düşük hassasiyet değerine 75P23U1M1C numunesi sahip olup, $0,028 \text{ kPa}^{-1}$ 'dir. 75P20U5M numunesi ise $0,152 \text{ kPa}^{-1}$ değeri ile en yüksek hassasiyete sahiptir (Tablo 5.9). En yüksek hassasiyete sahip olan 75P20U5M numunesinin R^2 değeri 0,7710 iken, ortalama $0,070 \text{ kPa}^{-1}$ hassasiyete sahip numuneler için bu değer 0,90'ı geçmektedir. Uygulanan basıncın artması ile bağıl direnç değişiminde lineer davranışın kaybolduğu ve doyum bölgesine ulaşıldığı görülmektedir. Lineer davranışın görüldüğü bölge basıncın hassas bir şekilde algılandığı bölge olup, 2 kPa altındaki basınç değerlerini daha hassas algılayabildiği görülmektedir.

Şekil 5.37-5.44'deki grafiklerin (b) şıklarında uygulanan farklı basınçlara göre 3'er çevrim içeren bağıl direnç değişim kararlılığı yer almaktadır. Her bir çevrim numuneye 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanması ve hemen ardından uygulanan basıncın geri alınması süreçlerinden oluşmaktadır. Her çevrim sonucunda basınç altındaki elde edilen bağıl direnç değişimi verileri, (a) şıkında yer alan bağıl direnç değişimlerinde ve hassasiyetin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Tablo 5.9 Piezorezistif sensörlerin hassasiyet değerleri

Numune Adı	P<2 kPa	
	S (kPa^{-1})	R^2
25P74U1C	0,073	0,8301
25P73U1M1C	0,074	0,9772
25P69U5M1C	0,074	0,9222
50P50U	0,071	0,9282
50P45U5M	0,067	0,9217
50P44U5M1C	0,068	0,9311
75P23U1M1C	0,028	0,3046
75P20U5M	0,152	0,7710

Şekil 5.37-5.44'deki grafiklerin (c) şıklarında sabit basınç altında 100 çevrim sonucunda numunenin bağıl direnç değişimlerini vermektedir. 25P74U1C numunesi için uygulanan basınç 0,69 kPa iken diğer numuneler için 1,39 kPa'dır. 100 çevrim sonucunda elde edilen bağıl direnç değişimi numunenin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. (d) şıklarında ise çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi yer almaktadır. Bu değişimin büyük olması kararlılığı olumsuz yönde

etkilemekte olup, 50P45U5M (%1,19) ve 75P23U1M1C (%1,47) numuneleri en yüksek değerlere sahiptir. En düşük değişim değerleri 25P74U1C (%0,38) ve 50P44U5M1C (%0,34) numunelerinde görülmektedir (Tablo 5.10).

Tablo 5.10 Piezorezistif sensörlerin kararlılıktaki yüzdelik değişimi

Numune Adı	Değişim (%)
25P74U1C	0,38
25P73U1M1C	0,42
25P69U5M1C	0,42
50P50U	0,77
50P45U5M	1,19
50P44U5M1C	0,34
75P23U1M1C	1,47
75P20U5M	0,87

Şekil 5.37-5.44'deki grafiklerin (e) şıklarında ortalama tepki ve gevşeme zamanlarını vermektedir. Tablo 5.11'de verilen süreler incelendiğinde, 1 s altında tepkiler oluşturduğu görülmekle birlikte ortalama algılama süreleri 0,50 s civarındadır. Ayrıca, numuneler hem birbirleri ile hem de uygulanan basınca göre kıyaslandığında tepki ve gevşeme süreleri açısından bir ilişki tespit edilememiştir.

Yukarıdaki elektromekanik ölçümlerden hesaplanan tepki ve gevşeme süreleri arasında farklılık görülmektedir. Bu durumun nedenleri irdelendiğinde, basıncın numuneye yüklenmesi anında elektromekanik cihazın performansı tepki ve gevşeme sürelerini etkilemekte olup, mükemmel bir şekilde basıncı yükleme ve boşaltma yapamamaktadır (Pyo vd. 2017). Ayrıca, bu sürelerin büyük olmasının sebeplerinden biri de PU'nun 7,4 MPa ile düşük elastik modülüne sahip olmasına rağmen, Parilen C'nin 3 GPa ve PMMA'nın 2 GPa ile yüksek elastik modüllerine sahip olmalarıdır (Kanyanta vd. 2010; Qiu vd. 2019; Zhi vd. 2008). Hem düşük hem de yüksek elastik modülüne sahip polimerlerin birlikte kullanımı, elastikiyet yapısını değiştirmekle birlikte uygulanan basınçla beraber polimer zincirlerin deformasyonu da değiştirmektedir (Huang vd. 2019; Shu vd. 2015). Yukarıdaki polimerlerin kullanılması ile üretilen numunelerin sensör performanslarının olumsuz etkilendiği görülmektedir. Üretilen numuneler özellikle >10 kPa basınç değerlerinde hassas ve lineer davranış göstermemektedir. Hassasiyetin ve lineer davranışın görüldüğü bölge

1,5 kPa'ten küçük basınç değerleridir. Aynı zamanda bu durumun yavaş dinamik tepki, düşük tespit limiti ve düşük hassasiyete neden olduğu görülmektedir (Zhu vd. 2014).

Serigrafi yöntemi ile üretilmiş olan sensörlerin Denklem 2.5 ve 2.6'ya hesaplanmış yüzdelik doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri Tablo 5.11'de yer almaktadır. Doğrusallık hatasına en düşük 25P73U1M1C (%0,70) numunesine sahipken, 75P20U5M (%4,63) numunesi de en yüksek değere sahiptir. Tekrarlanabilirlik hatasında ise en düşük hata oranı %0,89 ile 75P20U5M numunesine aittir. En yüksek tekrarlanabilirlik hata oranı ise %5,82 ile 75P23U1M1C numunesininidir.

Tablo 5.11 Piezorezistif sensörlerin doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri

Numune Adı	Doğrusallık Hatası (%)	Tekrarlanabilirlik Hatası (%)
25P74U1C	1,67	2,83
25P73U1M1C	0,70	2,13
25P69U5M1C	1,21	1,14
50P50U	1,06	2,13
50P45U5M	1,14	2,91
50P44U5M1C	1,11	1,43
75P23U1M1C	2,35	5,82
75P20U5M	4,63	0,89

Tablo 5.12 Piezorezistif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P74U1C	0,07	0,22±0,04	0,23±0,08
	0,14	0,81±0,07	0,67±0,01
	0,35	0,53±0,07	0,47±0,01
	0,69	0,98±0,06	0,91±0,09
	1,39	0,29±0,04	0,53±0,02
	3,47	0,93±0,03	0,65±0,03
	6,94	0,39±0,04	0,51±0,04
	13,89	0,80±0,05	0,73±0,06
	34,72	0,50±0,02	0,61±0,08
	ORTALAMA	0,48±0,05	0,59±0,05

Tablo 5.12'nin devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P73U1M1C	0,07	0,53±0,06	0,28±0,03
	0,14	0,67±0,04	0,74±0,04
	0,35	0,52±0,03	0,65±0,03
	0,69	0,43±0,07	0,64±0,07
	1,39	0,37±0,04	0,45±0,04
	3,47	0,42±0,05	0,73±0,08
	6,94	0,95±0,07	0,90±0,09
	13,89	0,64±0,05	0,67±0,07
	34,72	0,72±0,04	0,55±0,05
	ORTALAMA	0,58±0,05	0,62±0,06
25P69U5M1C	0,07	0,65±0,07	0,72±0,07
	0,14	0,54±0,07	0,61±0,05
	0,35	0,35±0,04	0,42±0,04
	0,69	0,73±0,03	0,72±0,03
	1,39	0,79±0,04	0,64±0,05
	3,47	0,64±0,02	0,45±0,06
	6,94	0,34±0,05	0,40±0,03
	13,89	0,29±0,03	0,32±0,01
	34,72	0,41±0,05	0,42±0,02
	ORTALAMA	0,53±0,05	0,52±0,04
50P50U	0,07	0,42±0,04	0,54±0,07
	0,14	0,34±0,05	0,48±0,04
	0,35	0,33±0,01	0,45±0,05
	0,69	0,45±0,03	0,48±0,06
	1,39	0,65±0,08	0,72±0,04
	3,47	0,58±0,07	0,64±0,04
	6,94	0,68±0,03	0,52±0,03
	13,89	0,71±0,09	0,88±0,08
	34,72	0,70±0,07	0,64±0,07
	ORTALAMA	0,54±0,05	0,59±0,05
50P45U5M	0,07	0,35±0,02	0,28±0,02
	0,14	0,27±0,03	0,31±0,01
	0,35	0,64±0,04	0,60±0,05
	0,69	0,47±0,04	0,42±0,03
	1,39	0,68±0,05	0,61±0,04
	3,47	0,78±0,09	0,88±0,08
	6,94	0,41±0,04	0,46±0,05
	13,89	0,38±0,06	0,62±0,04
	34,72	0,40±0,03	0,52±0,03
	ORTALAMA	0,49±0,04	0,52±0,04

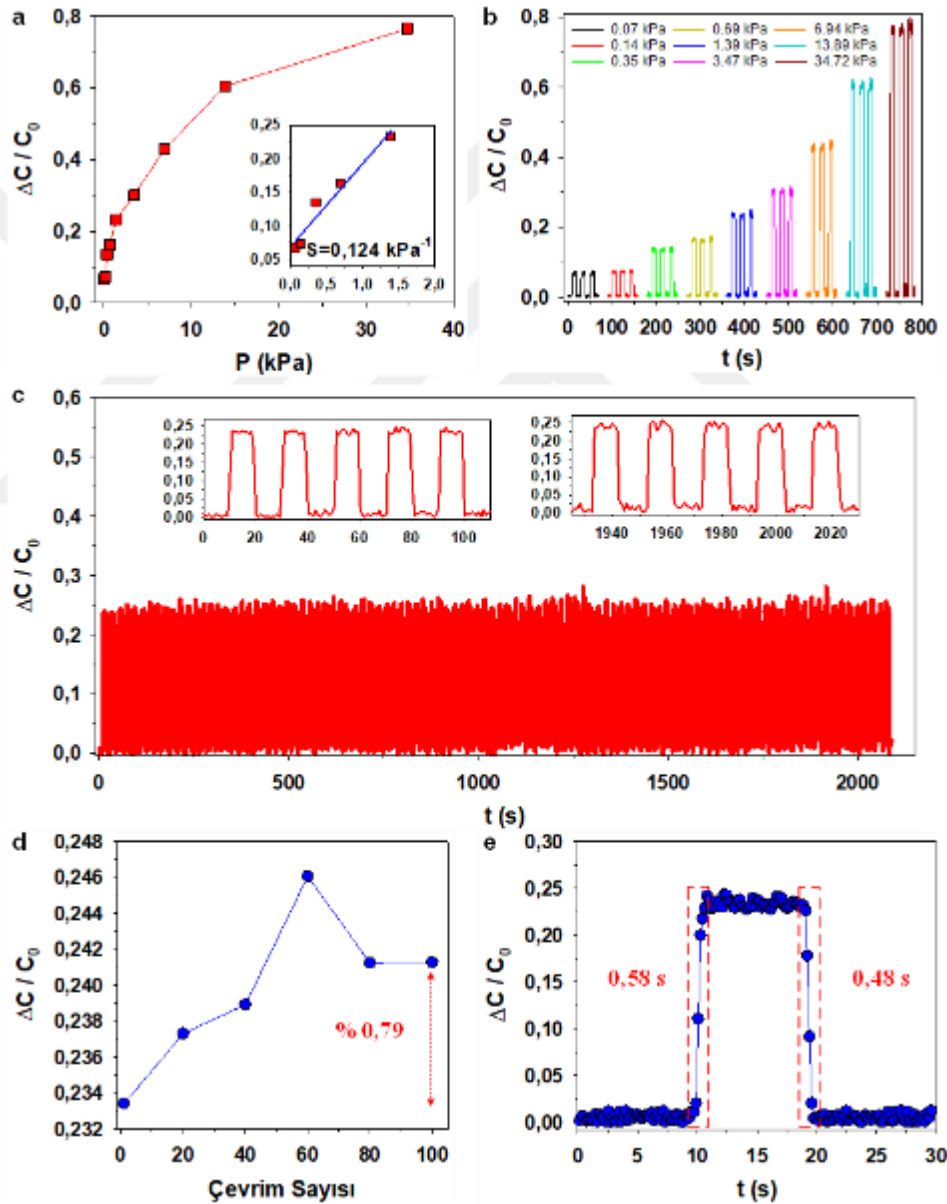
Tablo 5.12'nin devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
50P44U5M1C	0,07	0,56±0,05	0,50±0,02
	0,14	0,72±0,03	0,82±0,03
	0,35	0,66±0,04	0,73±0,01
	0,69	0,32±0,05	0,35±0,05
	1,39	0,41±0,02	0,48±0,06
	3,47	0,42±0,03	0,52±0,04
	6,94	0,37±0,01	0,62±0,04
	13,89	0,31±0,01	0,47±0,05
	34,72	0,39±0,02	0,43±0,01
	ORTALAMA	0,46±0,03	0,55±0,03
75P23U1M1C	0,07	0,64±0,05	0,70±0,07
	0,14	0,48±0,04	0,37±0,02
	0,35	0,57±0,04	0,63±0,05
	0,69	0,43±0,03	0,47±0,04
	1,39	0,78±0,06	0,88±0,08
	3,47	0,92±0,06	0,85±0,04
	6,94	0,82±0,04	0,79±0,08
	13,89	0,45±0,02	0,55±0,02
	34,72	0,67±0,03	0,70±0,03
	ORTALAMA	0,64±0,04	0,66±0,05
75P20U5M	0,07	0,52±0,04	0,62±0,07
	0,14	0,70±0,07	0,82±0,04
	0,35	0,45±0,04	0,46±0,03
	0,69	0,56±0,04	0,39±0,04
	1,39	0,42±0,05	0,64±0,02
	3,47	0,78±0,03	0,71±0,03
	6,94	0,34±0,04	0,46±0,04
	13,89	0,41±0,03	0,52±0,01
	34,72	0,37±0,07	0,36±0,02
	ORTALAMA	0,51±0,05	0,55±0,03

