



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ KUVVETLENDİRİCİ PERFORMANSI ÜZERİNE YORULMUŞ MOSFET ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Akif MEYDANCI

**Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı**

DANIŞMAN

Doç.Dr. Yasin ÖZÇELEP

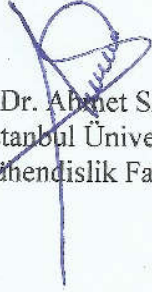
Haziran, 2018


İSTANBUL


Bu çalışma, 20.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Erkan ATMACA
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Abdürrahim
AKGÜNDOĞDU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin BAŞAK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi



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

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince desteğini ve yol gösterici fikirlerini benden eksik etmeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP'e içtenlikle saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Değerli görüşlerini benimle paylaşarak, tez aşamasına gelmemde çok emeği olan Sayın Prof. Dr. Ayten KUNTMAN'a saygılarımı sunarım.

Çalışma boyunca motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan dualarını benden esirgemeyen manevi destekçilerim ve hayattaki ilham kaynağım olan biricik anneme,teyzeme,anneanneme ve rahmetli Melek Hatun'a saygılarımı ve sevgilerimi belirtmek isterim.

Tez çalışmamın nihayete ermesinde büyük rol oynamış, çalışmalarım boyunca beni anlayışla karşılayan, sabırla yanıbaşımnda moral veren ve sürekli destekleyen müstakbel eşim, Burcu Elif Gizem TERLEMEZ'e sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2018 .

Mehmet Akif MEYDANCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1 GÜÇ MOSFET'LERİ.....	4
2.2 GÜÇ KUVVETLENDİRİCİLERİ	6
2.2.1 Güç Kuvvetlendiricileri Parametreleri	6
2.2.1.1 Güç Kazancı.....	7
2.2.1.2 DC Kazanç	7
2.2.1.3 Verimlilik.....	8
2.2.1.4 Doğrusallık.....	9
2.2.1.5 Bant Genişliği	9
2.2.1.6 Çıkış Gücü.....	9
2.2.2 Güç Kuvvetlendirici Sınıfları.....	10
2.2.2.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri	10
2.2.2.2 B Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri	11
2.2.2.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri	12
2.2.2.4 C Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri.....	13
2.2.2.5 D Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri.....	13
2.2.2.6 E Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri	14
2.2.2.7 F Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri	15
2.2.2.8 Güç Kuvvetlendirici Sınıflarının Karşılaştırılması	15
2.3 GÜVENİLİRLİK.....	16
2.4 MOSFET'LERİN BOZULMA MEKANİZMALARI	18
2.4.1 Sıcak Taşıyıcı Etkisi (HCE).....	18
2.4.2 Zamana Bağlı Dielektrik Kırılma (TDDB).....	20

2.4.3 Negatif Kutuplama Sıcaklığı Kararsızlığı (NBTI).....	21
2.4.4 Elektron Göçü (EM).....	21
2.5 HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA TEST YÖNTEMLERİ	22
2.5.1 Hızlandırılmış Yorma Metodları.....	22
2.5.2 Çalışma Ömrü Modelleri	23
2.5.3 Çalışma Ömrü Dağılımları.....	25
2.6 ELEKTRONİK UYGULAMALARINDA YORULMA ÇALIŞMALARI.....	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	29
3.1 I_d - V_{GS} ÖZEĞRİSİ ÖLÇME DEVRESİ VE V_{TH} PARAMETRESİNİN ÇIKARIMI	30
3.2 YORMA DEVRESİ	31
3.3 KUVVETLENDİRİCİ DEVRELERİ	31
3.3.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri	32
3.3.2 D Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri	35
3.3.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri	37
3.4 DİJİTAL ÖLÇME DEVRESİ VE VERİ TOPLAMA YAZILIMI.....	38
4. BULGULAR	41
4.1 YORMA KOŞULLARININ BELİRLENMESİ	41
4.2 ÖLÇÜM SONUÇLARININ ANALİZİ	42
4.2.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları.....	42
4.2.2 D Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları.....	52
4.2.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları	59
4.3 ÖLÇÜM SONUÇLARINA MATEMATİKSEL EĞRİ UYDURULMASI	64
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	77
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: (a) n kanallı bir MOSFET'in kesit görünümü, (b) I_D - V_{GS} özeğrisi, (c) nMOSFET'in sembolik gösterimi [27].....	4
Şekil 2.2: LDMOSFET kesit gösterimi [4].....	5
Şekil 2.3: VDMOSFET kesit gösterimi [4].....	6
Şekil 2.4: (a) Temel kuvvetlendirici şematiği (b) Kuvvetlendiricilerin giriş gücüne göre kazanç değişimi.	7
Şekil 2.5: Kuvvetlendiricilerin çıkış geriliminin giriş gerilimine göre değişimi.....	8
Şekil 2.6: Kuvvetlendiricilerin 1 dB Sıkıştırma Noktası.....	9
Şekil 2.7: (a) A sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	11
Şekil 2.8: (a) B sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	12
Şekil 2.9: (a) AB sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	12
Şekil 2.10: (a) C sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	13
Şekil 2.11: (a) D sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	14
Şekil 2.12: (a) E sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	15
Şekil 2.13: (a) F sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.....	15
Şekil 2.14: Yarıiletkenlerin zamana bağlı bozulma periyotları (küvet eğrisi).....	17
Şekil 2.15: Yarıiletkenlerin zamana bağlı bozulma mekanizmaları.....	18
Şekil 2.16: Sıcak taşıyıcı etkilerinin şematik gösterimi.	19
Şekil 2.17: Zamana bağlı dielektrik kırılmanın oluşumu.	20
Şekil 2.18: Hızlandırılmış Yorma Metodlarının Gösterimi.....	23
Şekil 2.19: Arrhenius Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı.....	24
Şekil 2.20: Eyring Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı [15].....	25
Şekil 2.21: Ters Güç Kanunu Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı [15].....	25
Şekil 3.1: Dijital Multimetre ve Veri Toplama Devresinin ölçüm yapılacak MOSFET'lere bağlantı şematiği.....	30
Şekil 3.2: I_D - V_{GS} özeğrisi ve V_{TH} noktasının kestirimi [63].....	30
Şekil 3.3: Yorma ve Multimetre devrelerinin bağlantı şeması.....	31
Şekil 3.4: A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematiği.....	32

Şekil 3.5: A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricilerin DC analiz devresi şematığı.....	33
Şekil 3.6: A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresi şematığı.....	34
Şekil 3.7: A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendiricilerin DC analiz devresi şematığı..	35
Şekil 3.8: D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematığı.....	36
Şekil 3.9: D sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresi şematığı.....	37
Şekil 3.10: AB sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematığı.....	38
Şekil 3.11: Veri toplayıcı yapısı şematığı.....	39
Şekil 3.12: Veri toplayıcı programının ekran görüntüsü.....	40
Şekil 4.1: IRF510 MOSFET'inin yorulma etkisi ile VTH değişimi.....	41
Şekil 4.2: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.....	43
Şekil 4.3: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.....	44
Şekil 4.4: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.....	44
Şekil 4.5: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için yorma olmadığında elde edilen DC kazanç grafiği.....	45
Şekil 4.6: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için tüm periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.....	45
Şekil 4.7: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.....	46
Şekil 4.8: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.....	46
Şekil 4.9: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için savak verimliliğin yormaya bağlı değişimi.....	47
Şekil 4.10: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.....	47
Şekil 4.11: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.....	48
Şekil 4.12: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.....	49
Şekil 4.13: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için yorma olmadığında elde edilen DC kazanç grafiği.....	49
Şekil 4.14: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.....	50
Şekil 4.15: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.....	50
Şekil 4.16: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.....	51

Şekil 4.17: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğın yormaya bağlı değişimi.....	51
Şekil 4.18: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.....	52
Şekil 4.19: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.....	53
Şekil 4.20: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.....	53
Şekil 4.21: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.....	54
Şekil 4.22: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.....	54
Şekil 4.23: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.....	55
Şekil 4.24: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için savak verimliliğın yormaya bağlı değişimi.....	55
Şekil 4.25: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.....	56
Şekil 4.26: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.....	56
Şekil 4.27: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için yorma olmadığında elde edilen DC kazanç grafiği.....	57
Şekil 4.28: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.....	57
Şekil 4.29: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.....	58
Şekil 4.30: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.....	58
Şekil 4.31: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğın yormaya bağlı değişimi.....	59
Şekil 4.32: IRF9540N MOSFET için yorulmanın VTH üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 4.33: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış akım işaretleri grafiği.....	60
Şekil 4.34: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış gerilim işaretleri grafiği.....	61
Şekil 4.35: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.....	61
Şekil 4.36: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.....	62
Şekil 4.37: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.....	62
Şekil 4.38: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.....	63
Şekil 4.39: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.....	63

Şekil 4.40: AB Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğin yormaya bağlı değişimi.....	64
Şekil 4.41: Vth geriliminin yormaya bağlı değişimi ve benzetimi.....	65
Şekil 4.42: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi	65
Şekil 4.43: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli kazanç ve benzetimi	66
Şekil 4.44: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimlilik ve benzetimi.....	67
Şekil 4.45: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli verimlilik ve benzetimi.....	67
Şekil 4.46: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi.....	68
Şekil 4.47: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV ve benzetimi.....	69
Şekil 4.48: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli maksimum DC kazanç ve benzetimi.....	69
Şekil 4.49: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV ve benzetimi	70
Şekil 4.50: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi	71
Şekil 4.51: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi.	71
Şekil 4.52: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimlilik ve benzetimi.....	72
Şekil 4.53: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli verimlilik ve benzetimi.....	72
Şekil 4.54: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi.....	73
Şekil 4.55: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV ve benzetimi.....	73
Şekil 4.56: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi.....	74
Şekil 4.57: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV ve benzetimi	75
Şekil 4.58: D sınıfı kuvvetlendirici için kazanç ve benzetimi	75
Şekil 4.59: AB sınıfı kuvvetlendirici için maksimum DC kazanç ve benzetimi.	76
Şekil 4.60: AB sınıfı kuvvetlendirici için ΔV ve benzetimi.....	76

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Temel Güç Kuvvetlendirici Parametreleri ile Güç Kuvvetlendirici Sınıflarının Karşılaştırılması.....	16
Tablo 3.1: Tasarımda kullanılan MOSFET'lerin önemli çalışma parametreleri.	29
Tablo 4.1: Kullanılan MOSFET'lerin yorma parametreleri.	42



SEMBOL LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
μ	: Mobilite
K	: Kuvvetlendirici devresi kazancı
C_{RSS}	: Ters iletim kapasitesi
D	: Savak
dB	: Desibel
E_A	: Aktivasyon enerjisi
G	: Geçit
gm	: Geçiş iletkenliği
I	: Akım
I_{OUT}	: Çıkış akımı
I_D	: Savak-kaynak akımı
L	: Kanal boyu
	: Verimlilik
<i>d</i>	: Savak verimliliği
P	: Güç
Q	: Çalışma noktası
R_D	: Kuvvetlendirici devresi savak direnci
R_L	: Kuvvetlendirici devresi yük direnci
R_{ON}	: Çalışma direnci
S	: Kaynak
t_{BD}	: Kırılma süresi
V_{DS}	: Savak-kaynak gerilimi
V_{GS}	: Geçit-kaynak gerilimi
V_{TH}	: Eşik gerilimi
V_{REF}	: Referans gerilimi
T	: Sıcaklık
	: İletim açısı
V	: Gerilim Değişim Aralığı
Kısaltmalar	Açıklama
AC	: Doğru akım
AM	: Analog modülasyon
AT	: Hızlandırılmış test
ADC	: Analog dijital çevirici
ALT	: Hızlandırılmış ömür testleri
BW	: Band genişliği
BJT	: Bipolar jonksiyon transistor
BTI	: Kutuplama sıcaklık kararsızlığı
CHC	: Kanal sıcaklık taşıyıcıları
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken
CSV	: Virgülle ayrılmış değerler
CW	: Devamlı dalga
DAHC	: Savak çıkış sıcaklık taşıyıcıları
DC	: Doğru akım
DMOS	: Çift difüzyonlu metal oksit yarıiletken

EM	: Elektron göçü
ESD	: Elektrostatik deşarj
EOS	: Elektriksel aşırı gerilim
FM	: Frekans modülasyonu
HCE	: Sıcak taşıyıcı etkisi
I2C	: Tümleşik devreler arası haberleşme
LDMOS	: Yatay güç metal oksit yarıiletken
MOSFET	: Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör
MTTF	: Bozulmaya kadar geçen ortalama süre
NBTI	: Negatif kutuplama sıcaklık kararsızlığı
nMOS	: n-kanallı MOS yapısı
OTA	: İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi
PAE	: Güç eklenmiş verimlilik
pMOS	: p-kanallı MOS yapısı
PWM	: Sinyal genişlik modülasyonu
RF	: Radyo frekansı
SGHC	: İkincil oluşmuş sıcaklık taşıyıcı
SHC	: Substrat sıcaklık taşıyıcıları
Si	: Silisyum
SILC	: Yorma kaynaklı kaçak akımı
SiO₂	: Silisyum dioksit
SMPS	: Anahtarlama güç kaynağı
SPI	: Seri çevre birimi arayüzü
TDDDB	: Zamana bağlı dielektrik kırılma
TDDF	: Bozulmaya kadar geçen süre
UART	: Evrensel asenkron alıcı verici
VDMOS	: Yatay güç metal oksit yarıiletken
VLSI	: Çok geniş ölçekli tümdevre

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ KUVVETLENDİRİCİLERİ PERFORMANSI ÜZERİNE YORULMUŞ MOSFET ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Akif MEYDANCI

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP

Günümüz elektronik endüstrisinde en çok kullanılan yarıiletken elemanlardan olan güç MOSFET'lerinin çalışma süreleri boyunca maruz kaldıkları farklı bozulma mekanizmaları bulunmaktadır. Bu bozulma mekanizmaları güç MOSFET'lerinin çalışma değerlerini etkileyerek beklenen çalışma performanslarının alınamamasına sebep olmaktadır. Bu etkiler, güç MOSFET'lerinin çoğunlukla içinde yer aldığı elektronik uygulamaların da davranış biçimlerini doğrudan belirlemektedirler. Bu etkilerin doğru şekilde yorumlanabilmesi için çalışma ömrü boyunca oluşan değişimler incelenmekle birlikte, hızlandırılmış testlerin yardımıyla bozulma etkilerinin değişiminin incelenmesi de önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada güç kuvvetlendiricilerinin, güç MOSFET'lerinin yorulma etkisiyle beraber, gösterdikleri değişim incelenmiştir. Farklı güç kuvvetlendirici topolojileri için, güç MOSFET'lerine yüksek gerilim yorma metodu ile hızlandırılmış testler uygulanıp, sonuçlar araştırılmıştır. Yapılan ölçümler ve elde edilen sonuçlar sayesinde, farklı güç kuvvetlendirici sınıfları için erken bozulma etkilerinin göz önünde bulundurulmasıyla daha güvenilir elektronik uygulamaların ortaya çıkmasına katkı sağlanacaktır.

Haziran 2018, 100 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüksek gerilimle sabit yorma etkileri, güç kuvvetlendiricilerinin yorulma etkileri, MOSFET güvenilirliği, güç kuvvetlendirici güvenilirliği

SUMMARY

M. Sc. THESIS

INVESTIGATION OF DEGRADED MOSFET EFFECT ON POWER AMPLIFIER PERFORMANCE

Mehmet Akif MEYDANCI

İstanbul University

Institute of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP

Power MOSFETs which are widely used semiconductors in today electronics industry have been exposed to different failure mechanisms during their life cycle. These failure mechanisms are causing not able to obtain expected operation performances by affecting power MOSFET operation parameters. These effects directly determine behaviour of power MOSFETs, which are commonly used in electronic applications. Along with the changes occurred during the life cycle are investigated to understand these effects, investigation of failure mechanisms with the help of accelerated tests also take important place. In this work, performance changes of power amplifiers which contains degraded power MOSFET effect have been investigated. Accelerated tests with high voltage stress method are applied to power MOSFETs for different power amplifier topologies and outputs have been analysed. Thanks to the measurements made and the results obtained, it will be contributed to the development of more reliable electronic applications by considering the early wear-out effects for different power amplifier classes.

June 2018, 100 pages.

Keywords: High voltage stress effects, wear-out effects of power amplifiers, MOSFET reliability, power amplifier reliability

1. GİRİŞ

Günümüz elektronik endüstrisinde silisyum tabanlı yarıiletken teknolojiler hemen hemen her uygulamada yer bulmaktadır. Elektronik uygulamaların daha karmaşık yapılar için tasarlanmasıyla, yarıiletken malzemelerin üretim teknolojileri çeşitlenmekte, bununla birlikte boyutlar oldukça küçülmektedir [1]. Küçülen boyutlar ve zorlaşan çalışma şartları ile birlikte malzemelerin farklı koşullardaki dayanımlarının araştırılması önem kazanmaya başlamıştır. Birim alanda daha fazla işlev gerçekleştirmek önem kazanmışken, bu kazancın ürünlerin çalışma ömrü boyunca korunabilmesi de maliyet yönetimi açısından göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin; silisyum tabanlı yarıiletken malzemelerden imal edilen güneş panellerinin çalışma ömürleri ve çalıştıkları süre boyunca gösterdikleri performans, maliyeti birincil derecede etkilemektedir [2]. Bu nedenle yüksek kaliteli üretim yapmanın yanında güvenilirlik de ürün bütünlüğünün korunması için çalışılması gereken konuların başında gelmektedir.

1950'lerin sonunda MOSFET'ler keşfedilmeleriyle birlikte bugün konvansiyonel sayılabilecek BJT'lere oranla daha fazla kullanım alanı bulmuşlardır. Bu büyük değişimde MOSFET'lerin tümdevreleştirmeye uygun olmaları büyük rol oynamaktadır. Akım kontrollü transistörlerin yerini gerilim kontrollü MOSFET yapılar almıştır. İlk üretilen transistörlerden itibaren günümüze kadar boyutları nanometreler seviyesine inmiştir [3]. Bunun sonucunda birim alanda uygulanan akım yoğunluğu artmış ve bu elemanlar üzerinde farklı etkilere neden olmuştur. Bu nedenle MOSFET'lerin çalışma ömürleri boyunca gösterdikleri performans ayrıca bir çalışma alanı olarak görülmüştür. Bütün tümdevre teknolojisinin yapı taşı olan MOSFET'lerin üretim avantajları tüm elektronik endüstrisi uygulamalarında yer almalarını sağlamıştır. MOSFET'lerle akım kazancı sağlamanın BJT'lere göre zor olmasına karşın, tümleştirilebilmelerinin avantajlarından ötürü MOSFET'ler güç kazancı için de geliştirilmiş ve ortaya güç MOSFET'leri yapısı çıkmıştır [4]. Bu yapılarla güç kuvvetlendirici tasarımları ağırlıklı çalışılarak güç MOSFET'lerinin yüksek anahtarlama ve yük gerilime dayanabilme avantajları kullanılmak istenmiştir.

Günümüzde çoğu elektronik devre uygulaması için güç kuvvetlendirici devrelere önemli bir devre katı olarak yer verilmektedir. Örneğin, bir mikrofon yardımıyla ses sinyallerinin zayıf elektrik sinyallerine dönüştürüldükten sonra efektif bir ses çıkışı elde edilebilmesi için veya hava ortamına gönderilecek olan RF sinyallerin güçlendirilebilmesi için güç kuvvetlendirici devrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Güç kuvvetlendiricilerin, devrelerin giriş-çıkış katlarında bulunmaları veya tek başlarına çalışma performansları, devrenin tüm performansını doğrudan etkilediği için tasarımlar yapılırken doğru yapıların kullanılması ve etkilerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Güç MOSFET'lerinin bahsedilen avantajlarından yararlanabilmek için bu transistör yapılarıyla kuvvetlendirici tasarımları yapılmıştır.

Yapılan tasarımlarda askeri veya ticari uygulamalar için göz önüne alınması gereken iki temel ölçüt kalite ve güvenilirliktir. Ortaya konulan endüstriyel elektronik ürünlerin kaliteli olması kadar güvenilirlik açısından da kendini kanıtlaması gerekmektedir. Kalite, bir ürünün, belirli koşullar altında değerlendirilmesi olarak tanımlanırken, güvenilirlik ise belirli koşullar altında aynı ürünün zamanla gösterdiği dayanımı ifade etmektedir [5]. Bu nedenle bir ürünün kaliteli olmasıyla birlikte güvenilir olması büyük önem arz etmektedir. Günümüz endüstrisinde ürün güvenilirliği önemli yer tutmaktadır. Elektronik endüstrisinde güvenilirliğin önemi, çalışma alanına bağlı olarak hayati derecede artabilmektedir. Uzay çalışmaları, yenilenebilir enerji kaynakları gibi her an erişime müsait olmayan sistemlerde yapılan tasarımların çalışma ömürleri veya yorma etkisi altındaki davranışlarının öngörülebilmesi ve yeni tasarımların bu öngörüler ile yapılması büyük önem arz etmektedir.

Günümüzde yarıiletken yorma etkileri hala tam olarak modellenememiştir. Çoğunlukla yapılan çalışmalardan hareketle ortaya konulan yorma dağılımları veya ampirik modeller kullanılmışlardır [6–10]. Çalışma ömürlerinin ve buna bağlı olarak yorma etkilerinin metodolojik olarak tespit edilebilmesi için hızlandırılmış testler kullanılmıştır [11–17]. Yüksek sıcaklık, aşırı gerilim gibi çalışma koşullarının üzerinde uygulanan yorma faktörleri vasıtasıyla bu etkiler incelenmiştir [18–21].

MOSFET'ler üzerine yapılan çalışmalarla, eşik gerilimi, mobilite gibi parametreler üzerinden yorulma etkilerine dair çalışmalar ortaya konulmuştur [22], [23]. Küçülen devre boyutlarıyla aynı oranda azaltılamayan besleme gerilimi ve birim alanda oluşan akım yoğunluğu, MOSFET'ler için yüksek sıcaklık veya aşırı gerilim ile yapılan yorma testlerinin gerçek çalışma ömrünün modellenmesine benzer sonuçlar oluşturmasından

ötürü çoğu çalışmada ilk yorma ögeleri olarak kullanılmışlardır [20], [24], [25]. Bununla birlikte uzay çalışmalarında yoğun radyoaktiviteye maruz kalan elektronik cihazlar için radyoaktif etkileri inceleyen çalışmalar da yapılmıştır [18], [26].

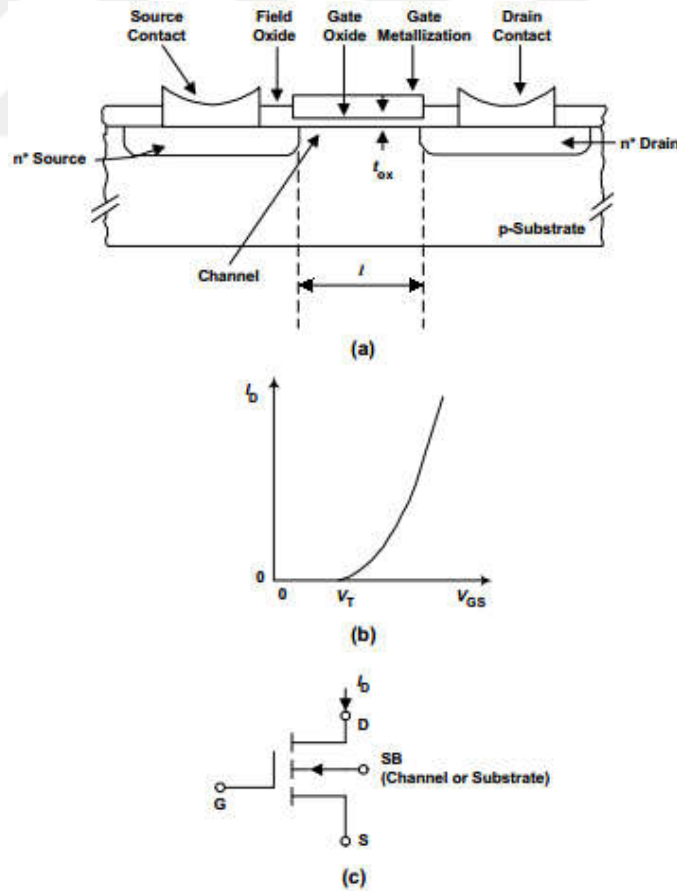
Bu çalışmada MOSFET'lerin yorulma etkilerinin güç kuvvetlendirici devreler içinde oluşturduğu değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, farklı güç kuvvetlendirici sınıfları için, aşırı gerilim yorması yöntemi ile hızlandırılmış testler yapılacak ve elde edilen sonuçlar ile yorulmamış kuvvetlendirici devreleri arasındaki ilişkiler araştırılacaktır.



2. GENEL KISIMLAR

2.1 GÜÇ MOSFET'LERİ

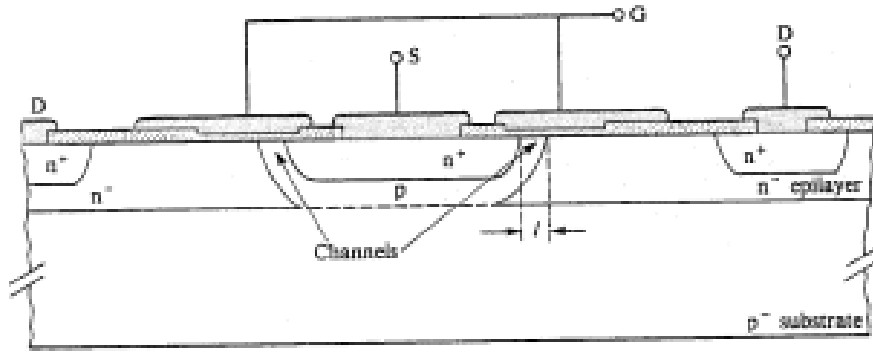
MOSFET'ler (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 1970'lerin başından itibaren elektronik sinyal işleme, kontrol sistemleri ve bilgisayarlarda kullanılmaya başlandı [4]. 1980'lerden itibaren, aynı temel prensiplere ve benzer üretim tekniklerine dayanmasına rağmen geliştirilen geometri, güç elektroniği uygulamalarının belirgin şekilde gelişme kaydetmesini sağladı. Günümüzde tümleşik devreler, anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), sürücü devreleri ve RF alıcı-verici devreleri gibi birçok elektronik uygulamada oldukça yaygın yer almasından ötürü en çok kullanılan aktif elemanlar MOSFET'lerdir. Şekil 2.1 'de nMOS yapısına ait bir MOSFET 'in şematığı, transfer karakteristiği ve yaygın kullanılan sembolü verilmiştir.



Şekil 2.1: (a) n kanallı bir MOSFET'in kesit görünümü, (b) I_D - V_{GS} özgeğrisi, (c) nMOSFET'in sembolik gösterimi [27].

1980'lerin başında geliştirilen DMOS (double diffused MOS) transistörler birçok güç uygulamasında kullanılmaya başlandı [28]. DMOS transistör yapısının diğer MOS yapılarına göre avantajı frekans performansından ödün vermeden, yüksek besleme geriliminde düşük besleme kaynağı maliyeti sağlaması ve yüksek güç cihazlarının tasarımını basitleştirmeyi başararak yüksek delinme gerilimine dayanmasıdır. DMOS transistörlerin yüksek doğrusal verimlilikle tasarlanabilme kabiliyeti yaygın kullanılmalarını sağlamıştır. DMOS transistör yapısı ve fabrikasyon teknolojisi akım yönüne bağlı olarak yatay güç DMOS ve dikey güç DMOS olarak (LDMOS ve VDMOS) iki alt gruba ayrılmıştır. Bu iki yapıdan her biri kendi artı ve eksileriyle, değişik segmentlerde genişçe yer bulmuştur. VDMOS ve LDMOS; teknoloji ve üretim yapıları farklılıklarına, DC ve RF karakteristiklerine göre farklı uygulama alanlarında kullanılmışlardır.

LDMOS'larda akım savaktan kaynağa doğru yatay olarak akar.

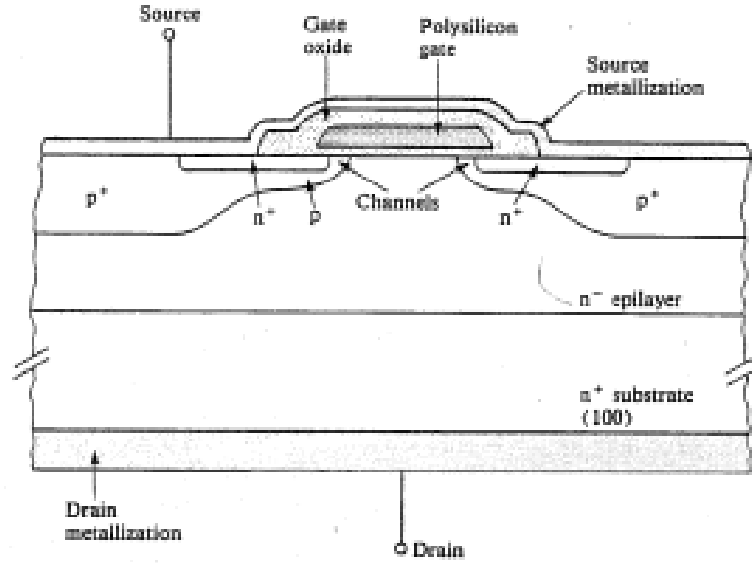


Şekil 2.2: LDMOSFET kesit gösterimi [4].

LDMOS yüksek frekanslı uygulamalarda çoklukla tercih edilir [29]. LDMOS, VDMOS 'a oranla daha yüksek kazanç, daha fazla verimlilik, aynı alanda daha fazla güç sağlar. Çalışma frekansı azaldıkça VDMOS'lara karşı bu avantajları azalır. C_{rss} kapasitansının düşük olması dışında VDMOS ile benzer DC karakteristikler gösterir [30]. Bu özellikleriyle LDMOS güç MOSFET'leri dar bant uygulamaları, yüksek frekans, kazanç ve verimlilik istenen uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

VDMOS 'larda akım savaktan kaynağa doğru dikey olarak akar. LDMOS'a oranla daha yüksek giriş empedanslı, daha kararlı, daha dayanıklı ve yüksek güçlerde çalışılabilir bir güç MOSFET'i olarak belirtilir [31]. C_{rss} kapasitansının düşük olması dışında VDMOS ile benzer DC karakteristikler gösterir [30]. Yüksek giriş empedansı genişbant uygulamalarında daha kolay kullanılabilmesini sağlar. Bu artıları vasıtasıyla VDMOS güç MOSFET'leri genişbant devre tasarımları, ham güç yükseltgeçleri, devamlı dalga

(CW) FM/AM devreleri gibi dayanım ve stabilizasyon gerektiren düşük frekanslı uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.3: VDMOSFET kesit gösterimi [4].

Bu çalışmada, güç kuvvetlendiricilerinde sıklıkla kullanılan VDMOSFET'ler kullanılacaktır.

2.2 GÜÇ KUVVETLENDİRİCİLERİ

2.2.1 Güç Kuvvetlendiricileri Parametreleri

Kuvvetlendiriciler, alınan bir sinyali veya giriş değerini, bir elemana ya da başka bir kuvvetlendiriciye daha yüksek bir sinyal veya çıkış değeri olarak aktarır. Örneğin, bir mikrofondan çevirici ile alınan birkaç miliVolt'luk giriş sinyali, bir hoparlörden çıkış sağlamak için yükseltilmeye ihtiyaç duyar. Kuvvetlendiricilerin tasarımları elde edilmek istenen çıkış sinyali veya giriş sinyaline göre belirli parametreler üzerinden tanımlanabilirler. Güç kuvvetlendiricileri için önemli olan parametreler;

- Çıkış Gücü
- Güç Kazancı
- DC Çalışma karakteristiği
- Verimlilik
- Dayanıklılık
- Kararlılık
- Doğrusallık

olarak verilebilir.

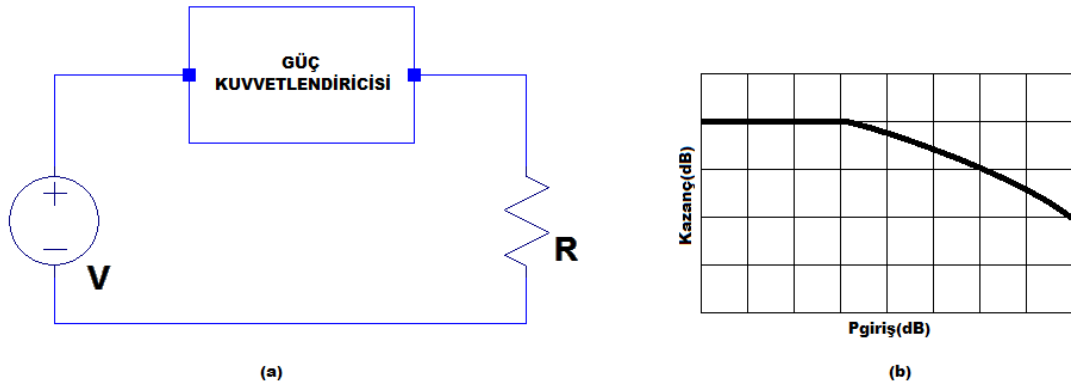
Küçük sinyal kuvvetlendiricileri için önemli olan ana faktörler doğrusallık ve kazancın büyüklüğüdür. Güç aktarma kabiliyeti ve verimlilik ise küçük sinyal kuvvetlendiricileri için daha az önem taşır. Bununla birlikte büyük sinyal veya güç kuvvetlendiricileri için çıkışa aktarılan gücün büyüklüğü ve güç aktarabilme kabiliyeti önemli etmenlerdir. Verimlilik, güç kazancı, çıkış işaretinin giriş işaretine göre doğrusal aralığı ve çalışma noktasının belirlenmesi bu çalışmada incelenecek önemli kuvvetlendirici parametreleridir.

2.2.1.1 Güç Kazancı

Güç kazancı, bir kuvvetlendiricinin çıkış gücünün, giriş gücüne oranıdır. Güç kazancı, K olmak üzere,

$$K = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanır. Giriş ve çıkış empedansının eşit olduğu durumlarda, çıkış ve giriş gerilimlerinin oranı da kazancı verir. Güç kuvvetlendiricilerinde eşlenik giriş-çıkış empedansı yerine çıkış empedansı artırılarak güç kazancı yüksek devreler elde edilebilir.

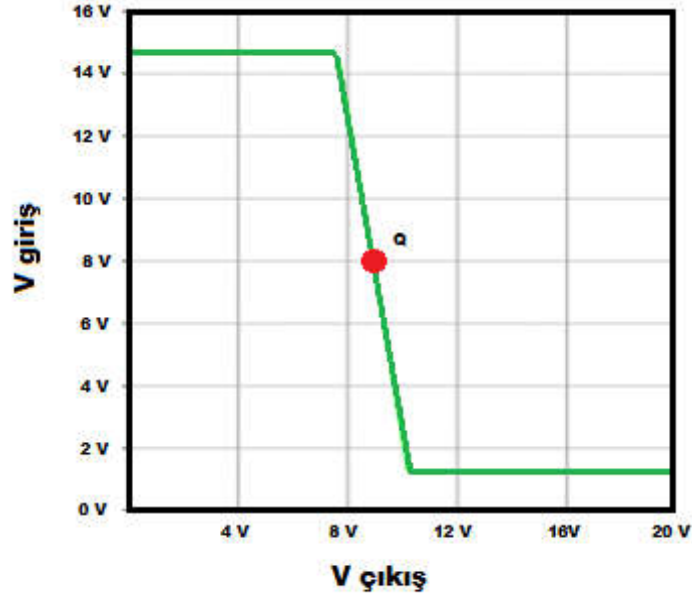


Şekil 2.4: (a) Temel kuvvetlendirici şematigi (b) Kuvvetlendiricilerin giriş gücüne göre kazanç değişimi.

2.2.1.2 DC Kazanç

DC Kazanç, kuvvetlendiricinin çıkış sinyalinin, DC giriş sinyaline olan oranını veren eğridir. Şekil 2.5 'de görüldüğü üzere eğrinin doğrusal olduğu aralık, çıkış işaretinin giriş işaretine göre doğrusal aralığını verir. Bu doğrusal aralığın orta noktası, çalışma noktasıdır (Q). Doğrusal çalışma aralığının değişimi, uygulanan işaretin bozulmadan

kuvvetlendirilebileceği aralığı göstermesi açısından incelenmesi gerekli bir parametredir. Çalışma noktasının kuvvetlendirici için doğru şekilde seçilmesi kuvvetlendirici verimliliği ve güç kazancını doğrudan etkiler.



Şekil 2.5: Kuvvetlendiricilerin çıkış geriliminin giriş gerilimine göre değişimi.

2.2.1.3 Verimlilik

Verimlilik, kuvvetlendiricinin DC besleme gücünün ne kadarının çıkış gücüne dönüştürüldüğünü tanımlar. Verimlilik özellikle güç kuvvetlendiricileri için oldukça kritik bir parametredir. Kuvvetlendiricilerin, güç tüketimi oransal olarak içinde buldukları tüm yapının verimini doğrudan etkiler. Güç kuvvetlendiricilerin verimliliğe bağlı olarak kalitesi, yüksek seviyeli veya tümdevre güç kuvvetlendiricilerinde ısı kaybının artmasında belirleyici bir parametredir. Verimlilik hesabı yapılırken giriş gücünün hesaba katılıp katılmamasına bağlı olarak iki temel verimlilik formülü kullanılır. Savak verimliliği, η_d olmak üzere,

$$\eta_d = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{dc}}} \times 100 \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanır.

Giriş gücü çıkarılmış verimlilik (P.A.E),

$$P.A.E = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \times 100 \quad (2.3)$$

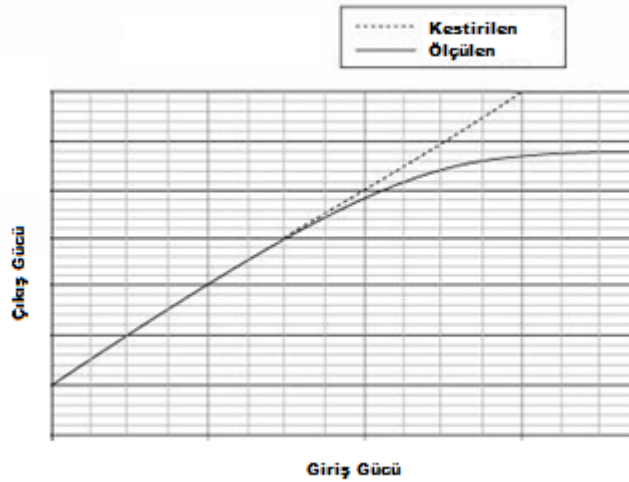
şeklinde hesaplanır. Kuplaj kapasitelerinin yer aldığı kuvvetlendirici devrelerinde giriş devresinde harcanan güç sıfır olacağı için iki temel formülasyon aynı olacaktır. Bu

çalışmada verimlilik hesaplamalarında savak verimliliği kullanılmış ve kısaca verimlilik olarak adlandırılmıştır.

2.2.1.4 Doğrusallık

Güç kuvvetlendiricilerinde, tasarım topolojisinin belirlenmesi kadar önemli olan bir etmen de doğrusallıktır. Yapılan tasarımların ihtiyaçlarına göre, doğrusal olmayan kuvvetlendiricilerin doğrusal kuvvetlendiricilere oranla daha yüksek verimlilik sağlamasından ötürü doğrusallıktan ödün verilebilmektedir.

Güç kuvvetlendiricilerinin doğrusal olduğu çıkış gücü aralığını belirleyen önemli bir parametre de 1dB sıkıştırma noktasınının (1 dB Compression Point) bulunmasıdır. Kazancın doğrusal olarak devam ettiği bölgeden kestirim yapılarak üretilen çıkış gücü değerinin, ölçülen çıkış gücü değerine göre 1dB aşağıda kaldığı nokta 1dB sıkıştırma noktası olarak tanımlanır [32].



Şekil 2.6: Kuvvetlendiricilerin 1 dB Sıkıştırma Noktası.

2.2.1.5 Bant Genişliği

Bant genişliği bir kuvvetlendiricinin hangi frekans aralığında çalışabildiğini gösterir. Sinyal frekansı arttıkça, kuvvetlendirici devresi tasarım limitlerine bağlı olarak daha hızlı cevap üretmek zorunda kalır. Düşük sinyal frekanslarında veya DC çalışmadaki etkilerde kuvvetlendiricinin çalışma kararlılığı için önem taşır. Maksimum çıkış gücünün 3dB azaldığı noktalar kesim frekansı olarak adlandırılır.

2.2.1.6 Çıkış Gücü

Çıkış gücü, kuvvetlendirici devresi tarafından çıkış yüküne uygulanan toplam güç olarak tanımlanır. Farklı çalışma koşulları ve giriş değerleri için çıkış gücü değişiklik

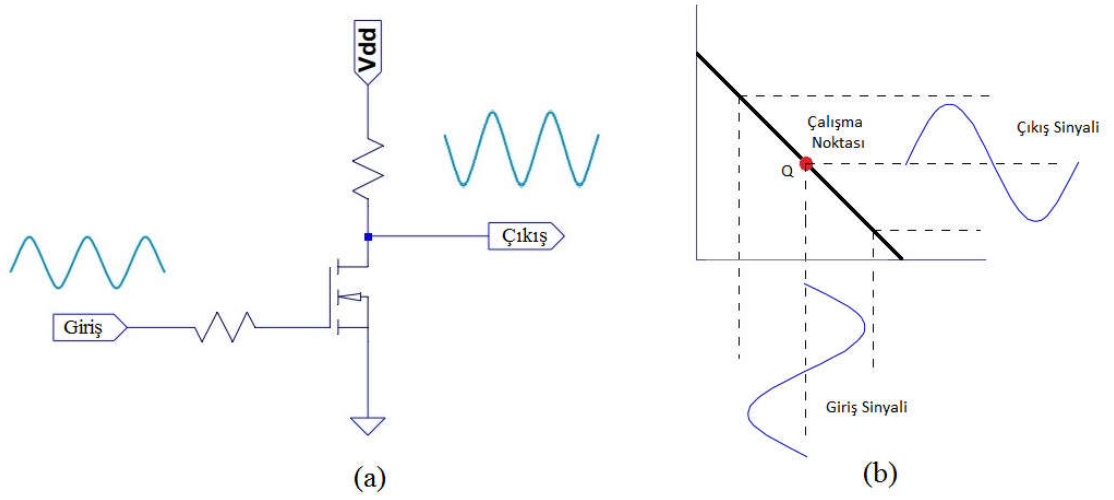
gösterir. Şekil 2.4 'de gösterildiği gibi, çıkış gücü daima giriş gücünü doğrusal olarak takip etmez. Çıkış gücünün maksimum olarak ölçüldüğü değere maksimum çıkış gücü denilir. Kuvvetlendirici devrelerinin tasarımı yapılırken, seçilecek topolojilerin belirlenmesinde göz önünde bulundurulmuş en önemli parametrelerden biri çıkış gücüdür.

2.2.2 Güç Kuvvetlendirici Sınıfları

Güç kuvvetlendiricileri yapılarındaki gelişmelere bağlı olarak, temel kuvvetlendirici topolojileri belirli bir biçimde terimlendirilmiştir. Bu terimlendirmeye göre, kuvvetlendirici topolojileri, sınıf etiketiyle A harfinden başlayarak isimlendirilmiştir. A sınıfı kuvvetlendirici tasarımı klasik küçük sinyal kuvvetlendiricisi topolojisindedir [33]. Güç kuvvetlendiricileri genel olarak doğrusal ve anahtarlama olmak üzere iki temel grupta incelenebilir. Bu temel grupların kesişiminde yer alan tasarımlar olmasına rağmen, bu şekilde sınıflandırma yapmak tasarım esnasında farklı topolojiler arasındaki ödenleşimi göstermesi açısından önemlidir. A, B, AB ve C sınıfı güç kuvvetlendiricileri, doğrusal kuvvetlendiricilerdir. Bu tip kuvvetlendiricilerde çıkış transistörü akım kaynağı olarak davranır ve çıkış empedansı bağıl olarak yüksektir. Çıkışta görülen dalga formları tam veya parçalı şekilde sinüs sinyallerinden oluşur. Buradaki doğrusallık çıkışta giriş sinyalinin, girişteki sinyalin doğrusal veya yarı-doğrusal ve kuvvetlendirilmiş şekilde görülmesidir [34]. D ve E sınıfı güç kuvvetlendiricileri anahtarlama tipli kuvvetlendiriciler olarak tanımlanır. Bu gruptaki kuvvetlendiriciler doğrusal kuvvetlendiricilere göre daha yüksek verimliliğe sahip olmasına rağmen daha az doğrusaldır.

2.2.2.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

A sınıfı güç kuvvetlendiricilerinde, Şekil 2.7 'deki gibi çıkış sinyali, giriş sinyalini tamamen takip eder.

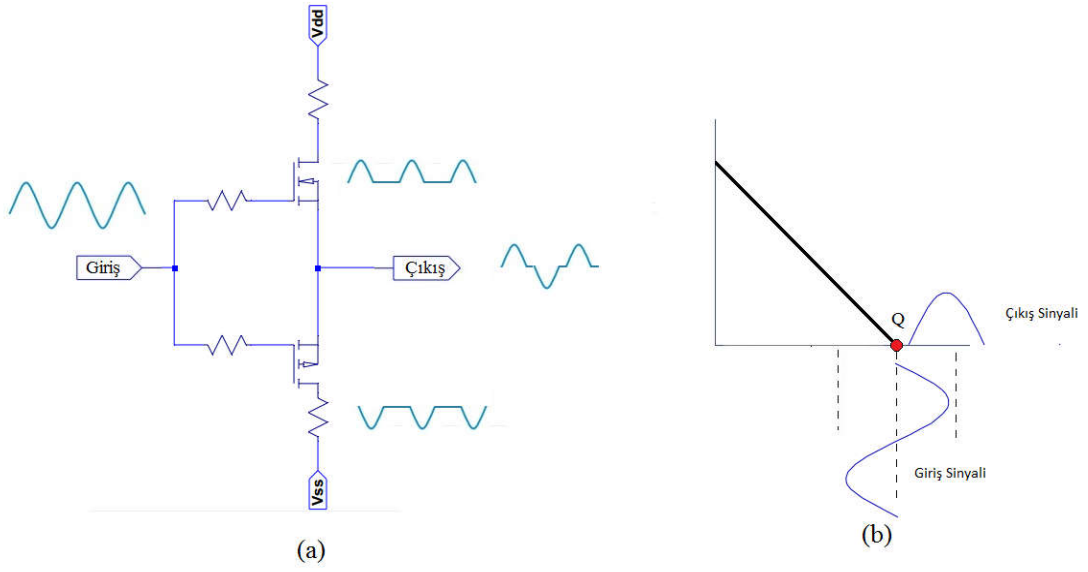


Şekil 2.7: (a) A sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

Çalışma noktası tam olarak, yük eğrisinin orta noktasında yer alır. A sınıfı kuvvetlendiricilerde, kuvvetlendirici transistör giriş sinyalinin tüm periyodu boyunca daima aktif bölgede çalıştığı için sürekli olarak akım akar ve fazladan güç tüketimi oluşur. Kuvvetlendiricilerin aktif kaldıkları periyot iletim açısı olarak adlandırılır. A sınıfı kuvvetlendiriciler için iletim açısı, $\theta = 360^\circ$ 'dır. Fazla güç tüketiminden ötürü A sınıfı kuvvetlendiricilerin verimliliği oldukça düşüktür ve maksimum teorik verimliliği %50 olarak verilir [35].

2.2.2.2 B Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

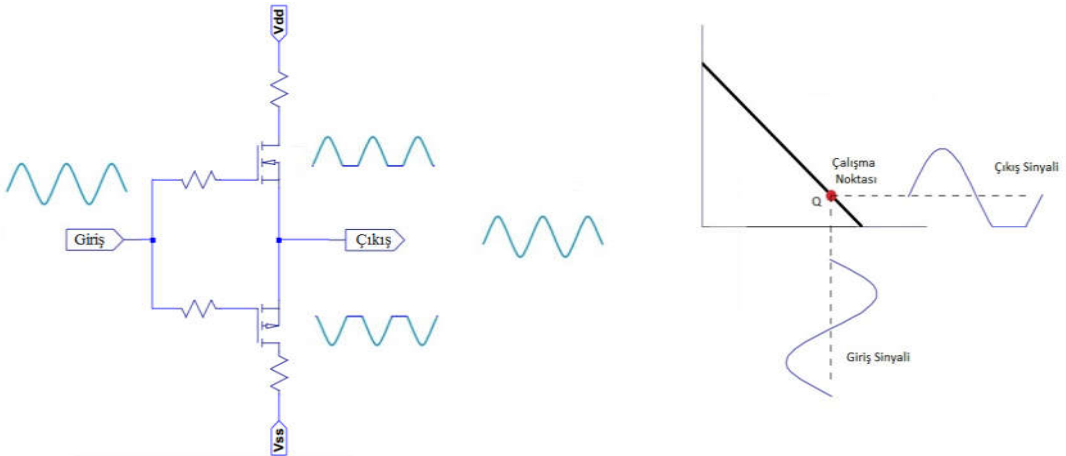
B sınıfı kuvvetlendiriciler giriş sinyali periyodunun yarısında aktiftirler ($\theta = 180^\circ$) ve güç tüketimleri A sınıfı kuvvetlendiricilere göre daha azdır. Bu nedenle verimlilikleri daha yüksektir. Maksimum teorik verimlilikleri %78.5 olarak verilir [35]. Şekil 2.8 'de B sınıfı kuvvetlendiricilerin çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.8: (a) B sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematığı, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

2.2.2.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

AB sınıfı kuvvetlendiriciler, A ve B sınıfı kuvvetlendiricinin ortaklaşa kullanıldığı bir kuvvetlendirici topolojisidir. AB sınıfı, ses kuvvetlendiricileri tasarımında en yaygın kullanılan kuvvetlendirici yapısıdır.



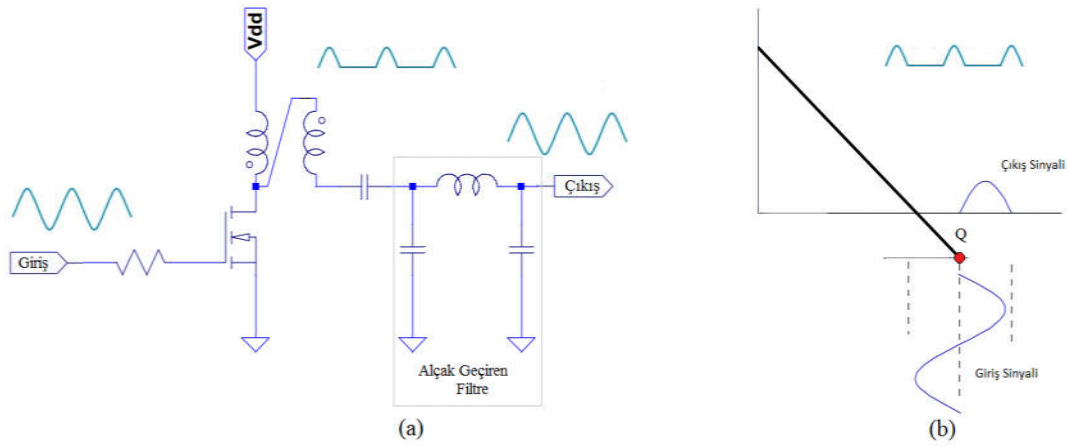
Şekil 2.9: (a) AB sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematığı, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

AB sınıfı kuvvetlendiriciler, B tipi kuvvetlendiricilerin sahip olduğu, dalga formlarının geçiş noktalarında iletimde kalmasından kaynaklı oluşan geçiş gürültülerini

oluşturmama başarımı gösterecek yapıdadırlar. Aktif oldukları aralık A ve B sınıfı kuvvetlendiricilerin arasındadır ($180 < < 360$) ve güç tüketimleri A sınıfı kuvvetlendiricilere göre daha azdır. Bu nedenle verimlilikleri daha yüksektir. Maksimum teorik verimliliği $\%50 < < \%78.5$ arasındadır [35]. Şekil 2.9 'da AB sınıfı kuvvetlendiricilerin çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre değişimi verilmiştir.

2.2.2.4 C Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

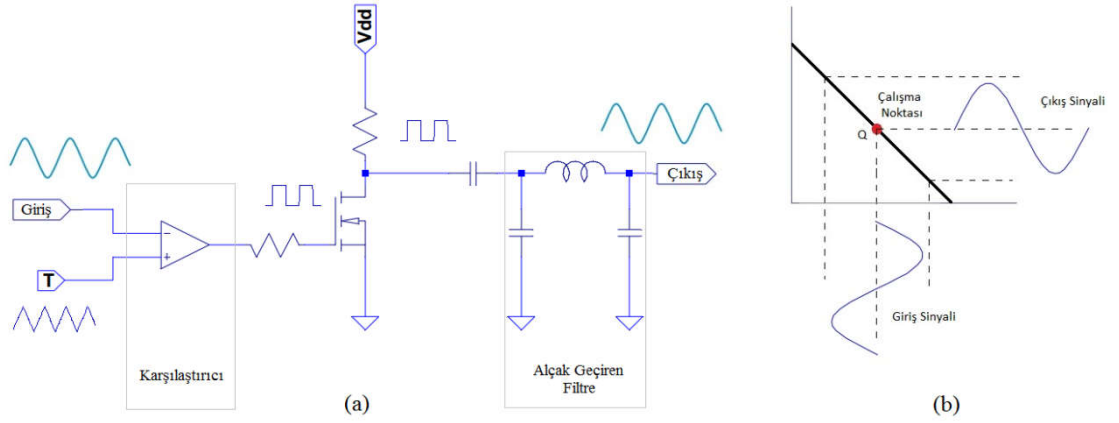
C sınıfı kuvvetlendirici tasarımı doğrusal kuvvetlendiriciler arasında en düşük doğrusallığa sahip olmasına rağmen verimliliği en yüksek kuvvetlendirici tipidir. A, B ve AB sınıfı kuvvetlendiricilerde çıkış sinyallerinin genliği ve fazı, giriş sinyallerinin genliği ve fazıyla orantılıdır. Bununla birlikte C sınıfı kuvvetlendiriciler giriş sinyalinin bir periyodunun yarısından fazlasında kesim durumunda kalırlar (< 180). Kuvvetlendiricinin transistörünü bu şekilde kutuplamak $\%80$ civarında verimlilik sağlamasına karşın çıkış sinyalinde çok fazla bozulmaya sebep olur. Bu nedenle C sınıfı kuvvetlendiriciler, ses kuvvetlendiricilerinde tercih edilmez, çoğunlukla RF kuvvetlendirici devrelerinde kullanılırlar.



Şekil 2.10: (a) C sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

2.2.2.5 D Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

D sınıfı güç kuvvetlendiricileri doğrusal olmayan veya PWM kuvvetlendiricileridir. D sınıfı kuvvetlendiriciler, sadece giriş sinyali olduğu sürece çıkış gerilimi ve akımı ürettikleri için teorik olarak $\%100$ verim sağlayabilirler.



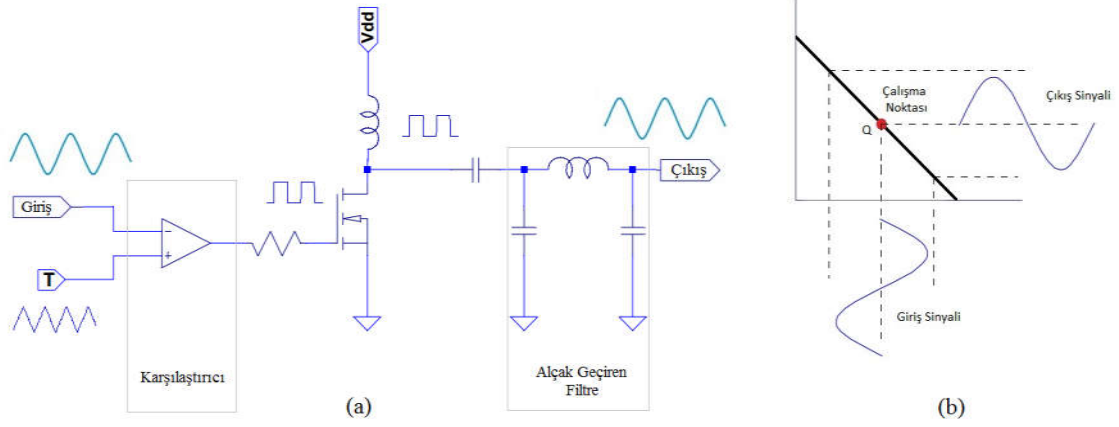
Şekil 2.11: (a) D sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

Pratikte, giriş sinyali frekansı kesim frekansına göre oldukça az olursa, çok yüksek çıkış verimliliği elde edilebilir. Çıkış katındaki transistörün aktif kesimde olmasından ötürü çok küçük bir güç harcanmasına rağmen, verimlilik %100 'e yakınsayabilir. Bu sebeple D sınıfı kuvvetlendiriciler ses uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, radyo frekanslarında, kapalı duruma geçiş gibi yüksek akım-gerilim geçişlerinin olduğu örtüşme bölgelerinde, parazitik etkiler olabilir. Bu parazitik etkilerin oluşmasından ötürü verimlilik azalır ve D sınıfı kuvvetlendiriciler RF uygulamaları için daha az kullanışlı hale gelir [36].

2.2.2.6 E Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

Yüksek frekanslar için, E sınıfı kuvvetlendiricilerin topolojisi, D sınıfı kuvvetlendiricilerin faydalarını ve yüksek akım-gerilim geçişlerinin olduğu örtüşme bölgelerindeki parazitik etkileri azaltacak şekilde oluşturulmuştur. E sınıfı kuvvetlendirici için tasarım şematiği aşağıda verilmiştir. E sınıfı kuvvetlendirici topolojisinin avantajı çıkışında bulunan kapasitedir. Bu kapasite cihazın çıkışında parazitik kapasitans etkisinin azalmasını sağlayarak, performansın artmasını sağlar. E sınıfı kuvvetlendiriciler 2 büyük dezavantaja sahiptir. İlk olarak delinme geriliminin düşük olduğu CMOS teknolojilerinde, çıkış geriliminin delinme geriliminin üzerinde salınması kırılmaya sebep olabilir. İkincisi, E sınıfı kuvvetlendiriciler, pasif duruma geçişteki örtüşme bölgelerindeki parazitik etkileri azaltma etkisi göstermesine rağmen, aktif duruma geçişteki etkiler için bir çözüm sağlamaz, geniş bir örtüşme bölgesinin

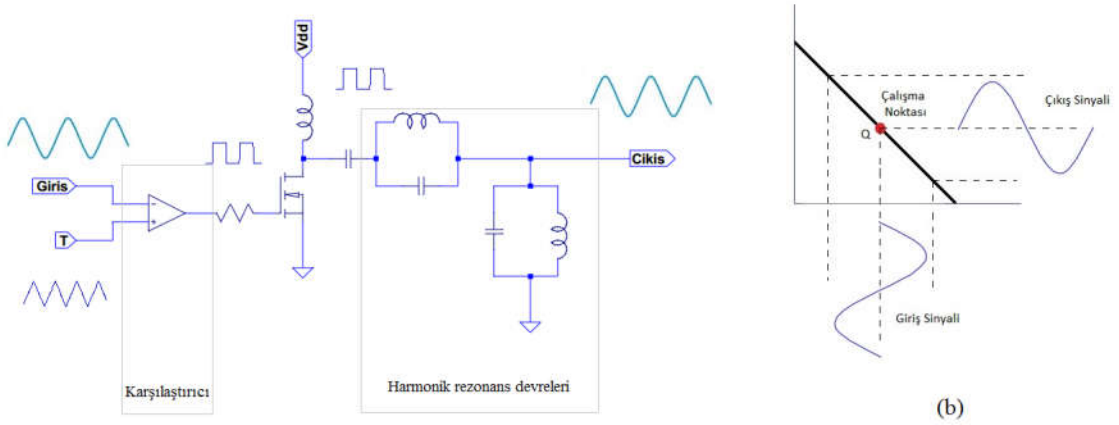
oluşması verimliliği azaltacak bir etki oluşturabilir. Bununla birlikte, E sınıfı güç kuvvetlendiricileri ile başarılı uygulamalar gerçekleştirilmiştir [37–39].



Şekil 2.12: (a) E sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

2.2.2.7 F Sınıfı Güç Kuvvetlendiricileri

F sınıfı güç kuvvetlendiricileri çıkış katında harmonik rezonans devrelerini kullanarak kare dalga formu oluşturur ve daha fazla verimlilik sağlar. F sınıfı kuvvetlendiriciler eğer sonsuz harmonik ayarlama devresi kullanılırsa, yüksek frekanslarda %90 'dan fazla verimlilik sağlar.



Şekil 2.13: (a) F sınıfı kuvvetlendiricilerin temel devre şematiği, (b) çalışma noktası, giriş ve çıkış sinyali.

2.2.2.8 Güç Kuvvetlendirici Sınıflarının Karşılaştırılması

Tablo 2.1 'de güç kuvvetlendirici sınıflarının çalışma modu, iletim açısı, çıkış gücü, verimlilik, kazanç ve doğrusallık özellikleri bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.1: Temel Güç Kuvvetlendirici Parametreleri ile Güç Kuvvetlendirici Sınıflarının Karşılaştırılması.

Sınıf	Mod	İletim Açısı()	Çıkış Gücü	Maksimum Verimlilik	Kazanç	Doğrusallık	Min. Transistör Sayısı
A	Akım Kaynağı	$=2\pi$	orta	%50	Yüksek	İyi	1
B		$=\pi$	orta	%78	Orta	Orta	2
AB		$\pi < <2$ π	orta	$\%50 < <$ $\%78.5$	Düşük	Zayıf	2
C		$<\pi$	düşük	%100	Düşük	Zayıf	1
D	Anahtarlama	$=\pi/2$	yüksek	%100	Düşük	Zayıf	1
E		$=\pi/2$	yüksek	%100	Düşük	Zayıf	1
F		$=\pi/2$	yüksek	%100	Düşük	Zayıf	1

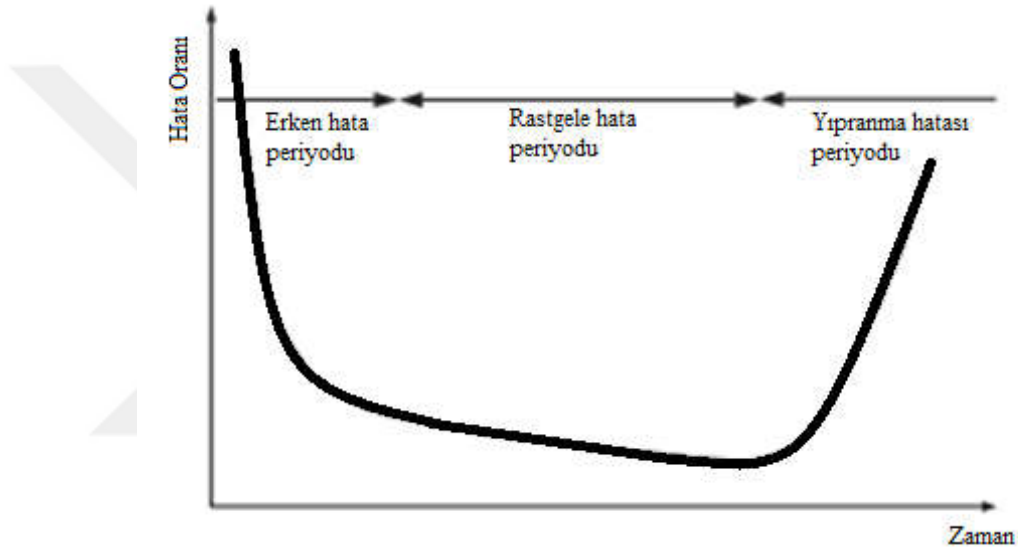
Cihazların aktif durumda kaldığı periyotlar iletim açısı olarak adlandırılmıştır. A, B, AB ve C sınıfı kuvvetlendiriciler için çıkış transistörü daha çok akım kaynağı olarak çalışır. Güç kuvvetlendirici topolojileri için doğrusallıkla verimlilik arasında bir ödünleşim olduğu görülmektedir. Yapılan tasarımlarda kuvvetlendirici devresinde gücün çıkışa aktarılması, iletim açısının azaltılmasıyla sağlanmasına karşın, sağlanan kazanç azalmaktadır. Doğrusallığın çok önemli görülmediği ve verimliliğin önem arz ettiği tasarımlarda D, E ve F sınıfı kuvvetlendiriciler tercih edilebilir.

2.3 GÜVENİLİRLİK

Güvenilirlik, belirli koşullar altında hatasız çalışma sürecidir [5]. Güvenilirlik, uygulama ve pratik verilerinin, değişik teknik ve metodlarla ilgili ürünlerden çıkarımı ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla güvenilirlik, üzerinde çalışılan ürüne veya uygulamalara göre farklı içerik taşır. Örneğin, bireysel kullanıcı için kullanılan güvenilirlik gereksinimleri ve taşınan risk, endüstri, otomotiv sektörü, telekomünikasyon, sağlık, askeri ve uzay uygulamalarına göre büyük farklılıklar gösterir.

Kalite ve güvenilirlik çok yakın terimler olmasına karşın, birbirlerinin yerine kullanılabilir değillerdir. Kalite, gereksinimlere karşı ürünün anlık performansını ifade

ederken, güvenilirlik, belirli bir periyot içinde gereksinimlere karşı gösterilen performansı ifade eder. Dolayısıyla güvenilirlik için her daim bir zaman faktörü vardır. Moore Yasasıyla birlikte [1], günümüzde yarı-iletken ürünlerin özellikle MOSFET'lerin boyutlarının sürekli küçülmesi gereksinimi doğmuştur. Bunun sonucu olarak yarı-iletken ürünlerin güvenilirlik analizi bir süreklilik arz ederek, önemini sürekli olarak artırmıştır. Yarı-iletkenlerin, hem üretim safhasında hem çalışma safhasındaki bozulma davranışları önemli bir çalışma konusu olmuştur. Yarı-iletkenlerin zamanla bozulma davranışları hata oranı eğrisi ile Şekil 2.14 'de verilmiştir.



Şekil 2.14: Yarıiletkenlerin zamana bağlı bozulma periyotları (küvet eğrisi).