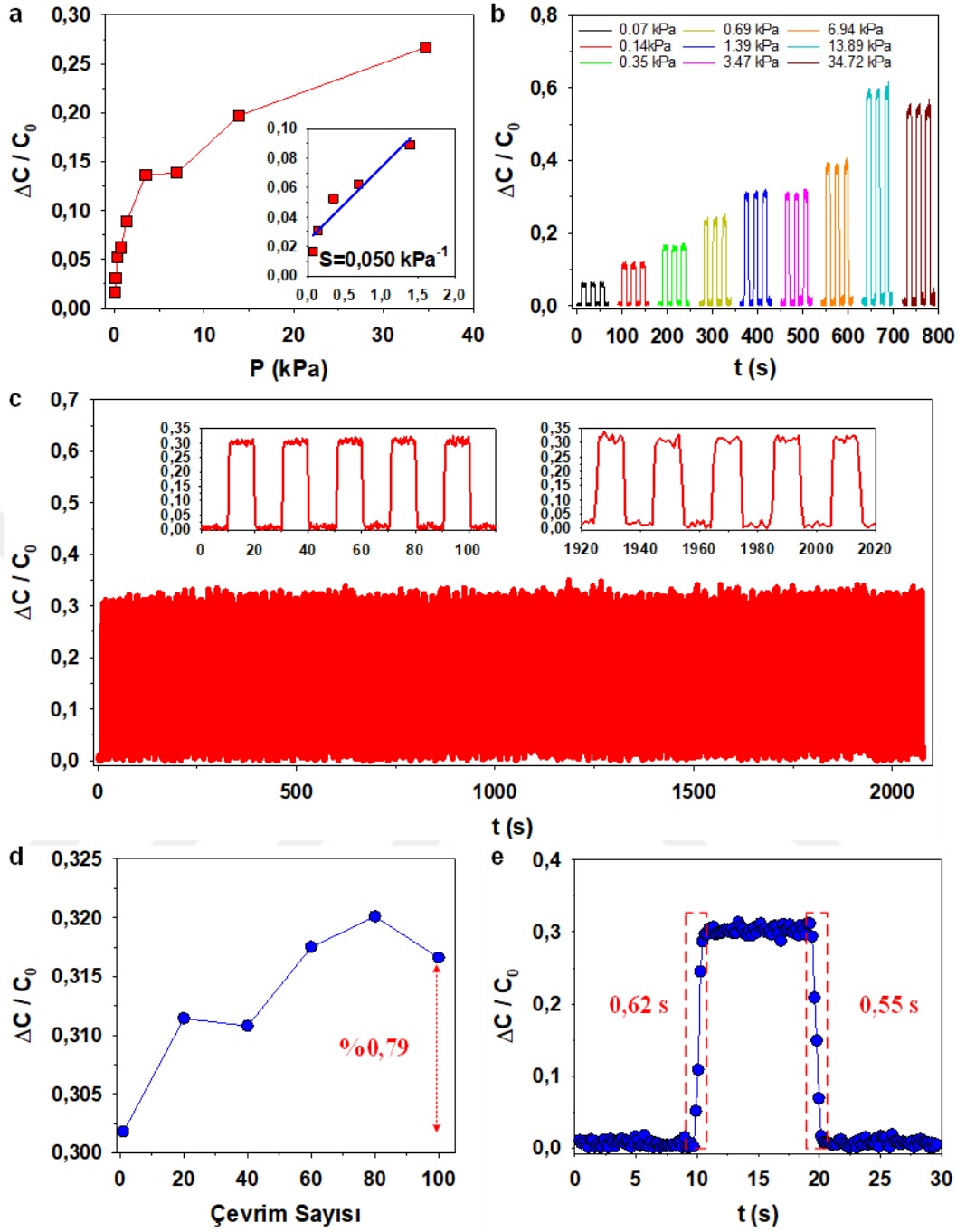
5.2.2.2 Serigrafi yöntemi ile üretilen kapasitif basınç sensörlerin elektromekanik ölçümleri

Şekil 5.45-5.52'de yer alan grafiklerde %25, %50 ve %75 oranında parilen C içeren numuneler hazırlanmış olup, 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanarak bağlı kapasitans değişim kararlılığı, hassasiyeti, sabit basınç altında 100 çevrimdeki bağlı kapasitans değişimi, çevrim sayısına göre kararlılıktaki yüzdelik değişimi, ortalama tepki ve gevşeme süreleri yer almaktadır. Uygulanan basınca göre hassasiyeti

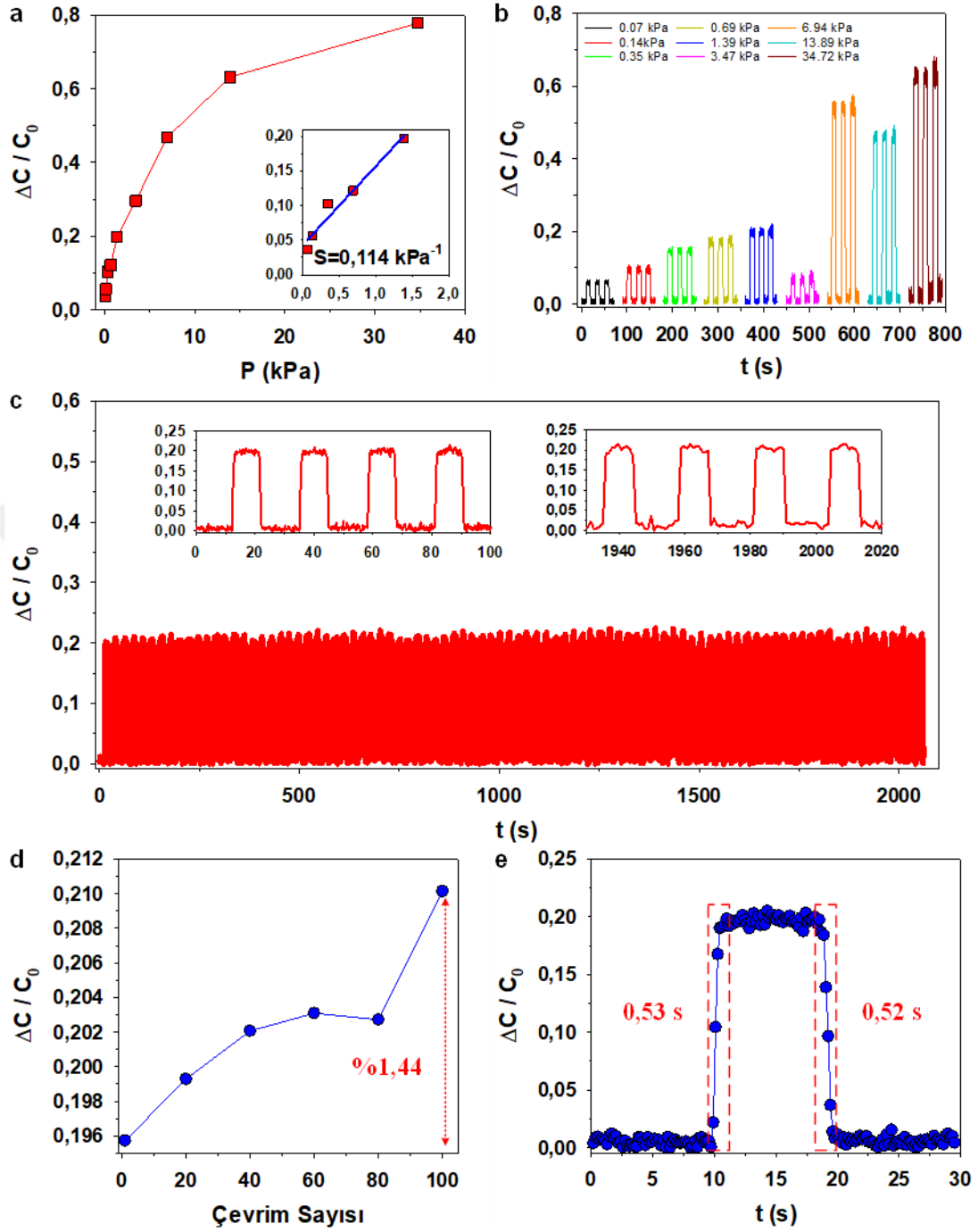
Denklem 2.4'e göre hesaplanmış ve Tablo 5.13'de verilmiştir. Sabit basınç altında 100 çevrim sonucunda bağıl kapasitans değişimindeki kararlılığın tespit edilmesini sağlayan kararlılıktaki yüzdelik değişim değerleri, Tablo 5.14'de yer almaktadır. Her bir numuneye farklı basınç değerlerinin uygulanması sonucu elde edilen ortalama tepki ve gevşeme süreleri Tablo 5.15'de yer almaktadır. Elde edilen veriler dikkate alınarak, Denklem 2.5 ve 2.6'ya göre hesaplanmış doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri Tablo 5.16'te verilmektedir.



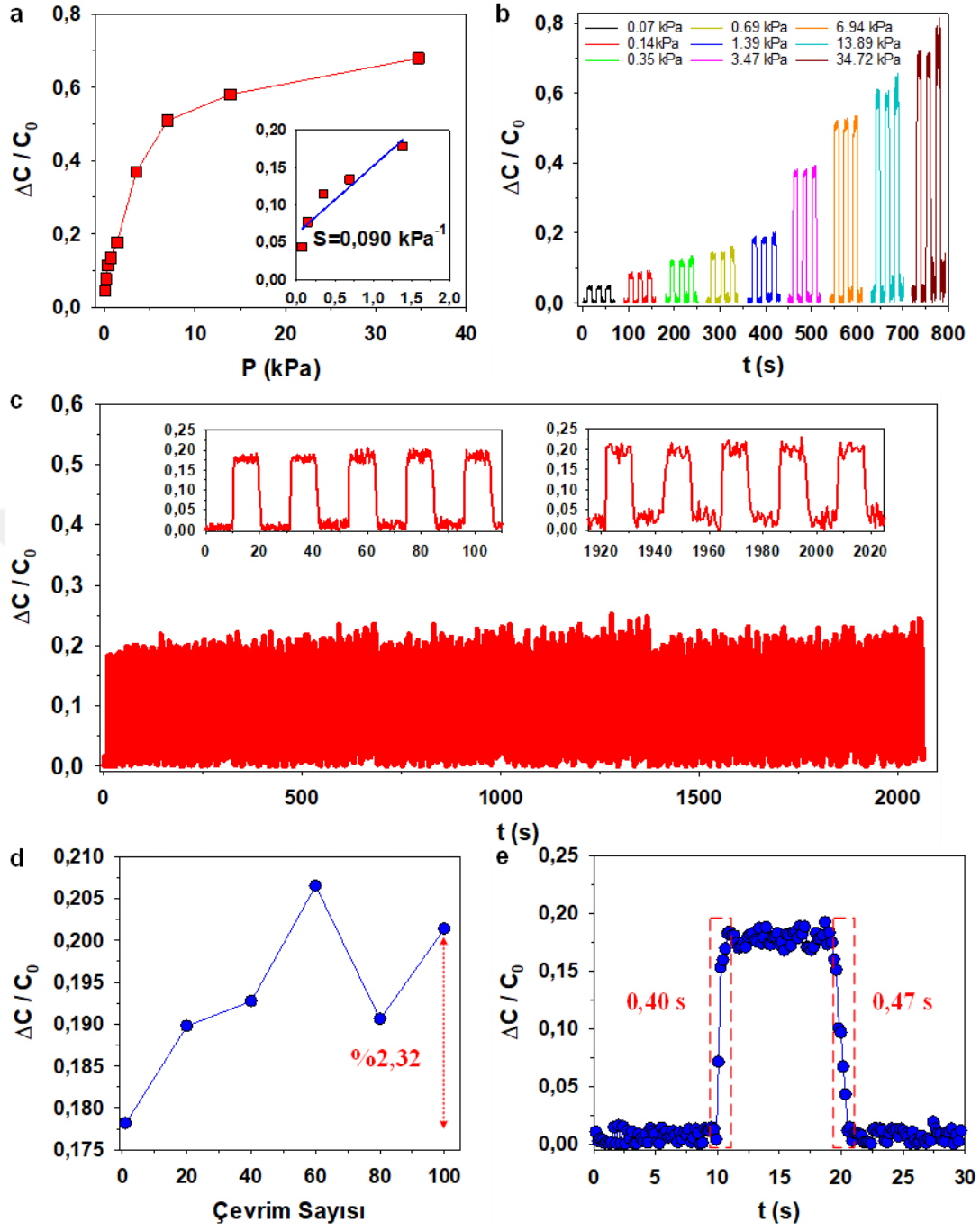
Şekil 5.45 25P74U1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



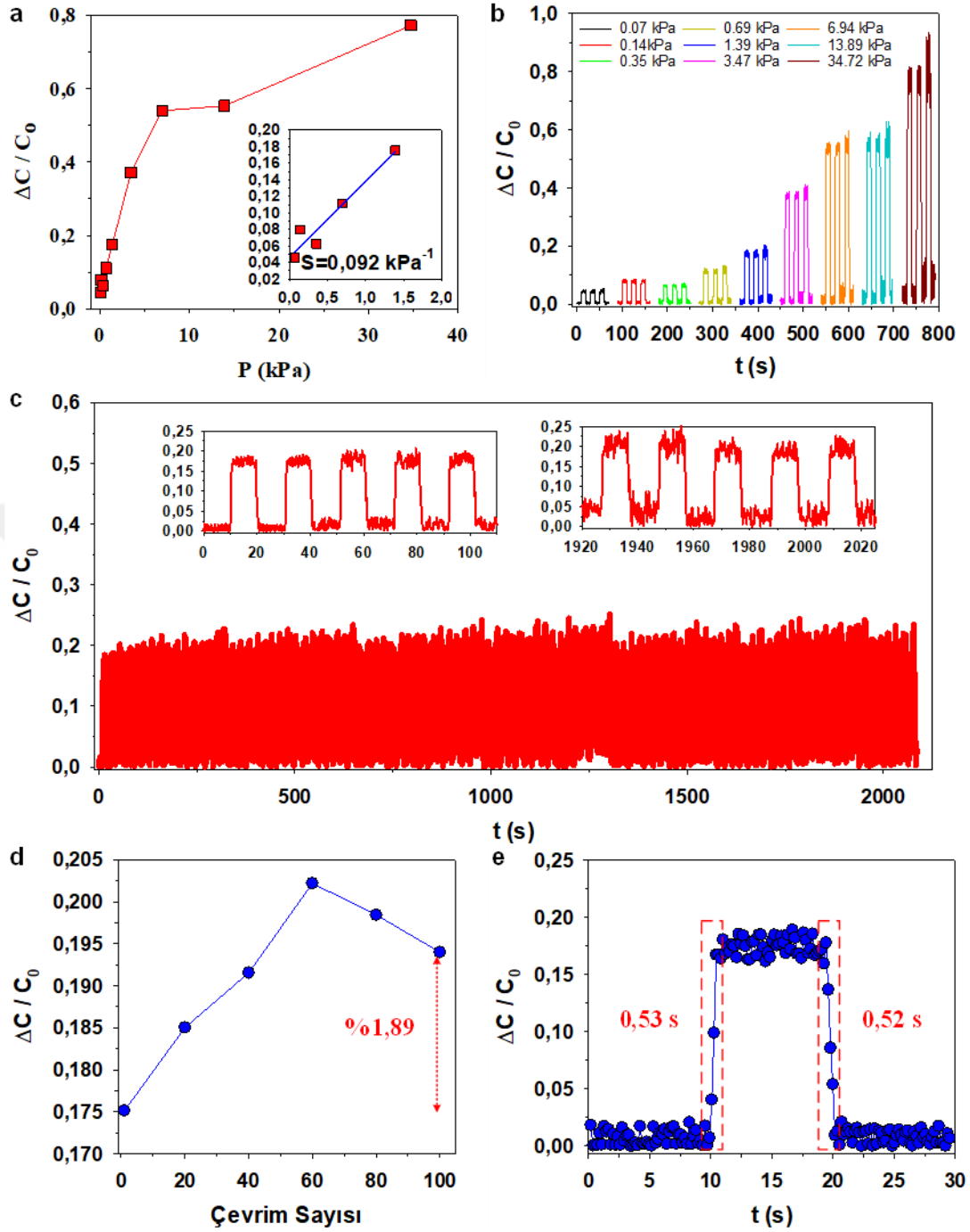
Şekil 5.46 25P73U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