Bu eğri küvet eğrisi olarak da adlandırılır. Eğri, erken hata periyodu, rastgele hata periyodu, yıpranma hatası periyodu olmak üzere 3 farklı kısımda incelenebilir. Bu 3 farklı kısımda çoğunlukla oluşabilecek hata türleri Şekil-2.15 'de verilmiştir. Erken hataların, çalışma zamanıyla birlikte oluşma sıklıkları hızlıca azalır. Monitörleme prosesinde görülmeyen hatalar, yüksek sıcaklık veya gerilim stresi altında kısa zaman içinde görünür duruma gelerek, erken periyot hatalarının oluşmasına neden olurlar. Çoğu erken periyot hatası, üretim prosesindeki hatalardan ve istenmeyen maddelerin ürüne karışmasından meydana gelirler. Rastgele hatalar, ani güç yükselmesi, erken dönemde farkedilmeyen hataların da oluşması gibi sebeplerle aşırı stres oluşmasından ötürü meydana gelebilirler. Bu periyottaki hatalar erken dönem hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu çalışma periyodundaki hatalar, elektriksel gürültü, elektrostatik deşarj ve diğer problemlere bağlı olarak dış kaynaklı faktörlerin stresi altında meydana gelebilir.

Çoğu yüksek kaliteli cihazda, rastgele hataların az oluşması ve cihazın bu dönemde kararlı çalışması beklenir. Aşınma hataları ise, cihazın yaşam ömrüne bağlı olarak aşınması ve yorulmasından kaynaklı olarak gerçekleşir. Bir cihaz aşınma hatası bölgesine girdiğinde, hata oluşma oranları hızlıca artar. Bu bölgede oluşan hatalar yarı-iletkenlerin, Sıcaklık Taşıyıcı Etkisi (HCE), Elektron Göçü (EM) ve Zamana Bağlı Dielektrik Yorulma(TDDB), Ters Kutuplama Sıcaklığı Kararsızlığı (NBTI) gibi çeşitli bozulma mekanizmalarını içerir. Bu bozulma tipleri Bölüm 2.4 ‘de anlatılmıştır.



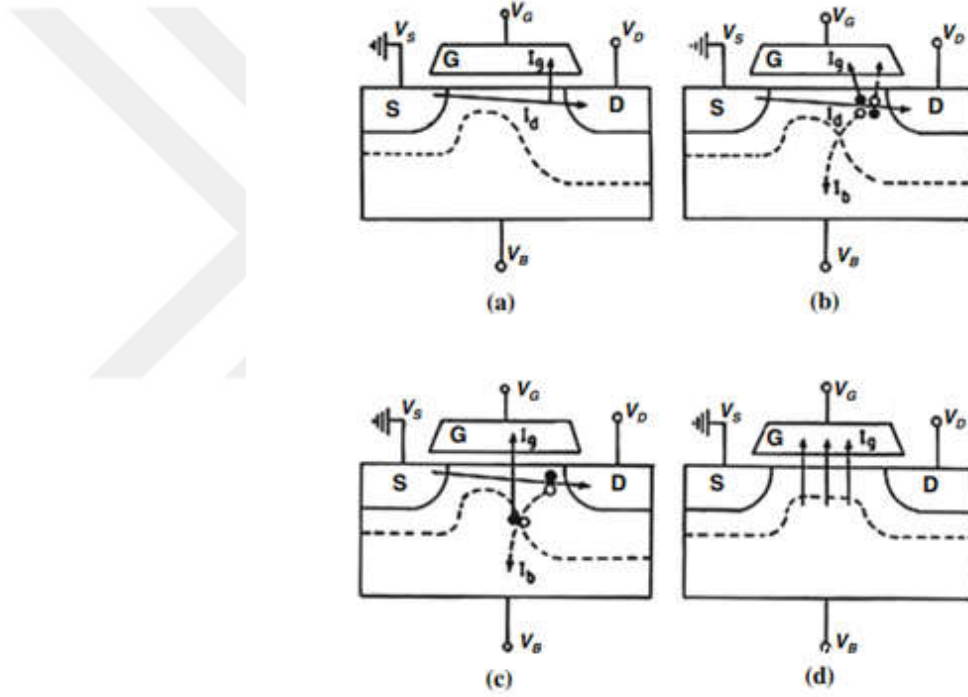
Şekil 2.15: Yarıiletkenlerin zamana bağlı bozulma mekanizmaları.

2.4 MOSFET'LERİN BOZULMA MEKANİZMALARI

2.4.1 Sıcak Taşıyıcı Etkisi (HCE)

Sıcak Taşıyıcılar (HC), yüksek elektrik alan tarafından, yüksek kinetik enerji kazandırılmış, yük taşıyıcılarıdır. Bu sahip oldukları enerji yarı-iletken kafesiyle termal dengede olmadığından ötürü “sıcak” taşıyıcı olarak adlandırılmışlardır. Bu taşıyıcıların bazıları iyonlaşma etkisi veya geçit oksidine yerleşerek elektron boşluk iletimi oluşturan, geçite ulaşan ve geçit akımı taşıyan tuzaklara dönüşürler. Sıcak taşıyıcı etkisinin oluşuma dair farklı yaklaşımlarda çalışmalar yapılmıştır [6], [40–42]. Dört farklı tipte sıcak taşıyıcı oluşumu mümkündür [43] :

- Savak Çığ Sıcak Taşıyıcıları (DAHC) , savak bölgesine yakın yüksek elektrik alandan kaynaklı çığ etkisiyle oluşurlar. Taşıyıcılar kanalda hareket ederken gerekli enerjiyi kazanırlar. Böylece iyonizasyon etkisiyle elektron iletim çiftleri oluşur. Bu kazanımla beraber ardışıl olarak daha fazla sıcak elektron ve sıcak delik geçit oksidinde tuzaklanır(Şekil 2.16 b). Bu durum daha çok $|V_{DS}| > |V_{GS}| > |V_{th}|$ olduğunda gözlemlenir.
- Kanal Sıcak Taşıyıcıları(CHC), savak bölgesinin yakınındaki kanalda MOSFET $V_{gs} = V_{ds}$ olarak çalıştırıldığında oluşurlar. Şekil 2.16 a' da görüldüğü şekilde kaynaktan savağa doğru enerji kaybetmeden ilerleyen bazı elektronlar SiO_2 bariyeri geçerek, geçit oksidinde tuzaklanırlar.



Şekil 2.16: Sıcak taşıyıcı etkilerinin şematik gösterimi.

- İkincil Oluşmuş Sıcaklık Taşıyıcıları (SGHC), substrat akımının ikincil iyonizasyon etkisiyle oluşan ikincil küçük taşıyıcılardır. Savak yakınında çığ etkisi olduğunda, substrat akımı oluşarak daha fazla elektron iletim çiftlerinin oluşmasıyla meydana gelirler.
- Substrat Sıcaklık Taşıyıcıları (SHC), sıcaklıkla oluşan ve tuzaklanan taşıyıcılardır. SHC etkisi, yüksek gövde kutuplaması uygulandığında, savak kutbundan bağımsız olarak oluşur. Bu mekanizmadan, sıcak taşıyıcı hızlandırma testlerinde çokça istifade edilir. Savak bölgesinin yakınlarında

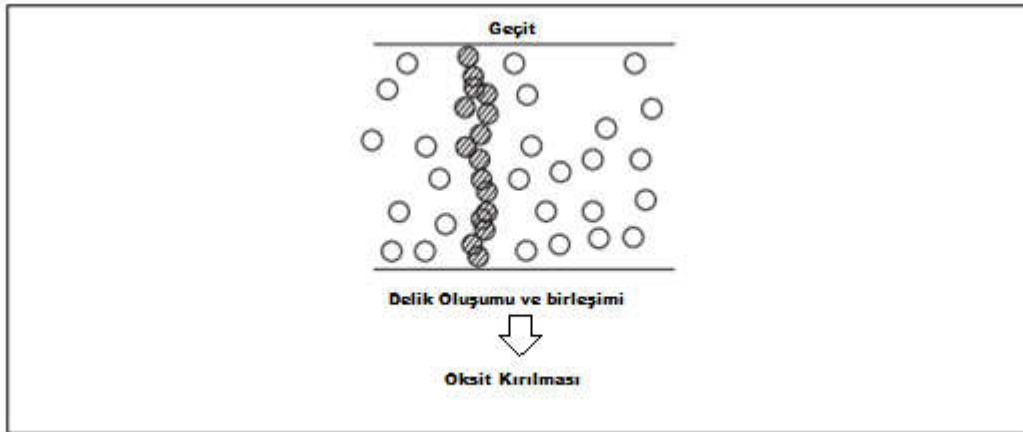
oluşan taşıyıcı mekanizmalarına göre bu taşıyıcı mekanizmasının taşıyıcılarının kanal boyunca eşit şekilde dağılmış olması, hızlandırılmış güvenilirlik testlerinde avantaj sağlamaktadır.

Sıcaklık taşıyıcısı etkileri (HCE), pMOSFET'lerin delik oluşumu için Si-SiO₂ arayüzünde yüksek bariyerleri olması ve deliklerin elektron iletim yolu çiftlerini oluşturmada daha pasif kalmasından ötürü daha çok nMOS cihazlarda çalışılmıştır.

2.4.2 Zamana Bağlı Dielektrik Kırılma (TDDB)

Dielektrik kırılma olayı, dielektrik katmanın yalıtkanlık özelliklerini elektriksel strese bağlı olarak aniden kaybetmesidir [44]. Oksit kırılması, geçit ve yarı iletken substratı arasındaki yolun yük akışıyla kırılmasıyla oluşur. Bu hata mekanizması, MOSFET teknolojisinin gelişmesiyle oksit kalınlığının sürekli olarak azalmasına bağlı olarak, dikkatle incelenmesi gereken bir güvenilirlik endişesi haline gelmiştir. Bu nedenle uzun yıllardır TDDB üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte bugün bile TDDB etkisi tam olarak modellenilebilmiş değildir. E ve 1/E modeli gibi modeller üzerinden tartışılmaya devam etmektedir. TDDB 'nin istatistiki doğası Weibull dağılımı ile iyi tanımlanabilmektedir. Perkülasyon teorisi TDDB'nin istatistiki verilerine uygulanabilmektedir.

TDDB mekanizmasında, oksit film içindeki tuzaklar ısıl veya gerilim stresıyla oluşur. Bu tuzaklardan geçen akım stresle etkilenmiş kaçak akımı (SILC) olarak adlandırılır. Bu oluşan tuzakların sayısı arttığında Silisyum substratla geçit elektrotu birbirine bağlanmış olur ve büyük bir akım akarak geçit oksit tabakası yok olur.



Şekil 2.17: Zamana bağlı dielektrik kırılmanın oluşumu.

2.4.3 Negatif Kutuplama Sıcaklığı Kararsızlığı (NBTI)

Kutuplama sıcaklık kararsızlığı (BTI), MOS teknolojilerinin güvenilirliğini etkileyen önemli bozulma etkilerinden biridir. Özellikle, p kanallı MOSFET'lerin üzerinde etkisi daha fazla gözlemlenmiştir. Bu bozulma etkisi, pMOSFET'ler negatif gerilimle kutuplandıkları için negatif kutuplama sıcaklığı kararsızlığı (NBTI) olarak adlandırılmıştır. NBTI etkileri MOS teknolojisinin ilk zamanlarında itibaren raporlanmıştır [45]. Bununla birlikte son dönemde yarı-iletken teknolojisinin hızlıca büyümesinin etkisiyle ve pMOSFET'lerin sayısının artmasıyla daha fazla önem kazanmıştır. NBTI bozulma mekanizması, eşik geriliminin kaymasına, alt-eşik zarfının bozulmasına ve mobilitenin azalmasına sebep olur. Diğer bozulma mekanizmalarından farklı olarak, NBTI stresi ortadan kalktığında, mekanizmanın etkileri de azalır. Bununla birlikte hasar oluşan yerler aynı kalır ya da çok yavaş şekilde eski haline gelir. pMOSFET'lerin önemli yeri olan CMOS teknolojisinin yaygın kullanılması, sınırlı besleme geriliminin VLSI tasarımlarda sabit kalarak, küçük oksit alanlarında yüksek elektrik alan oluşması, yüksek çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak yüksek güç tüketimi ve alternatif dielektrik malzemelerin kullanılması NBTI oluşumunu artırıcı gelişmeler olarak sıralanabilir.

2.4.4 Elektron Göçü (EM)

Elektron göçü, malzemelerin yer değiştirmesini baz alan bir bozulma mekanizmasıdır. Mikro-elektronik cihazlarda, içeriden bağlı olan kablolar yüksek akım taşırlar. Transistörlerin küçülmesine bağlı olarak, tümleşik devrelerin yoğunluğunda, performansında ve güvenilirliğinde iç bağlantılar da transistörler kadar önemli bir kısıtlayıcı etken olarak ortaya çıkar. Yoğun şekilde iç bağlantıların küçülerek ölçeklendirilmesi akım yoğunluklarının ve ısıl etkilerin artması, güvenilirlik problemlerine neden olabilir. EM, iç bağlantıların bozulma mekanizmalarını baskın şekilde gösteren, metal atomlarının yüksek akım yoğunluklarında geçişini karakterize eden bozulma mekanizmasıdır [46]. EM uzun süredir yoğun olarak çalışılan bir konu olmasına karşın, bazı yönleri tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun sebebi EM'i etkileyen birden fazla faktör olması ve bu faktörlerin etkisinden izole ederek çalışılma imkanının olmamasıdır. Bu faktörler tanecik yapısı, arayüz yapısı, stresler, ısıl ve akım yoğunluğu bağımlılıkları vb. yapıları içerir [47]. Deneysel çalışmalara bağlı olarak, akım yoğunluğu ve sıcaklığın en önemli faktörler olduğu söylenebilir.

2.5 HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA TEST YÖNTEMLERİ

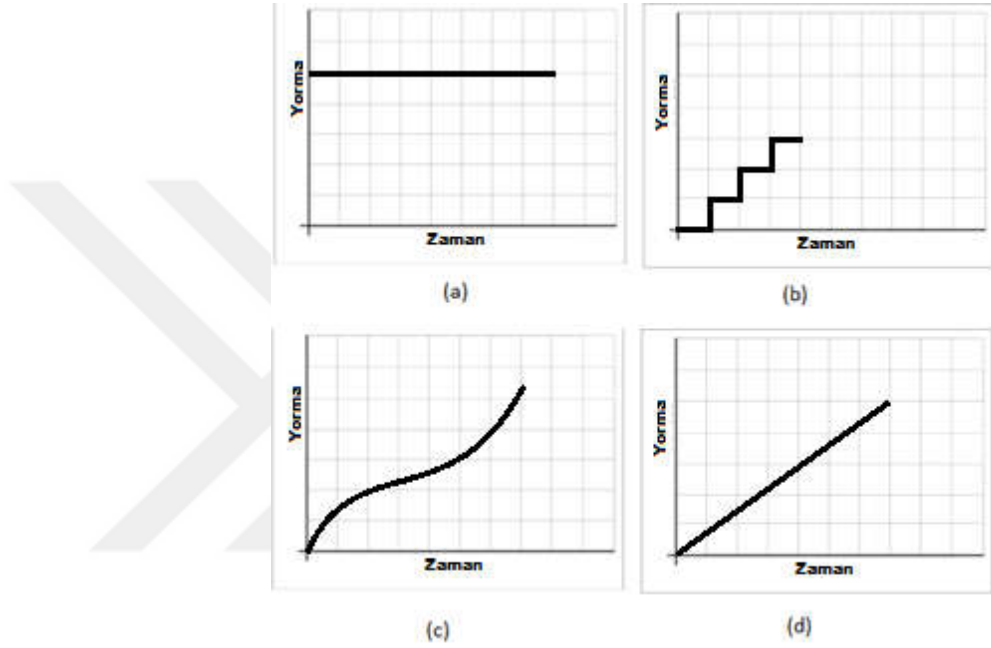
Hızlandırılmış testler (AT), üretim endüstrisinde uzun yıllardır kullanılırlar. Hızlandırılmış testlerin amacı güvenilirlik verisini hızlıca ulaştırmaktır. Cihazların normal çalışma koşullarında üzerlerinde oluşan sıcaklık, nem, gerilim, radyasyon, basınç vb. kaynaklı etkileri normalden daha fazla uygulayarak test metodları uygulanır. Alınan sonuçlarla, cihazların normal çalışma koşullarındaki ömürleri tahmin edilir. Bu ömür süreleri kestirilirken belirli fiziksel modellerden veya önceki deneylere ve tecrübelerle bağlı olarak ampirik modellerden yararlanılarak çalışılır. Hızlandırma testleri niceliksel ve niteliksel olarak iki temel ayrımında incelenebilir. Niteliksel yaşlandırma testlerinde cihazların normal koşullarda çalışma ömürleri hakkında tahmin yapılmaksızın hata ve hata modları incelenir. Bu tarz testlerde cihazların güvenilirliklerine dair içerik yer almamasına karşın, niceliksel testler için önemli bir öncelik taşırlar. Niceliksel yaşlandırma testlerinde ise elde edilen verilerden normal çalışma koşullarındaki ömürlerin çıkarımı yapılır ve güvenilirlik bilgisi elde edilir. Güvenilirlik bilgisi cihazların normal çalışma şartları altında oluşabilecek olası hataları ve hata oluşana kadar olan ortalama yaşam ömürleriyle (MTTF) ilgili istatistiksel bilgileri içerir. Niceliksel yaşlandırma testleri, kullanım oranı hızlandırma testleri ve aşırı stres hızlandırma testlerini içerir. Sürekli çalışmayan cihazların, sürekli çalıştırılarak yaşlandırma testlerinin yapılması kullanım oranı hızlandırma testleri olarak adlandırılır. Hali hazırda sürekli çalışan elektronik cihazlar için aşırı stres hızlandırma testleri kullanılır. Bu bölümde aşırı yorma test metodlarından ve temel ömür yorma modellerinden ve ömür dağılımları modelleri anlatılacaktır.

2.5.1 Hızlandırılmış Yorma Metodları

Çok sık veya sürekli kullanılan cihazlar için normal çalışma koşulları altında cihazların üzerinde bulunan stres koşullarının aşırı olarak uygulanmasıyla, hızlandırılmış aşırı yorma testleri uygulanır. Bu hızlandırılmış testler fazla veya az sıcaklık, nem, gerilim, basınç, vibrasyon vb. stres etkilerinin her biriyle veya kombinasyonu ile uygulanarak yapılır. Hızlandırılmış yorma metodları, sabit yorma, basamak yorma, periyodik yorma ve rassal yorma vb. şekilde gerçekleştirilebilir. Basamak yorma, periyodik yorma ve rassal yorma gibi hızlandırılmış yaşlandırma testlerinde yorma zamana bağlı bir fonksiyon olarak uygulanır [48]. Sabit yorma yönteminde uygulanan yorma tüm test boyunca sabittir ve dolayısıyla zamana bağlı değildir. Şekil 2.18'de yorma metodları

verilmiştir. Sabit yorma zamana bağlı olan yorma yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Özellikle;

- Çoğu cihaz sabit stres etkileri altında çalışır.
- Sabit yorma testini uygulamak diğer test metodlarına göre daha kolaydır.
- Sabit yorma testindeki sonuçları birbirine göre incelemek daha kolaydır.
- Mevcut modellerle veri analizini yapmak genişçe çalışılan ve ampirik olarak doğrulanabilen bir yöntemdir.



Şekil 2.18: Hızlandırılmış Yorma Metodlarının Gösterimi.

Yukarıda belirtilen avantajları göz önünde bulundurularak bu çalışmada sabit yorma ile hızlandırılmış yaşlandırma testleri uygulanmıştır.

2.5.2 Çalışma Ömrü Modelleri

Hızlandırılmış yaşlandırma testlerinde uygulanan yorma parametresine bağlı olarak, belirli çalışma ömrü modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerden bazıları;

- Arrhenius Modeli
 - Eyring Modeli
 - Ters Güç Kanunu Modeli
- olarak verilebilir.

Arrhenius Eşitliği: Sıcaklık stres etkisini modellemek için kullanılan en yaygın çalışma yorulma ömrü modelidir. 1887 yılında Svandte Arrhenius tarafından “Arrhenius Reaksiyon Oranı Eşitliği” olarak tanımlanmıştır. Bu eşitlik;

A, sıcaklığın bir fonksiyonu

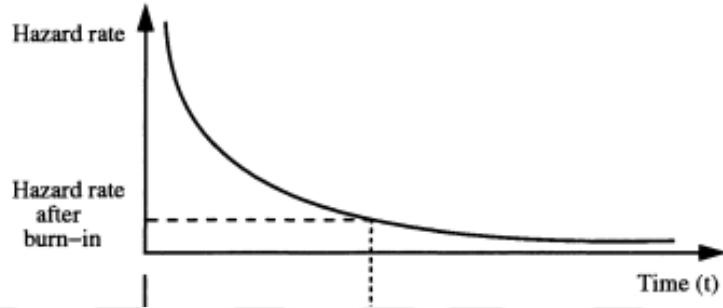
E_A , Aktivasyon enerjisi

K, Boltzmann sabiti,

T, sıcaklık olmak üzere,

$$R(T) = Ae^{\frac{-E_A}{kT}} \quad (2.4)$$

şeklinde verilir. Risk oluşma – yaşam süresi eğrisi Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19: Arrhenius Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı.

Eyring Modeli: Kuantum mekaniği prensiplerinden formülize edilmiş ve çoğunlukla ısı yorma için kullanılmaktadır. Bununla birlikte nem gibi farklı yorma değişkenleri için kullanılmaktadır. Eyring Eşitliği;

L , ortalama yaşam süresi,

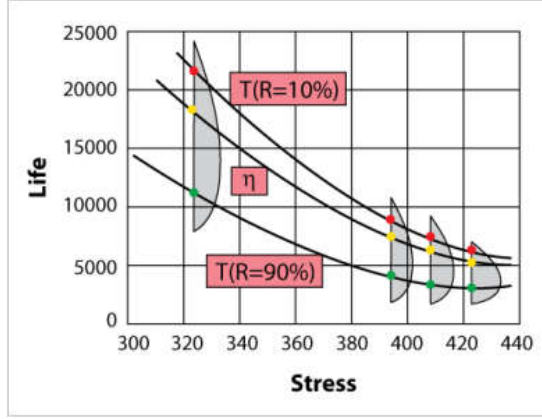
V, stres seviyesi,

A, belirli model parametresi

B, belirli bir diğer model parametresi olmak üzere,

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-(A-\frac{B}{V})} \quad (2.5)$$

Şeklinde verilir. Şekil 2.20’de Eyring modeli için risk oluşma – yaşam süresi eğrisi verilmiştir



Şekil 2.20: Eyring Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı [15].

Ters Güç Kanunu Modeli: Genellikle ısı olmayan stres etkisini modellemek için kullanılır ve

L, ortalama yaşam süresi,

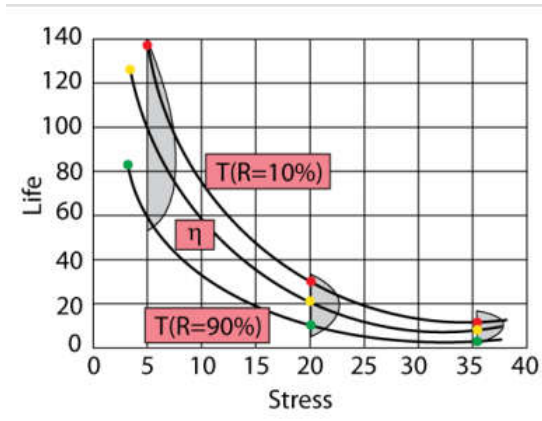
V, yorma seviyesi,

K, belirli bir model parametresi ($K > 0$)

, başka bir model parametresi olmak üzere,

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (2.6)$$

olarak verilir. Şekil 2.21 'de Eyring modeli için risk oluşma – yaşam süresi eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.21: Ters Güç Kanunu Modelinde zamana bağlı hata oluşum oranı [15].

2.5.3 Çalışma Ömrü Dağılımları

Üstel Dağılım: Güvenilirlik çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan dağılımlardan biridir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(t) = \lambda e^{-t}, \quad t > 0, \quad \lambda > 0$$

şeklinde ifade edilir.

Normal Dağılım: Yorulma periyodunu modellemek için kullanılır ve olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf);

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \infty < t < \infty, \quad \infty < \mu < \infty, \sigma > 0 \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir.

Gamma Dağılımı: Erken bozulma evresini tanımlar ve olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf);

$$f(t) = \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} e^{-\beta t}, \quad t \geq 0, \quad a \geq 0, \quad \beta \geq 0 \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir.

Weibull Dağılımı:

$$f(t) = \lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta}, \quad t \geq 0, \quad \lambda \geq 0, \quad \beta \geq 0 \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır.

2.6 ELEKTRONİK UYGULAMALARINDA YORULMA ÇALIŞMALARI

MOSFET'ler ve MOSFET'lerle gerçekleştirilen elektronik uygulamaları için yorulma etkileri tam olarak anlaşılammıştır. Bu nedenle, yarıiletkenlerin güvenilirliğinin anlaşılması üzerine farklı çalışmalar yapılmaktadır. Yorma etkileri, ampirik modellerle veya farklı dağılım modelleriyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Sadece MOS yapıları inceleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, farklı elektronik uygulamaları için de çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, güvenilirlik üzerine yapılmış çalışmalar kısaca anlatılmıştır.

Şüphesiz güç MOSFET'leri yüksek akım ve gerilim değerleri altında çalıştıkları için, hem yüksek gerilim hem de yüksek sıcaklık açısından güvenilirliklerinin sınanması önem arz etmektedir. Bundan dolayı MOSFET'lerin elektriksel yorma karşısındaki etkisini incelemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [21], [49]. Bu çalışmalarda V_{TH} , mobilite ve yük yoğunluğu değerlerinin farklı yorma gerilimleri için değişimleri verilmiştir. MOSFET'lerin sıcaklık karşısındaki yorulma etkileri, elektriksel yormada incelenen benzer parametrelerle incelenmiştir [23], [50]. Sıcaklık yorması ve gerilim yorması beraber yapılan çalışmalarda BTI etkisinin ön plana çıktığı görülmüştür. Çalışmalarda verilen sonuçlarda belirli süreler sonunda yorma etkisi ortadan

kaldırıldıktan sonra, Bölüm 2.5 'de anlatıldığı şekilde, bozulma etkilerinin kısmen düzeldiği görülmüştür [26], [51]. Ayrıca uzay çalışmaları göz önünde bulundurularak, radyasyon etkileri incelenmiştir [18], [26]. CMOS yapılar için incelenen çalışmalarda, HC etkisinin ön plana çıktığı görülmüştür [52]. Farklı gerilim değerleri için V_{TH} değerinin değişimi erken evre bozulma sonuçları RF yorma etkisi altında incelenmiştir. RF uygulamalar için, yüksek frekanslarda oluşan bozulma etkilerini içeren çalışmalar incelenmiştir [19], [53]. RF stres testleri için kısa yorma sürelerinde $I_{DS} - V_{GS}$ özgeğrisinin, V_D besleme gerilimine bağlı olarak I_D akımının ve r_o direncinin değişimi verilmiştir. Bununla birlikte güç MOSFET'lerindeki güvenilirlik incelemelerinden farklı olarak değişik yüksek frekans değerleri için gürültü faktörünün değişimlerinin incelendiği görülmüştür.

Elektronik uygulamalarında yapı taşı olarak yer alan MOSFET'lerin yorulma etkilerinin, içlerinde buldukları tasarıma katastrofik etkilerinin olması nedeniyle, bu etkiler kümülatif olarak veya farklı bozulma mekanizmaları ön planda olacak şekilde çalışılmışlardır. DC-DC çevirici devreleri için, MOSFET etkisi yerine kapasitans etkisinin araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir [25], [54]. Bu devre yapısı incelenirken yüksek gerilim koşulları, geçiş kaçak akımları, ters kutuplama, güç, titreşim ve akımda yüksek dalgalanma gibi kapasitelerin bozulma etmenlerinin baz alındığı görülmüştür. Bununla birlikte DC-DC çevirici yapılar için, yük gerilim yorma etkisi altında doğrudan MOSFET etkisini inceleyen çalışmalar araştırılmıştır. MOSFET'lerin DC-DC çevirici yapılar içindeki V_{TH} , mobilite ve kanal boyu parametrelerinin yormaya bağlı değişimlerinin incelendiği görülmüştür [25]. Anahtarlama modlu güç kaynakları (SMPS), elektronik sistemler için güç sağlama kaynağı olarak önemli rol oynarlar. Yüksek akım ve gerilim etkisi altında kalan yapılar oldukları için, yorulma etkilerinin de bu parametreler üzerinden değiştiği görülmüştür [55]. İncelenen çalışmada bozulma hatasına kadar geçen süre (TTDF) metodu öncelikli olarak kullanılarak, çalışma ömrü Arrhenius modeli ile çıkarılarak, dayanımlı bir tasarım ortaya konulmaya çalışılmıştır. OTA-C ile oluşturulmuş CMOS düşük güç filtre devreleri için incelenen çalışmada, devrelerin yorma etkisi altındaki eşik değeri değişimi, OTA 'nın çıkış akımının, geçiş iletiminin değişimi ve filtrelerin yorma öncesi ve yorma sonrası frekans cevapları çalışıldığı görülmüştür [56]. RF düşük güç kuvvetlendiricilerinin güvenilirlik analizi çalışmaları yapılırken sıcaklık taşıyıcı ve BTI etkileri göz önünde bulundurularak sonuçların araştırıldığı görülmüştür [41], [57].

AB sınıfı güç kuvvetlendiricilerin elektriksel ve sıcaklık yorulması etkisi altındaki performansının incelendiği, bu tezde yapılmak istenen çalışmaya benzer motivasyon taşıyan çalışmada, sıcaklık taşıyıcısı etkisi araştırılmıştır [20]. Çalışmada simülasyon koşullarında değerler elde edilmiştir. Sonuç değerleri irdelendiğinde, daha önceki çalışmalarda verilen MOSFET'lerin yormaya bağlı V_{TH} gerilimi değişiminin yansıtılmadığı görülmektedir. Pratikte ticari MOSFET'ler için belirli bir V_{GS} çalışma aralığı olmasından ötürü, V_{TH} değerinin değişimi ile birlikte güç kuvvetlendirici performansının birincil olarak etkileneceği öngörüsü yapılmıştır. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında V_{TH} gerilimlerinin değişimi temel değişim parametresi olarak belirlenmiştir. Bu bölümde anlatılan literatür taraması sonuçları ışığında yapılacak olan tez çalışmasında MOSFET'lerin güç kuvvetlendirici için oluşturdukları bozulma etkilerinin incelenmesi ve araştırılması amaçlanmıştır. Bu konunun seçilmesindeki temel motivasyon, MOSFET'ler için farklı yorma metodları ile yapılmış çalışmalar olmasına karşın bu çalışmaların elektronik endüstrisinde çokca yer alan güç kuvvetlendiricileri için etkileri üzerine pek çalışma yapılmadığının görülmesi ve yapılan çalışmalarda zamana bağlı olmayan sabit elektriksel yormanın Bölüm 2.4 'te belirtilen geç yorma dönemi bozulma periyodundaki etkilerinin TDDB bozulma mekanizmasına bağlı olan etkilerinin ortaya konulmak istenmesidir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan güç mosfetleri, ölçme devresi düzenekleri, ölçme yazılımı ve tasarlanan kuvvetlendirici devreleri anlatılmıştır. Yorma testlerinde kullanılmak için; A ve D sınıfı güç kuvvetlendirici devrelerinde Vishay firmasının IRF510 n kanallı VDMOS güç transistörü kullanılmıştır [58]. AB sınıfı kuvvetlendirici devresinde ek olarak International Rectifier firmasının IRF9540N p kanallı VDMOS güç transistörü tercih edilmiştir [59]. Çalışılan transistörlerin kataloglarında yer alan ve ilgilenilen önemli parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1: Tasarımda kullanılan MOSFET'lerin önemli çalışma parametreleri.

MOSFET kodu	V_{BR}^* (V)	V_{TH} (V)	Maks. I_{DS} (A) ($V_{GS} = 10V$, $T_C = 25^\circ C$)	Maks. V_{GS} (V)	$R_{ds\ on}$ (Ω)
IRF510	100	2V – 4V arası	5.6	± 20	0.54
IRF9540N	-100	-2V – -4V arası	-23	± 20	0.117

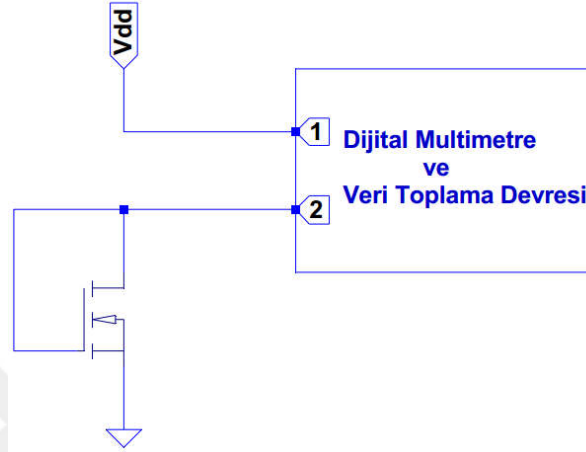
Çalışma boyunca üretim farklılıklarından doğabilecek sapmaları minimize etmek için, aynı üretim serisindeki MOSFET'ler kullanılmıştır. Yorma testleri uygulanmadan önce ilk olarak MOSFET'lerin $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrilerinin çıkarımları yapılarak, aynı V_{TH} değerlerine sahip elemanlarla çalışılmıştır. Böylelikle elemanların yorma sonrasındaki birbirlerine göre değişimleri oransal olarak yorumlanabilmiştir.

Aşağıda yorma ve ölçme deneyleri boyunca izlenen yöntem maddeler halinde verilmiştir:

- $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrisinin çıkarılması
- Aşırı gerilim yormasının uygulanması
- Yorulmuş elemanın $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrisinin çıkarılması
- Yorulmuş elemanın eklendiği güç kuvvetlendirici devresi üzerinde AC analiz yapılması
- Yorulmuş elemanın eklendiği güç kuvvetlendirici devresi üzerinde DC analiz yapılması

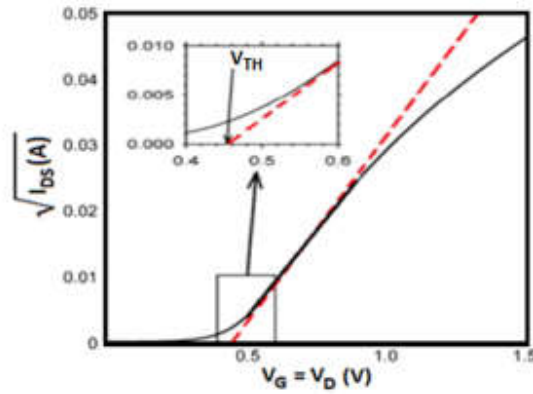
3.1 $\sqrt{I_d}$ V_{GS} ÖZEĞRİSİ ÖLÇME DEVRESİ VE V_{TH} PARAMETRESİNİN ÇIKARIMI

V_{TH} geriliminin bulunması amacıyla I_D akımının V_{GS} gerilimine göre değişimini gösteren devrenin şeması Şekil 3.1 'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Dijital Multimetre ve Veri Toplama Devresinin ölçüm yapılacak MOSFET'lere bağlantı şematiği.

I_D akımı, 0 V'dan başlayarak yaklaşık 10 V'a kadar V_{DD} gerilimi değiştirilerek, Bölüm 3.4 'de anlatılan veri toplama devresi sayesinde ölçülmüş ve bilgisayar ortamında özeğrisinin çıkarılması sağlanmıştır. Şekil 3.2 'de çıkarılan $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrisinin bir örneği verilmiştir.

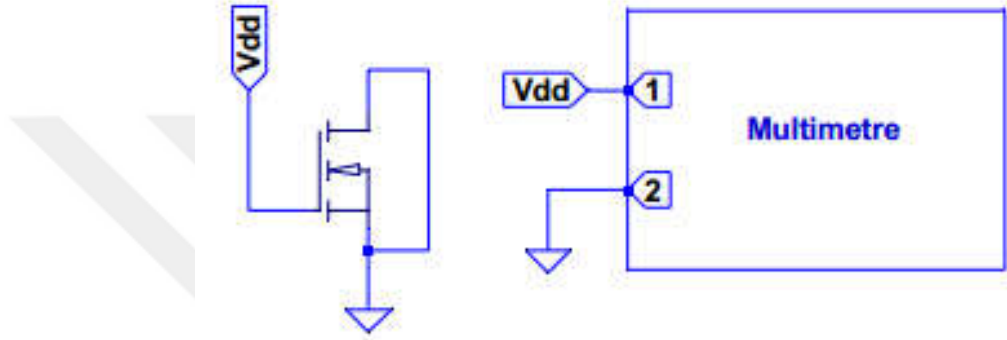


Şekil 3.2: $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrisi ve V_{TH} noktasının kestirimi [63].

V_{TH} gerilimi $\sqrt{I_d}$ V_{GS} özeğrisinin doğrusal olduğu aralıkta bir doğru kestirimi yapılarak bulunur [3]. $\sqrt{I_d} = 0$ olduğu noktadaki değer V_{TH} değeridir.

3.2 YORMA DEVRESİ

Bu çalışmada zamana bağlı olmayan sabit aşırı gerilim kaynaklı yorma yöntemi uygulanmıştır. Şekil 3.3 'de gösterilen yorma devresi yardımıyla ilk olarak geçit kaynak arası kırılma gerilimi, $V_{BR(GS)}$, ölçümlenmiştir. Bölüm 4.1 'de anlatılan şekilde çalışma gerilimi ve periyotları belirlendikten sonra yorma devresinde çalışılan tüm elemanlar üzerinde uygulanmıştır.



Şekil 3.3: Yorma ve Multimetre devrelerinin bağlantı şeması.

3.3 KUVVETLENDİRİCİ DEVRELERİ

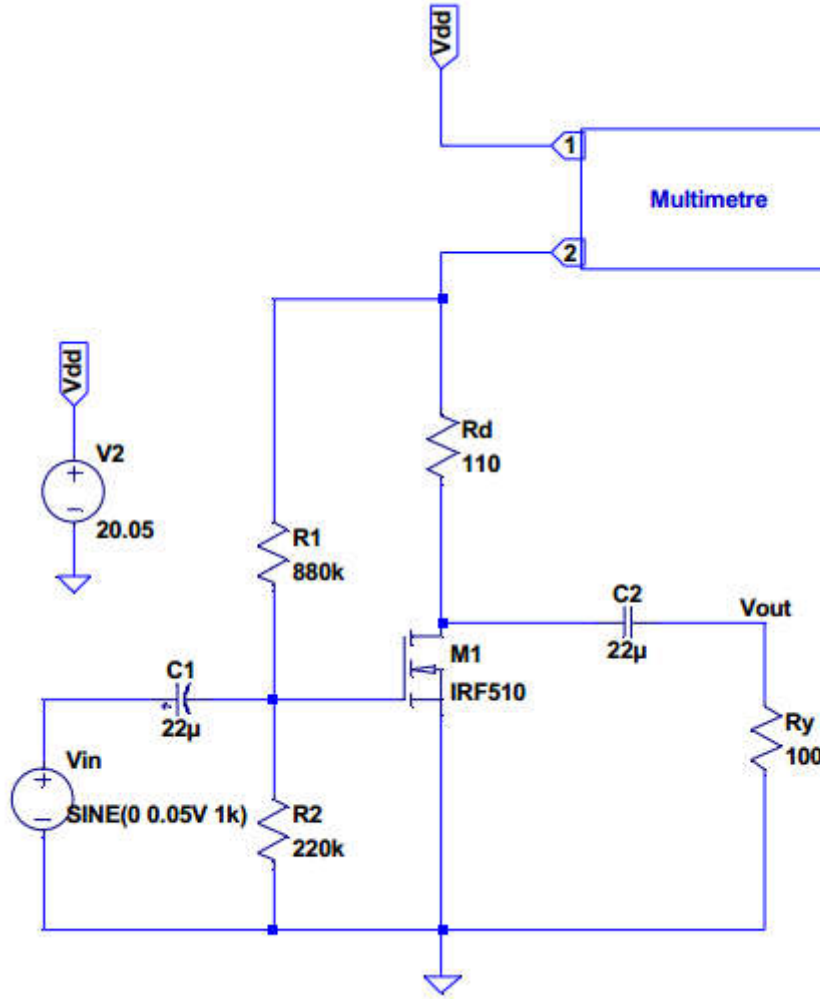
Bu bölümde, çalışmada incelenmiş olan A, D ve AB sınıfı kuvvetlendiricileri devreleri anlatılmıştır. A sınıfı kuvvetlendiriciler en temel doğrusal kuvvetlendirici yapısı oldukları için seçilmişlerdir. D sınıfı kuvvetlendiriciler anahtarlamalı veya dijital kuvvetlendirici olarak adlandırılırlar. Bu iki tip kuvvetlendirici tek bir MOSFET ile gerçekleştirilebilirler. Bu sayede, analog ve dijital güç kuvvetlendiricilerinin karşılaştırılması aynı yorulmuş MOSFET ile ölçülerek yorulma etkisi bu tip kuvvetlendiriciler arasında incelenmiştir. A ve D tipi güç kuvvetlendirici devreleri gerçekleştirirken IRF510 kullanılmıştır. AB Sınıfı kuvvetlendiriciler n ve p kanallı olmak üzere en az 2 MOSFET ile gerçekleştirilir. A ve AB sınıfı kuvvetlendiricilerin yorulma etkisinin karşılaştırılması da tek veya daha fazla yorulmuş MOSFET etkisinin incelenebilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. AB sınıfı güç kuvvetlendiricileri gerçekleştirirken IRF510 ve IRF9540N MOSFET'leri kullanılmıştır. Kuvvetlendirici devrelerinin yorulma etkileri incelenirken devreler geribeslemeli ve geribeslemesiz olarak tasarlanarak, her iki etki için ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır. Ayrıca devrelerin

büyük sinyal analizini yapabilmek için DC kuplaj kapasiteleri devreden çıkarılmış ve ölçümler tekrar yapılmıştır.

3.3.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri

A sınıfı kuvvetlendirici devrelerinde çıkış işareti giriş işaretini doğrusal olarak takip eder. A Sınıfı kuvvetlendirici devreleri IRF510 transistörü ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.4 'de geribeslemesiz kuvvetlendirici devresi şematığı verilmiştir. Devre girişine $V_{in(pp)} = 100 \text{ mV}$ ve $f = 1 \text{ kHz}$ sinüs işareti uygulanmıştır.

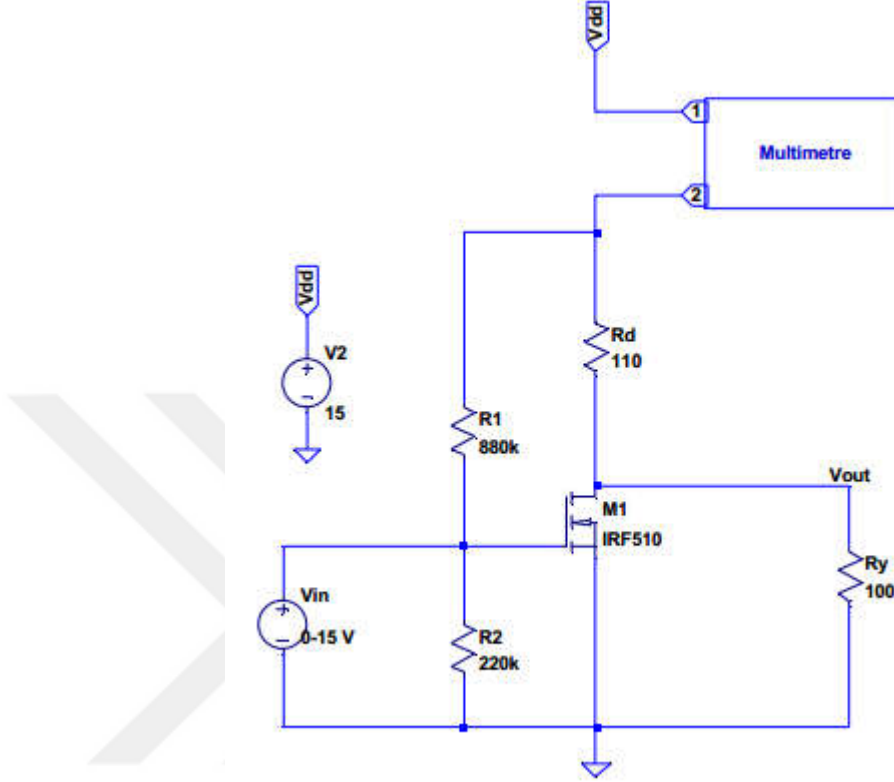


Şekil 3.4: A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematığı.

Besleme gerilimi olarak $V_{DD} = 20 \pm 0.05 \text{ V}$ seçilmiştir. Çıkış yükü, $R_y = 100 \Omega$ olarak belirlenmiştir. Kuvvetlendirici devresi $V_{GS} = 4 \text{ V}$ olacak şekilde kutuplanmıştır.

A sınıfı kuvvetlendirici devresinin, DC Analizi için devredeki kapasiteler kısa devre yapılmıştır. Giriş işareti olarak $V_{in(dc)}$, 0 V 'tan başlayarak 15 V 'a kadar DC giriş

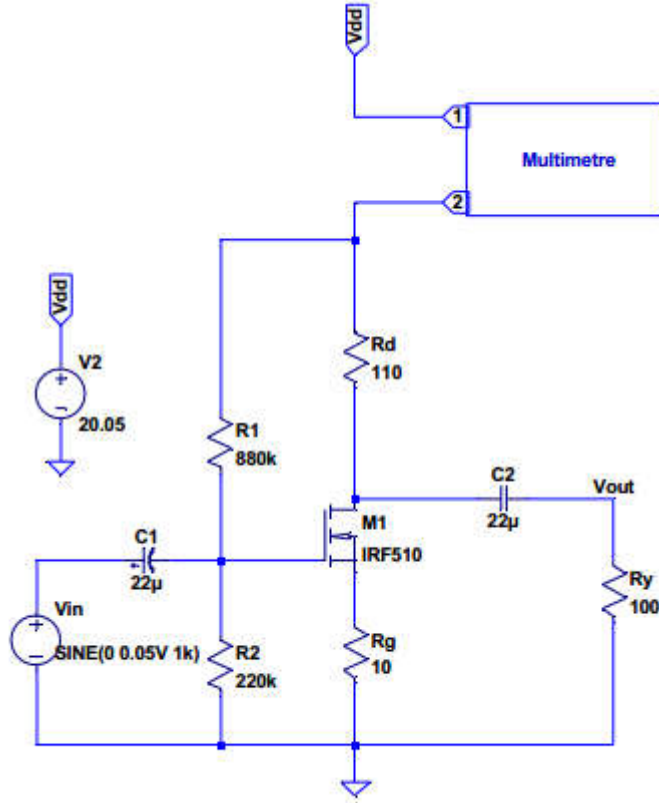
gerilimi uygulanarak çıkış işaretinin değişimi incelenmiştir. Şekil 3.5 'de A sınıfı geri beslemesiz kuvvetlendirici için DC analiz devresi verilmiştir.



Şekil 3.5: A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricilerin DC analiz devresi şematiği.

DC Analiz sayesinde, yorma sonrasında kuvvetlendirici devresi için önemli olan çıkışın doğrusal aralığı ve optimal çalışma noktası elde edilir.

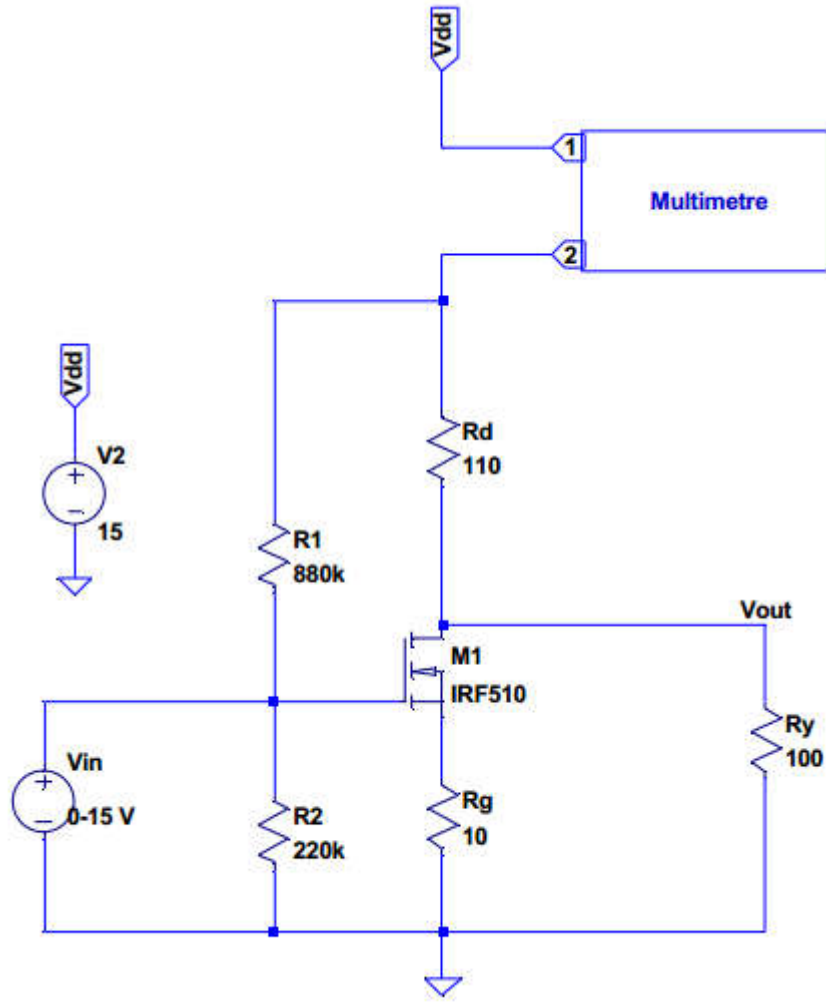
Şekil 3.6 'da geribeslemeli kuvvetlendirici devresi şematiği verilmiştir. Devre girişine geribeslemesiz kuvvetlendiricide olduğu gibi $V_{in(pp)} = 100 \text{ mV}$ ve $f = 1\text{kHz}$ sinüs işareti uygulanmıştır.



Şekil 3.6: A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresi şematığı.

Besleme gerilimi olarak $V_{DD} = 20 \pm 0.05$ V seçilmiştir. Çıkış yükü, $R_y = 100 \Omega$ olarak belirlenmiştir. Kuvvetlendirici devresi $V_{GS} = 4$ V olacak şekilde kutuplanmıştır.

A sınıfı geribeslemeli kuvvetlendirici devresinin DC Analizi için devredeki kapasiteler kısa devre yapılmıştır. Giriş işareti olarak $V_{in(dc)}$, 0 V 'tan başlayarak 15 V 'a kadar DC giriş gerilimi uygulanarak çıkış işaretinin değişimi incelenmiştir. Şekil 3.7 'de A sınıfı geribeslemeli kuvvetlendirici için DC analiz devresi verilmiştir.



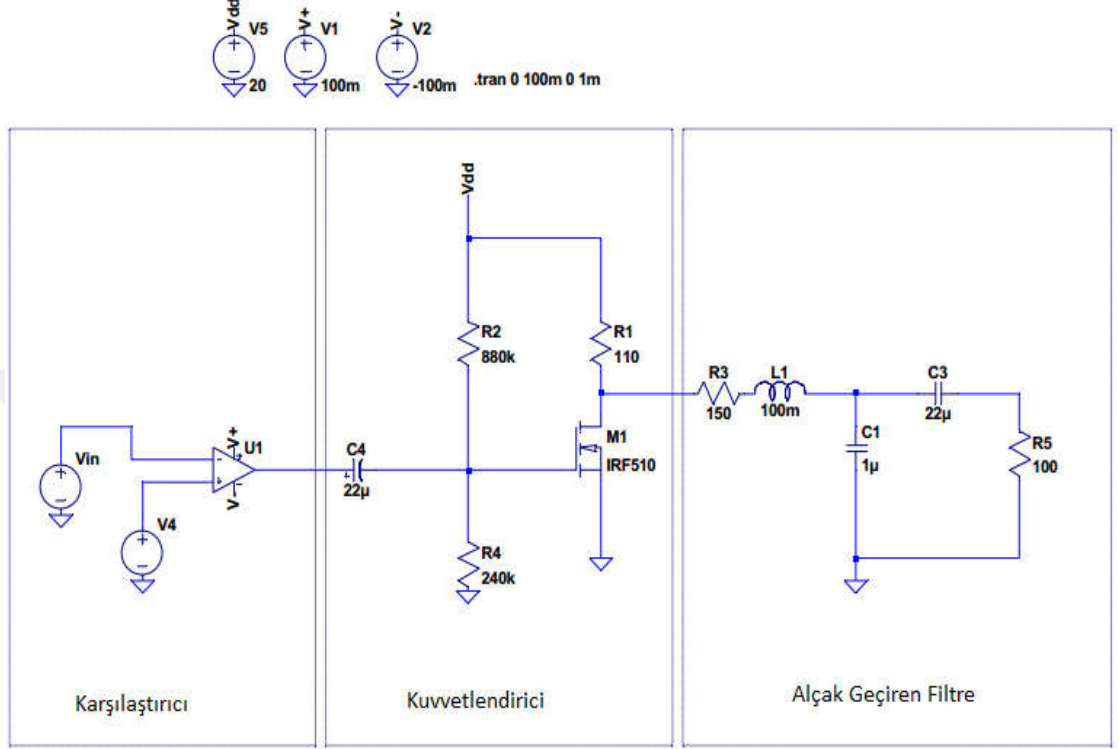
Şekil 3.7: A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendiricilerin DC analiz devresi şematiği.

DC Analiz sayesinde, yorma sonrasında kuvvetlendirici devresi için önemli olan çıkışın doğrusal aralığı ve optimal çalışma noktası elde edilir.

3.3.2 D Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri

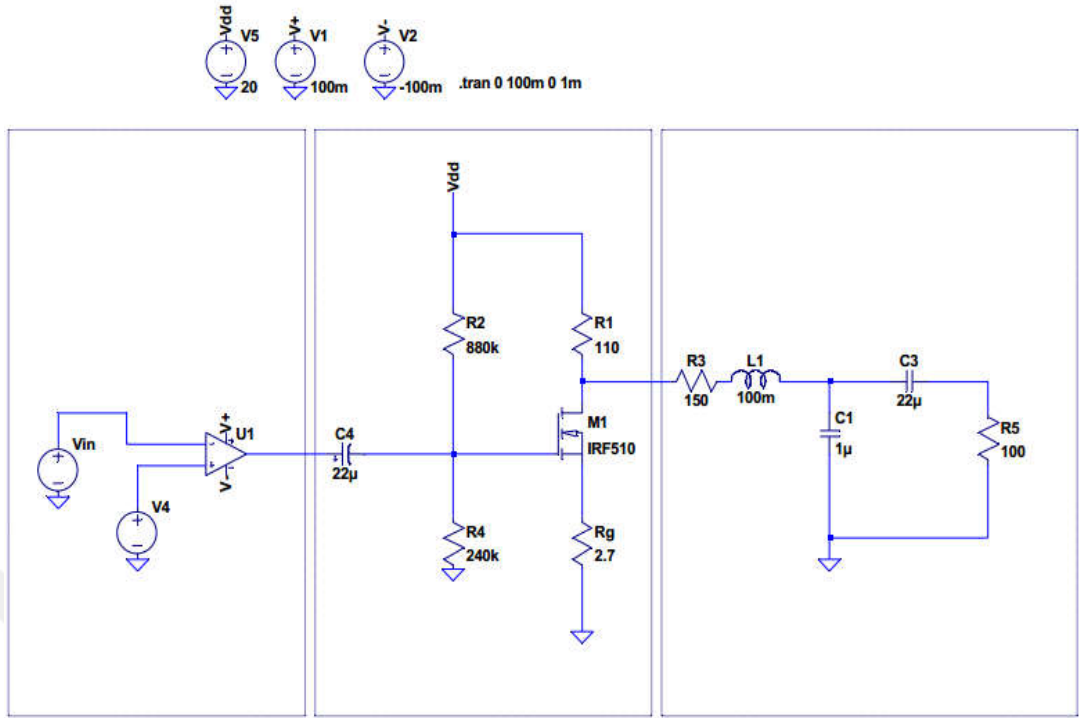
D sınıfı güç kuvvetlendiriciler dijital veya anahtarlamalı güç kuvvetlendiricisi olarak adlandırılırlar. Temelde D sınıfı güç kuvvetlendiricileri 3 farklı devre yapısının biraraya gelmesiyle oluşturulurlar. 1.kısımda sinüsoidal giriş işaretinin karşılaştırma devresiyle PWM şeklini almasının sağlandığı devre yer alır. 2. Kısımda MOSFET'in yer aldığı A sınıfı kuvvetlendirici ile aynı yapıya sahip devre yer alır. 3 kısımda elde edilen kuvvetlendirilmiş sinyalin tekrar sinusoidal hale geri getirilmesini sağlayan alçak geçiren filtre (LPF) yer alır. Bu 3 aşamalı devrenin şematiği Şekil 2.2.2.5 'de verilmiştir. D Sınıfı kuvvetlendirici devreleri IRF510 transistörü ile gerçekleştirilmiştir.

D sınıfı geribeslemesiz kuvvetlendirici devresinin şematığı aşağıda verilmiştir. Devre girişine $V_{in(pp)} = 100 \text{ mV}$ ve $f = 1\text{kHz}$ sinüs işareti uygulanmıştır. Şekil 3.8 'de tasarlanan devre verilmiştir.



Şekil 3.8: D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematığı.

D sınıfı geribeslemeli kuvvetlendirici devresinin şematığı aşağıda verilmiştir. Devre girişine $V_{in(pp)} = 100 \text{ mV}$ ve $f = 1\text{kHz}$ sinüs işareti uygulanmıştır. Şekil 3.9 'da tasarlanan devre verilmiştir.

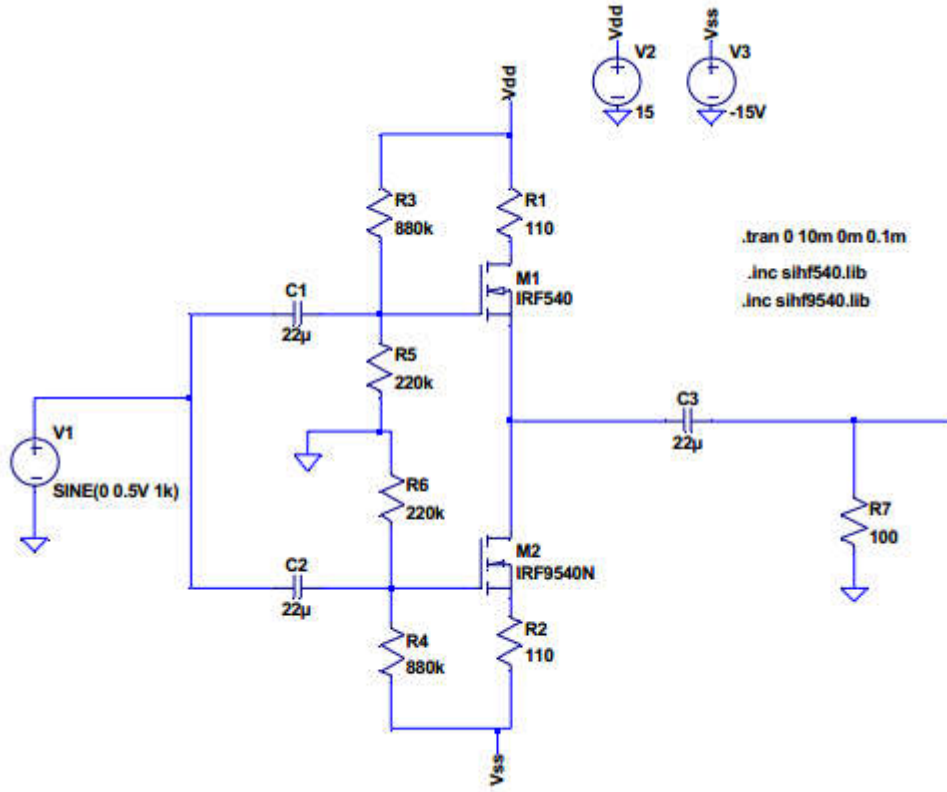


Şekil 3.9: D sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresi şematiği.

3.3.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendirici Devreleri

AB sınıfı güç kuvvetlendiricileri gerilim kazancı yerine akım kazancı sağlayacak şekilde tasarlanırlar. AB sınıfı güç kuvvetlendiricilerinin tasarımı minimum 2 transistör ile gerçekleştirilir. AB Sınıfı kuvvetlendirici devreleri IRF540N ve IRF9540N transistörleri ile gerçekleştirilmiştir.

AB sınıfı geribeslemesiz kuvvetlendirici devresinin şematiği aşağıda verilmiştir. Devre girişine $V_{in(pp)} = 100$ mV ve $f = 1$ kHz sinüs işareti uygulanmıştır. Şekil 3.10'da tasarlanan devre verilmiştir.

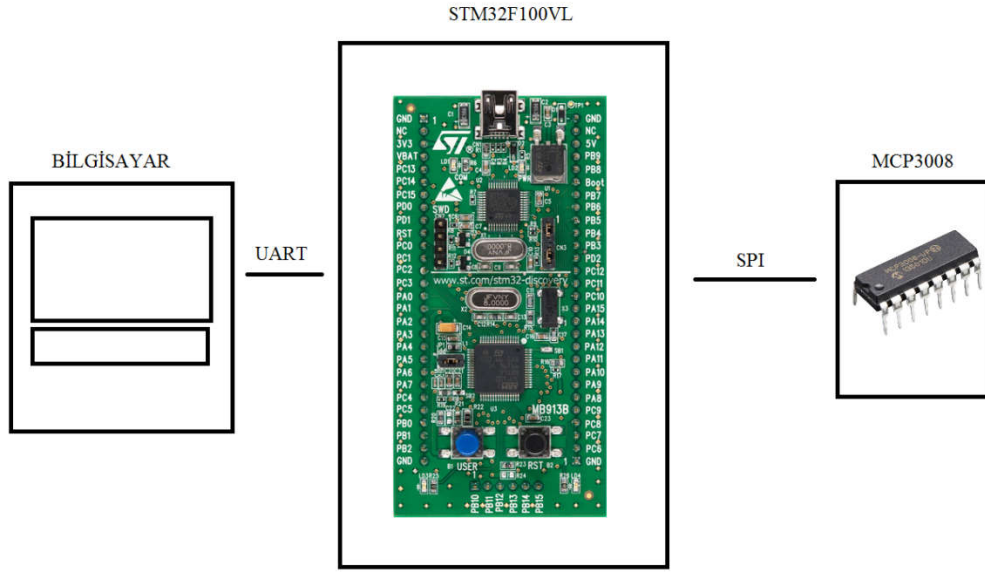


Şekil 3.10: AB sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi şematiği.

3.4 DİJİTAL ÖLÇME DEVRESİ VE VERİ TOPLAMA YAZILIMI

Çalışmada ölçüm sonuçlarının hızlıca ve aynı doğrulukta dijital ortama alınması, çalışmanın ilerleyişi açısından büyük önem arz ettiği için proje kapsamında, veri toplayıcı tasarımı yapılmıştır. Bu bölümde, veri toplayıcı tasarımı hakkında bilgiler verilecektir.

Veri toplayıcı, STM32F103VL Discovery kiti [60], PL 2303 UART- USB dönüştürücü [61] ve MCP3008 8 kanallı 10-bit ADC tümdevresi [62] ile tasarlanmıştır. Şekil 3.11 'de veri toplayıcı şematiği verilmiştir.



Şekil 3.11: Veri toplayıcı yapısı şematığı.

STM32F103VL Discovery kiti, ST firması tarafından üretilen ARM Cortex M3 çekirdeğine sahip bir mikrodeneleyicidir. Mikrodeneleyicinin üzerinde I2C, SPI, UART gibi çevresel haberleşme birimleri bulunmaktadır. PL 2303 UART-USB dönüştürücü, mikrodeneleyici tarafından üretilen UART verilerini dönüştürerek, bilgisayar ortamında USB portu üzerinden okunabilir hale getirir. MCP3008, 8 farklı kanaldan Analog Dijital dönüştürme yapabilen 10-bit çözünürlüğe sahip bir ADC tümdevresidir. Projede mikrodeneleyici üzerinde yer alan ADC birimi yerine, ayrı bir tümdevre kullanılmasının sebebi, daha kararlı bir V_{REF} gerilimi ile çalışabilmenin sağlanmak istenmesidir. Çözünürlük, Q ,

Referans besleme gerilimi V_{REF} ,

Bit sayısı n olmak üzere;

$$Q = \frac{V_{REF}}{2^n} \quad (3.1)$$

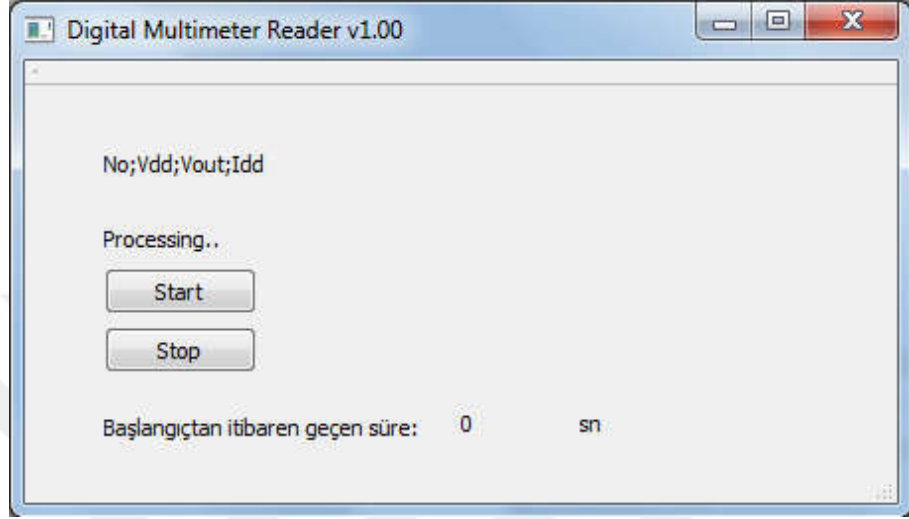
olarak hesaplanır. Kullanılan ADC entegresinin çözünürlüğü, $V_{REF} = 5V$ ve $n = 10$ olmak üzere;

$$Q = \frac{5}{2^{10}} = 4.8 \text{ mV} \quad (3.2)$$

olarak hesaplanmıştır.