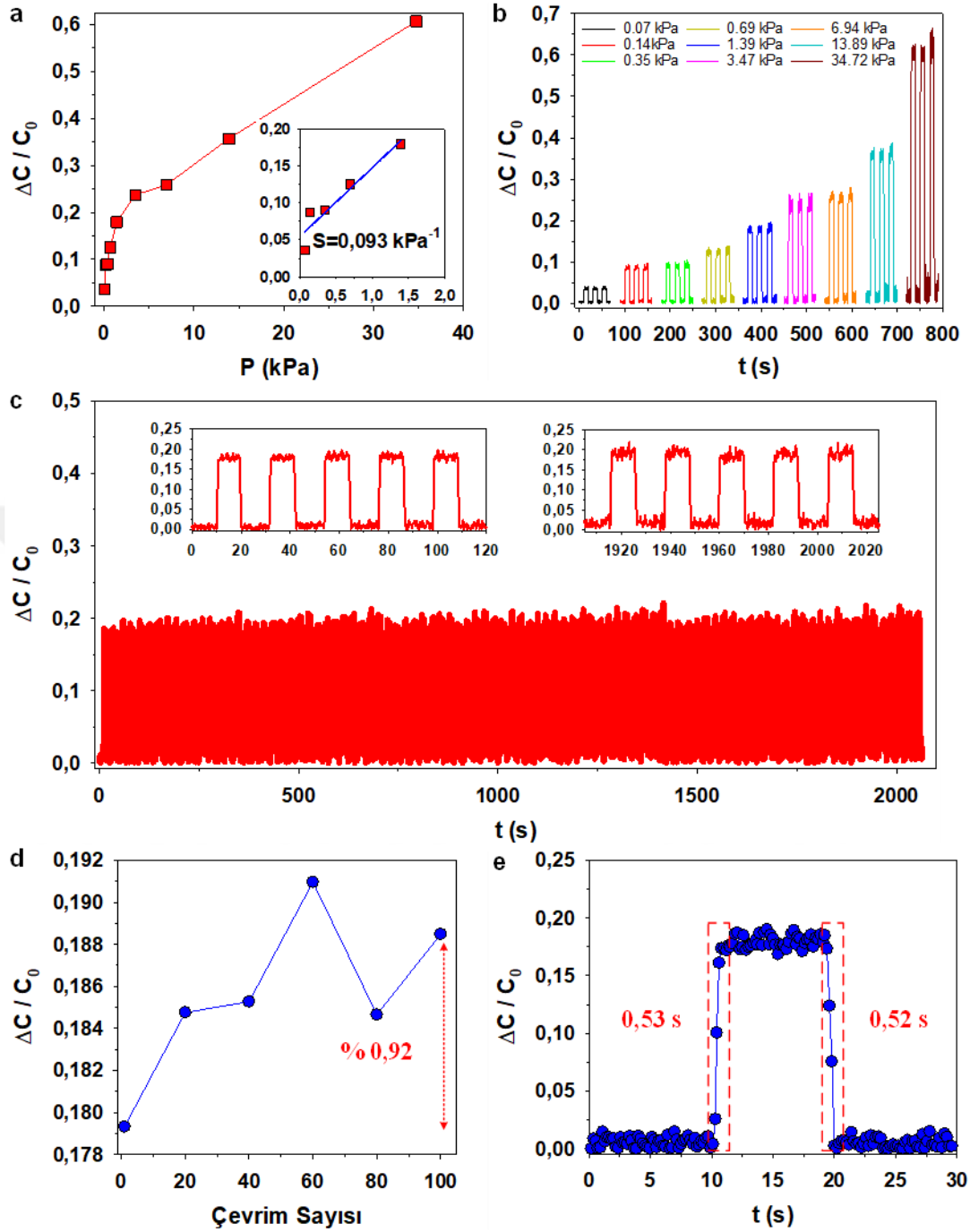
Şekil 5.47 25P69U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



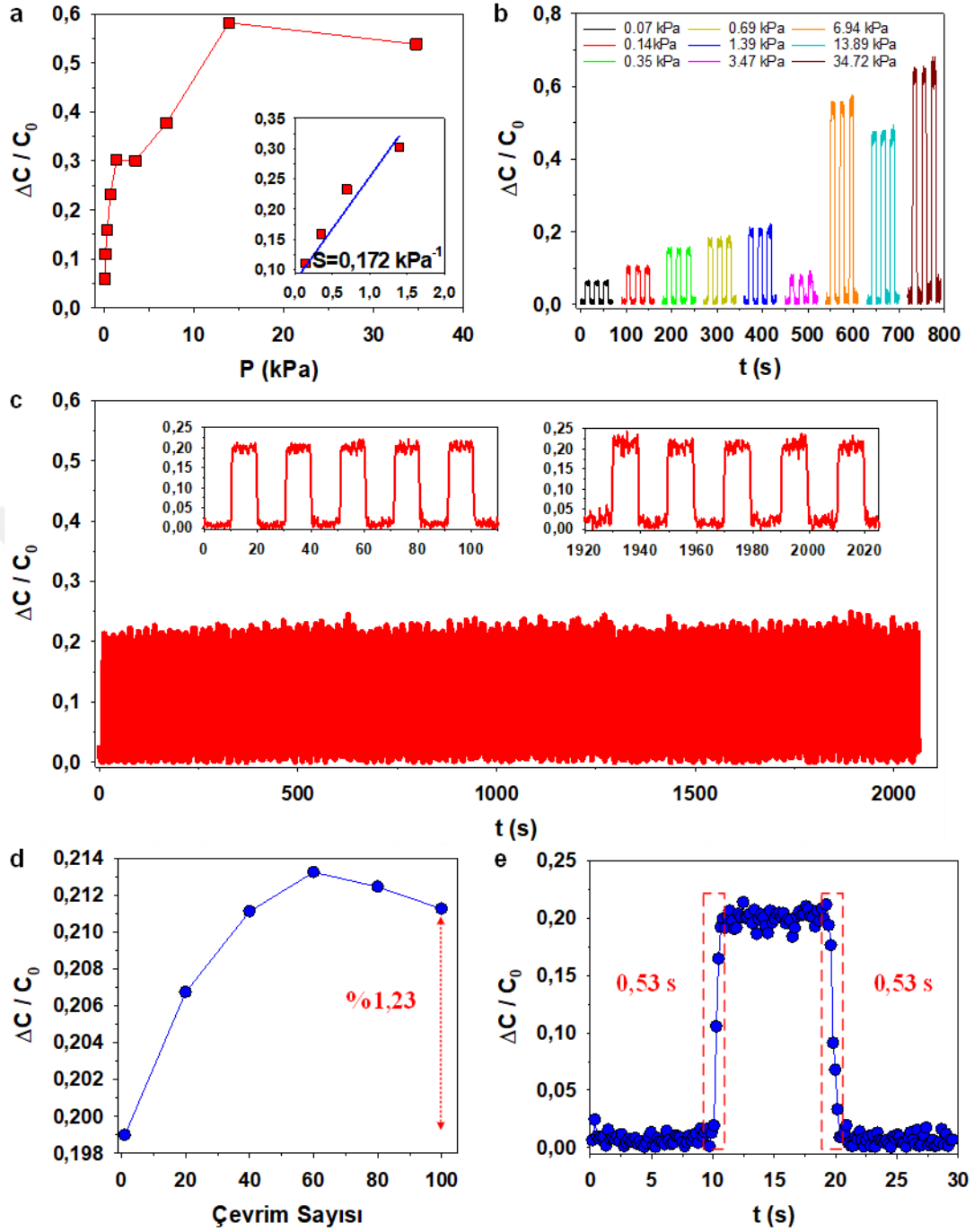
Şekil 5.48 50P50U numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



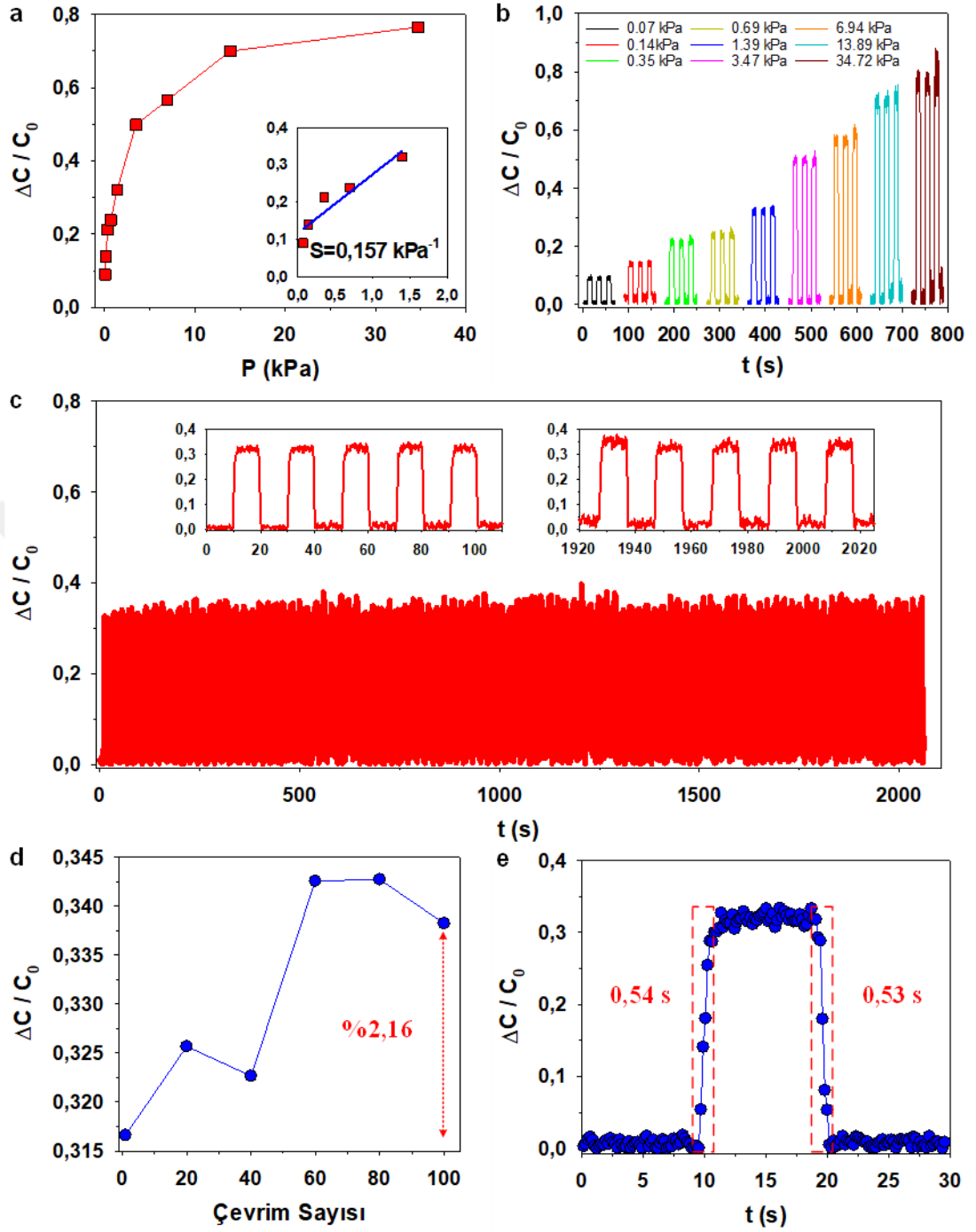
Şekil 5.49 50P45U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.50 50P44U5M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.51 75P23U1M1C numunesinin uygulanan basınca göre bağıl kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağıl kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri



Şekil 5.52 75P20U5M numunesinin uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimi ve hassasiyeti, (b) artan basınç değerlerine göre bağlı kapasitans değişimi kararlılığı, (c) 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim, (d) 1,39 kPa basınç altında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve (e) uygulanan farklı basınç değerlerine göre ortalama tepki ve gevşeme süreleri

Şekil 5.45-5.52'deki grafiklerin (a) şıklarında uygulanan basınca göre bağlı kapasitans değişimleri ve hassasiyetleri yer almaktadır. $P < 2 \text{ kPa}$ basınç altında 25P74U1C, 25P69U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M numunelerin hassasiyet değerleri

sırasıyla 0,124 kPa⁻¹, 0,114 kPa⁻¹, 0,172 kPa⁻¹ ve 0,157 kPa⁻¹'dir (Tablo 5.13). R² değerleri de sırasıyla 0,9493; 0,9595; 0,9231 ve 0,8910'dur. Uygulanan basıncın artması ile birlikte bağıl kapasitans değişiminde lineer davranışın kaybolduğu görülmektedir. Bu numunelerde lineer davranışın sürdüğü 2 kPa altındaki basınç değerlerini daha hassas algılayabildiği görülmektedir.

Şekil 5.45-5.52'deki grafiklerin (b) şıklarında yer alan uygulanan farklı basınçlara göre 3'er çevrim içeren bağıl kapasitans değişim kararlılığı yer almaktadır. Her bir çevrim, numuneye 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanması ve hemen ardından uygulanan basıncın geri alınması süreçlerinden oluşmaktadır. Her çevrim sonucunda basınç altındaki elde edilen bağıl kapasitans değişim verileri, (a) şıkında yer alan bağıl kapasitans değişimlerinde ve hassasiyetin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Tablo 5.13 Kapasitif sensörlerin hassasiyet değerleri

Numune Adı	P<2 kPa	
	S (kPa ⁻¹)	R ²
25P74U1C	0,124	0,9493
25P73U1M1C	0,050	0,9132
25P69U5M1C	0,114	0,9595
50P50U	0,090	0,8836
50P45U5M	0,092	0,9305
50P44U5M1C	0,093	0,9028
75P23U1M1C	0,172	0,9231
75P20U5M	0,157	0,8910

Şekil 5.45-5.52'deki grafiklerin (c) şıklarında 1,39 kPa basınç altında 100 çevrim sonucunda numunenin bağıl kapasitans değişimlerini vermektedir. 100 çevrim sonucunda elde edilen bağıl kapasitans değişimleri dikkate alınarak, (d) şıklarında çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Bu değerlerin büyük olması kararlılığı olumsuz yönde etkilemekle birlikte 25P69U5M1C (%1,44), 50P50U (%2,32), 50P45U5M (%1,89), 75P23U1M1C (%1,23) ve 75P20U5M (%2,16) numuneleri en yüksek değerlere sahiptir. En düşük değişim değerleri 25P74U1C (%0,79) ve 25P73U1M1C (%0,79) numunelerinde görülmektedir (Tablo 5.14).

Tablo 5.14 Kapasitif sensörlerin kararlılıktaki yüzdelik değişimi

Numune Adı	Değişim (%)
25P74U1C	0,79
25P73U1M1C	0,79
25P69U5M1C	1,44
50P50U	2,32
50P45U5M	1,89
50P44U5M1C	0,92
75P23U1M1C	1,23
75P20U5M	2,16

Şekil 5.45-5.52'deki grafiklerin (e) şıklarında ortalama tepki ve gevşeme sürelerinin vermektedir. Tablo 5.15'de verilen süreler incelendiğinde, 1 s altında tepkiler oluşturduğu görülmekle birlikte ortalama algılama süreleri 0,50 s civarında olduğu görülmektedir.