Sistem, MCP3008 ADC ile ölçülmek istenen analog gerilim noktaları bilgilerini 10-bit olarak dijitalle dönüştürerek SPI protokolü üzerinden mikrodeneleyiciye iletir. Mikrodeneleyici tarafından alınan veriler, virgülle ayrılmış değerler (CSV) formatına

dönüştürülerek UART protokolü ile bilgisayar ortamına aktarılır. Bilgisayar ortamında proje kapsamında geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bir yazılım bulunmaktadır [7]. Bu yazılım C++ diliyle Qt geliştirme ortamında yazılmıştır. Mikrodenetleyici vasıtası ile bilgisayar ortamına alınan verilerin daha sonra işlenmek üzere CSV formatında saklanabilmesini sağlar. Aşağıdaki şekilde programın ekran görüntü verilmiştir.



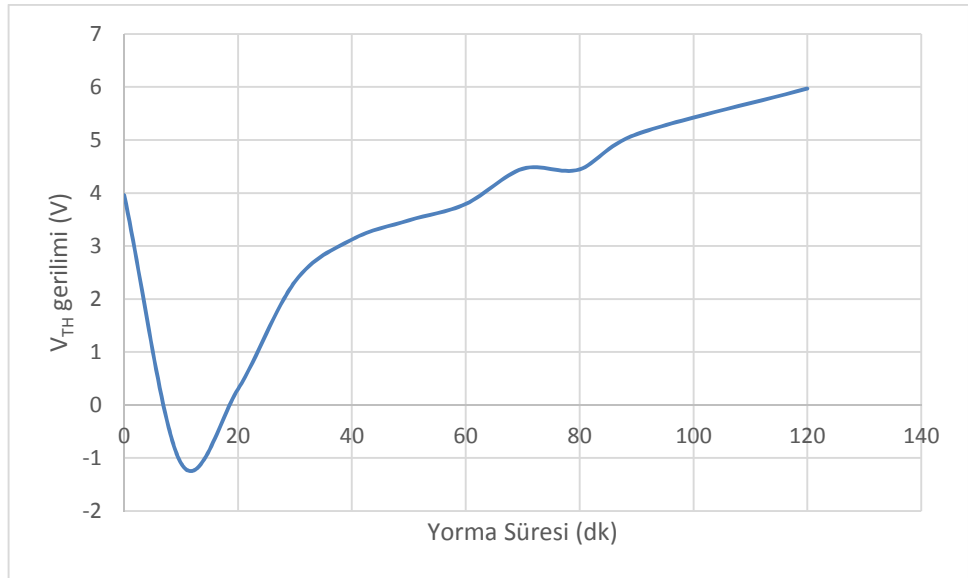
Şekil 3.12: Veri toplayıcı programının ekran görüntüsü.

4. BULGULAR

Bu bölümde, öncelikle çalışmada gerçekleştirilen devrelerin simülasyonları yapılmış ve gerçekleştirilen devrenin ölçüm sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için simülasyon devreleri eklenmiştir. Bu bölümde ise yorma koşullarının nasıl belirlendiği ve çalışmalarda elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar anlatılacaktır.

4.1 YORMA KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

Yorma koşulları, çalışmada kullanılan güç kuvvetlendiricilerinin ve MOSFET'lerin çalışma koşulları ve karakteristikleri belirlenip, bunlara uygun şekilde seçilmiştir. A, D ve AB sınıfı güç kuvvetlendiricileri çoğunlukla ses kuvvetlendiricileri uygulamalarında yer aldığı için çalışma frekansı, $f = 1\text{kHz}$ olarak seçilmiştir. Tasarlanan güç kuvvetlendiricilerin besleme gerilimleri A ve D sınıfı için $V_{DD} = 20\text{V}$ ve AB sınıfı için $V_{DD} = 20\text{V}$, $V_{SS} = -20\text{V}$ olarak belirlenmiştir. MOSFET'lerin yorma sonrasında V_{TH} gerilimlerinin Şekil 4.1 'de verildiği şekilde değişmesinden ötürü güç kuvvetlendirici devresi tasarımı yapılırken maksimum V_{TH} geriliminde çalışacak şekilde tasarlanması gerekliliği görülmüştür. Kutuplama gerilimi V_{GS} buna bağlı olarak belirlenerek devre tasarımları yapılmıştır.



Şekil 4.1: IRF510 MOSFET'inin yorulma etkisi ile V_{TH} değişimi.

Zamana bağlı olmayan sabit gerilim yorması yöntemi ile uygulanacak olan yorma gerilimini seçmek için öncelikle çalışılan MOSFET'lerin geçit kırılma gerilimi olan,

$V_{GS(BR)}$ değerleri bulunmuştur. Çalışılan MOSFET çeşitlerine göre bu kırılma değerleri Tablo 4.1 'de verilmiştir. Sonrasında bu kırılma gerilimlerine yakın olacak şekilde daha düşük seviyeli farklı yorma gerilimleri uygulanarak uzun dönem V_{TH} etkisi incelenmiştir. Kırılma gerilimine çok yakın yorma gerilimi seçildiğinde V_{TH} geriliminin çok hızlı hareket ederek ilk 60 dakikada oluşan sert değişimlerin ölçüm periyotlarına göre çok hızlı (< 10 dk) değiştiği ve ölçülemediği görülmüştür. Ayrıca MOSFET'lerin V_{TH} geriliminin aşırı artmasından ötürü çalışma bölgesinin dışında kaldığı ve güç kuvvetlendirici devresinin çalışamaz hale geldiği görülmüştür. Bu nedenle yorma etkisinin kırılma gerçekleşene kadar incelenmesi yerine her MOSFET için, erken yorulma etkisinin ilk 60 dakika içinde yayılarak oluştuğu ve ilk 120 dakika içerisinde de çalışma bölgesini terkedecek şekilde optimal yorma gerilimleri belirlenmiştir. Ölçüm periyotları toplam 120 dakikalık yorma testi boyunca 10'ar dakikalık yapılacak şekilde belirlenmiştir. Çalışılan MOSFET'ler için seçilen yorma gerilimleri ve test süreleri Tablo 4.1 'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kullanılan MOSFET'lerin yorma parametreleri.

MOSFET Adı	$V_{GS(BR)}$	Yorma Gerilimi	Yorma Süresi
IRF510	75 V	63 V	120 dk
IRF9540N	66.9 V	63 V	120 dk

4.2 ÖLÇÜM SONUÇLARININ ANALİZİ

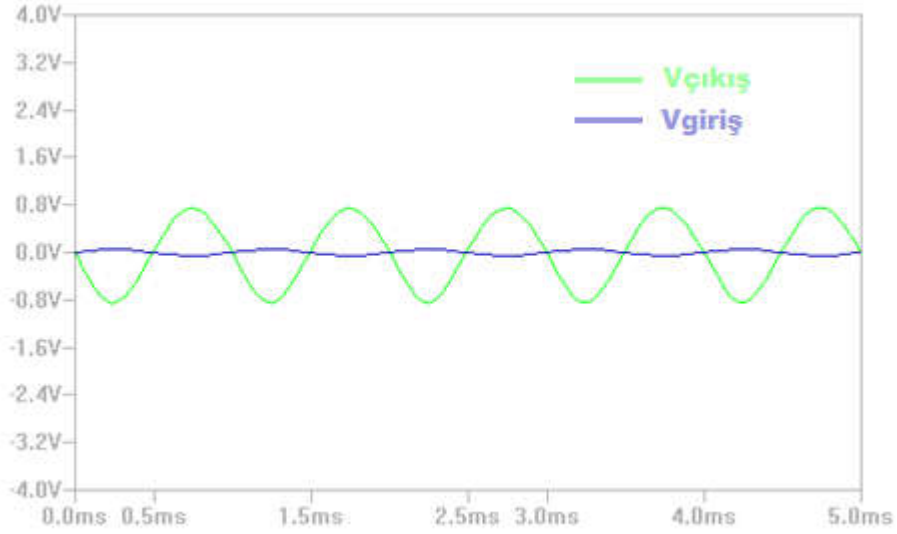
Bu bölümde yorma uygulanmamış ve farklı zaman aralıklarında yorma uygulanmış MOSFET'lerin ve kullandıkları güç kuvvetlendirici devrelerin ölçüm sonuçları verilmiştir. Yorma etkisinin sonuçları incelenmiştir. 90 dakikaya kadar 10 'ar dakikalık periyotlar halinde ve 120 dakika olmak üzere toplam 10 farklı yorma testi uygulanmış ve yorulan MOSFET'ler için devreler üzerinde Bölüm 3 'de anlatılan ölçümler yapılmıştır.

4.2.1 A Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.1 'de A sınıfı kuvvetlendiricilerde kullanılan IRF510 MOSFET'inin yormaya bağlı olarak V_{TH} geriliminin değişimi verilmiştir. V_{TH} geriliminin ilk 30 dakikalık

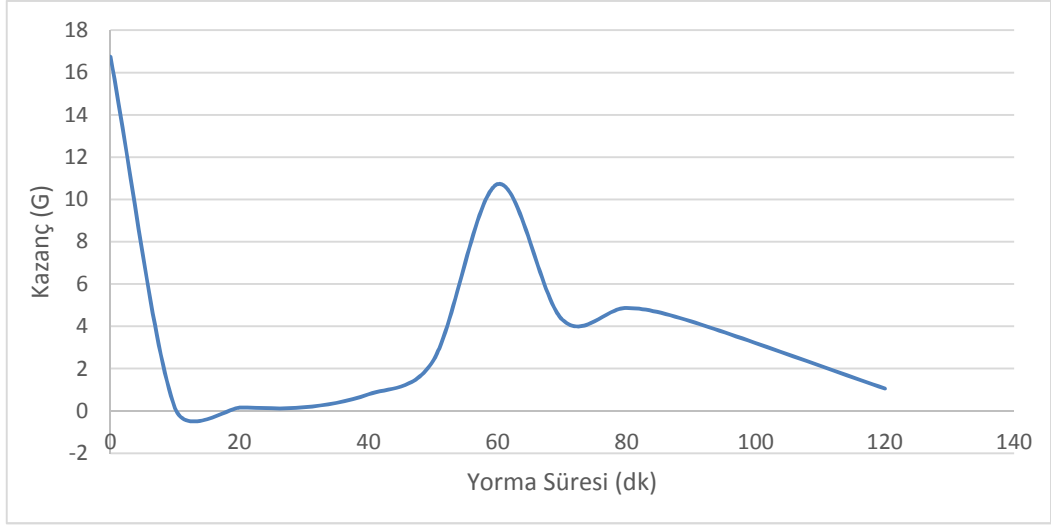
yorma döneminde önce azalıp sonra arttığı görülmüştür. İlk 30 dakikadan sonra belirli bir artış ivmesiyle artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.4' de verilmiş olan geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi için LT Spice programında yapılan benzetim sonucunda çıkış geriliminin giriş gerilimine göre değişimi Şekil 4.2' de verilmiştir. $V_{OUT(pp)} = 1.589 \text{ V}$ ve $V_{IN} = 100 \text{ mV}$ olarak ölçülmüştür. Gerilim kazancı, $K = 15.89$ olarak hesaplanmıştır.



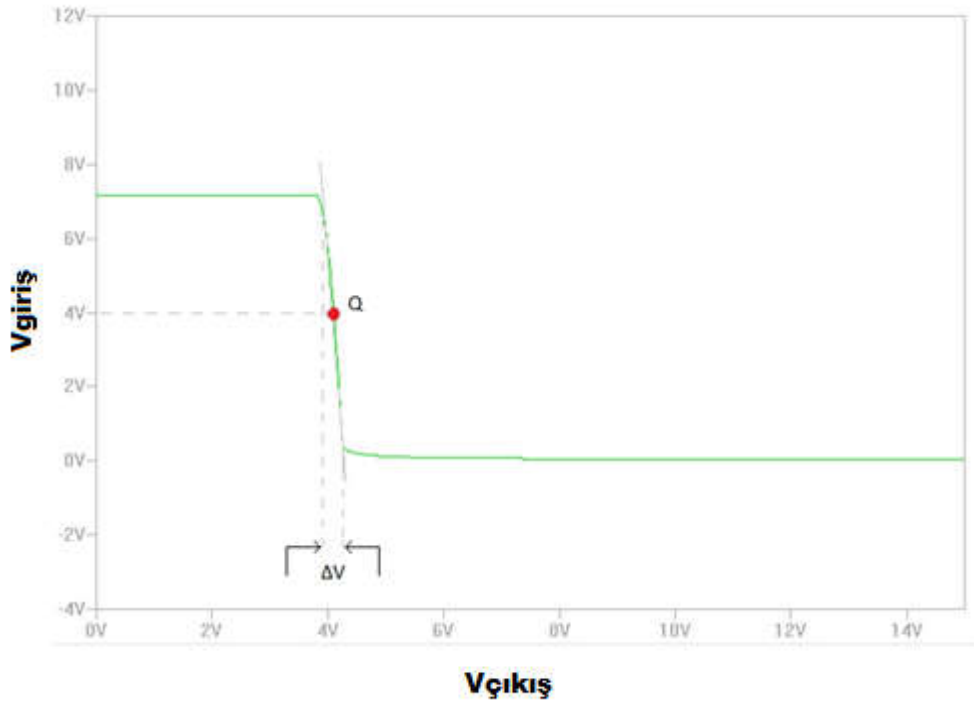
Şekil 4.2: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.

Gerçekleştirilen devre için, A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricilerin kazanç ölçümü Şekil 4.3'te verilmiştir. İlk 60 dakika içindeki veriler MOSFET in çalışma aralığından ötürü kazanç görülemediği. Ancak farklı besleme değerleri için 0-60 dakikalık aralıkta daha yüksek kazanç değerleri görülmüştür. 120. dakikada kazancın yaklaşık olarak 1'e düştüğü görülmüştür.



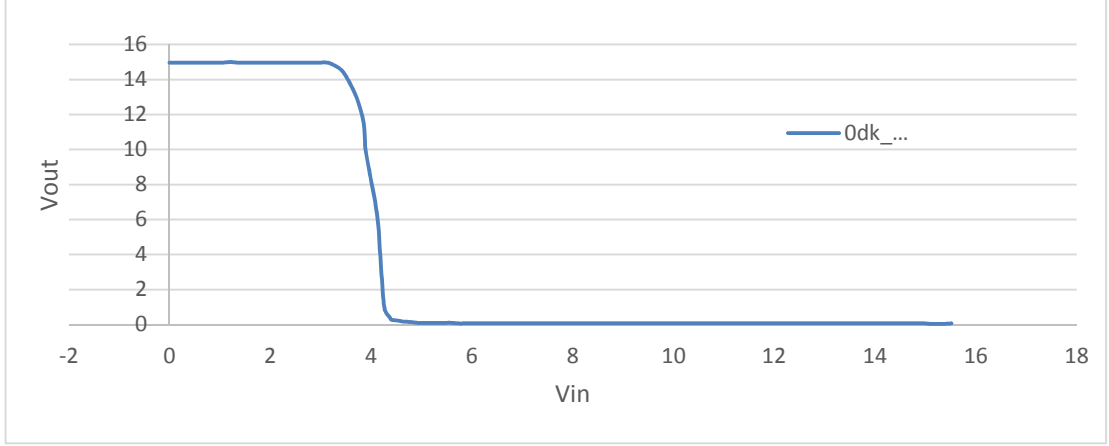
Şekil 4.3: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazanç grafiği.

A sınıfı geribeslemesiz kuvvetlendiriciler için LT Spice ile yapılan benzetim sonrası yapılan DC Analiz Şekil 4.4’de verilmiştir.



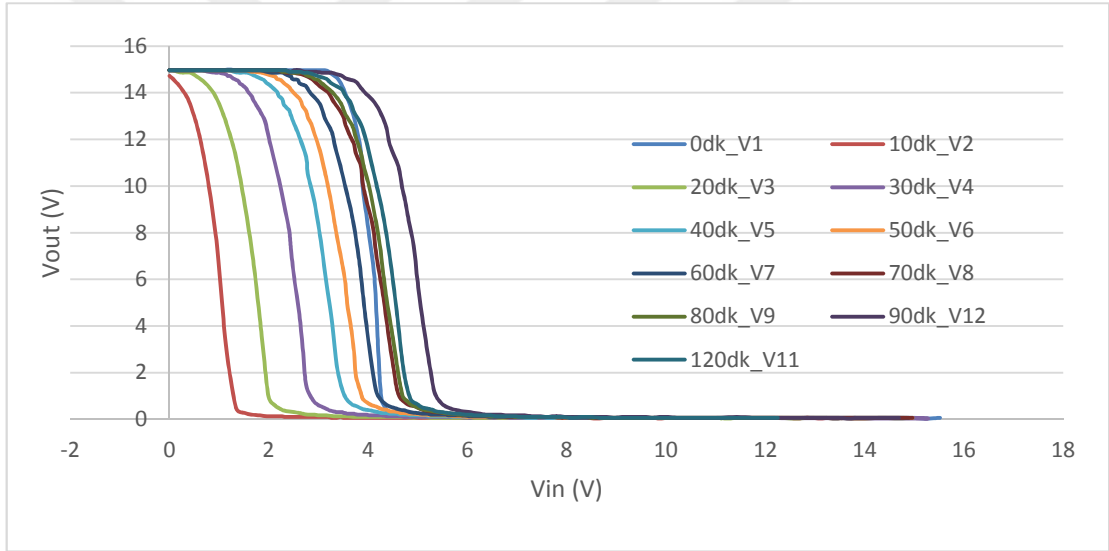
Şekil 4.4: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.

DC Analiz sonucunda çalışma noktası, Q (4.02, 4.1) olarak gözlemlenmiştir. $V = 0.38$ V olarak ölçülmüştür. Gerçeklenen devreler için, yorma uygulanmamış MOSFET ile çalışan geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresinin DC kazanç eğrisinin grafiği Şekil 4.5 ’de verilmiştir.



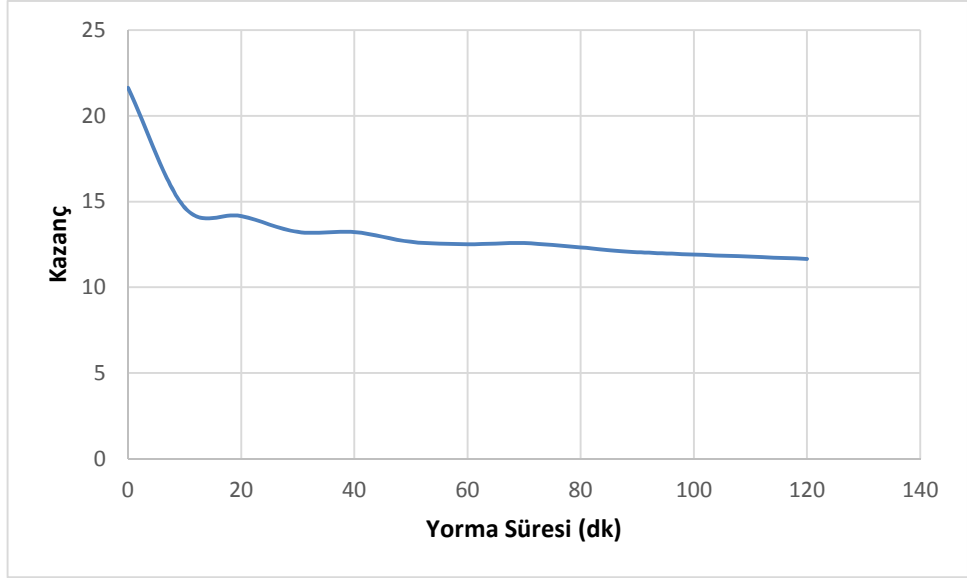
Şekil 4.5: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için yorma olmadığında elde edilen DC kazanç grafiği.

Şekil 4.6 'da yorma uygulanan tüm MOSFET'lerin DC kazanç eğrisinin değişimi verilmiştir.



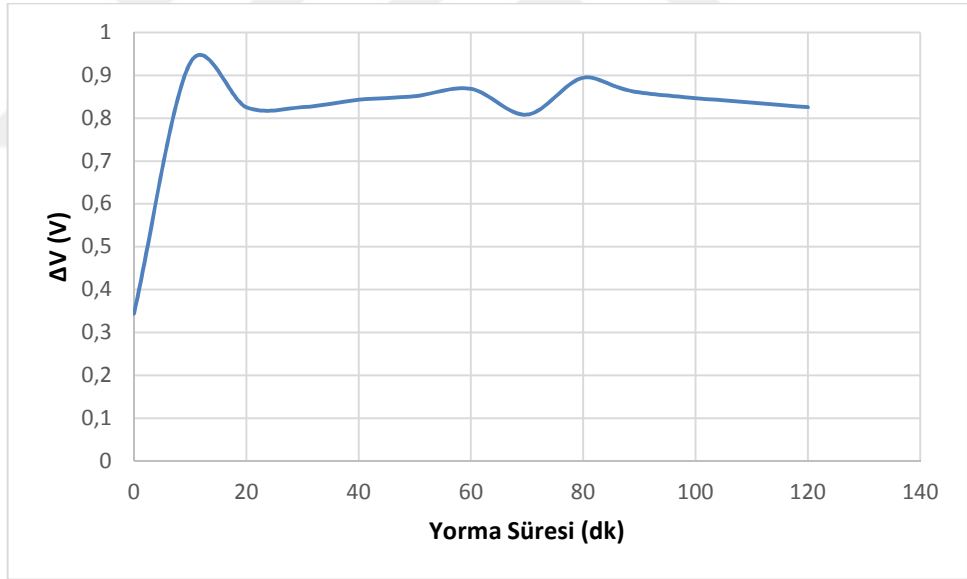
Şekil 4.6: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için tüm periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.

Yorma uygulandıkça DC kazancın da AC kazançta olduğu gibi azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte çalışma noktası, Q 'nun değişimi ve doğrusal çalışma aralığının değişimlerinin daha farklı bir davranış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.7 'de maksimum DC kazancın yormaya bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.

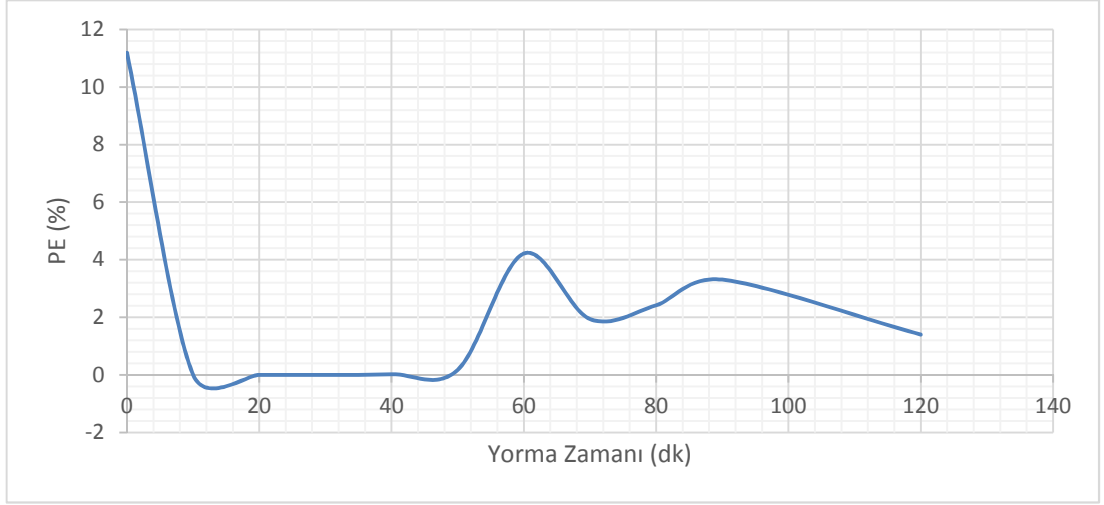
Şekil 4.8 'de çıkış işaretinin giriş işaretine göre doğrusal aralığı Şekil 4.7'de verilen DC kazanç eğrilerine en küçük kareler yöntemi ile eğri uydurularak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.

Maksimum DC kazanç eğrisinin uzun yorma sürelerinde küçük sinyal kazancında olduğu kadar hızlı şekilde düşmediği, büyük genlikli ve düşük frekanslı A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresi için yorma etkisinin daha minimal olduğu görülmektedir.

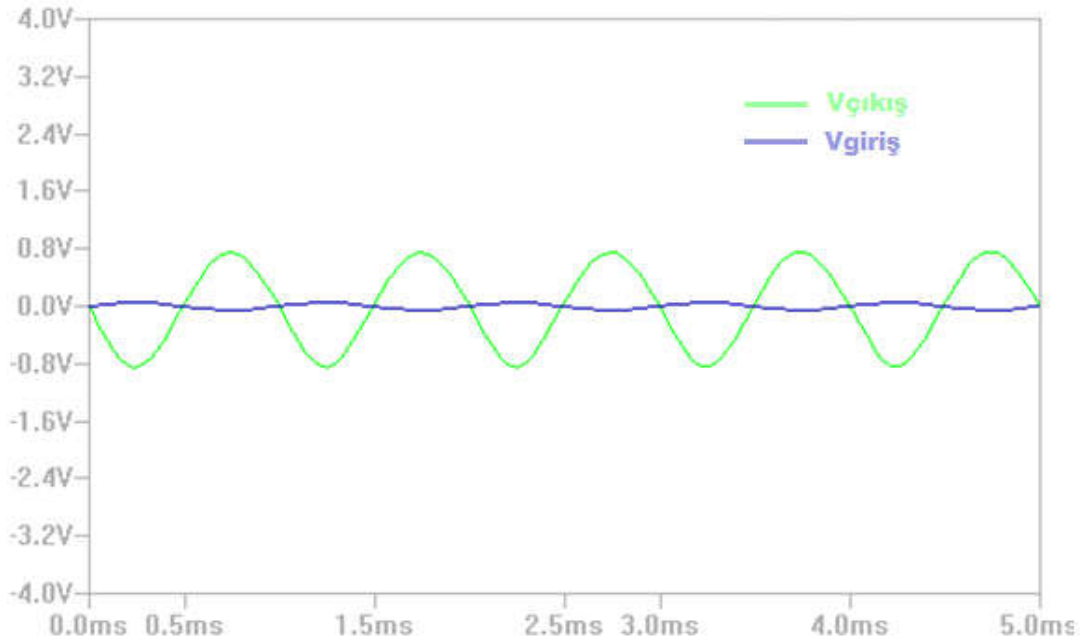
Şekil 4.9 'da savak verimliliği için yapılan hesaplamalar doğrultusunda yormaya bağlı olarak verimliliğin zamana göre değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.9: A Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için savak verimliliğinin yormaya bağlı değişimi.

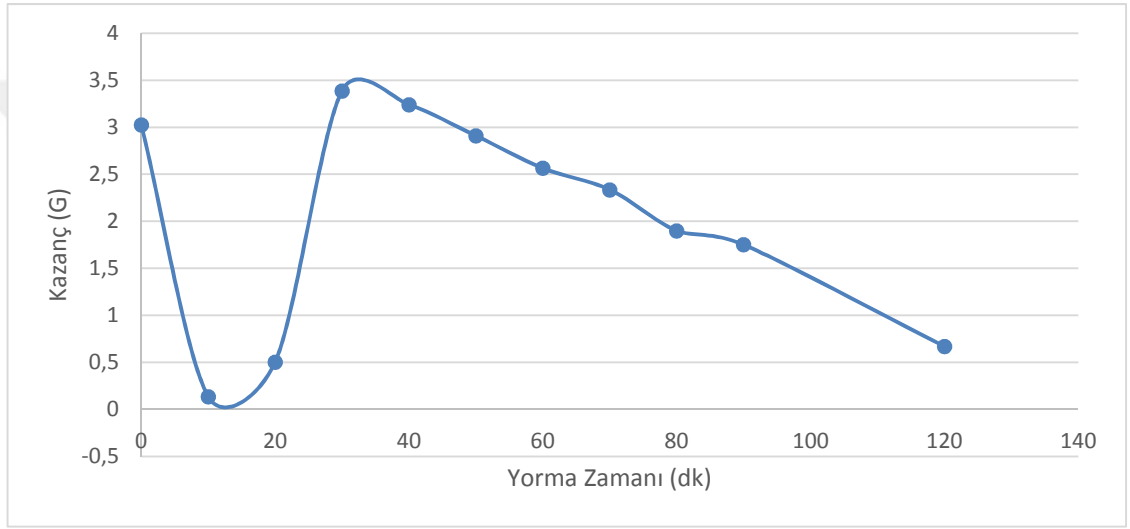
Verimliliğin değişim değerleri kazanç değişim grafiğiyle örtüşmektedir. Bölüm 2.2.1 'de verildiği gibi savak verimliliği doğru orantıyla $P_{\text{çıkış}}$ değeriyle değişmektedir.

Şekil 3.6' da verilmiş olan geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresi için LT Spice programında yapılan benzetim sonucunda çıkış geriliminin giriş gerilimine göre değişimi Şekil 4.10 'da verilmiştir. $V_{\text{OUT(pp)}} = 164.94 \text{ mV}$ ve $V_{\text{IN}} = 100 \text{ mV}$ olarak ölçülmüştür. Gerilim kazancı, $K = 1.6494$ olarak hesaplanmıştır.



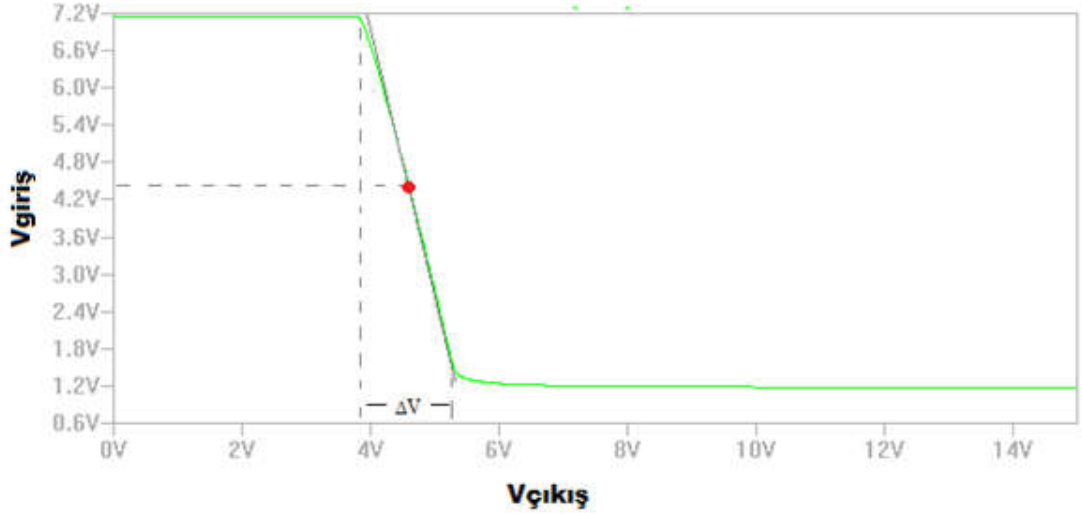
Şekil 4.10: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.

Gerçeklenen devre için, A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendiricinin kazanç ölçümü Şekil 4.11’de verilmiştir. Geribeslemesiz A sınıfı kuvvetlendiriciden farklı olarak kazançtaki sert değişim dalgasının kısaldığı görülmüştür. Geribesleme direnci sebebiyle V_{GS} geriliminin değişmesinden ötürü erken yorulma etkisine karşı daha dayanımlı bir grafik oluşmuştur. Bununla birlikte geribeslemesiz güç kuvvetlendiricisinde görülen kazançtan belirgin şekilde daha az bir kazanç gözlemlenmiştir. 30 dakikadan sonraki yorma ölçümlerinde kazancın geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresine nazaran daha doğrusal şekilde azaldığı görülmüştür. 120. dakikada kazancın 0.67 ye düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.11: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.

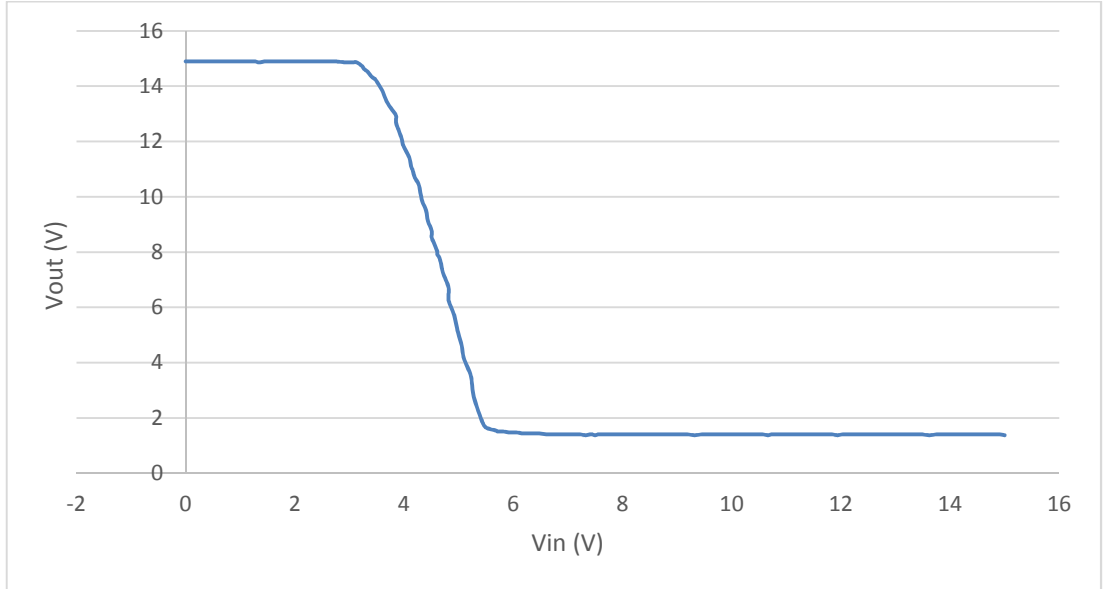
A sınıfı geribeslemeli kuvvetlendiriciler için LT Spice ile koşulan simülasyon sonrası yapılan DC Analiz Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.

DC Analiz sonucunda, çalışma noktası, Q (4.46, 4.58) olarak gözlemlenmiştir. $V = 1.51$ V olarak ölçülmüştür. Simülasyon sonuçları analiz edildiğinde geribeslemeli ve geribeslemesiz devre tasarımında kazanç ile doğrusallık arasında ödünleşim olduğu görülmüştür. Geribeslemeli devre tasarımında kazanç azalırken, doğrusal aralık artmıştır.

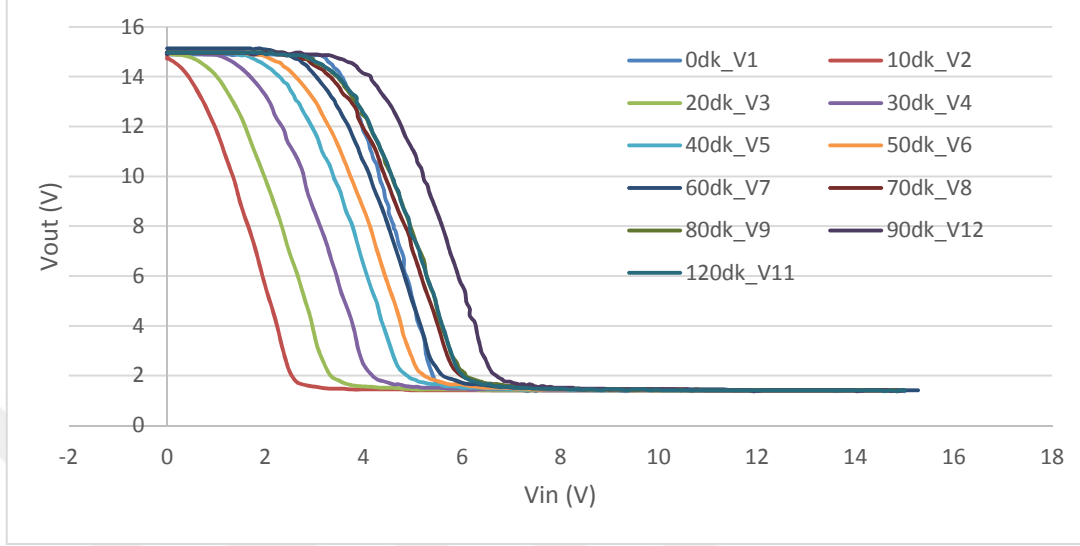
Pratik devre için, yorma uygulanmamış MOSFET ile çalışan geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresinin DC kazanç eğrisinin grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için yorma olmadığında elde edilen DC kazanç grafiği.

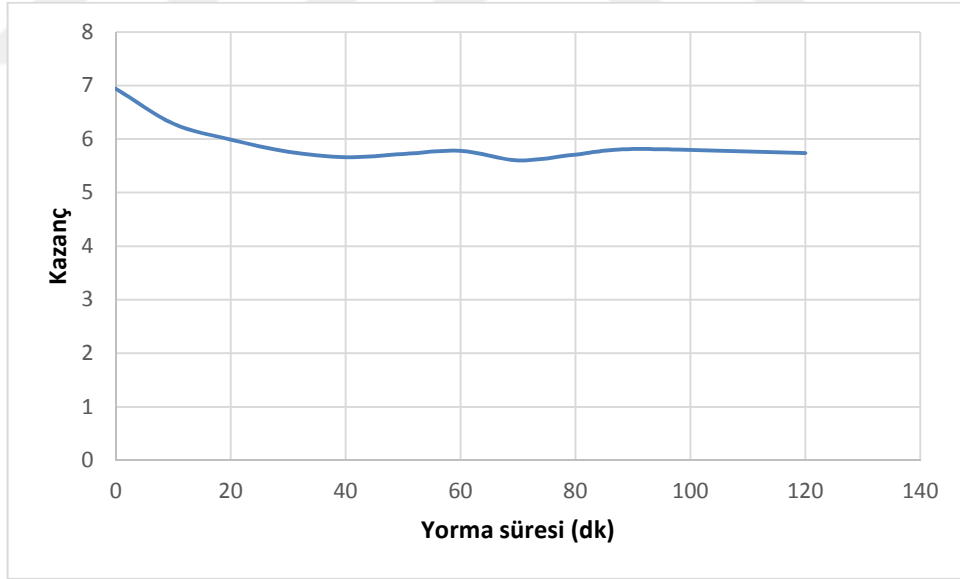
Geribesleme etkisiyle beraber kazancın azaldığı ve doğrusal aralığın arttığı görülmüştür. Şekil 4.14 ‘de yorulmuş tüm MOSFET’lerin DC kazanç değişimleri verilmiştir. Yorma

etkisiyle beraber DC kazancın ve doğrusal aralığın A sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici devresinde geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresine oranla daha dayanımlı bir azalma gösterdiği görülmektedir.



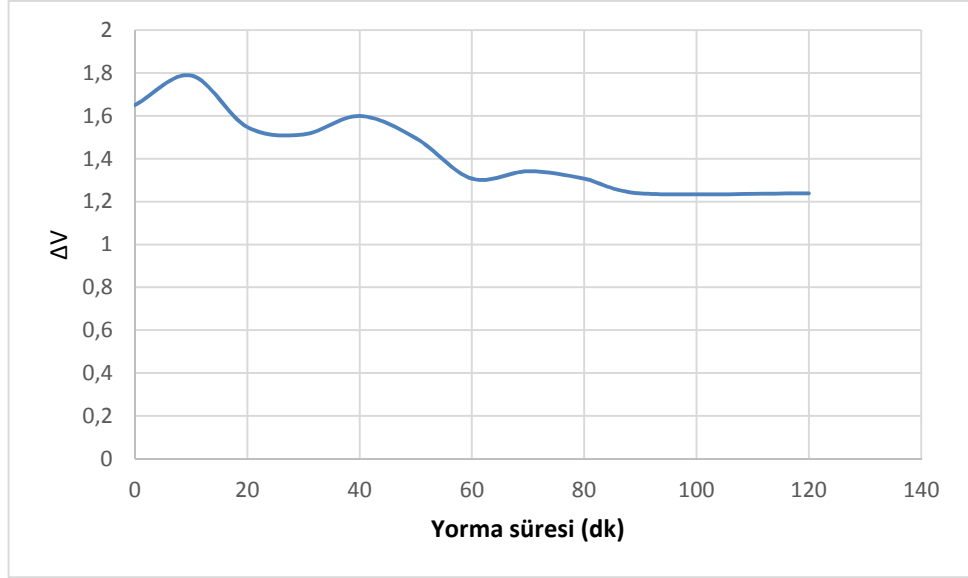
Şekil 4.14: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.

Şekil 4.15'de maksimum DC kazancın yormaya bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 4.15: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.

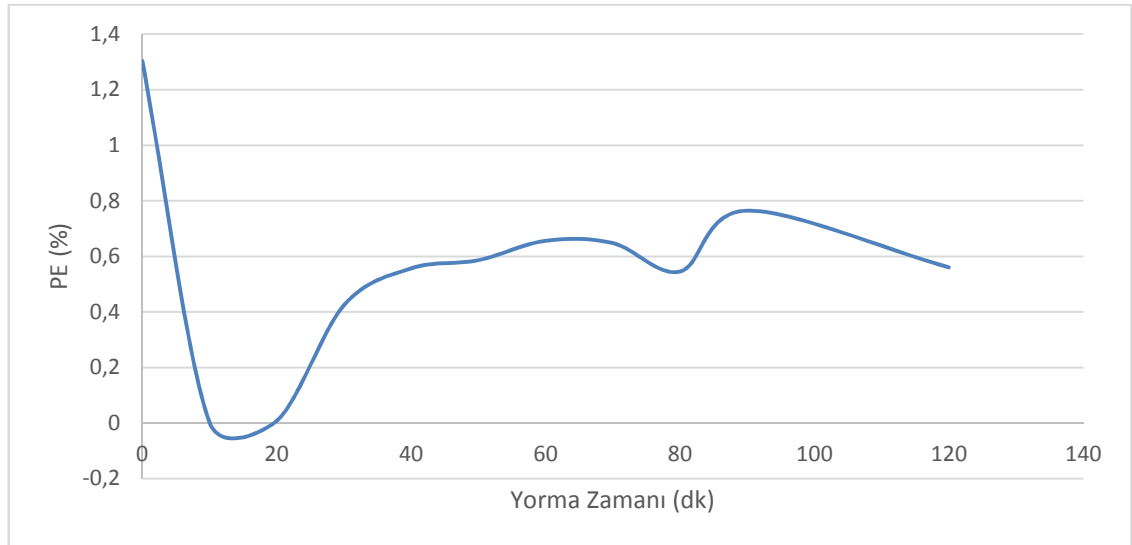
Geribesleme etkisiyle beraber kazanç değeri azalmasına rağmen maksimum kazancın yormaya karşı dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.16'da çıkış işaretinin giriş işaretine göre doğrusal aralığı Şekil 4.15'de verilen DC kazanç eğrilerine en küçük kareler yöntemi ile doğru uydurularak hesaplanmıştır.



Şekil 4.16: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.

Geribesleme etkisiyle beraber ΔV aralığı artmasına rağmen, erken yorulma döneminde geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresine göre daha hızlı şekilde azalmıştır. Bununla birlikte 90 dakika ve 120 dakikalık yorma testlerinde azalma gözlenmemiştir.

Şekil 4.17'de savak verimliliği için yapılan hesaplamalar doğrultusunda yormaya bağlı olarak verimliliğin zamana göre değişimi grafiği verilmiştir.

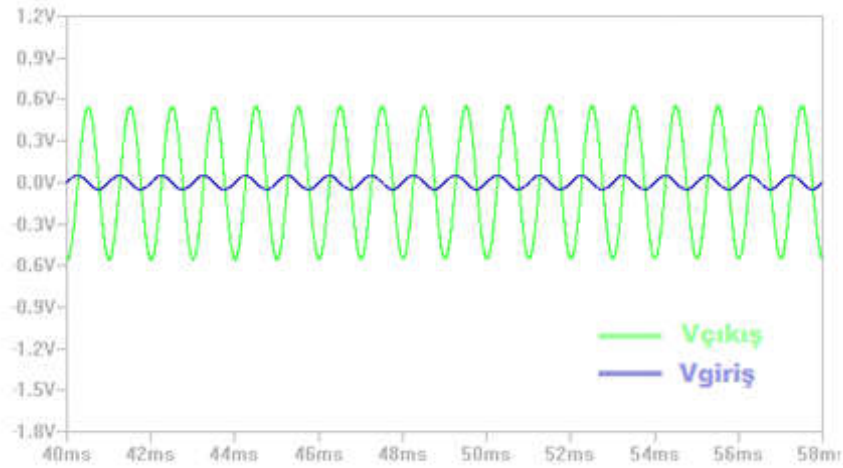


Şekil 4.17: A Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğinin yormaya bağlı değişimi.

Savak verimliliği, geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devresinde olduğu gibi AC kazanç grafiğini izlemiştir. Erken dönem yorma etkisinin kaybolmasıyla beraber zamana bağlı olarak verimlilik azalmıştır. Buna rağmen geribeslemesiz A sınıfı güç kuvvetlendirici devresine göre daha dayanımlı bir karakteristik sergilemiştir.

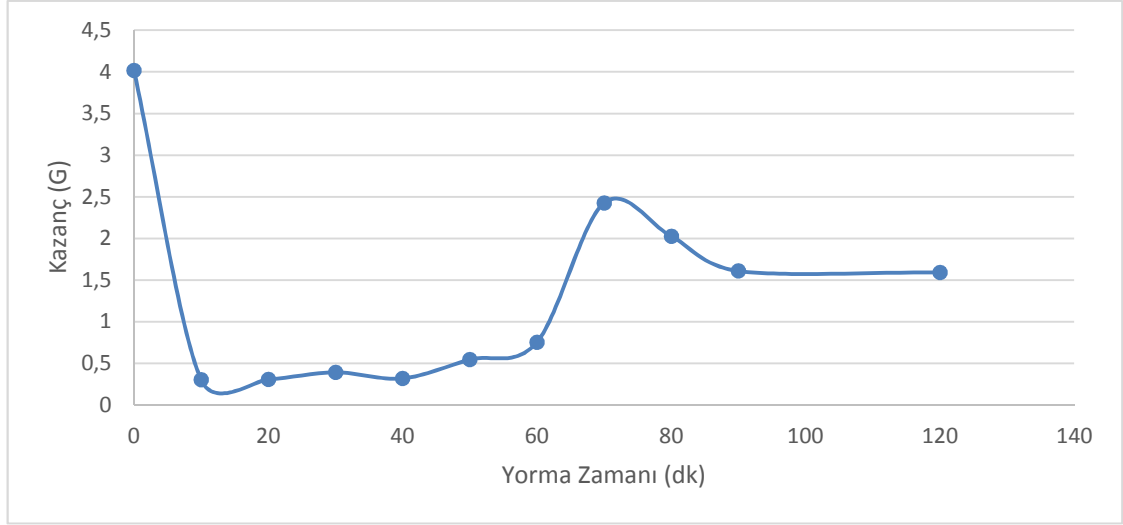
4.2.2 D Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.1 'de D sınıfı kuvvetlendiricilerde kullanılan IRF510 MOSFET'inin yormaya bağlı olarak V_{TH} geriliminin değişimi verilmiştir. LT Spice programı ile yapılan simülasyon sonucunda $V_{OUT(pp)} = 1.1 \text{ V}$ ve $V_{IN(pp)} = 100 \text{ mV}$ olarak ölçülmüştür. Gerilim kazancı, $K = 11$ olarak hesaplanmıştır. Çıkış işareti ve giriş işaretinin grafikleri Şekil 4.18'de verilmiştir.



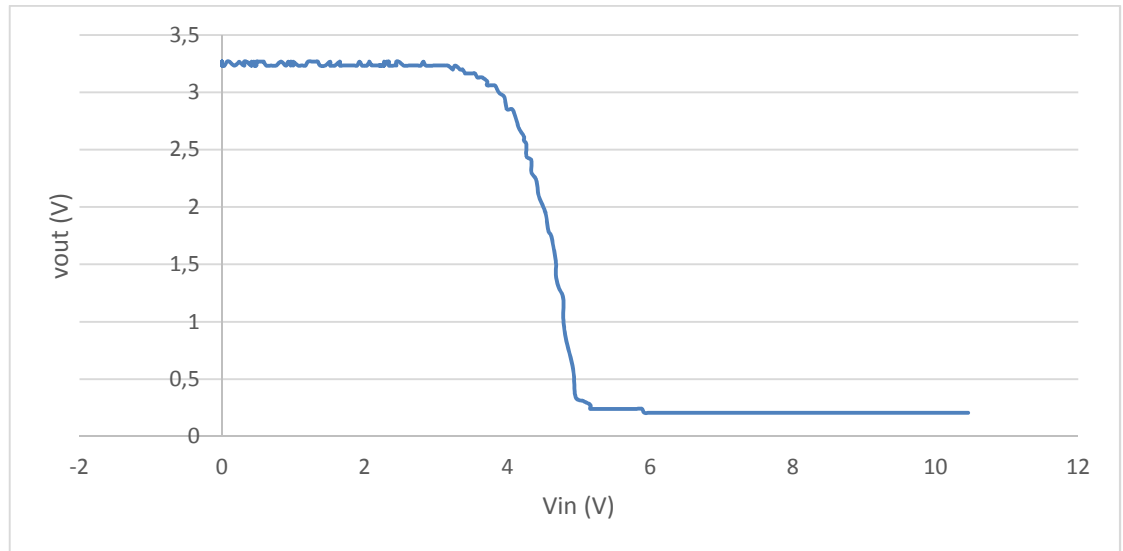
Şekil 4.18: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.

Gerçeklenen devre için, D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricilerin kazanç ölçümü Şekil 4.19'da verilmiştir. İlk 70 dakika içindeki veriler MOSFET'in çalışma aralığından ötürü pasif olarak ölçümlenmiş ve kazanç görülememiştir. Farklı besleme değerleri için 0-70 dakikalık aralıkta önce sert bir şekilde kazanç azalması sonrasında kazanç artışı görülmüştür. 120.dakikada kazancın 1.59' a düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.

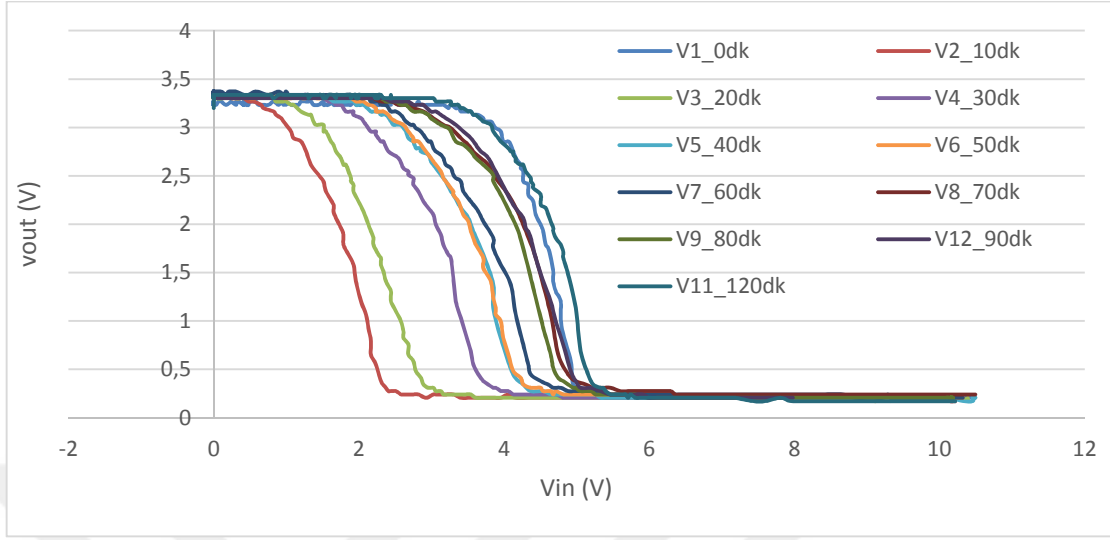
D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricileri çıkış katlarında yer alan alçak geçiren filtre devresinin performansına bağlı olarak kazanç kaybı yaşayabilirler. Tasarlanan D sınıfı kuvvetlendiricide kullanılan bobinin iç direncinin yüksek olması nedeniyle kazançtan kayıp yaşanmıştır. D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricilerinin A sınıfı kuvvetlendiricilere göre daha az kazanç sağlamasına rağmen yorma etkisine karşı daha fazla dayanım gösterdikleri görülmüştür. Şekil 4.20'de geribeslemesiz DC kazanç grafiği verilmiştir. D sınıfı güç kuvvetlendiricilerinin DC kazanç eğrisinin A sınıfı kuvvetlendiricilerle benzer karakteristiğe sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.20: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.

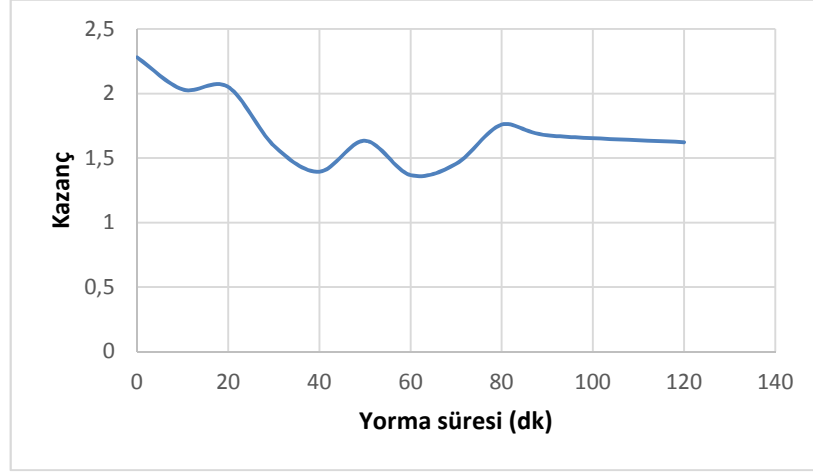
Yorma etkisiyle beraber Q noktasının ve V aralığının, A sınıfı güç kuvvetlendiricilere göre daha fazla değiştiği ve bozulduğu görülmüştür. Yüksek giriş değerleri ve çok düşük frekans ($f = 0$ Hz) için D sınıfı güç kuvvetlendiricilerin, A sınıfı

kuvvetlendiricilere göre doğrusallığının oldukça azaldığı görülmüştür. Şekil 4.21’de çalışılan tüm MOSFET’ler için DC kazanç grafikleri verilmiştir.



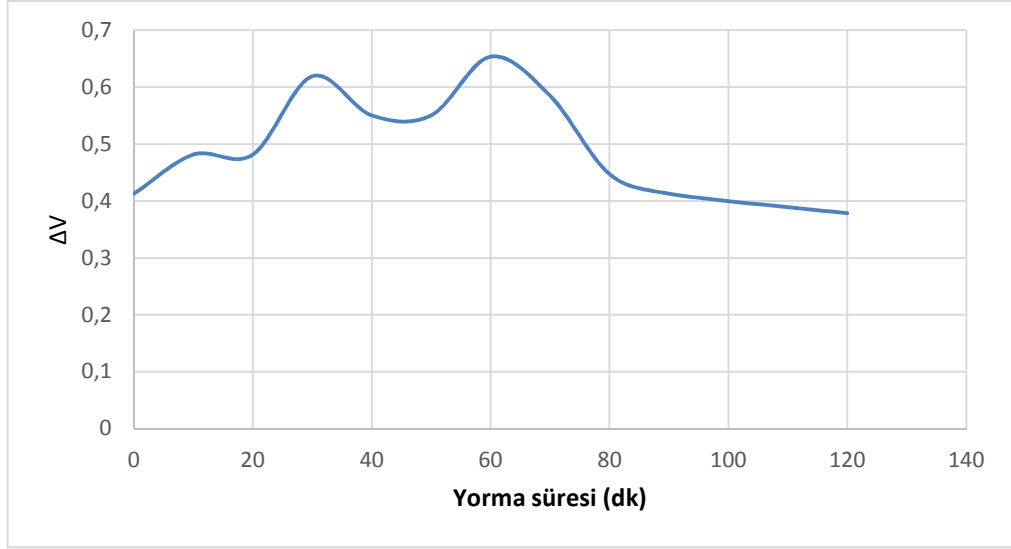
Şekil 4.21: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.

Şekil 4.22 ’de D sınıfı güç kuvvetlendiricileri için maksimum DC kazanç verilmiştir. Maksimum DC kazanç grafiğine bakıldığında yormaya karşı direncin olduğu görülmektedir.



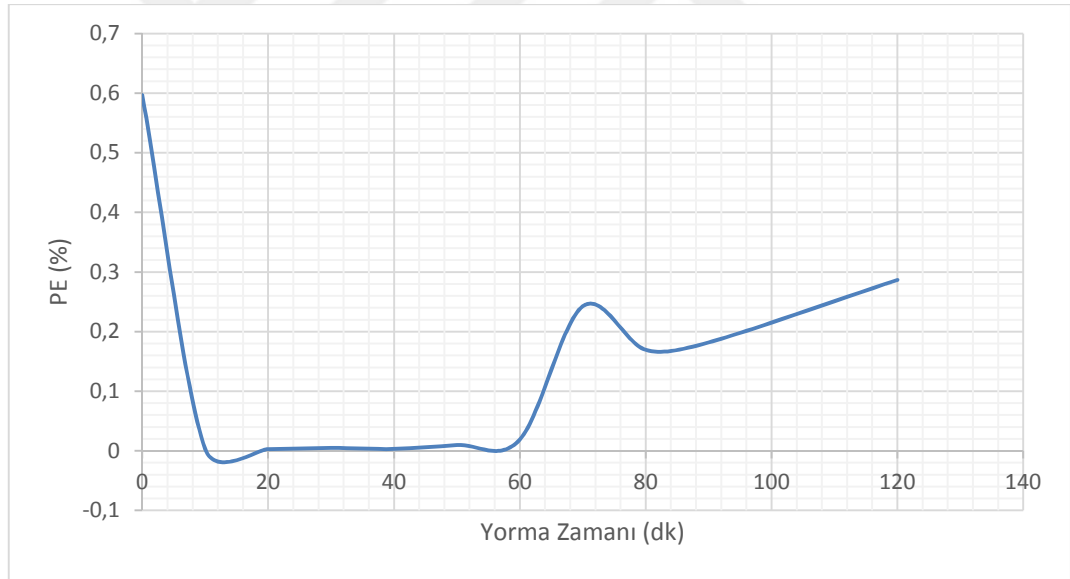
Şekil 4.22: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.

Bununla birlikte Şekil 4.23’de verildiği gibi V aralığının A sınıfı kuvvetlendiricilere göre oldukça dar olduğu gözlemlenmiştir. Dar bir doğrusal aralık için D sınıfı geribeslemesiz kuvvetlendiriciler A sınıfı kuvvetlendiricilere göre yormaya karşı daha başarılı bir bozulma grafiği göstermişlerdir.



Şekil 4.23: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.

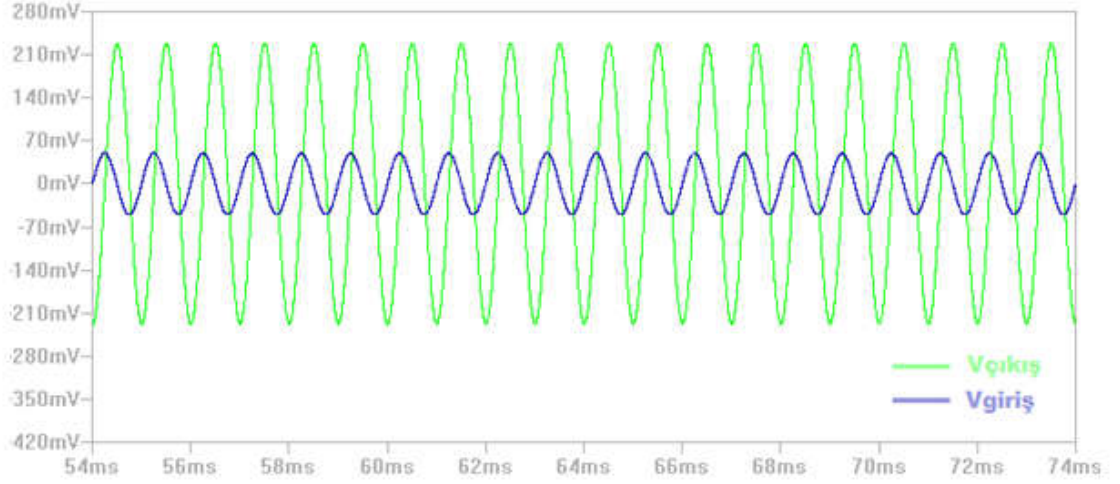
D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricileri için savak verimliliği Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.24: D Sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici için savak verimliliğinin yormaya bağlı değişimi.

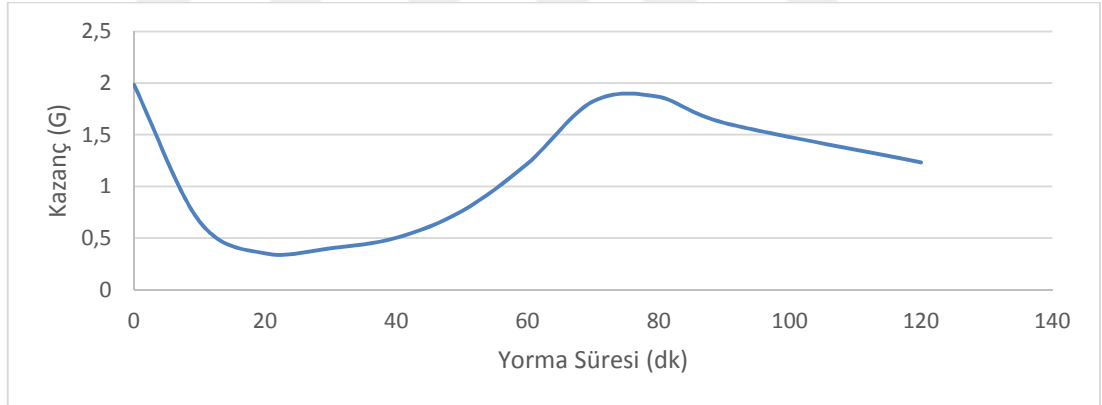
Verimliliğin değişim değerleri kazanç değişim grafiğiyle örtüşmektedir. Bölüm 2.2.1 'de verildiği gibi savak verimliliği doğru orantıyla $P_{\text{çıkış}}$ değeriyle değişmektedir.

Bölüm 3.3.2 'de anlatılan kuvvetlendirici devresi için yapılan LT Spice programında koşturulan simülasyon sonucunda çıkış gerilimi ve giriş gerilimi değerleri Şekil 4.25 'de verilmiştir. $V_{\text{OUT(pp)}} = 0.456 \text{ V}$ ve $V_{\text{IN(pp)}} = 100 \text{ mV}$ olarak ölçülmüştür. Gerilim kazancı, $K = 4.56$ olarak hesaplanmıştır.



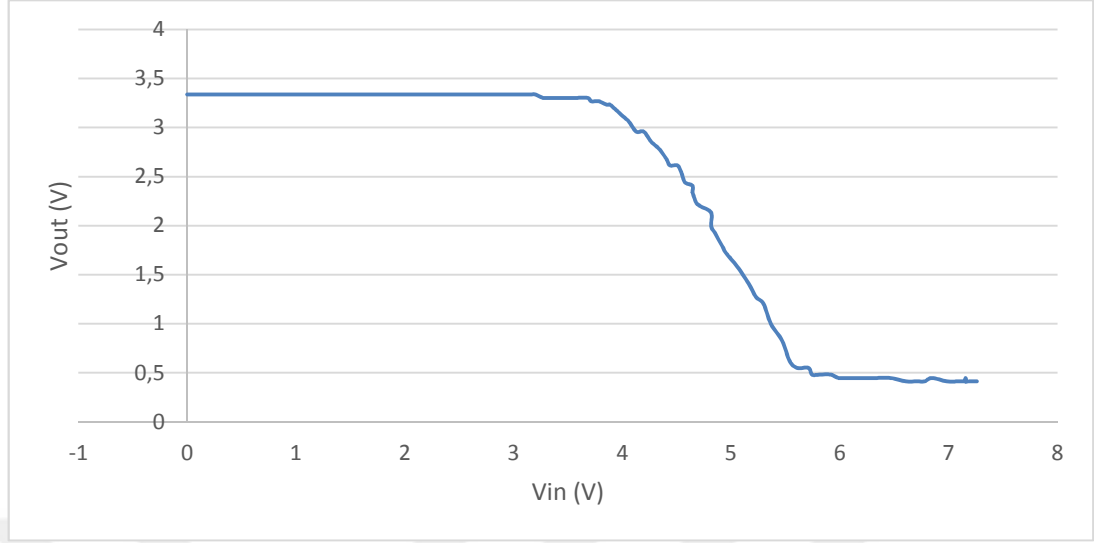
Şekil 4.25: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış işaretleri grafiği.

Pratik devre için, D sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendiricilerin kazanç ölçümü Şekil 4.26 'da verilmiştir. Geribesleme etkisiyle küçük işaret kazancı azalmasına rağmen D sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendiricisiyle benzer bir yorma etkisi gözlemlenmiştir. A sınıfı kuvvetlendiricilerde olduğu gibi geribeslemenin D sınıfı güç kuvvetlendiricilerinde yorma dayanımı artırmadığı görülmüştür.



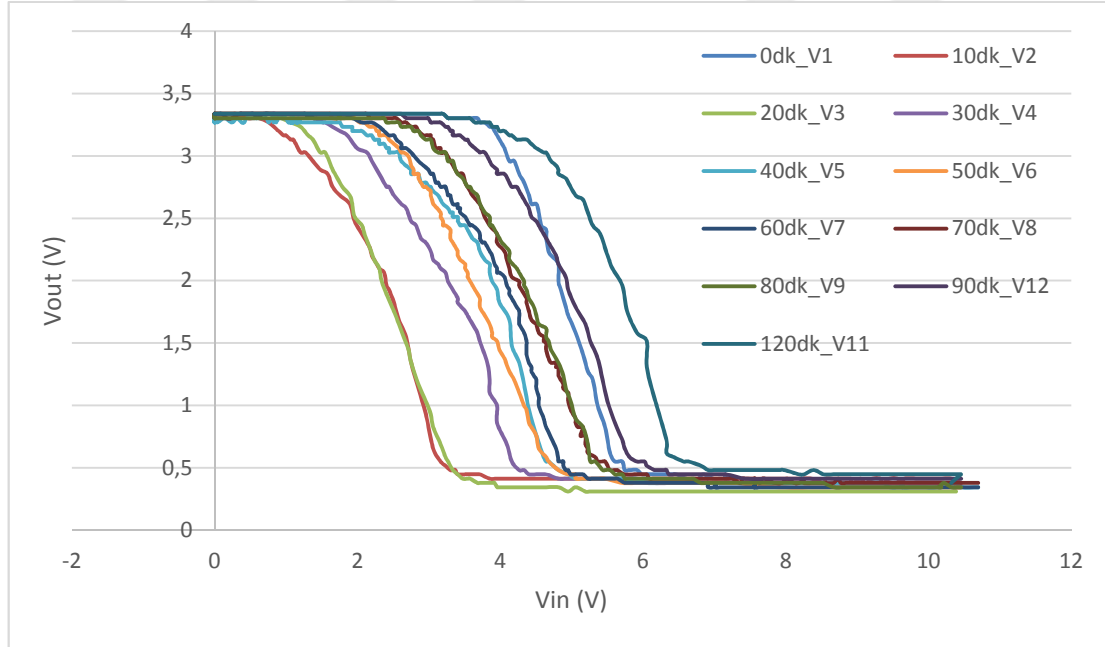
Şekil 4.26: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.