Tablo 5.15 Kapasitif sensörlerin tepki ve gevşeme süreleri

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P74U1C	0,07	0,55±0,02	0,62±0,03
	0,14	0,72±0,08	0,34±0,02
	0,35	0,64±0,01	0,42±0,04
	0,69	0,45±0,07	0,52±0,04
	1,39	0,38±0,05	0,31±0,07
	3,47	0,29±0,04	0,28±0,09
	6,94	0,38±0,04	0,35±0,07
	13,89	0,88±0,07	0,82±0,05
	34,72	0,93±0,06	0,69±0,03
	ORTALAMA	0,58±0,05	0,48±0,05
25P73U1M1C	0,07	0,82±0,02	0,47±0,03
	0,14	0,72±0,03	0,69±0,09
	0,35	0,47±0,04	0,49±0,04
	0,69	0,89±0,07	0,71±0,06
	1,39	0,70±0,06	0,75±0,07
	3,47	0,43±0,07	0,56±0,08
	6,94	0,49±0,04	0,32±0,07
	13,89	0,54±0,03	0,45±0,09
	34,72	0,60±0,04	0,53±0,08
	ORTALAMA	0,62±0,04	0,55±0,07

Tablo 5.15'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
25P69U5M1C	0,07	0,29±0,03	0,23±0,04
	0,14	0,33±0,06	0,31±0,03
	0,35	0,42±0,05	0,56±0,05
	0,69	0,82±0,03	0,98±0,06
	1,39	0,72±0,08	0,73±0,02
	3,47	0,38±0,04	0,27±0,01
	6,94	0,46±0,06	0,65±0,02
	13,89	0,47±0,09	0,45±0,05
	34,72	0,67±0,04	0,52±0,02
	ORTALAMA	0,51±0,05	0,52±0,03
50P50U	0,07	0,42±0,02	0,48±0,02
	0,14	0,47±0,04	0,55±0,05
	0,35	0,65±0,04	0,63±0,04
	0,69	0,29±0,05	0,35±0,01
	1,39	0,34±0,01	0,42±0,02
	3,47	0,38±0,09	0,53±0,08
	6,94	0,27±0,01	0,33±0,05
	13,89	0,35±0,02	0,56±0,04
	34,72	0,42±0,04	0,39±0,01
	ORTALAMA	0,40±0,04	0,47±0,04
50P45U5M	0,07	0,58±0,02	0,37±0,03
	0,14	0,62±0,04	0,31±0,02
	0,35	0,43±0,03	0,43±0,01
	0,69	0,37±0,05	0,65±0,02
	1,39	0,28±0,01	0,26±0,01
	3,47	0,78±0,08	0,29±0,03
	6,94	0,83±0,10	0,38±0,06
	13,89	0,72±0,06	0,67±0,07
	34,72	0,48±0,04	0,72±0,09
	ORTALAMA	0,57±0,05	0,45±0,04
50P44U5M1C	0,07	0,54±0,04	0,73±0,05
	0,14	0,47±0,05	0,56±0,07
	0,35	0,38±0,02	0,47±0,02
	0,69	0,82±0,09	0,75±0,08
	1,39	0,42±0,02	0,52±0,01
	3,47	0,78±0,06	0,69±0,03
	6,94	0,91±0,09	0,89±0,10
	13,89	0,43±0,03	0,56±0,04
	34,72	0,62±0,02	0,63±0,04
	ORTALAMA	0,60±0,05	0,64±0,05

Tablo 5.15'in devamı

Numune Adı	Basınç (kPa)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)
75P23U1M1C	0,07	0,82±0,05	0,46±0,04
	0,14	0,75±0,05	0,52±0,05
	0,35	0,41±0,02	0,61±0,08
	0,69	0,83±0,09	0,95±0,09
	1,39	0,48±0,07	0,72±0,04
	3,47	0,28±0,01	0,48±0,02
	6,94	0,39±0,01	0,25±0,03
	13,89	0,32±0,04	0,38±0,01
	34,72	0,46±0,02	0,41±0,07
	ORTALAMA	0,53±0,04	0,53±0,05
75P20U5M	0,07	0,48±0,01	0,42±0,07
	0,14	0,58±0,02	0,69±0,03
	0,35	0,72±0,03	0,42±0,04
	0,69	0,98±0,10	0,78±0,04
	1,39	0,24±0,05	0,42±0,05
	3,47	0,38±0,04	0,21±0,08
	6,94	0,42±0,06	0,49±0,07
	13,89	0,41±0,04	0,53±0,05
	34,72	0,65±0,02	0,79±0,02
	ORTALAMA	0,54±0,04	0,53±0,05

Serigrafi yöntemi ile üretilmiş olan sensörlerin Denklem 2.5 ve 2.6'ya hesaplanmış yüzdelik doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri Tablo 5.16'da yer almaktadır. Doğrusallık hatası en düşük 25P73U1M1C (%0,84) numunesinde görülmektedir. 75P20U5M (%3,06) numunesi ise en yüksek doğrusallık hatası değerine sahiptir. Tekrarlanabilirlik hatasında ise en düşük değer %1,78 ile 25P74U1C numunesine aittir. En yüksek tekrarlanabilirlik hata değerleri ise %5,12 ile 50P50U ve 50P45U5M numunelerine aittir.

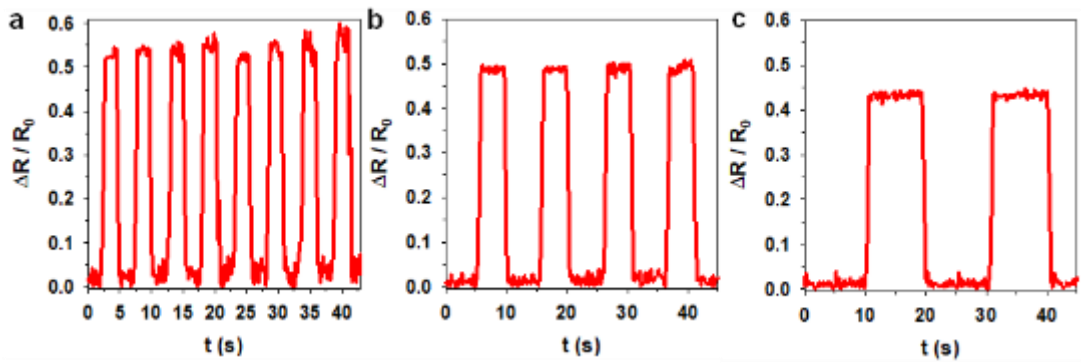
Tablo 5.16 Kapasitif sensörlerin doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri

Numune Adı	Doğrusallık Hatası (%)	Tekrarlanabilirlik Hatası (%)
25P74U1C	1,73	1,78
25P73U1M1C	0,84	2,10
25P69U5M1C	1,56	2,37
50P50U	1,86	5,12
50P45U5M	1,54	5,12
50P44U5M1C	1,89	2,13
75P23U1M1C	2,63	2,58
75P20U5M	3,06	3,38

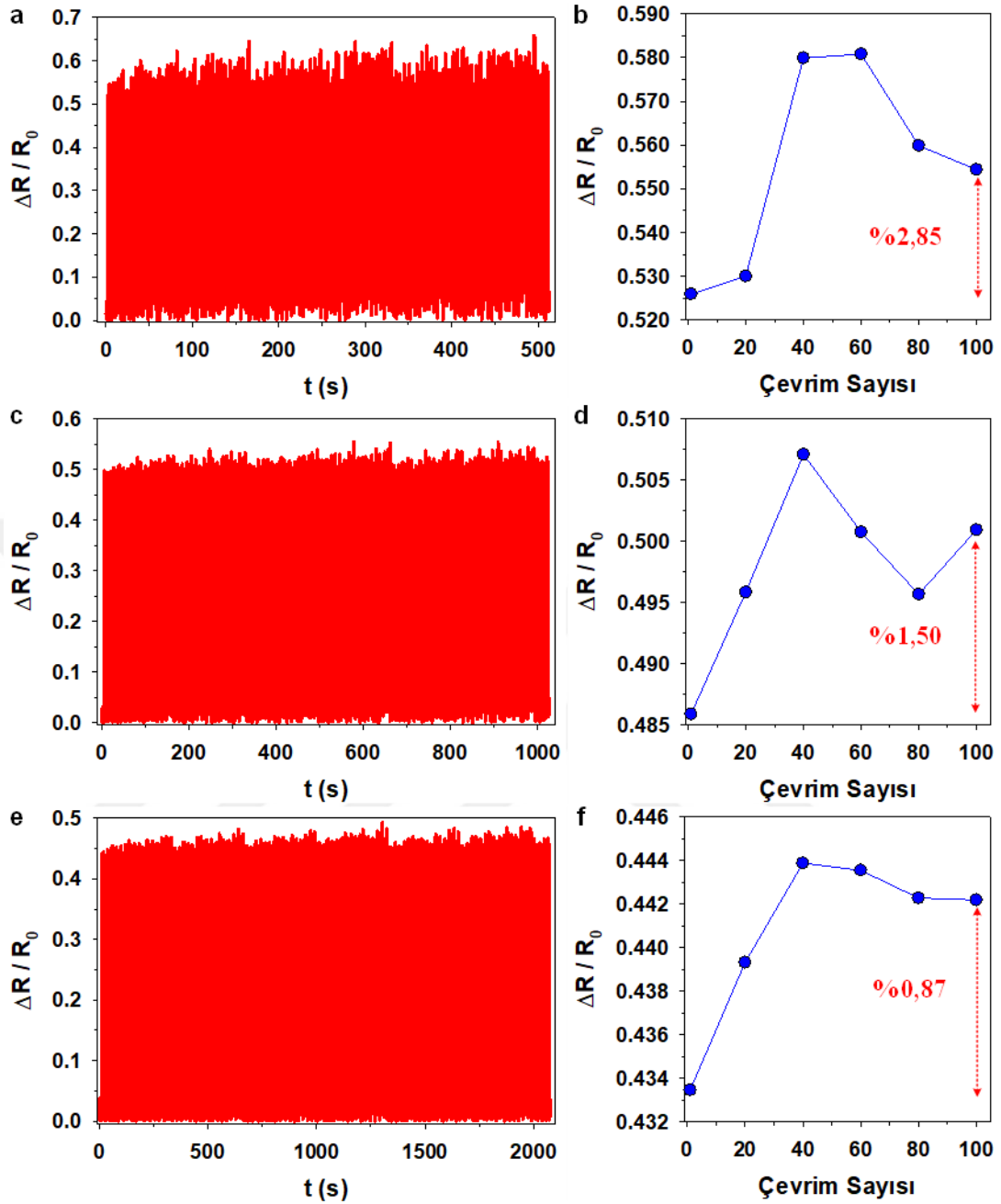
Tüm bu sonuçlar incelendiğinde, 25P74U1C, 25P69U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M numuneleri yüksek hassasiyet değerlerine sahiptir. Tablo 5.14'deki kararlılıktaki yüzdelik değişimleri incelendiğinde, 25P69U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M numunelerinin yüzdelik değişimleri, 25P74U1C numunesine göre yüksektir. Bu değerlerin yüksek olması çevrim sayısına göre bağıl kapasitans değişiminin yüksek olması anlamına gelmekte olup, sensör performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, düşük kararlılıktaki yüzdelik değişime ve tekrarlanabilir hatasına sahip olan 25P74U1C numunesi potansiyel esnek kapasitif sensör adaydır.

5.2.2.3 Serigrafi yöntemi ile üretilen piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerin değişken frekanslardaki elektromekanik ölçümleri

Yukarıdaki elektromekanik ölçümler sonucunda potansiyel esnek piezorezistif basınç sensörü için 75P20U5M numunesi ve potansiyel esnek kapasitif basınç sensörü için 25P74U1C numunesi aday olarak seçilmiş olup, yukarıdaki tüm elektromekanik ölçümler 0,05 Hz frekansında gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak iki esnek sensör adayı için 0,1 ve 0,2 Hz frekansında 1,39 kPa basınç uygulanarak 100 çevrim gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimlerle birlikte bağıl direnç ve kapasitans değişimleri ölçülmüştür. Bu sayede frekans değerindeki artış ile birlikte basınca vereceği tepki gözlemlenerek, tepki süreleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda, kararlılığı ve yüzdelik değişimi incelenerek performansı incelendi.



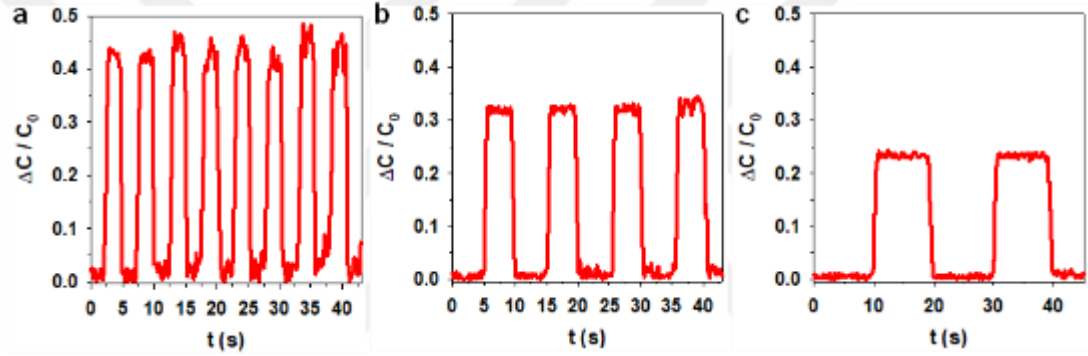
Şekil 5.53 75P20U5M numunesinin 1,39 kPa basınç altında (a) 0,2 Hz, (b) 0,1 Hz ve (c) 0,05 Hz frekansa bağlı bağıl direnç değişimi kararlılığı



Şekil 5.54 75P20U5M numunesinin (a) 0,2 Hz, (c) 0,1 Hz ve (e) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak 1,39 kPa basınç altında 100 çevrimli bağıl direnç değişimi kararlılığı ve (b) 0,2 Hz, (d) 0,1 Hz ve (f) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi

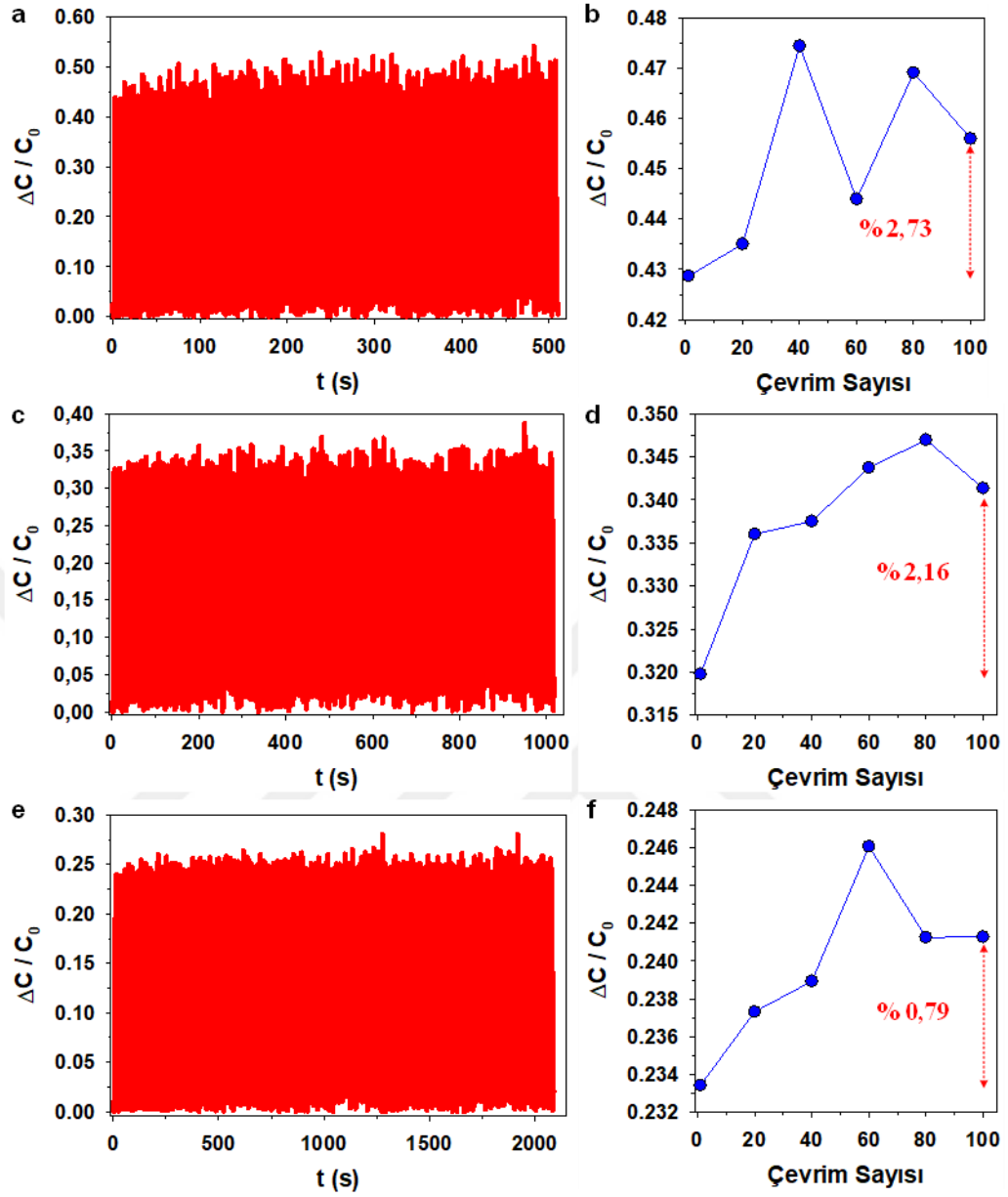
Şekil 5.53’de 75P20U5M numunesinin 3 farklı frekanstaki bağıl direnç değişimi gösterilmektedir. Şekil 5.54’da ise 100 çevrim sonucunda bağıl direnç değişim kararlılığı ve çevrim sayısına göre kararlılığındaki yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Frekans değerinin 0,2 Hz’den 0,05 Hz’e azalışı ile birlikte bağıl direnç değişiminin azaldığı ve kararlılığın arttığı görülmektedir. Aynı zamanda, frekansın azalışı ile birlikte yüzdelik değişiminde %2,85’den %0,87’e düştüğü görülmektedir.