Şekil 4.27’de yorulmamış transistör ile kurulan devrenin DC çıkış eğrisi paylaşılmıştır.



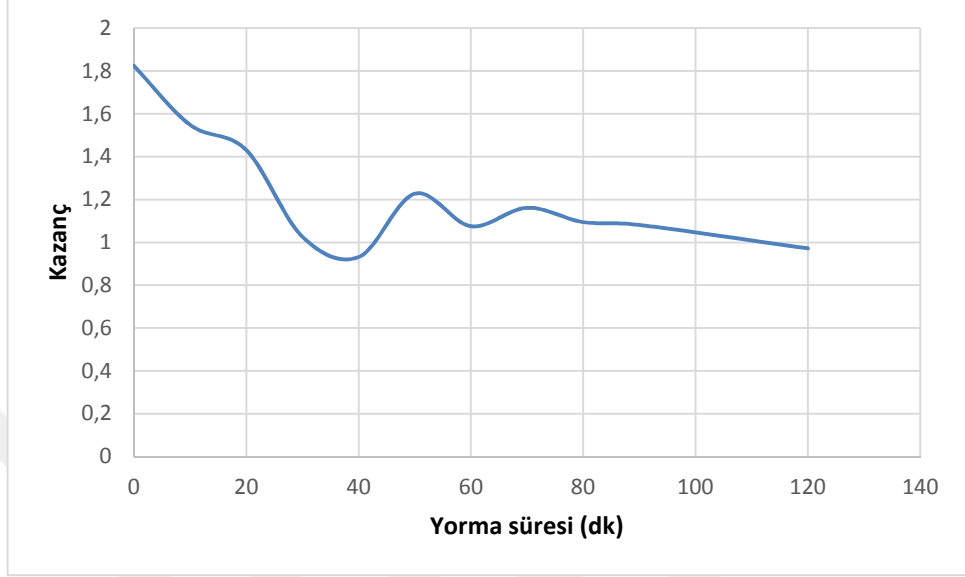
Şekil 4.27: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için yorma olmadığı elde edilen DC kazanç grafiği.

V aralığının geribeslemesiz güç kuvvetlendiricisine göre arttığı görülmüştür. Şekil 4.28’de geribeslemeli D sınıfı güç kuvvetlendiricisinin Q ve V değerlerinin geribeslemesiz güç kuvvetlendiricisine oranla yorma etkisiyle daha az bozulmaya uğradığı gözlemlenmiştir.



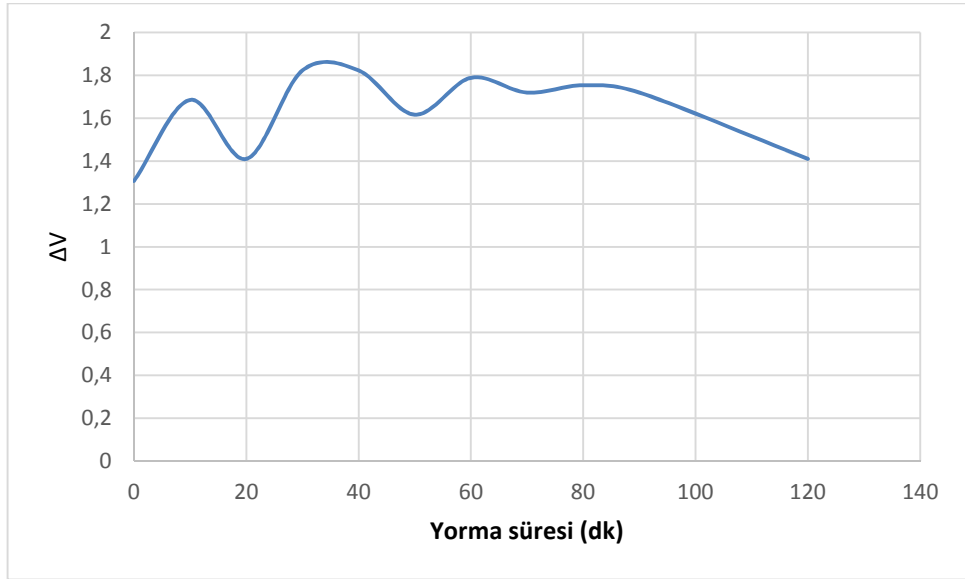
Şekil 4.28: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.

Şekil 4.29 'da maksimum DC kazancın yorma etkisiyle değişimi verilmiştir. AC kazanç grafiğinde olduğu gibi kazançta azalma olmasına rağmen geribesleme etkisiyle geribesleme etkisi olmayan kuvvetlendirici yapısı arasında yorma etkisinde değişim gözlemlenmemiştir.



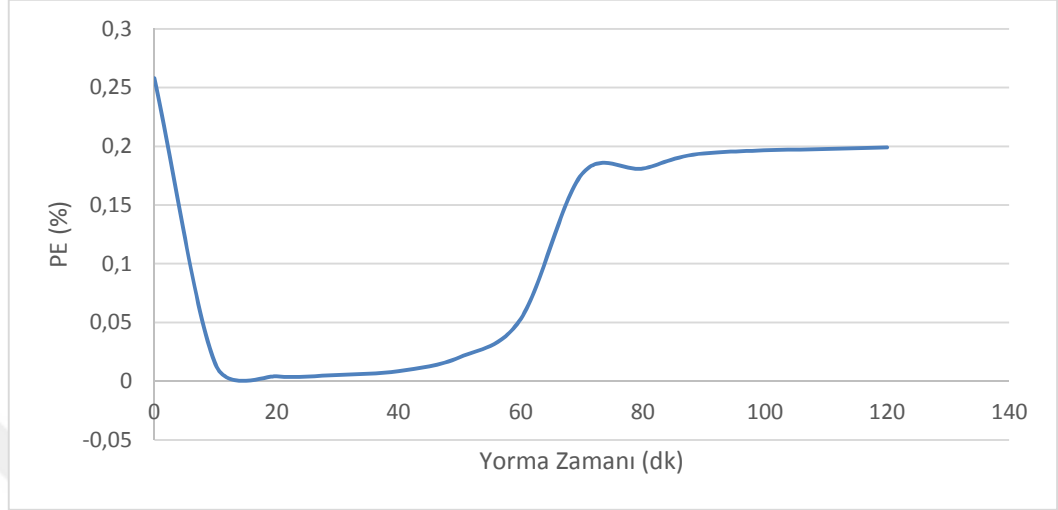
Şekil 4.29: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.

Şekil 4.30'da ΔV aralığının yorma etkisiyle değişimi verilmiştir. ΔV aralığı artmasına rağmen geribesleme etkisi geribeslemesiz kuvvetlendirici devresiyle bir fark oluşturmamıştır.



Şekil 4.30: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.

Şekil 4.31’de savak verimliliği hesaplanarak verilmiştir.

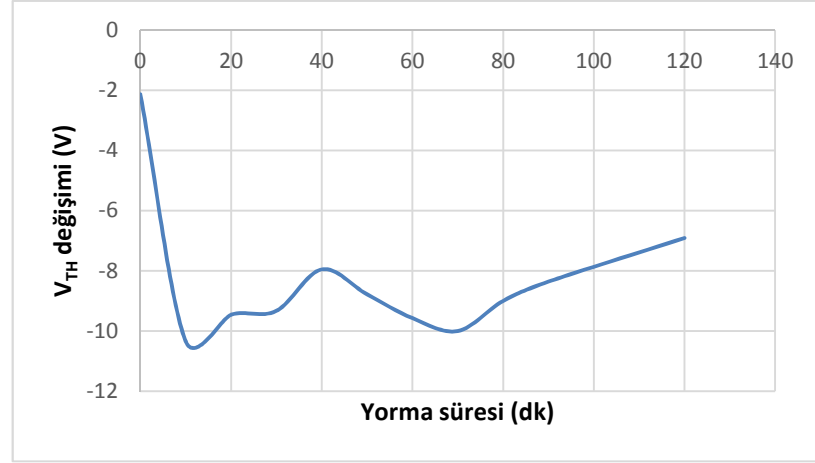


Şekil 4.31: D Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğin yormaya bağlı değişimi.

Savak verimliliği, $P_{ÇIKIŞ}$ 'a göre değişiklik göstermiştir. D sınıfı geribeslemesi güç kuvvetlendiricilerine benzer bir verimlilik grafiği oluşmuştur. Doğrusal olmayan D sınıfı güç kuvvetlendiricileri için geribeslemenin yorma etkisine karşı, geribeslemesiz kuvvetlendirici devrelere karşı A sınıfı güç kuvvetlendiricilerinde olduğu gibi bir iyileştirme sağlamadığı görülmüştür. Bununla birlikte D sınıfı güç kuvvetlendiricileri A sınıfı kuvvetlendiricilere karşı az kazanç sağlamasına rağmen, yorma testlerinden daha az etkilenmişlerdir.

4.2.3 AB Sınıfı Güç Kuvvetlendiricilerin Ölçüm Sonuçları

AB sınıfı kuvvetlendiricilerde kullanılan IRF510 n kanallı MOSFET'in yormaya bağlı olarak V_{TH} geriliminin değişimi Şekil 4.1 'de ve IRF9540N p kanallı MOSFET'in yormaya bağlı olarak V_{TH} geriliminin değişimi Şekil 4.32 'de verilmiştir.



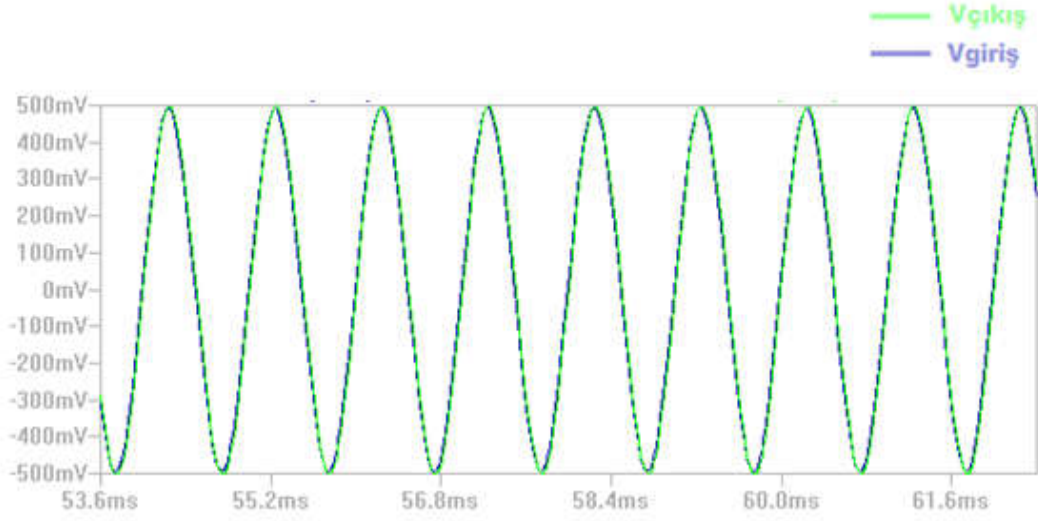
Şekil 4.32: IRF9540N MOSFET için yorulmanın V_{TH} üzerindeki etkisi.

Bölüm 3.3.3’de verilen kuvvetlendirici devresi için LT Spice programın yapılan simülasyonun sonuçları, $I_{OUT(pp)} = 9.86 \text{ mA}$ ve $V_{IN(pp)} = 0.025 \text{ V}$ olarak elde edilmiştir. Akım kazancı, $K_I = 394,4$ olarak hesaplanmıştır. $V_{OUT(pp)} = 0.493 \text{ V}$ ve $V_{IN(pp)} = 0.500 \text{ V}$ olarak ölçülmüştür. Gerilim kazancı, $K_V = 0.986$ olarak hesaplanmıştır. Güç kazancı $K_P = 388.87$ olarak hesaplanmıştır. Çıkış akımının giriş akımına göre değışimi Şekil 4.33’de verilmiştir.



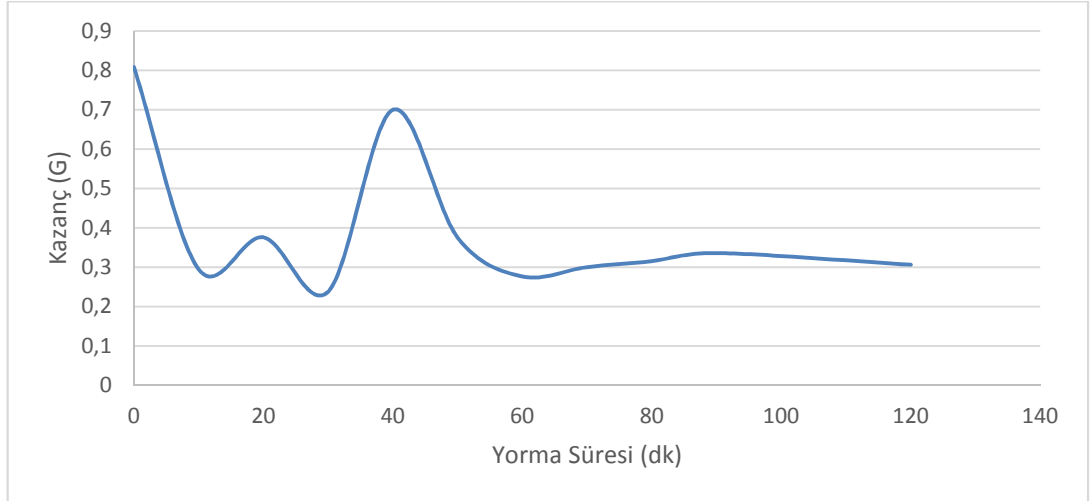
Şekil 4.33: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış akım işaretleri grafiği.

Çıkış geriliminin giriş gerilimine göre değişimi Şekil 4.34’de verilmiştir.



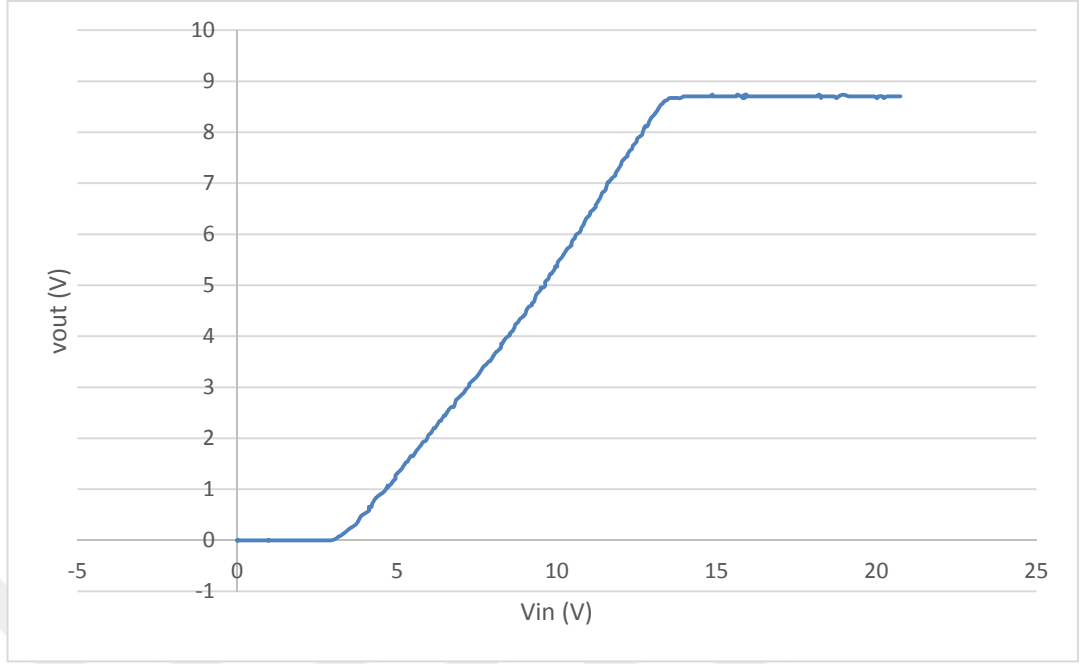
Şekil 4.34: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için giriş ve çıkış gerilim işaretleri grafiği.

AB sınıfı güç kuvvetlendiricilerin kazanç ölçümü Şekil 4.35’de verilmiştir. AB sınıfı kuvvetlendiriciler için tek transistörlü kuvvetlendiricilerden farklı olarak erken dönem kazanç değerleri n kanallı MOSFET pasif bölgede olmasına rağmen, p kanallı MOSFET daha ileri yorulma noktasında olduğu için kazanç görülmüştür. İlk 40 dakikalık yorulma süresinden sonra kazanç grafiği A sınıfı kuvvetlendiricilerde olduğuna benzer davranış göstermiştir. 120 dakika yorulma sonrasında kazanç 0,31 değerine düşmüştür.



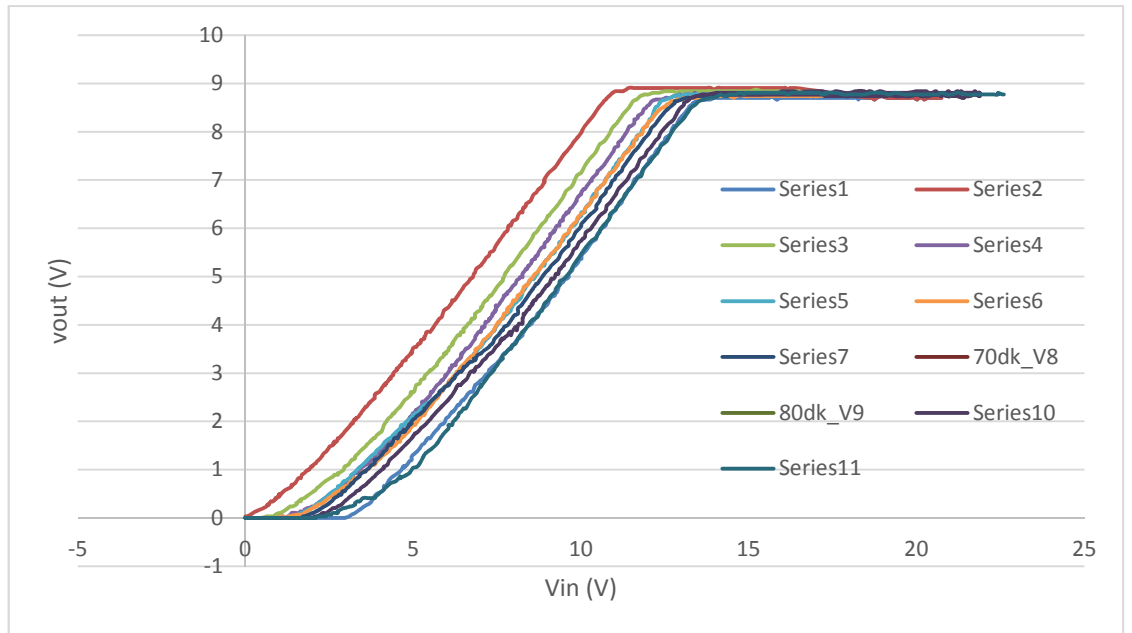
Şekil 4.35: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için küçük işaret kazancı grafiği.

Yorma uygulanmamış MOSFET’ler ile çalışan güç kuvvetlendirici devresinin DC kazanç eğrisinin grafiği Şekil 4.36’da verilmiştir.



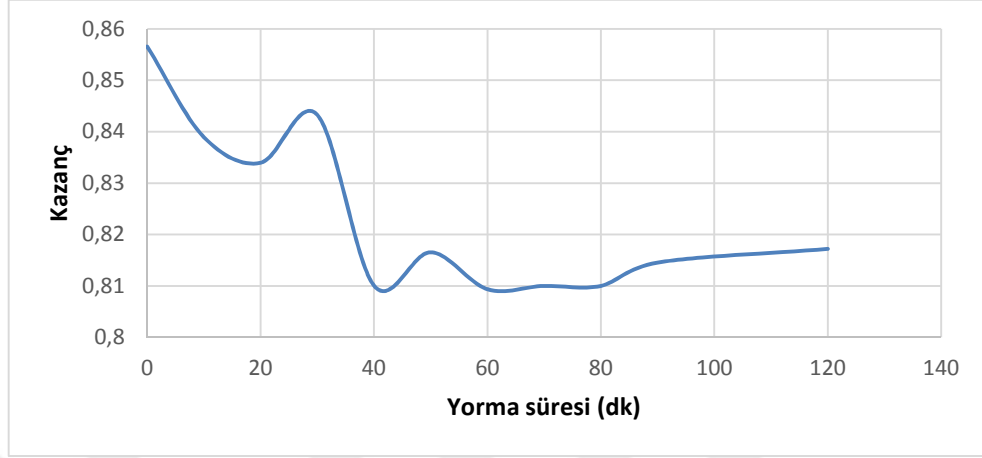
Şekil 4.36: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için DC kazanç grafiği.

Şekil 4.37 'de yorma uygulanan tüm MOSFET'lerin DC kazanç eğrisinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.37: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için tüm yorma periyotlarında elde edilen DC kazanç grafiği.

AB sınıfı kuvvetlendiricilerde tek transistörlü MOSFET'lerde görülen bozulma etkisine göre DC gerilim kazancının daha az etkilendiği görülmüştür. Şekil 4.38 'de maksimum DC kazancın yormaya bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 4.38: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi.

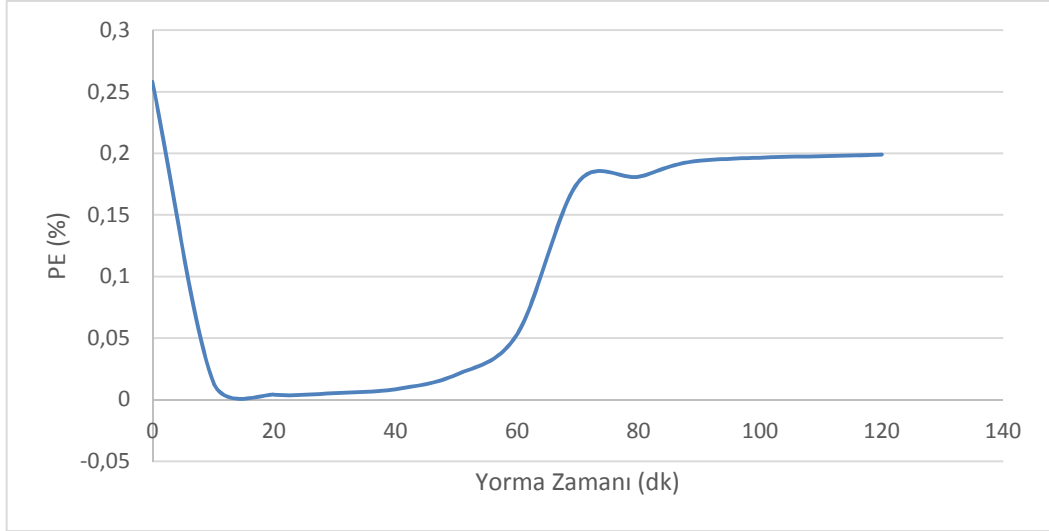
Şekil 4.39'da çıkış işaretinin giriş işaretine göre doğrusal aralığı Şekil 4.38'de verilen DC kazanç eğrilerine en küçük kareler yöntemi ile doğru uydurularak hesaplanmıştır.



Şekil 4.39: AB Sınıfı güç kuvvetlendirici için çıkışın doğrusal aralığının yormaya bağlı değişimi.

ΔV aralığının diğer kuvvetlendirici yapılarına göre daha geniş bir gerilim aralığında olduğu görülmüştür.

Şekil 4.40'da savak verimliliği için yapılan hesaplamalar doğrultusunda yormaya bağlı olarak verimliliğin zamana göre değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.40: AB Sınıfı geribeslemeli güç kuvvetlendirici için savak verimliliğin yormaya bağlı değişimi.

Verimliliğin değişim değerleri kazanç değişim grafiğiyle örtüşmektedir. Bölüm 2.2.1 'de verildiği gibi savak verimliliği doğru orantıyla $P_{\text{çıkış}}$ değeriyle değişmektedir.

4.3 ÖLÇÜM SONUÇLARINA MATEMATİKSEL EĞRİ UYDURULMASI

İncelenen farklı güç kuvvetlendirici sınıfları için ölçüm parametrelerinin değişimlerinin, yorulan güç MOSFET'lerinin V_{TH} değişimiyle benzer bir desen izlediği görülmüştür. Bu nedenle ölçüm çalışmaları sonrasında, elde edilen bulgular için matematiksel eğriler uydurulmuştur. Ölçüm sonuçlarının birbirleri ile olan matematiksel ilişkilerini yorumlayabilmek için benzer dereceden bir polinom ve gauss dağılımı toplam şeklinde kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Tüm fonksiyonlar için;

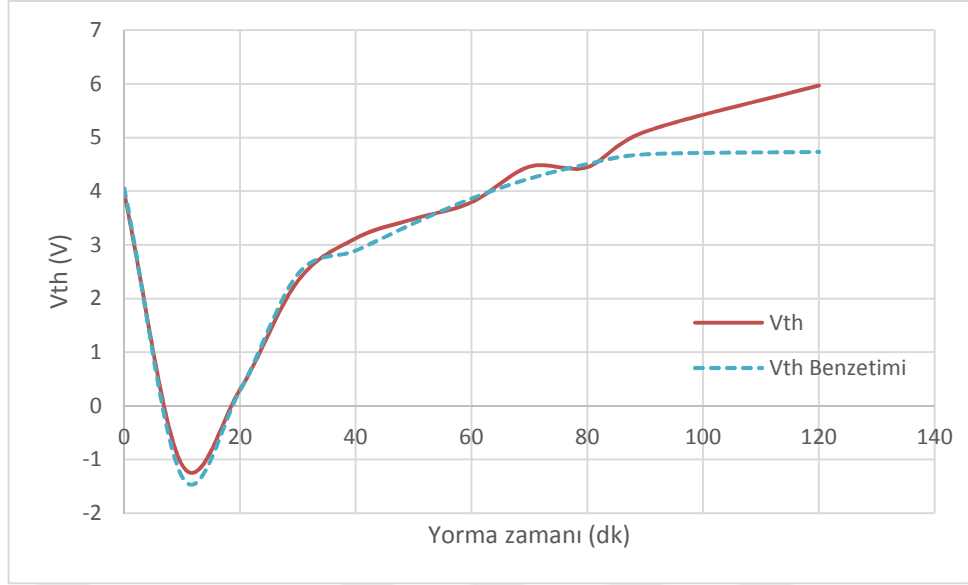
$$f(t) = a_4t^4 + a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t^1 + a_0t^0 \quad \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

formülasyonu kullanılmıştır.

IRF510 güç MOSFET'i için V_{TH} parametresinin yormaya bağlı değişimi;

$$V_{th}(t) = 0,0000002171t^4 - 0,0000614329t^3 + 0,0058817332t^2 + 0,1799487905t^1 + 4,0142841730 \quad 4e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.2)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,98334$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.41' de verilmiştir.

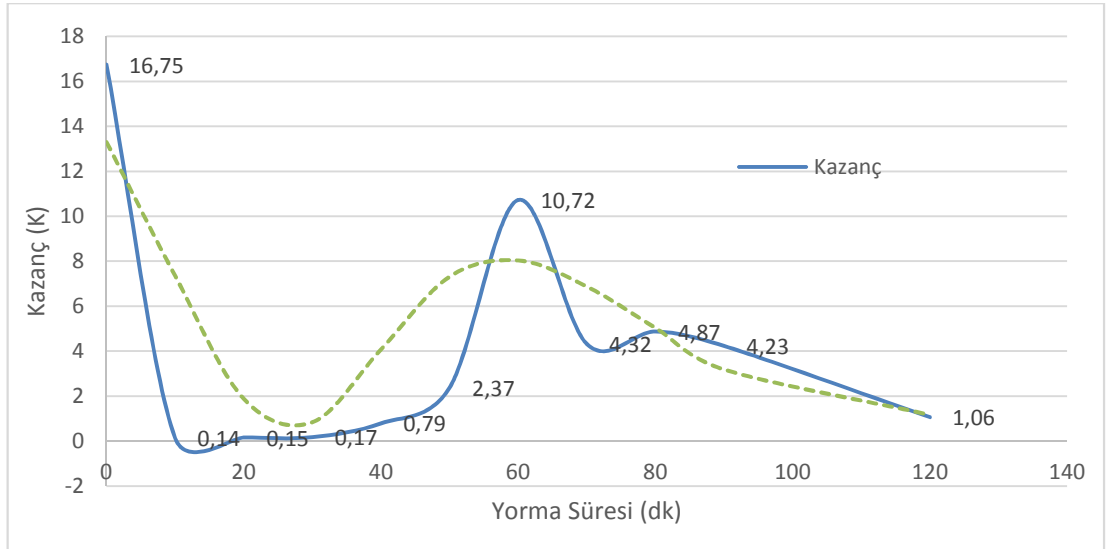


Şekil 4.41: Vth geriliminin yormaya bağlı değişimi ve benzetimi.

A sınıfı güç kuvvetlendiriciler için geribeslemesiz kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000002961t^4 - 0,0000570483t^3 + 0,0027968117t^2 + 0,1538988249t^1 + 16,545013954 - 13e^{-\frac{(t-25)^2}{450}} \quad (4.3)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,80080$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.42' de verilmiştir.

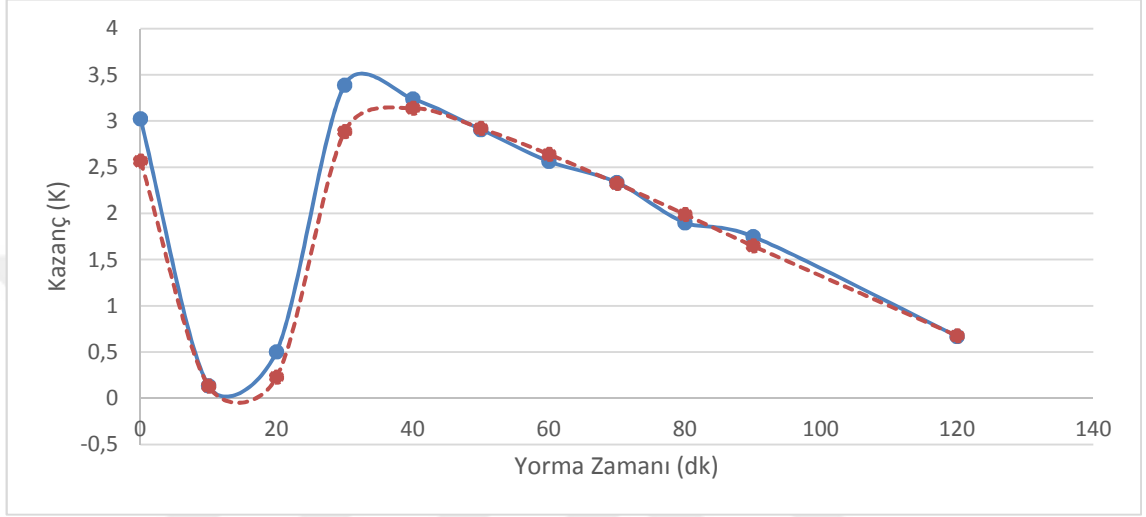


Şekil 4.42: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendiriciler için geribeslemeli kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000132t^4 + 0,0000062168t^3 - 0,0010135951t^2 + 0,0358101877t^1 + 2,9707935805 - 4e^{-\frac{(t-15)^2}{98}} \quad (4.4)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,98423$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.43' de verilmiştir.

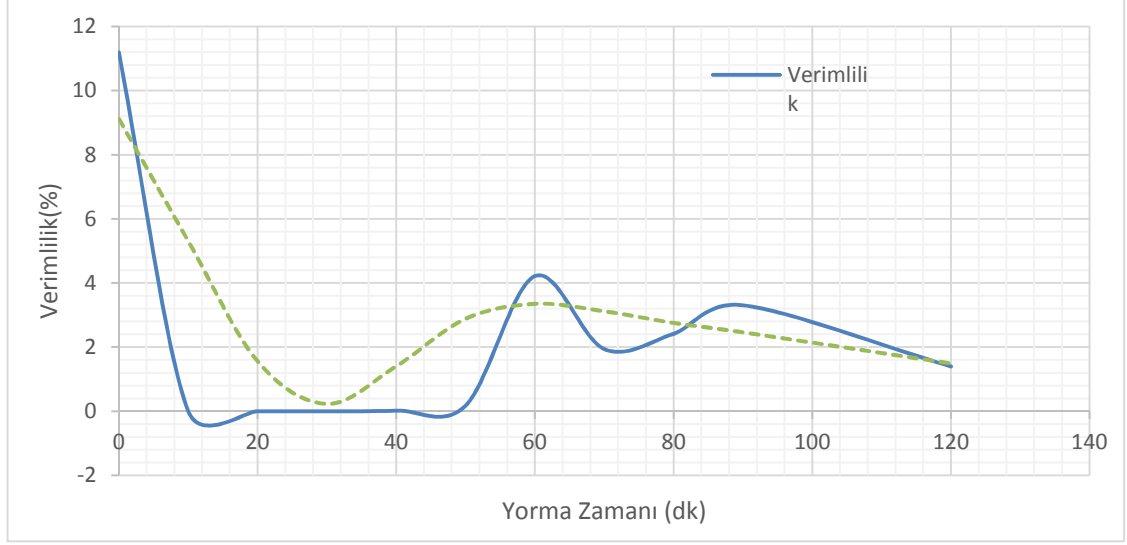


Şekil 4.43: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli kazanç ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimliliğin yormaya bağlı değişimi;

$$V(t) = 0,000000105t^4 + 0,0000234045t^3 - 0,0009102075t^2 + 0,1244059054t^1 + 10,8607562674 - 7e^{-\frac{(t-25)^2}{450}} \quad (4.5)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,80367$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.44' de verilmiştir.