Bu durum sensörün performansını etkilemekte olup, frekans artışı ile olumsuz etkilendiği görülmektedir. Tablo 5.17’de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, frekans artışı ile birlikte tepki süresinin arttığı ve gevşeme süresinin biraz azaldığı görülmeye rağmen sürelerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, frekans artışı ile tekrarlanabilirlik hata değerlerinin de %0,89’dan %4,25’e yükseldiği görülmektedir. Bu durum, yüksek elastik modülüne sahip olan parilen C ve PMMA’da oluşan numuneye uygulanan basınç ile birlikte polimer zincirlerinin deforme olması ve tekrardan aynı konuma gelmesi sürecinde ölçülen sinyal değerinde farklılık gözlenmektedir. Farklı frekanslarda uygulanan basınca, numune tepki vermekte gecikmektedir.



Şekil 5.55 25P74U1C numunesinin (a) 0,2 Hz, (b) 0,1 Hz ve (c) 0,05 Hz frekansa bağlı bağlı kapasitans değişimi kararlılığı

Şekil 5.55’de 25P74U1C numunesinin 3 farklı frekanstaki bağlı kapasitans değişimi yer almaktadır. Frekansın azalması ile birlikte bağlı kapasitans değişiminin 0,45’ten 0,25’e düştüğü görülmektedir. Şekil 5.56’da 100 çevrim sonucunda bağlı kapasitans değişimi ve çevrim sayısına göre bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Frekans değerinin artışı ile birlikte bağlı kapasitans değişiminin arttığı ve yüzdelik değişiminde %0,79’dan %2,73’e yükseldiği görülmektedir. Tablo 5.17’de yer alan tepki ve gevşeme süreleri incelendiğinde, frekansın artışı ile bu sürelerin arttığı görülmektedir. Tekrarlanabilirlik hata değerleri incelendiğinde, frekans artışı ile %1,78’den %4,09’a yükselmiştir.



Şekil 5.56 25P74U1C numunesinin (a) 0,2 Hz, (c) 0,1 Hz ve (e) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak 1,39 kPa basınç altında 100 çevrimli bağıl kapasitif değişimi ve (b) 0,2 Hz, (d) 0,1 Hz ve (f) 0,05 Hz frekansa bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi

Tablo 5.17 Farklı frekansta tepki ve gevşeme süreleri, kararlılıktaki yüzdelik değişimi ve tekrarlanabilirlik hatası

Numune Adı	Frekans (Hz)	Tepki Süresi (s)	Gevşeme Süresi (s)	Değişim (%)
75P20U5M	0,20	0,45±0,03	0,53±0,04	2,85
	0,10	0,39±0,02	0,60±0,07	1,50
	0,05	0,42±0,05	0,64±0,02	0,87
25P74U1C	0,20	0,43±0,06	0,36±0,08	2,73
	0,10	0,39±0,06	0,36±0,04	2,16
	0,05	0,38±0,05	0,31±0,07	0,79

5.3 Ferroelektrik ve Piezoelektrik Özelliklerinin İncelenmesi

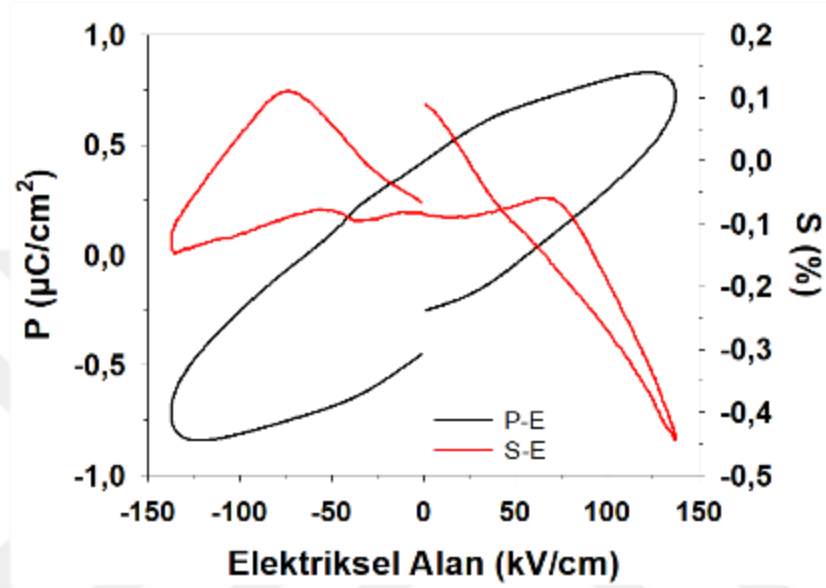
Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilen parilen C filmin optimum bir süre, sıcaklık ve kutuplama alanına bağlı olarak ferroelektrik ve piezoelektrik özellikleri arttırılabilmektedir. Fakat, parilen C'nin camısı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda uygulanan kutuplama alanında dipol momentler, amorf polimer zincirleri tarafından çevrenmesi ile olumsuz etkilemektedir. Bu durum, daha düşük piezoelektrik davranış göstermesine neden olabilmektedir (Kim, 2011). Parilen C'nin camısı geçiş sıcaklığının 42,8°C olması, sensörleri birleştirmek için kullanılacak PET'in 80°C'de camısı geçiş sıcaklığına sahip olması ve sensörün çalışma sıcaklığının 60°C olarak belirlenmesi sebebiyle 50°C'de elektriksel kutuplama işlemi gerçekleştirildi. Kutuplama süresi de 10 dakika olarak belirlendi (Kim, 2013).

Ferroelektrik Ölçüm Ünitesinde, 290 µm kalınlıktaki parilen C için polarizasyon-elektriksel alan (P-E) ile elektromekaniksel performans için gerinim-elektriksel alan (S-E) ölçümleri gerçekleştirildi. Gerinim özelliği, aynı zamanda ters piezoelektrik etki olarak da adlandırılan uygulanan elektrik alan altında ferro/piezoelektrik malzemelerde yer değiştirmeyi (displacement) ifade etmektedir. Elde edilen S-E eğrisinden, ters piezoelektrik katsayısı olan d_{33}^* , aşağıda verilen Denklem 5.1 kullanılarak hesaplanır (Bayındır, 2020).

$$d_{33}^* = \frac{S_{maks}}{E_{maks}} \quad (5.1)$$

Burada S_{maks} , maksimum gerinim değeri ve E_{maks} , maksimum elektrik alanıdır. Şekil 5.57'de P-E ölçümünden elde edilen histerisiz eğrisinde doyum gerçekleşmediği görülmekle birlikte zorlayıcı alanın (E_c) 56,30 kV/cm, kalıcı polarizasyonun (P_r) 0,42 µC/cm² ve doyumluk polarizasyonun (P_s) 0,72 µC/cm² değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Normal ferroelektriklerin tipik bipolar S-E eğrisi “kelebek” benzeri bir görünüme sahiptir. Burada da aynı davranış görülmektedir. Gerinim değeri %0,07 olarak ölçülmüştür. d_{33}^* değeri ise 1,2 pm/V'dir. Bu değer, PVDF'in ters piezoelektrik katsayısına (19,2 pm/V) göre 16 kat düşüktür (Cauda vd. 2012). Ayrıca, histerezis eğrilerinde sıfır elektrik alan altında kopmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Bu

durum domainlerin sabit bir elektrik alanı altında veya sıfır elektrik alanı altında kritik boyuttan daha fazla büyümesinden kaynaklanabilir. Domainlerin kritik boyutun üstünde bir değere kadar büyümesi bazen tersine yönlendirilmiş alanlara hükmedecek ölçüde olabildiğinden sıfır gerilim altında ters polarizasyonda histerezis eğrisinin sapmasına sebep olabileceği düşünülmektedir (Yoo ve Desu, 1994).



Şekil 5.57 290 μm kalınlıktaki parilene C filminin P-E ve S-E ölçümü

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Son yıllarda insan-makine etkileşimi, elektronik deri, yumuşak robot uygulamaları ve sağlığın izlenilmesindeki geliştirmeler, basınç sensörlerin esneme, sıkıştırılma, bükülme ve deforme olma yeteneğine sahip olması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Geleneksel sensörlerin bu ihtiyacı karşılayamaması esnek basınç sensörlerin ortaya çıkışında kritik rol oynamıştır. Yüksek hassasiyete sahip esnek basınç sensörlerin üretiminde malzeme seçimi önemli olmakla birlikte sıkça kullanılan malzemelere alternatif olarak parilen C, yüksek elektriksel izolasyon, biyouyumluluk ve organik çözücülere karşı kimyasal dayanıklılık gösteren bir polimerdir. Ticarileştiği yıl olan 1966'dan beri medikal ve elektronik uygulamalarda koruyucu tabaka olarak sıkça kullanılmaktadır. Piezoelektrik özelliklerin ilk kez 2011 yılında keşfedilmesi ile birlikte esnek basınç sensörlerinde kullanılabilecek potansiyel bir malzeme haline gelmiştir.

Bu tez kapsamında, Parilen C'nin piezoelektrik özelliklerinin tanımlanması ile esnek basınç sensörü uygulamalarında potansiyel olarak kullanılıp kullanılamayacağına odaklanılmıştır. İlk defa bu tez ile parilen C tabanlı esnek piezoelektrik sensör üretilmiştir. Ayrıca; esnek piezorezistif ve kapasitif basınç sensörleri de üretilmiştir. Bu çalışma ile birlikte elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Parilen C, kimyasal buhar biriktirme yönteminde yer alan süblimleşme, piroliz ve biriktirme süreçleri ile dimer formundan polimer formuna dönüştürülerek, sentezlenmiştir. Sentezlenen parilen C, 1,2 diklorbenzen içerisinde çözdürülmüş ve ağırlıkça çeşitli oranlarda poliüretan (PU), poli(metil metakrilat) (PMMA) ve aktif karbon eklenerek, basınca duyarlı mürekkepler hazırlanmış ve 19 adet numune üretilmiştir.
- Üretilen numunelerin karakterizasyonu için XRD, SEM, FTIR, TGA ve DSC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça farklı oranlarda kullanılan malzemelerin kompozit yapı içerisinde etkileri ve değişimleri incelenmiştir.
- Piezoelektrik ölçümler ile ters piezoelektrik katsayısı olan d_{33}^* hesaplanmış, 290 µm kalınlıktaki parilen C filmi için 1,20 pm/V bulunmuştur.

- Elektromekanik ölçümler ile karakteristik özellikleri olan piezoelektrik, piezorezistif ve kapasitif değişimleri tespit edilmiştir.
- Elektromekanik ölçümler sonucunda gerilim değişimi, kararlılığı, hassasiyet ve R^2 değerleri incelendiğinde, basıncı algılama performansının kötü olduğu görülmektedir. Bu nedenle, parilen C tabanlı numunelerin verimli bir esnek piezoelektrik basınç sensörü olarak kullanılamayacağı belirlenmiştir.
- Elektromekanik ölçümlerden elde edilen bağıl direnç değişimi, hassasiyet, çevrimlerdeki kararlılığı, tepki süreleri, R^2 değerlerinin yanı sıra yapısal, morfolojik, kimyasal ve termal özelliklerinin incelenmesi sonucunda 25P69U5M1C, 50P50U ve 75P20U5M numuneleri potansiyel esnek piezorezistif basınç sensör adaylarıdır.
- Elektromekanik ölçümlerden elde edilen bağıl kapasitans değişimi, hassasiyet, çevrimlerdeki kararlılığı, tepki süreleri, R^2 değerlerinin yanı sıra yapısal, morfolojik, kimyasal ve termal özelliklerinin incelenmesi sonucunda 25P74U1C, 25P73U1M1C, 25P69U5M1C, 50P50U, 50P45U5M, 50P44U5M1C, 75P23U1M1C ve 75P20U5M numuneleri potansiyel esnek kapasitif basınç sensör adaylarıdır.
- Sensör adayı olan numuneler, serigrafi yöntemi kullanılarak esnek sensörler haline getirilmiştir. 0,07-34,72 kPa aralığında basınç uygulanarak, piezorezistif ve kapasitif değişimleri tespit edilmiştir. Bu değişimlerden yola çıkarak, basıncı algılama bölgesi tespit edilmeye, hassasiyeti, kararlılık yüzdelik değişimini, tepki ve gevşeme sürelerini, doğrusalık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.
- Üretilen 8 adet numunenin bağıl direnç değişim kararlılığı, hassasiyeti, sabit basınç altında 100 çevrimdeki bağıl direnç değişimi, çevrim sayısına bağlı olarak kararlılıktaki yüzdelik değişimi, tepki ve gevşeme süreleri, doğrusalık ve tekrarlanabilirlik hata değerleri dikkate alındığında, hassasiyetinin yüksek olması ve düşük tekrarlanabilirlik hatasına sahip olması sebebiyle 75P20U5M numunesi potansiyel esnek piezorezistif basınç sensörü adayıdır.
- Düşük kararlılıktaki yüzdelik değişime ve tekrarlanabilir hatasına sahip olan 25P74U1C numunesi potansiyel esnek kapasitif basınç sensörü adayıdır.
- Frekans değerinin 0,2 Hz'den 0,05 Hz'e azalışı ile birlikte bağıl direnç ve kapasitans değişiminin azaldığı ve kararlılığın arttığı görülmektedir.

Tablo 6.1’de literatürdeki çalışmalar içerisinde düşük ve orta basınç bölgesinde algılama gerçekleştiren esnek piezorezistif ve kapasitif sensörlere ait sonuçlar ile bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Bazı çalışmalarda görülen hassasiyet ve tespit aralığı değerleri kıyaslanabilir olmasına rağmen, elde edilen sonuçların düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Fakat, doğrusallık aralıkları ve tespit limitleri kıyaslanabilir mertebededir. Shao vd. (2017) ve Wang vd. (2023) çalışmalarında parilen C kullanılarak esnek sensörler geliştirmişlerdir. Shao vd. (2017) çalışmasındaki sonuçlar ile elde ettiğimiz sonuçlar kıyaslandığında hassasiyetin 10 kat düşük olduğunda görülmesine rağmen, doğrusallık aralığının elde ettiğimiz sonuçtan neredeyse 12 kat geniş olduğu görülmektedir. Wang vd. (2023) çalışmasındaki sonuçlar incelendiğinde, hassasiyetin büyük olduğunu görülmektedir. Fakat, doğrusallık aralığı da elde ettiğimiz sonucun yarısı kadardır. Literatürdeki çalışmalarda dayanıklılığı tanımlayan çevrim sayısının oldukça yüksek olması, sensör performansını özellikle doğrusallık ve tekrarlanabilirlik hata değerlerini tanımlamada önemli bir etkidir. Bu çalışmada ise dayanıklılık daha az sayıda çevrim ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.1 Literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılması

Malzeme	Hassasiyet (kPa ⁻¹) /Doğrusallık aralığı (kPa)	Tespit Aralığı (kPa)	Tespit Limiti (Pa)	Dayanıklılık (çevrim)	Referans
rGO/ PDMS	25,1 / 0-2,6	0-40	16	3000	Pang vd. 2018
AgNWs/PDMS	14,1 / 0-3,5	0-40	-	1000	Dan vd. 2019
CB/PDMS	124 / 0-0,2	0-50	2	1200	Zhou vd. 2019
CNWs/PDMS	6,64 / 0-0,1	0-10	0,6	1000	Zhou vd. 2019
G/PDMS	480 / 0-0,1	0-1	-	4000	Zhu vd. 2019
PPy/PDMS	1907,2 / <0,1	<1,9	0,075	15000	Li vd. 2018
AgNWs/PDMS	20,08 / <0,800	0-2,1	50	10000	Mao vd. 2019
CNT/PDMS	47062 / <1	0-26	0,09	1000	Park vd. 2018

Tablo 6.1'in devamı

Malzeme	Hassasiyet (kPa ⁻¹) /Doğrusallık aralığı (kPa)	Tespit Aralığı (kPa)	Tespit Limiti (Pa)	Dayanıklılık (çevrim)	Referans
Grafen/PDMS	1875,5 / <20	0-40	1,8	15000	He vd. 2019
PAC/MWCNT	0,012 / 0-17,5	-	-	-	Shao vd. 2017
PAC/Elastomer	1,33 / 0-0,758	-	-	-	Wang vd. 2023
PDMS/Ag/PI/Au	259,32 / 0-2,5	0-54	0,36	-	Chen vd. 2019
Grafen/HIE-LM PDMS	8,5 / 0-12	0-12	1	10000	Bae vd. 2016
PPy/PDMS	449 / < 0,01	> 0,6	0,14	-	Yang vd. 2019
MWCNT/HPM- PDMS	83,9 / < 0,140	0-10	0,5	28000	Zhao vd. 2019
ACNT/G/m- PDMS	19,8 / <0,3	0-6	0,6	35000	Jian vd. 2017
VACNT/PDMS	0,3 / <0,7	0-2	20	5000	Kim vd. 2017
CNT/Ecoflex	0,00023 / <50	0-10	50	-	Lipomi vd. 2011
PDMS/PS	0,741 / <3	0-50	19	1000	Cui vd. 2017
Grafen/PET	0,0655 / 3-12	0-30	500	500	Pyo vd. 2017
PDMS/Grafit	0,62 / <2	0-80	6	5000	Lee vd. 2017
25P74U1C	0,124 / 0,07-1,39	0,07-1,39	70	100	Bu çalışmada
75P20U5M	0,152 / 0,07-1,39	0,07-1,39	70	100	Bu çalışmada

Single Tact ve Tekscan şirketlerine ait endüstriyel olarak kullanılan esnek sensörler ile bu çalışma sonucunda potansiyel olarak tanımlanan esnek piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerinin sonuçları Tablo 6.2'de yer almaktadır. Öncelikli olarak ticari sensörlerin tepki süreleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen sürelerin kıyaslanamayacak ölçüde büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, tekrarlanabilirlik hata değerlerinin ticari sensörlere göre büyük olmasına rağmen, doğrusallık hatası kıyaslanabilir değerlerdedir. Fakat Tekscan A101 sensörüne ait

çevrim sayısının 3 milyonun üzerinde olması, potansiyel esnek sensörlerin çevrim sayısının 100 ile sınırlı olması sonucu doğrusallık hata değerlerini kıyaslanabilir değerler haline getirmemektedir.

Tablo 6.2 Endüstriyel sensörler ile karşılaştırılması

Numune Adı	Mekanizma	Tepki Süresi	Doğr. Hatası (%)	Tekr. Hatası (%)	Çevrim	Referans
75P20U5M	Piezorezistif	<1 s	0,89	4,25	100	-
Tekscan A101		<5 μ s	<3	<3	>3 Milyon	A101, 2023
25P74U1C	Kapasitans	<1 s	1,78	4,09	100	-
SingleTact		<1 ms	<2	<1	-	SingleTact, 2023

Sonuç olarak, tez kapsamında kullanılan parilen C'nin kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak polimer formu üretilmiştir. Bu polimer ile birlikte üç farklı malzeme de kullanılarak, basınca duyarlı mürekkepler üretilmiş olup, hedeflenen karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. MEMS uygulamalarında koruyucu tabaka olarak kullanılan parilen C'nin düşük basınç uygulamalarında esnek piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerde kullanılabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdelrazek, E. (2004). Physical properties of MgCl₂-filled PMMA films for optical applications. *Physica B: Condensed Matter*, 351(1-2), 83–89. doi:10.1016/j.physb.2004.05.015.
- Ahrabi, A. Z. (2009). Pet atıkları kullanılarak kompozit malzeme üretiminin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. R. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *RSC Advances*, 6(115), 114453–114482. doi:10.1039/c6ra14525f.
- Alan N Gent. (2012). *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
- Ali, U., Karim, K. J. B. A., & Buang, N. A. (2015). A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA). *Polymer Reviews*, 55(4), 678–705. doi:10.1080/15583724.2015.1031377.
- Alrammouz, R., Podlecki, J., Abboud, P., Sorli, B., & Habchi, R. (2018). A review on flexible gas sensors: From materials to devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 284, 209–231. doi: 10.1016/j.sna.2018.10.036.
- Amoli, V., Kim, S. Y., Kim, J. S., Choi, H., Koo, J., & Kim, D. H. (2019). Biomimetics for high-performance flexible tactile sensors and advanced artificial sensory systems. *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 14816. doi:10.1039/c9tc05392a.
- Bae, G. Y., Pak, S. W., Kim, D., Lee, G., Kim, D. H., Chung, Y., & Cho, K. (2016). Linearly and Highly Pressure-Sensitive Electronic Skin Based on a Bioinspired Hierarchical Structural Array. *Advanced Materials*, 28(26), 5300–5306. doi:10.1002/adma.201600408.
- Bayındır, H. (2020). Kurşunsuz KNN Esaslı Piezoelektrik Seramiklerden Yeni Nesil Deniz Kabuğu Dönüştürücülerinin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Barikani, M., Fazeli, N., & Barikani, M. (2013). Study on thermal properties of polyurethane-urea elastomers prepared with different dianiline chain extenders. *Journal of Polymer Engineering*, 33(1), 87–94. doi:10.1515/polyeng-2012-0137.
- Birkholz, M. (1995). Crystal-field induced dipoles in heteropolar crystals II: Physical significance. *Zeitschrift Für Physik B Condensed Matter*, 96(3), 333–340. doi:10.1007/bf01313055.
- Caddeo, S., Baino, F., Ferreira, A. M., Sartori, S., Novajra, G., Ciardelli, G., & Vitale-Brovarone, C. (2014). Collagen/Polyurethane-Coated Bioactive Glass: Early

- Achievements towards the Modelling of Healthy and Osteoporotic Bone. *Key Engineering Materials*, 631, 184–189. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.631.184.
- Cauda, V., Torre, B., Falqui, A., Canavese, G., Stassi, S., Bein, T., & Pizzi, M. (2012). Confinement in Oriented Mesopores Induces Piezoelectric Behavior of Polymeric Nanowires. *Chemistry of Materials*, 24(21), 4215–4221. doi:10.1021/cm302594s.
- Chang, J. H. (2014). Wireless Parylene-Based Retinal Implant. Doktora Tezi, *Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü*, Kaliforniya.
- Charles, E., & Carraher, J. (2012). *Introduction to Polymer Chemistry*. 3. Baskı. Florida: CRC Press.
- Chatterjee, Tabor, & Ghosh. (2019). Electrically Conductive Coatings for Fiber-Based E-Textiles. *Fibers*, 7(6), 51. doi:10.3390/fib7060051.
- Chen, L., Xu, H., Li, T., Zhang, M., Han, X., Jin, Y., & Wang, W. (2022). Adhesion enhancement strategy for Parylene C substrate by nanograft technique. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32, 044005. doi: 10.1088/1361-6439/ac57ae.
- Chen, M., Li, K., Cheng, G., He, K., Li, W., Zhang, D., Li, W., Feng, Y., Wei, L., Li, W., Zhong, G., & Yang, C. (2019). Touchpoint-Tailored Ultrasensitive Piezoresistive Pressure Sensors with a Broad Dynamic Response Range and Low Detection Limit. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11 (2), 2551-2558. doi:10.1021/acsami.8b20284.
- Chen, N., & Bedekar, V. (2017). Modeling, Simulation and Optimization of Piezoelectric Bimorph Transducer for Broadband Vibration Energy Harvesting. *Journal of Materials Science Research*, 6(4), 5. doi:10.5539/jmsr.v6n4p5.
- Chen, S., Peng, S., Sun, W., Gu, G., Zhang, Q., & Guo, X. (2019). Scalable Processing Ultrathin Polymer Dielectric Films with a Generic Solution Based Approach for Wearable Soft Electronics. *Advanced Materials Technologies*, 4(7), 1800681. Portico. <https://doi.org/10.1002/admt.201800681>.
- Cheng, M.-Y., Liao, B.-T., Huang, X.-H., & Yang, Y.-J. (2009). A flexible tactile sensing array based on novel capacitance mechanism. *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*. doi:10.1109/sensor.2009.52856009.
- Cheng, M.-Y., Lin, C.-L., & Yang, Y.-J. (2010). Tactile and shear stress sensing array using capacitive mechanisms with floating electrodes. *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. doi:10.1109/memsys.2010.5442525.
- Chindam, C., Lakhtakia, A., & Awadelkarim, O. O. (2015). Surface energy of Parylene C. *Materials Letters*, 153, 18–19. doi: 10.1016/j.matlet.2015.04.009.

- Chou, N., Moon, H., Park, J., & Kim, S. (2021). Interfacial and surface analysis of parylene C-modified PDMS substrates for soft bioelectronics. *Progress in Organic Coatings*, 157, 106309. doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106309.
- Cinifer, Ş. P. (2022). Kuvvete Duyarlı Karbon Nanotüp/Polimer Bazlı Elektroeğirilmiş Esnek Nanoliflerin Sentezi ve Elektromekanik Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Cui, J., Zhang, B., Duan, J., Guo, H., & Tang, J. (2017). A Micro-Pressure Sensing Method Based on the Micropatterned Electrodes Filled with the Microspheres. *Materials*, 10(12), 1439. doi:10.3390/ma10121439.
- Da Cruz, S. M. F. (2015). Inkjet Printing Technology for Flexible Pressure Sensors. Doktora Tezi, *Minho Üniversitesi*. Braga.
- Dan, L., Shi, S., Chung, H.-J., & Elias, A. L. (2019). Porous Polydimethylsiloxane-Silver Nanowire Devices for Wearable Pressure Sensors. *ACS Applied Nano Materials*, 2 (8), 4869-4878. doi:10.1021/acsanm.9b00807.
- Daneshvar, S., Behrooz, R., Kazemi, S., & Sadeghi, G. M. M. (2019). Characterization of polyurethane wood adhesive prepared from liquefied sawdust by ethylene carbonate. *BioResources* 14(1), 796-815. doi: 10.15376/biores.14.1.796-815.
- Duggina, M., & Jackson, N. (2021). Converting Parylene C into thin film piezoelectric material. *IEEE 16th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC)*, Vancouver, BC, Canada, 1-5, doi: 10.1109/NMDC50713.2021.9677547.
- Ferk, G., Krajnc, P., Hamler, A., Mertelj, A., Cebollada, F., Drofenik, M., & Lisjak, D. (2015). Monolithic Magneto-Optical Nanocomposites of Barium Hexaferrite Platelets in PMMA. *Scientific Reports*, 5(1). doi:10.1038/srep11395.
- Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York: Springer Science & Business Media.
- Frick, A., Rochman, A. (2004). Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC). *Polymer Testing*, 23(4), 413–417. doi:10.1016/j.polymertesting.2003.09.013
- Furtado, C. A. S. R. (2019). Study and development of a flexible airflow sensor based on screen printing techniques. Yüksek lisans tezi. *Porto Üniversitesi*, Porto.
- Gao, L., Zhu, C., Li, L., Zhang, C., Liu, J., Yu, H.-D., & Huang, W. (2019). All paper-based flexible and wearable piezoresistive pressure sensor. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.9b07465.
- Gazicki, M., Surendran, G., James, W., & Yasuda, H. (1985). Polymerization of Para-Xylylene Derivatives (Parylene Polymerization). II. Heat Effects during Deposition of Parylene C at Different Temperatures. *Journal of Polymer Science*, 23, 2255-2277.

- Gonçalves, V. F. B. (2014). Development of Polymer-based Pressure Sensors for Electronic Devices., Doktora tezi, *Porto Üniversitesi*. Porto.
- Gorham, W. F. (1966). A New, General Synthetic Method for the Preparation of Linear Poly-p-xylylenes. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*, 4(12), 3027–3039. doi:10.1002/pol.1966.150041209.
- Hammock, M. L., Chortos, A., Tee, B. C.-K., Tok, J. B.-H., & Bao, Z. (2013). 25th Anniversary Article: The Evolution of Electronic Skin (E-Skin): A Brief History, Design Considerations, and Recent Progress. *Advanced Materials*, 25(42), 5997–6038. doi:10.1002/adma.201302240.
- Han, Z., Li, H., Xiao, J., Song, H., Li, B., Cai, S., Chen, Y., Ma, Y., & Feng, X. (2019). Ultralow-Cost, Highly Sensitive, and Flexible Pressure Sensors Based on Carbon Black and Airlaid Paper for Wearable Electronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.9b12929.
- He, J., Xiao, P., Lu, W., Shi, J., Zhang, L., Liang, Y., Pan, C., Kuo, S.-W., & Chen, T. (2019). A Universal High Accuracy Wearable Pulse Monitoring System via High Sensitivity and Large Linearity Graphene Pressure Sensor. *Nano Energy*, 59, 422–433. doi:10.1016/j.nanoen.2019.02.036.
- Huang, Y., Fan, X., Chen, S.-C., & Zhao, N. (2019). Emerging Technologies of Flexible Pressure Sensors: Materials, Modeling, Devices, and Manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 1808509. doi:10.1002/adfm.201808509.
- Huang, Y., Rui, G., Li, Q., Allahyarov, E., Li, R., Fukuto, M., Zhong, H.-J., Xu, J.-Z., Li, Z.-M., Taylor, P. L., & Zhu, L. (2021). Enhanced piezoelectricity from highly polarizable oriented amorphous fractions in biaxially oriented poly(vinylidene fluoride) with pure β crystals. *Nature Communications*, 12(1). doi:10.1038/s41467-020-20662-7.
- Ismoilov, K., Akram, W., Chauhan, S., & Ergasheva, K. (2019). Synthesis and Evaluation of Properties of a Novel Cationic Waterborne Polyurethane Finishing Agent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 10(3), 398. doi:10.35248/2157-7048.19.10.398.
- Ji, B. (2021). Rational Design of Flexible Tactile Sensors towards High Sensitivity and Wide Linearity Range. Doktora Tezi, *Macau Üniversitesi*. Macau.
- Jia, J., Huang, G., Deng, J., & Pan, K. (2018). Skin-Inspired Flexible and High-Sensitivity Pressure Sensor Based on rGO Film with Continuous-Gradient Wrinkles. *Nanoscale*. doi:10.1039/c8nr08503j.
- Jian, M., Xia, K., Wang, Q., Yin, Z., Wang, H., Wang, C., Xie, H., Zhang, M., & Zhang, Y. (2017). Flexible and Highly Sensitive Pressure Sensors Based on Bionic Hierarchical Structures. *Advanced Functional Materials*, 27(9), 1606066. doi:10.1002/adfm.201606066.
- Jiang, S., Yu, J., Xiao, Y., Zhu, Y., & Zhang, W. (2019). Ultrawide Sensing Range and Highly Sensitive Flexible Pressure Sensor Based on a Percolative Thin Film

- with a Knoll-like Microstructured Surface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(22), 20500–20508. doi:10.1021/acsami.9b02659.
- Joo, Y., Byun, J., Seong, N., Ha, J., Kim, H., Kim, S., Kim, T., Im, H., Kim, D., & Hong, Y. (2015). Silver nanowire-embedded PDMS with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor. *Nanoscale*, 7(14), 6208–6215. doi:10.1039/c5nr00313j.
- Kapoor, A., McKnight, M., Chatterjee, K., Agcayazi, T., Kausche, H., Bozkurt, A., & Ghosh, T. K. (2018). Toward Fully Manufacturable, Fiber Assembly-Based Concurrent Multimodal and Multifunctional Sensors for e-Textiles. *Advanced Materials Technologies*, 1800281. doi:10.1002/admt.201800281.
- Karmakar, R.S., Chu, C.-P., Liao, Y.-C., & Lu, Y.-W. (2022). PVA tactile sensors based on Electrical Contact Resistance (ECR) change mechanism for subtle pressure detection. *Sensors and Actuators A:Physical*, 342, 113613. doi:10.1016/j.sna.2022.113613.
- Kastrounis, N. (2016). Uncertainty of Electrical Capacitance Tomography measurements for clamp-on sensors. Yüksek lisans tezi, *Coventry Üniversitesi*. İngiltere.
- Kawai, H. (1969). The Piezoelectricity of Poly (vinylidene Fluoride). *Japanese Journal of Applied Physics*, 8(7), 975–976. doi:10.1143/jjap.8.975.
- Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2015). Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 15(6), 3164–3185. doi:10.1109/jsen.2014.2375203.
- Khalifeh, S. (2020). Polymeric Structures Optimized For Organic Passive Electronic Components. *Polymers in Organic Electronics*, 341–391. doi:10.1016/b978-1-927885-67-3.50012-2.
- Kim, J., Lee, M., Shim, H. J., Ghaffari, R., Cho, H. R., Son, D., Jung, Y. H., Soh, M., Choi, C., Jung, S., Chu, K., Jeon, D., Lee, S.-T., Kim, J. H., Choi, S. H., Hyeon, T., Kim, D.-H. (2014). Stretchable silicon nanoribbon electronics for skin prosthesis. *Nature Communications*, 5(1). doi:10.1038/ncomms6747.
- Knite, M., Teteris, V., Polyakov, B., & Erts, D. (2002). Electric and elastic properties of conductive polymeric nanocomposites on macro- and nanoscales. *Materials Science and Engineering: C*, 19(1-2), 15–19. doi:10.1016/s0928-4931(01)00410-6.
- Korkmaz, Z. (2015). MEMS Teknikleri Kullanarak Esnek Piezoelektrik Dokunsal Algılayıcı Dizini Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Kulkarni, M. V., Apte, S. K., Naik, S. D., Ambekar, J. D., & Kale, B. B. (2013). Ink-jet printed conducting polyaniline based flexible humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 178, 140–143. doi:10.1016/j.snb.2012.12.046.

- Kwon, D., Lee, T.-I., Shim, J., Ryu, S., Kim, M. S., Kim, S., Kim T.-S., Park, I. (2016). Highly Sensitive, Flexible, and Wearable Pressure Sensor Based on a Giant Piezocapacitive Effect of Three-Dimensional Microporous Elastomeric Dielectric Layer. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(26), 16922–16931. doi:10.1021/acsami.6b04225.
- Lemos, V. A., Santos, M. S., Santos, E. S., Santos, M. J. S., dos Santos, W. N. L., Souza, A. S., de Jesus D. S., das Virgens, C. F., Carvalho, M. S., Oleszczuk, N., Vale, M. G. R., Welz, B., & Ferreira, S. L. C. (2007). Application of polyurethane foam as a sorbent for trace metal pre-concentration — A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(1), 4–12. doi:10.1016/j.sab.2006.12.006.
- Kretschmar, M., & Welsby, S. (2005). Capacitive and Inductive Displacement Sensors. *Sensor Technology Handbook*. Newnes: Burlington.
- Kılınçeri, Ü. (2004). Serigrafi Baskı Tekniği ve Eğitimde Kullanım Alanları. Yüksek Lisans Tezi. *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir.
- Kim, J. Y. H. (2013). Parylene-C as a new piezoelectric material. Doktora Tezi, *Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü*. Kaliforniya.
- Kim, J. Y. H., Cheng A., & Tai Y.-C. (2014). *Parylene-C as a piezoelectric material and method to make it*. Patent, US 8.732.922 B2, USA.
- Kim, K. H., Hong, S. K., Jang, N. S., Ha, S. H., Lee, H. W., & Kim, J. M. (2017). Wearable Resistive Pressure Sensor Based on Highly Flexible Table and Figure Captions Carbon Composite Conductors with Irregular Surface Morphology. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9, 17499–17507. doi: 10.1021/acsami.7b06119.
- Küçükgül, E. Y. (2004). Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 41-56.
- Lee, B.-Y. (2018). Polymer-Nanocomposite Based Pressure Sensors and Energy Harvesting Devices for Wearable Applications. Doktora tezi, *Ulusal Seul Üniversitesi*, Seul.
- Lee, K., Lee, J., Kim, G., Kim, Y., Kang, S., Cho, S., Kim, S., Kim, J.-K., Lee, W., Kim, D.-E., Kang, S., Kim, D., Lee, T., & Shim, W. (2017). Rough-Surface-Enabled Capacitive Pressure Sensors with 3D Touch Capability. *Small*, 13(43), 1700368. doi:10.1002/sml.201700368.
- Lei, K. F., Lee, K.-F., & Lee, M.-Y. (2012). Development of a flexible PDMS capacitive pressure sensor for plantar pressure measurement. *Microelectronic Engineering*, 99, 1–5. doi:10.1016/j.mee.2012.06.005.
- Li, B. (2016). Soft Tactile Sensors for Mechanical Imaging. Doktora Tezi, *Drexel Üniversitesi*. Philadelphia.

- Li, H., Wu, K., Xu, Z., Wang, Z., Meng, Y., & Li, L. (2018). Ultrahigh-Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors for Detection of Tiny Pressure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(24), 20826–20834. doi:10.1021/acsami.8b03639.
- Li, J., Bao, R., Tao, J., Peng, Y., & Pan, C. (2018). Recent progress in flexible pressure sensor arrays: from design to applications. *Journal of Materials Chemistry C*. doi:10.1039/c8tc02946f.
- Li, X., Huang, W., Yao, G., Gao, M., Wei, X., Liu, Z., Zhang, H., Gong, T., & Yu, B. (2017). Highly sensitive flexible tactile sensors based on microstructured multiwall carbon nanotube arrays. *Scripta Materialia*, 129, 61–64. doi:10.1016/j.scriptamat.2016.10.037.
- Lipomi, D. J., Vosgueritchian, M., Tee, B. C.-K., Hellstrom, S. L., Lee, J. A., Fox, C. H., & Bao, Z. (2011). Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nature Nanotechnology*, 6(12), 788–792. doi:10.1038/nnano.2011.184.
- Liu, Q., Liu, Y., Shi, J., Liu, Z., Wang, Q., & Guo, C.F. (2022). High-Porosity Foam-Based Iontronic Pressure Sensor with Superhigh Sensitivity of 9280 kPa⁻¹. *Nano-Micro Lett.* 14, 21. doi: 10.1007/s40820-021-00770-9.
- Liu, Y., Wang, H., Zhao, W., Zhang, M., Qin, H., & Xie, Y. (2018). Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features. *Sensors*, 18(2), 645. doi:10.3390/s18020645.
- Maddipatla, D., Zhang, X., Bose, A. K., Masihi, S., Narakathu, B. B., Bazuin, B. J., Williams, J. D., & Atashbar, M. Z. (2020). A Polyimide Based Force Sensor Fabricated Using Additive Screen-Printing Process for Flexible Electronics. *IEEE Access*, 8, 207813–207821. doi:10.1109/access.2020.3037703.
- Majid, N., Dabral, S., & McDonald, J. F. (1989). The parylene-aluminum multilayer interconnection system for wafer scale integration and wafer scale hybrid packaging. *Journal of Electronic Materials*, 18(2), 301–311. doi:10.1007/bf02657422.
- Mao, Y., Ji, B., Chen, G., Hao, C., Zhou, B., & Tian, Y. (2019). Robust and Wearable Pressure Sensor Assembled from AgNW-coated PDMS Micro-pillar Sheets with High Sensitivity and Wide Detection Range. *ACS Applied Nano Materials*. doi:10.1021/acsanm.9b00503.
- Maynard, E. M., Nordhausen, C. T., & Normann, R. A. (1997). The Utah intracortical Electrode Array: a recording structure for potential brain-computer interfaces. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 102, 228-39. doi: 10.1016/S0013-4694(96)95176-0.
- Miserendino, S., Boland, S., & Tai, Y.-C. (2004). Material and Electrochemical Properties of Pyrolyzed Parylene-C”, The Electrochemical Society 206th Meeting, Abs. 1461.

- Mofokeng, L. E. (2017). Synthesis And Characterization Of Polymer And Carbonaceous Nanocomposites And Their Application In Hydrostatic Pressure Sensing. Yüksek Lisans Tezi, *Johannesburg Üniversitesi*. Johannesburg.
- Murat Koç, İ., & Akça, E. (2013). Design of a piezoelectric based tactile sensor with bio-inspired micro/nano-pillars. *Tribology International*, 59, 321–331. doi:10.1016/j.triboint.2012.06.003.
- Nie, B., Li, R., Cao, J., Brandt, J. D., & Pan, T. (2015). Flexible Transparent Iontronic Film for Interfacial Capacitive Pressure Sensing. *Advanced Materials*, 27(39), 6055–6062. doi:10.1002/adma.201502556.
- Niu, H., Gao, S., Yue, W., Li, Y., Zhou, W., & Liu, H. (2019). Highly Morphology-Controllable and Highly Sensitive Capacitive Tactile Sensor Based on Epidermis-Dermis-Inspired Interlocked Asymmetric-Nanocone Arrays for Detection of Tiny Pressure. *Small*, 1904774. doi:10.1002/sml.201904774.
- Nowlin, T. E., Smith Jr., D. F., & Cieloszyk, G. S. (1980). Thermal oxidative stability of poly-p-xylylenes. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 18(7), 2103–2119. doi:10.1002/pol.1980.170180707.
- O’Sullivan, S., Nagle, R., McEwen, J. A., & Casey, V. (2003). Elastomer rubbers as deflection elements in pressure sensors: investigation of properties using a custom designed programmable elastomer test rig. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(15), 1910–1916. doi:10.1088/0022-3727/36/15/324.
- Oh, J. H., Hong, S. Y., Park, H., Jin, S. W., Jeong, Y. R., Oh, S. Y., Yun, J., Lee, H., Kim, J. W., & Ha, J. S. (2018). Fabrication of High-Sensitivity Skin-Attachable Temperature Sensors with Bioinspired Microstructured Adhesive. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(8), 7263–7270. doi:10.1021/acsami.7b17727.
- Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Kim, S., Hu, X., Lim, H., & Kim, C. (2017). Remote tactile sensing system integrated with magnetic synapse. *Scientific Reports*, 7(1). doi:10.1038/s41598-017-17277-2.
- Pang, C. (2008). Parylene Technology for Neural Probes Applications. Doktora Tezi, *Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü*. Kaliforniya.
- Pang, Y., Zhang, K., Yang, Z., Jiang, S., Ju, Z., Li, Y., Wang, X., Wang, D., Jian, M., Zhang, Y., Liang, R., Tian, H., Yang, Y., & Ren, T.-L. (2018). Epidermis Microstructure Inspired Graphene Pressure Sensor with Random Distributed Spinosum for High Sensitivity and Large Linearity. *ACS Nano*, 12(3), 2346–2354. doi:10.1021/acsnano.7b07613.
- Park, J., Kim, J., Hong, J., Lee, H., Lee, Y., Cho, S., Kim, S.-W., Kim, J. J., Kim, S. Y., & Ko, H. (2018). Tailoring force sensitivity and selectivity by microstructure engineering of multidirectional electronic skins. *NPG Asia Materials*, 10(4), 163–176. doi:10.1038/s41427-018-0031-8.
- Park, J., Lee, Y., Hong, J., Ha, M., Jung, Y.-D., Lim, H., Kim, S. Y., & Ko, H. (2014). Giant Tunneling Piezoresistance of Composite Elastomers with Interlocked

- Microdome Arrays for Ultrasensitive and Multimodal Electronic Skins. *ACS Nano*, 8(5), 4689–4697. doi:10.1021/nn500441k.
- Patra, N., Salerno, M., Cozzoli, P. D., Barone, A. C., Ceseracciu, L., Pignatelli, F., Carzino, R., Marini, L. Athanassiou, A. (2012). Thermal and mechanical characterization of poly(methyl methacrylate) nanocomposites filled with TiO₂ nanorods. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3114–3119. doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.028.
- Pehlivan, E., Ünal, S., & Tunçsiper, B. (2004). Plastik Ambalaj Malzemelerinin Hayatımızdaki Yeri ve Bunların geri kazanılması ve Azaltımında Çağdaş Yöntemler. *Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu*, 114-128, Mersin.
- Perelaer, J., Schubert, U. S. & Jena, F. (2010). *Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications: Inkjet Printing and Alternative Sintering of Narrow Conductive Tracks on Flexible Substrates for Plastic Electronic Applications*. InTech 265–286. doi: 10.5772/7983.
- Poomalai, P., Varghese, T. O. & Siddaramaiah (2011). Thermomechanical Behaviour of Poly(methyl methacrylate)/Copoly(ether-ester) Blends. *ISRN Materials Science*, 1–5. doi:10.5402/2011/921293.
- Qiu, J., Guo, X., Chu, R., Wang, S., Zeng, W., Qu, L., Zhao, Y., Yan F., & Xing, G. (2019). Rapid-Response, Low Detection Limit, and High-Sensitivity Capacitive Flexible Tactile Sensor Based on Three-Dimensional Porous Dielectric Layer for Wearable Electronic Skin. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.9b16511.
- Rodriguez, B. M. (2016). Inkjet and screen printing for electronic applications. Doktora tezi, *Barselona Üniversitesi*. Barselona.
- Rogers, J. A., Someya, T., & Huang, Y. (2010). Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science*, 327(5973), 1603–1607. doi:10.1126/science.1182383.
- Pyo, S., Choi, J., & Kim, J. (2017). Flexible, Transparent, Sensitive, and Crosstalk-Free Capacitive Tactile Sensor Array Based on Graphene Electrodes and Air Dielectric. *Advanced Electronic Materials*, 4(1), 1700427. doi:10.1002/aelm.201700427.
- Pyo, S., Lee, J., Bae, K., Sim, S., & Kim, J. (2021). Recent Progress in Flexible Tactile Sensors for Human-Interactive Systems: From Sensors to Advanced Applications. *Advanced Materials*, 2005902. doi:10.1002/adma.202005902.
- Saccomandi, P., Schena, E., Oddo, C., Zollo, L., Silvestri, S., & Guglielmelli, E. (2014). Microfabricated Tactile Sensors for Biomedical Applications: A Review. *Biosensors*, 4(4), 422–448. doi:10.3390/bios4040422.
- Saunders JH, & Frisch KC. (1982). *Polyurethanes: chemistry and technology*. New York: Interscience.

- Schwerdt, H. N., Zhang, E., Kim, M. J., Yoshida, T., Stanwicks, L., Amemori, S., Dagdeviren, H. E., Langer, R., Cima, M. J., & Graybiel, A. M. (2018). Cellular-scale probes enable stable chronic subsecond monitoring of dopamine neurochemicals in a rodent model. *Communications Biology*, 1(1). doi:10.1038/s42003-018-0147-y.
- Senkevich, J. J., & Desu, S. B. (1999). Morphology of poly(chloro- p -xylylene) CVD thin films. *Polymer*, 40(21), 5751–5759. doi:10.1016/s0032-3861(98)00793-9.
- Shao, N., Wu, J., Yang, X., Yao, J., Shi, Y., & Zhou, Z. (2017). Flexible capacitive pressure sensor based on multi-walled carbon nanotube electrodes. *Micro & Nano Letters*, 12(1), 45–48. doi:10.1049/mnl.2016.0529.
- Shen, D., Xiao, M., Xiao, Y., Zou, G., Hu, L., Zhao, B., Liu, L. L., Duley, W. W., & Zhou, Y. N. (2019). Self-Powered, Rapid-Response, and Highly Flexible Humidity Sensors Based on Moisture-Dependent Voltage Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(15), 14249–14255. doi:10.1021/acsami.9b01523.
- Shi, Z., Meng, L., Shi, X., Li, H., Zhang, J., Sun, Q., Liu, X., Chen, J., & Liu S. (2022). Morphological Engineering of Sensing Materials for Flexible Pressure Sensors and Artificial Intelligence Applications. *Nano-Micro Letters*, 14, 141. doi: 10.1007/s40820-022-00874-w
- Shu, Y., Tian, H., Yang, Y., Li, C., Cui, Y., Mi, W., Li, Y., Wang, Z., Deng, N., Peng, B., & Ren, T.-L. (2015). Surface-modified piezoresistive nanocomposite flexible pressure sensors with high sensitivity and wide linearity. *Nanoscale*, 7(18), 8636–8644. doi:10.1039/c5nr01259g.
- Smith, C. S. (1954). Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, 94(1), 42–49. doi:10.1103/physrev.94.42.
- Smith, M., & Kar-Narayan, S. (2021). Piezoelectric polymers: theory, challenges and opportunities. *International Materials Reviews*, 1–24. doi:10.1080/09506608.2021.1915935.
- Song, Z., Im, J.-H., Ko, H., Park, J.-H., Lee, G.-Y., Kang, M.-J., Kim M.-H. & Pyun, J.-C. (2021). Plasma deposition of parylene-C film. *Materials Today Communications*, 26, 101834. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101834.
- Søndergaard, R., Hösel, M., Angmo, D., Larsen-Olsen, T. T., & Krebs, F. C. (2012). Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Materials Today*, 15(1-2), 36–49. doi:10.1016/s1369-7021(12)70019-6.
- Stassi, S., Cauda, V., Canavese, G., & Pirri, C. (2014). Flexible Tactile Sensing Based on Piezoresistive Composites: A Review. *Sensors*, 14(3), 5296–5332. doi:10.3390/s140305296.
- Stuart B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. West Sussex: Wiley.

- Sun, Q., Zhao, X., Zhou, Y., Yeung, C., Wu, W., Venkatesh, S., Xu, Z. X., Wylie, J. J., Li, W. J., & Roy, V. A. L. (2019). Fingertip-Skin-Inspired Highly Sensitive and Multifunctional Sensor with Hierarchically Structured Conductive Graphite/Polydimethylsiloxane Foams. *Advanced Functional Materials*, 29(18), 1808829. doi:10.1002/adfm.201808829.
- Sun, X., Sun, J., Zheng, S., Wang, C., Tan, W., Zhang, J., Chunxiu, L., Chang, L., Tong, L., Zhimei, Q., & Ning, X. (2019). A Sensitive Piezoresistive Tactile Sensor Combining Two Microstructures. *Nanomaterials*, 9(5), 779. doi:10.3390/nano9050779.
- Sun, X., Wang, C., Chi, C., Xue, N., & Liu, C. (2018). A highly-sensitive flexible tactile sensor array utilizing piezoresistive carbon nanotube–polydimethylsiloxane composite. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 28(10), 105011. doi:10.1088/1361-6439/aaceb9.
- Suzuki, M., Takahashi, T., & Aoyagi, S. (2012). Flexible Tactile Sensor Using Polyurethane Thin Film. *Micromachines*, 3(2), 315–324. doi:10.3390/mi3020315.
- Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2015). *Handbook of Polymers for Pharmaceutical Technologies, Structure and Chemistry*. West Sussex: Wiley.
- Takamatsu, S., Kobayashi, T., Shibayama, N., Miyake, K., & Itoh, T. (2012). Fabric pressure sensor array fabricated with die-coating and weaving techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 184, 57–63. doi:10.1016/j.sna.2012.06.031.
- Tao, L.-Q., Zhang, K.-N., Tian, H., Liu, Y., Wang, D.-Y., Chen, Y.-Q., Yang, Y., & Ren, T.-L. (2017). Graphene-Paper Pressure Sensor for Detecting Human Motions. *ACS Nano*, 11(9), 8790–8795. doi:10.1021/acsnano.7b02826.
- Tee C. K. (2013). *Electronic Skin: Flexible And Stretchable Organic Electro-Mechanical Sensors For Robotics, Wearable Electronics And Health Monitoring*. Doktora Tezi, *Stanford Üniversitesi*. Stanford.
- Tessarolo, M., Possanzini, L., Campari, E. G., Bonfiglioli, R., Violante, F. S., Bonfiglio, A., & Fraboni, B. (2018). Adaptable pressure textile sensors based on a conductive polymer. *Flexible and Printed Electronics*, 3(3), 034001. doi:10.1088/2058-8585/aacbee.
- Tichý, J., Erhart, J., Kittinger, E., & Přívratská, J. (2010). *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- URL-1. <https://datasheetspdf.com/pdf/167141/AnalogDevices/ADG734/1>. Son erişim tarihi: 08 Şubat 2023.
- URL-2. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1220.pdf?ts=1593643501430&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Son erişim tarihi: 08 Şubat 2023.

- URL-3. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5529.pdf?ts=1593643309454&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Son erişim tarihi: 08 Şubat 2023.
- URL-4. <http://www.ti.com/lit/an/sloa033a/sloa033a.pdf>. Son erişim tarihi: 08 Şubat 2023.
- URL-5. <https://pressureprofile.com/resources-1/what-is-pressure-mapping#:~:text=Pressure%20mapping%20is%20simply%20the,a%20seat%20or%20a%20mattress>. Son erişim tarihi: 07 Şubat 2023.
- Wang, K., Lou, Z., Wang, L., Zhao, L., Zhao, S., Wang, D., Han, W., Jiang, K., & Shen, G. (2019). Bioinspired Interlocked Structure-Induced High Deformability for Two-Dimensional Titanium Carbide (MXene)/Natural Microcapsule-Based Flexible Pressure Sensors. *ACS Nano*. doi:10.1021/acsnano.9b03454.
- Wang, L., Ding, T., & Wang, P. (2009). Thin Flexible Pressure Sensor Array Based on Carbon Black/Silicone Rubber Nanocomposite. *IEEE Sensors Journal*, 9(9), 1130–1135. doi:10.1109/jsen.2009.2026467.
- Wan, S., Bi, H., Zhou, Y., Xie, X., Su, S., Yin, K., & Sun, L. (2017). Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors. *Carbon*, 114, 209–216. doi:10.1016/j.carbon.2016.12.023.
- Wang, S., Xu, J., Wang, W., Wang, G.-J. N., Rastak, R., Molina-Lopez, F., Chung, J. W., Niu, S., Feig, V. R., Lopez, J., Lei, T., Kwon, S.-K., Kim, Y., Foudehl, A. M., Ehrlich, A., Gasperini, A., Yun, Y., Murmann, B., Tok, J. B.-H., & Bao, Z. (2018). Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array. *Nature*, 555(7694), 83–88. doi:10.1038/nature25494.
- Wang, X., Deng, Y., Jiang, P., Cheung, Y. K., & Yu, H. (2023). A Flexible Thin-Film Pressure Sensor Based on Thermal Conduction Mechanism for Pressure, Orientation, and Mapping Signal Acquisition. *IEEE Sensors Council*, 23, 1990–1998. doi: 10.1109/JSEN.2022.3230982.
- Wang, Z., Guan, X., Huang, H., Wang, H., Lin, W., & Peng, Z. (2018). Full 3D Printing of Stretchable Piezoresistive Sensor with Hierarchical Porosity and Multimodulus Architecture. *Advanced Functional Materials*, 1807569. doi:10.1002/adfm.201807569.
- Wang, Z., Wang, S., Zeng, J., Ren, X., Chee, A. J. Y., Yiu, B. Y. S., Chung, W. C., Yang, Y., Yu, A. C., Roberts, R. C., Tsang, A. C., Chow, K. W., & Chan, P. K. L. (2016). High Sensitivity, Wearable, Piezoresistive Pressure Sensors Based on Irregular Microhump Structures and Its Applications in Body Motion Sensing. *Small*, 12(28), 3827–3836. doi:10.1002/smll.201601419.
- Webb, A. J., Szablewski, M., Bloor, D., Atkinson, D., Graham, A., Laughlin, P., & Lussey, D. (2013). A multi-component nanocomposite screen-printed ink with non-linear touch sensitive electrical conductivity. *Nanotechnology*, 24(16), 165501. doi:10.1088/0957-4484/24/16/165501.

- Webster, J. G., & Eren H. (2018). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Florida: CRC press.
- Wei, Y., Chen, S., Yuan, X., Wang, P., & Liu, L. (2016). Multiscale Wrinkled Microstructures for Piezoresistive Fibers. *Advanced Functional Materials*, 26(28), 5078–5085. doi:10.1002/adfm.201600580.
- Willis, H. A., Zichy V. J. I., & Hendra, P.J. (1969). The Laser-Raman and Infrared Spectra of Poly(Methyl Methacrylate). *Polymer*, 10, 737. doi: 10.1016/0032-3861(69)90101-3.
- Wu, Y., Liu, H., Chen, S., Dong, X., Wang, P., Liu, S. Lin, Y., Wei, Y., Liu, L. (2017). Channel Crack-Designed Gold@PU Sponge for Highly Elastic Piezoresistive Sensor with Excellent Detectability. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(23), 20098–20105. doi:10.1021/acsami.7b04605.
- Xiong, Y., Shen, Y., Tian, L., Hu, Y., Zhu, P., Sun, R., & Wong, C.-P. (2020). A Flexible, Ultra-Highly Sensitive and Stable Capacitive Pressure Sensor with Convex Microarrays for Motion and Health Monitoring. *Nano Energy*, 104436. doi:10.1016/j.nanoen.2019.104436.
- Xu, M., Li, F., Zhang, Z., Shen, T., & Qi, J. (2018). Piezoresistive Sensors Based on rGO 3D Microarchitecture: Coupled Properties Tuning in Local/Integral Deformation. *Advanced Electronic Materials*, 1800461. doi:10.1002/aelm.201800461.
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218–235. doi:10.1016/j.rser.2015.02.051.
- Yamashita, T., Takamatsu, S., Miyake, K., & Itoh, T. (2013). Fabrication and evaluation of a conductive polymer coated elastomer contact structure for woven electronic textile. *Sensors and Actuators A: Physical*, 195, 213–218. doi:10.1016/j.sna.2012.09.002.
- Yang, J. C., Kim, J.-O., Oh, J., Kwon, S. Y., Sim, J. Y., Kim, D. W., Choi, H. B., & Park, S. (2019). Microstructured Porous Pyramid-Based Ultrahigh Sensitive Pressure Sensor Insensitive to Strain and Temperature. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(21), 19472–19480. doi:10.1021/acsami.9b03261
- Yao, S., & Zhu, Y. (2014). Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires. *Nanoscale*, 6(4), 2345. doi:10.1039/c3nr05496a.
- Yin, M.-J., Yin, Z., Zhang, Y., Zheng, Q., & Zhang, A. P. (2019). Micropatterned elastic ionic polyacrylamide hydrogel for low-voltage capacitive and organic thin-film transistor pressure sensors. *Nano Energy*, 58, 96–104. doi:10.1016/j.nanoen.2019.01.032.

- Yoo, I. K., & Desu, S. B. (1994). Domain behavior in lead zirconate titanate (PZT) thin film capacitors. *Integrated Ferroelectrics*, 6, 329-336. doi: 10.1080/10584589508019376.
- Zhang, H., Ke, F., Shao, J., Wang, C., Wang, H., & Chen, Y. (2022). One-step fabrication of highly sensitive pressure sensor by all FDM printing. *Composites Science and Technology*, 226, 109531. doi: 10.1016/j.compscitech.2022.109531
- Zhang, L., Liu, Y., Li, Z., & Wang, W. (2018). SF6 Optimized O2 Plasma Etching of Parylene C. *Micromachines*, 9(4), 162. doi:10.3390/mi9040162.
- Zhao, T., Li, T., Chen, L., Yuan, L., Li, X., & Zhang, J. (2019). Highly Sensitive Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Developed Using Biomimetically Textured Porous Materials. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.9b09265.
- Zheng, Y. F., & Fan, Y. (1991). Robot force sensor interacting with environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(1), 156–164. doi:10.1109/70.68079.
- Zhong, W., Liu, Q., Wu, Y., Wang, Y., Qing, X., Li, M., Liu, K., Wang, W., & Wang, D. (2016). A nanofiber based artificial electronic skin with high pressure sensitivity and 3D conformability. *Nanoscale*, 8(24), 12105–12112. doi:10.1039/c6nr02678h.
- Zhou, Q., Ji, B., Chen, G., Ding, Y., Wu, J., She, J., Wang, S., & Zhou, B. (2019). Lithography-free Formation of Controllable Micro-domes via Droplet Templates for Robust, Ultra-sensitive, and Flexible Pressure Sensors. *ACS Applied Nano Materials*. doi:10.1021/acsanm.9b01680.
- Zhou, X., Zhang, Y., Yang, J., Li, J., Luo, S., & Wei, D. (2019). Flexible and Highly Sensitive Pressure Sensors Based on Microstructured Carbon Nanowalls Electrodes. *Nanomaterials*, 9(4), 496. doi:10.3390/nano9040496.
- Zhu, B., Niu, Z., Wang, H., Leow, W. R., Wang, H., Li, Y., Zheng, L., Wei, J., Huo, F., & Chen, X. (2014). Microstructured Graphene Arrays for Highly Sensitive Flexible Tactile Sensors. *Small*, 10(18), 3625–3631. doi:10.1002/smll.201401207.
- Zhu, Y., Cai, H., Ding, H., Pan, N., & Wang, X. (2019). Fabrication of Low-Cost and Highly Sensitive Graphene-Based Pressure Sensor by Direct Laser Scribing Polydimethylsiloxane. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.8b17085.