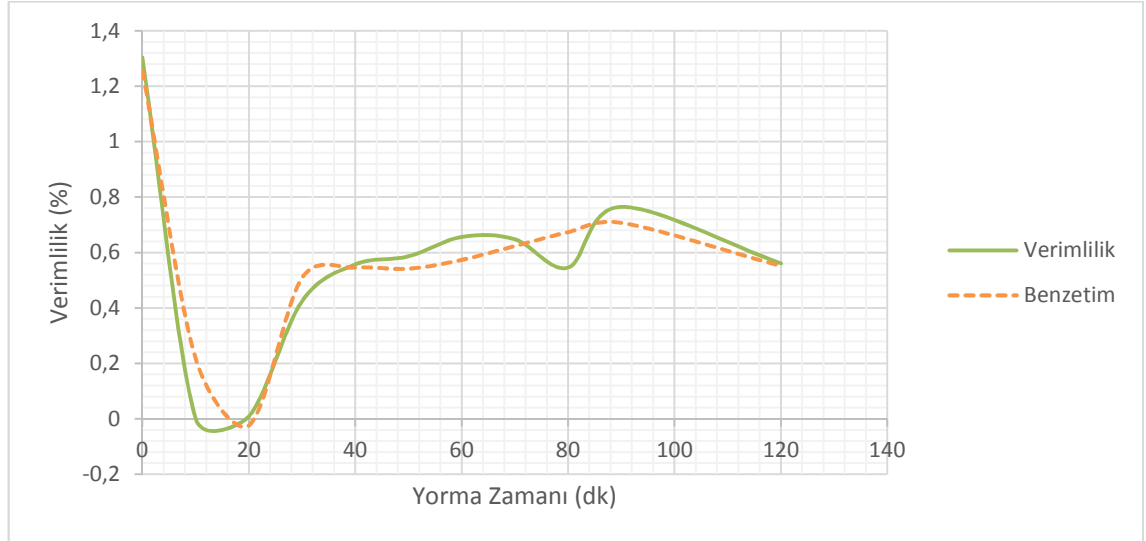


Şekil 4.44: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimlilik ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli verimliliğin yormaya bağlı değişimi;

$$V(t) = 0,0000000041t^4 - 0,0000040668t^3 + 0,0007343039t^2 + 0,0433408988t^1 + 1,356181343 \cdot 1e^{-\frac{(t-15)^2}{98}} \quad (4.6)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,96866$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.45' de verilmiştir.

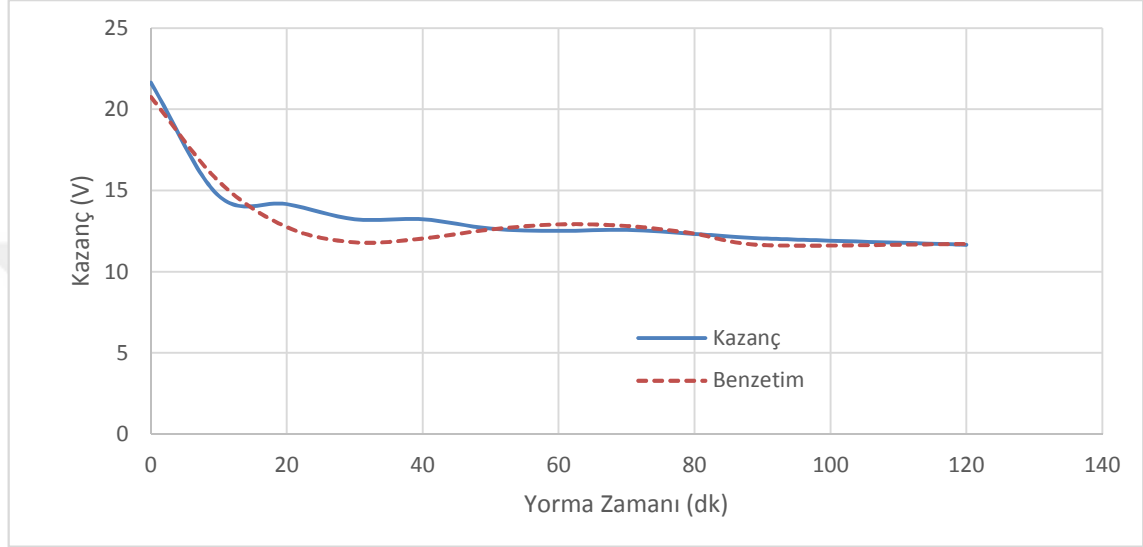


Şekil 4.45: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli verimlilik ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000006692t^4 - 0,0001824081t^3 + 0,0169066608t^2 + 0,6359086411t^1 + 21,0061751478 - 1e^{-\frac{(t-25)^2}{450}} \quad (4.7)$$

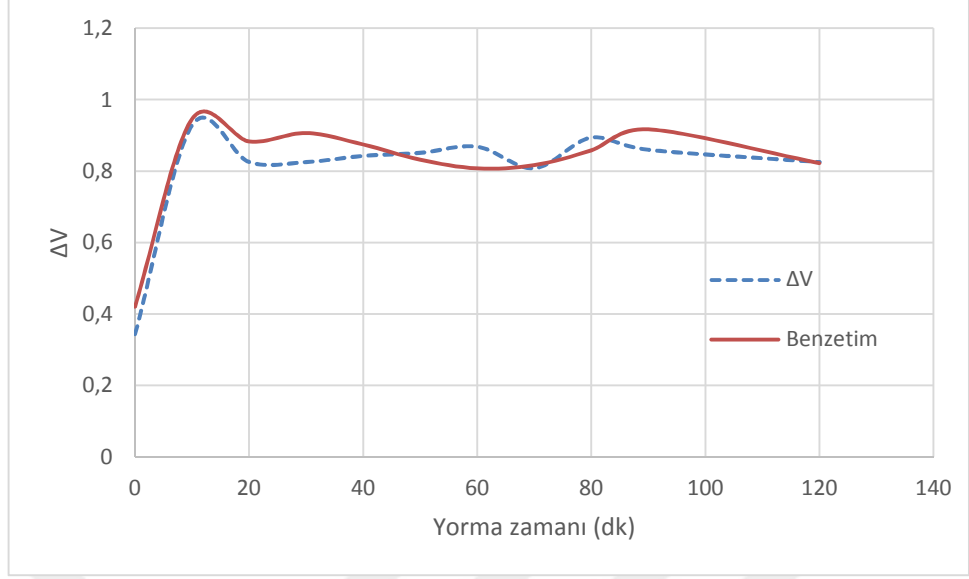
şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,95970$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.46' da verilmiştir.



Şekil 4.46: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV değerinin yormaya bağlı değişimi;

$$\Delta V(t) = 0,000000062t^4 + 0,0000160561t^3 - 0,0013794896t^2 + 0,0448192234t^1 + 0,4199682458 + 0,2e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.8)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,98909$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.47' de verilmiştir.

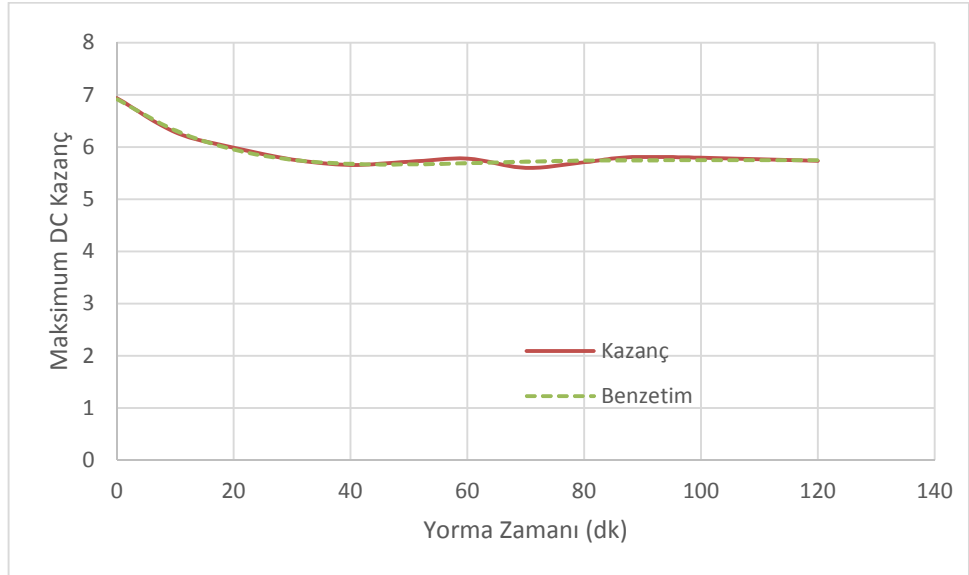


Şekil 4.47: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000394t^4 - 0,0000129423t^3 + 0,0015150955t^2 + 0,073261269t^1 + 6,9218815178 + 0,01e^{-\frac{(t-25)^2}{450}} \quad (4.9)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,95678$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.48 'de verilmiştir.

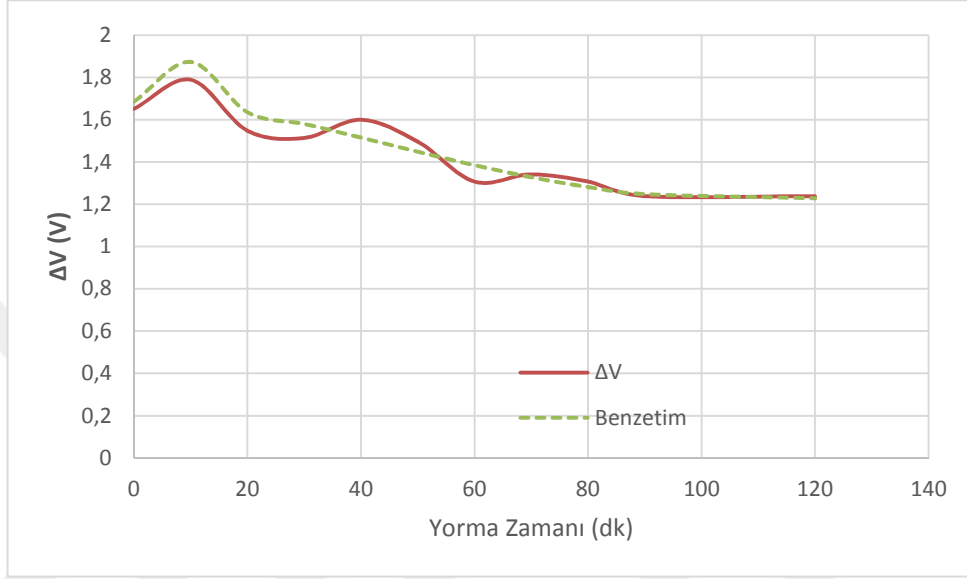


Şekil 4.48: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli maksimum DC kazanç ve benzetimi

A sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV değerinin yormaya bağlı değişimi;

$$\Delta V(t) = 0,0000000045t^4 + 0,0000017166t^3 - 0,0001754761t^2 + 0,0003003567t^1 + 1,6866320931 + 0,2e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.10)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,96172$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.49' da verilmiştir.

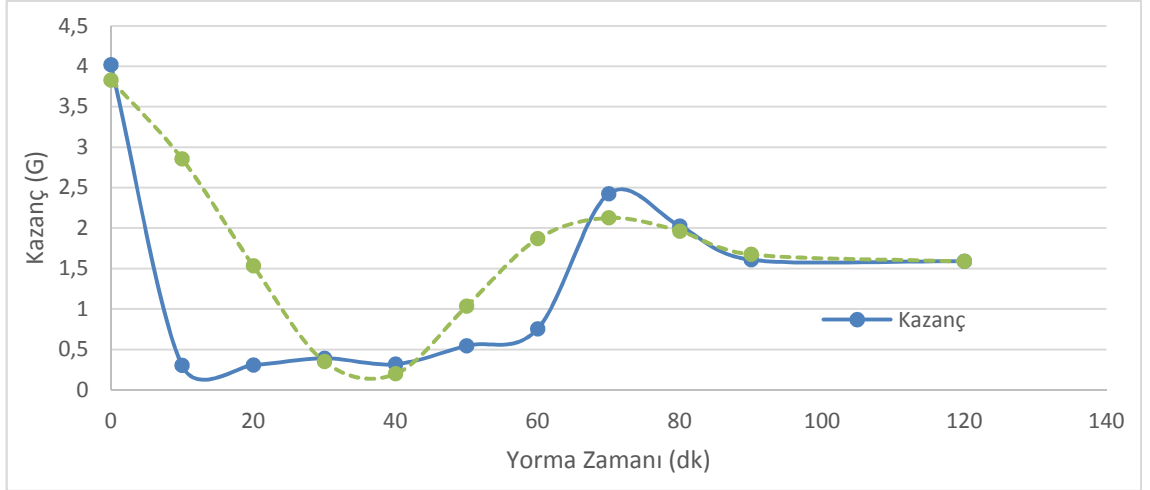


Şekil 4.49: A sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV ve benzetimi

D sınıfı güç kuvvetlendiriciler için geribeslemesiz kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000952t^4 - 0,0000210657t^3 + 0,0014456337t^2 + 0,0549735032t^1 + 4,028914887 - 3e^{-\frac{(t-35)^2}{450}} \quad (4.11)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,69828$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.50' de verilmiştir.

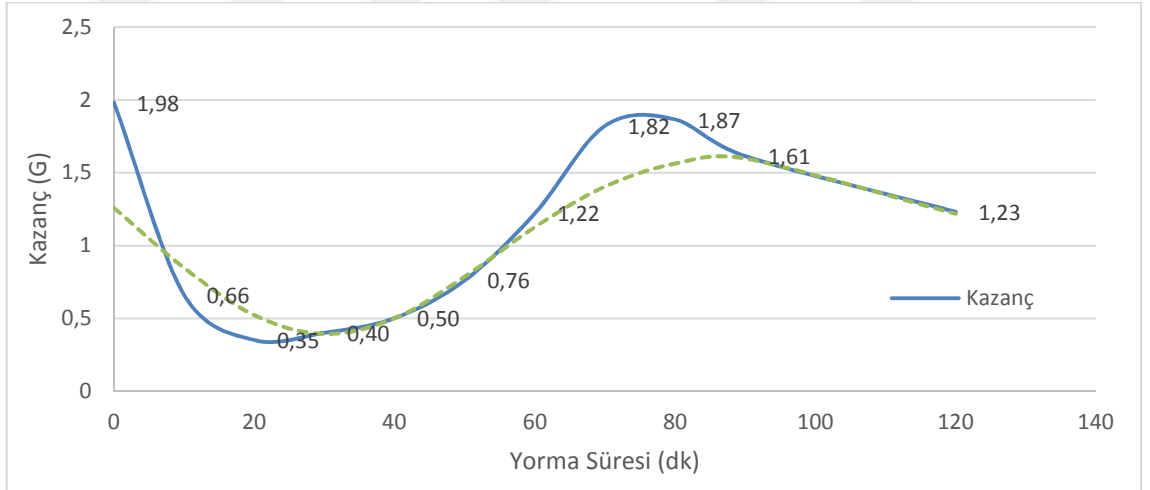


Şekil 4.50: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi

D sınıfı güç kuvvetlendiriciler için geribeslemeli kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000132t^4 + 0,0000062168t^3 + 0,0010135951t^2 + 0,0358101877t^1 + 2,9707935805 \cdot 4e^{-\frac{(t-15)^2}{98}} \quad (4.12)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,93104$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.51' de verilmiştir.

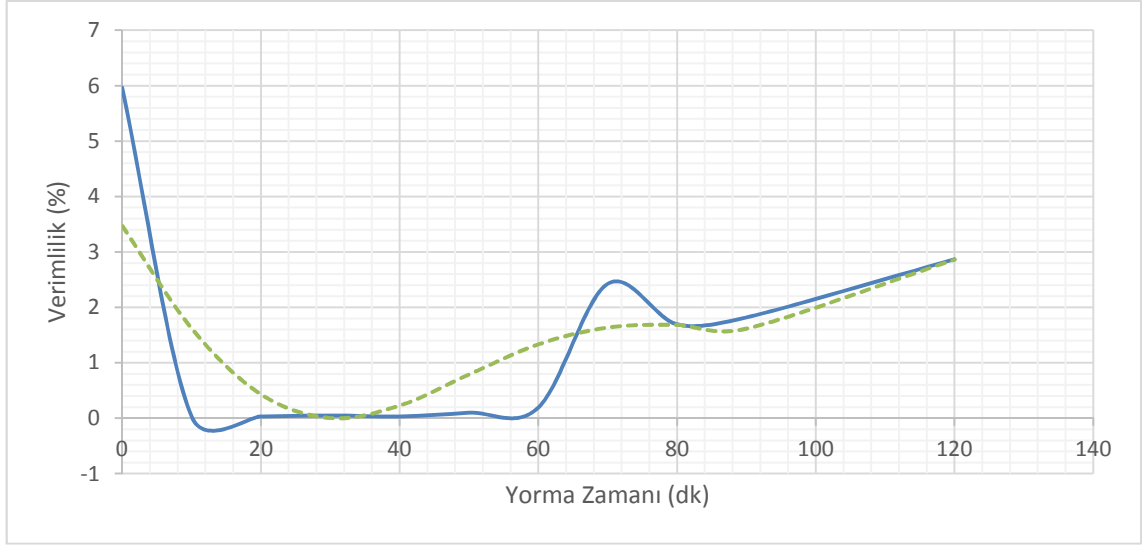


Şekil 4.51: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz kazanç ve benzetimi.

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimliliğin yormaya bağlı değişimi;

$$V(t) = 0,0000001575t^4 + 0,0000337442t^3 + 0,002533975t^2 + 0,1155679836t^1 + 5,8963624393 \cdot 4e^{-\frac{(t-25)^2}{1250}} \quad (4.13)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,87686$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.52' de verilmiştir.

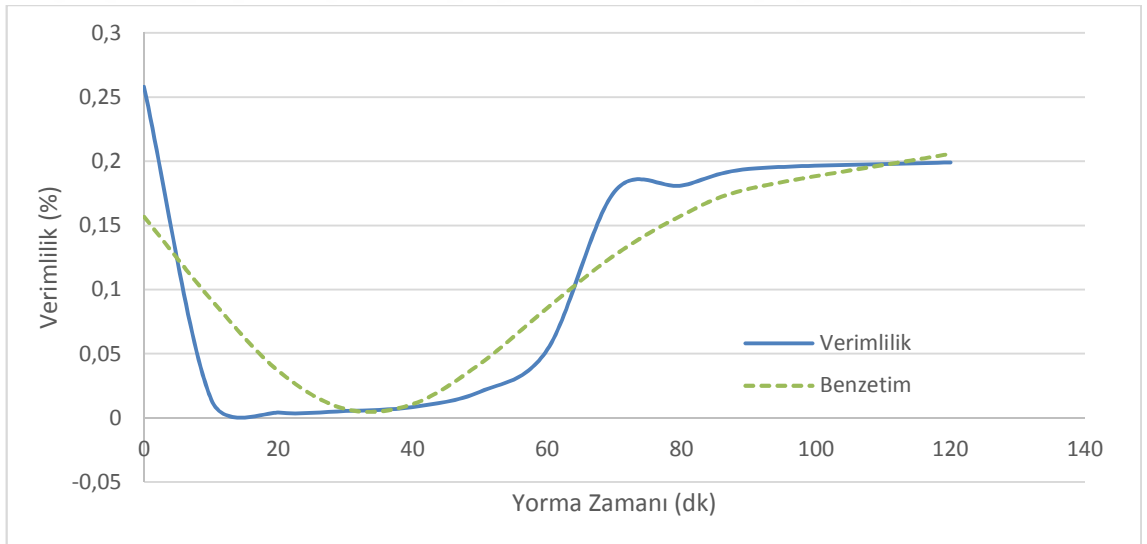


Şekil 4.52: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz verimlilik ve benzetimi.

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli verimliliğin yormaya bağlı değişimi;

$$V(t) = 0,0000000014t^4 + 0,0000002938t^3 + 0,0000045775t^2 + 0,00166136t^1 + 0,254106849 + 0,2e^{-\frac{(t-30)^2}{1250}} \quad (4.14)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,90204$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.53' de verilmiştir.

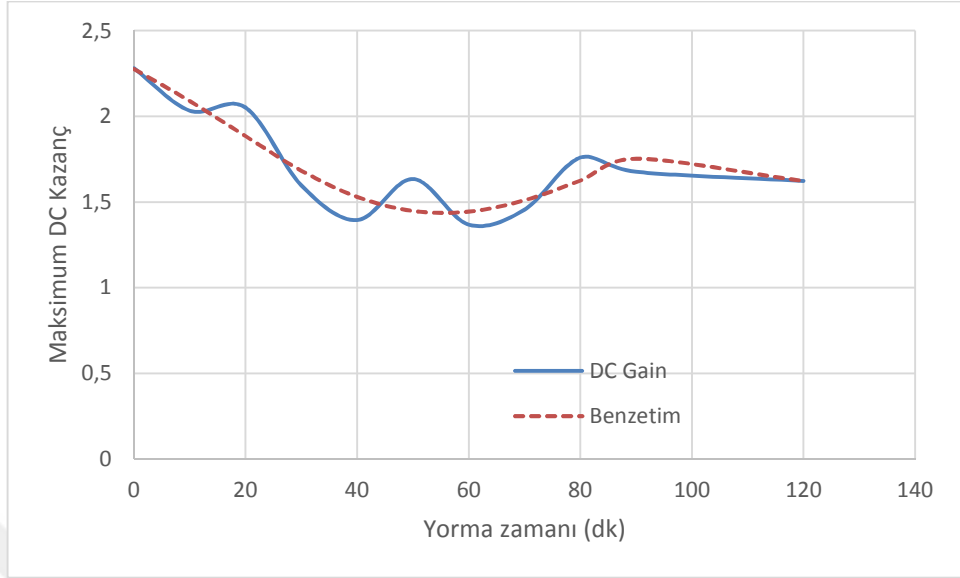


Şekil 4.53: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli verimlilik ve benzetimi.

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000606t^4 + 0,0000120906t^3 + 0,0005089079t^2 + 0,0137669205t^1 + 2,2768676676 + 0,01e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.15)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,92498$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.54' de verilmiştir.

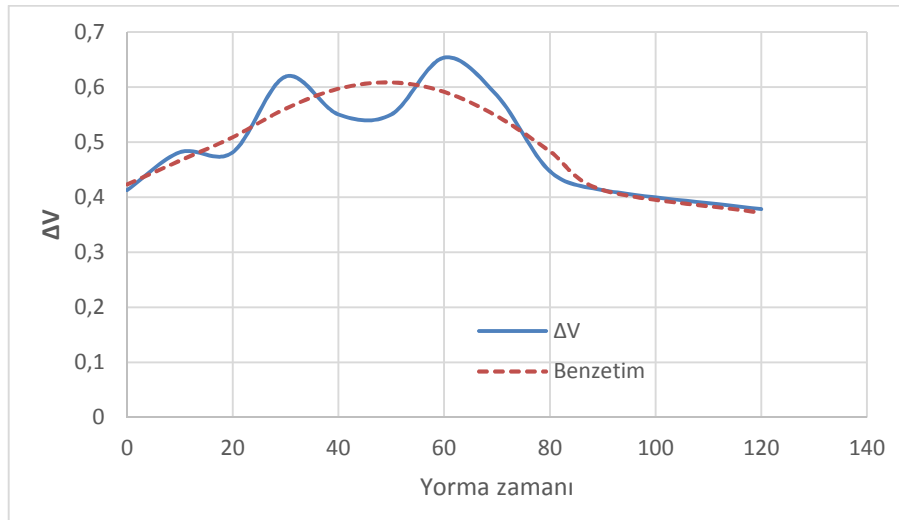


Şekil 4.54: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV değerinin yormaya bağlı değişimi;

$$\Delta V(t) = 0,000000023t^4 - 0,000004765t^3 + 0,0002242942t^2 + 0,001526067t - 0,4236377006 + 0,01e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.16)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,89368$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.55' de verilmiştir.

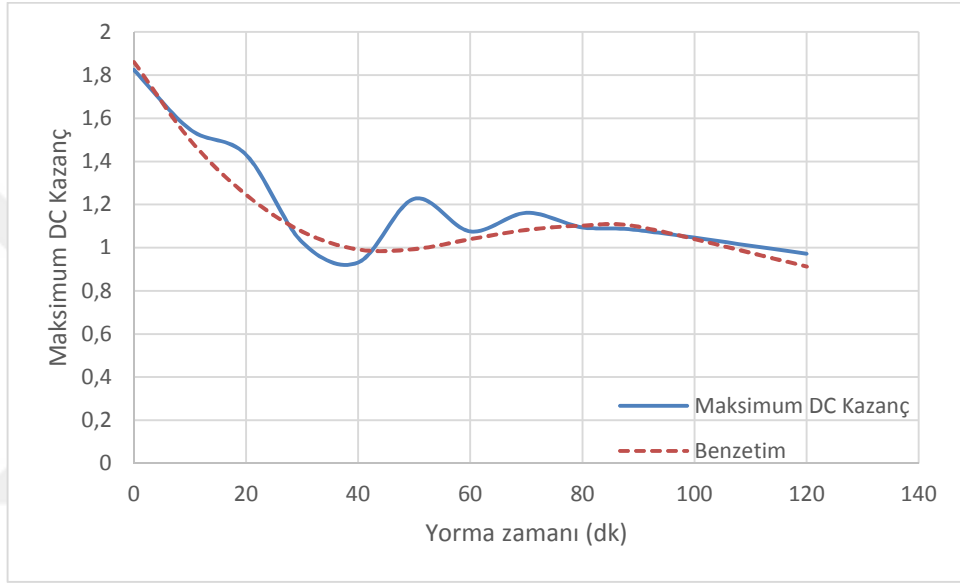


Şekil 4.55: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz ΔV ve benzetimi

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,000000013t^4 - 0,0000057034t^3 + 0,0007844017t^2 + 0,0423857484t^1 + 1,864157375 + 0,1e^{-\frac{(t-40)^2}{450}} \quad (4.17)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,94116$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.56' da verilmiştir.

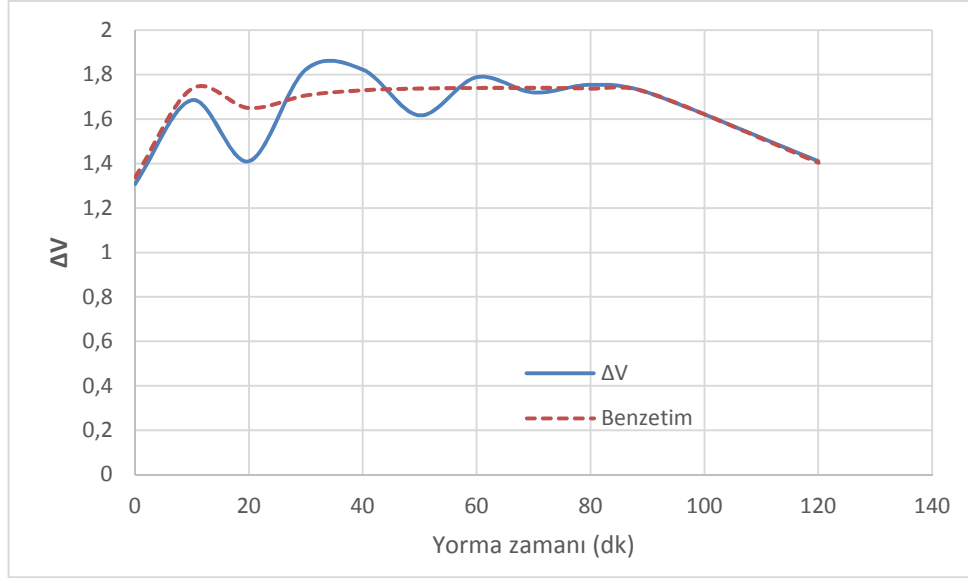


Şekil 4.56: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemesiz maksimum DC kazanç ve benzetimi.

D sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV değerinin yormaya bağlı değişimi;

$$\Delta V(t) = 0,000000027t^4 + 0,0000065953t^3 - 0,0006092256t^2 + 0,0253369338t^1 + 1,3390681842 + 0,2e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.18)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,84175$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.57' de verilmiştir.

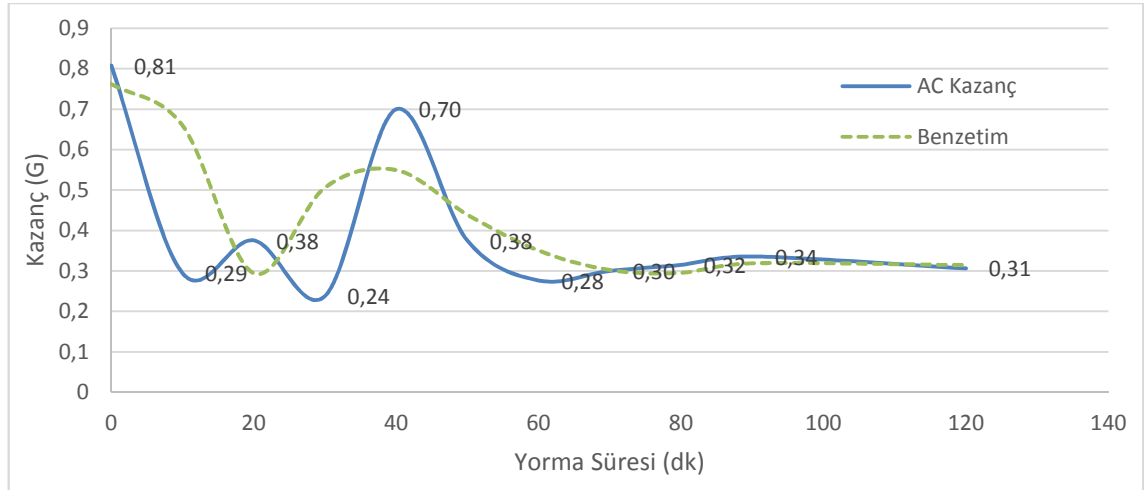


Şekil 4.57: D sınıfı kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV ve benzetimi

AB sınıfı güç kuvvetlendiriciler için kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,000000043t^4 + 0,0000111826t^3 - 0,0008758791t^2 + 0,0145808809t^1 + 0,7707291826 - 0,5e^{-\frac{(t-20)^2}{98}} \quad (4.19)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,63078$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.58' de verilmiştir.

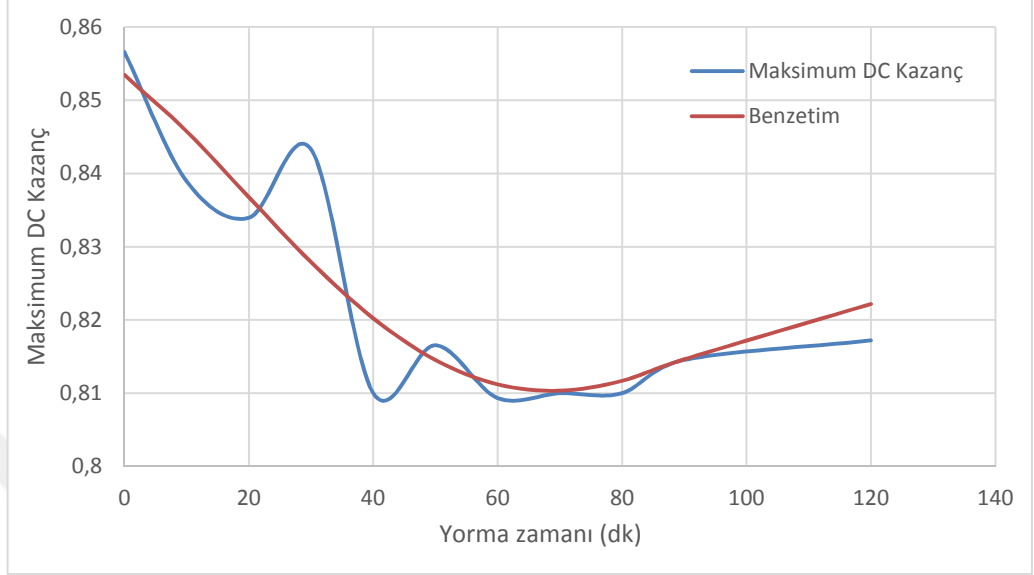


Şekil 4.58: D sınıfı kuvvetlendirici için kazanç ve benzetimi

AB sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli maksimum DC kazancın yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = -0,0000000014t^4 + 0,0000003214t^3 - 0,0000151833t^2 + 0,0006474606t^1 + 0,8534454691 - 0,01e^{-\frac{(t-15)^2}{0,18}} \quad (4.20)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,91786$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.59' da verilmiştir.

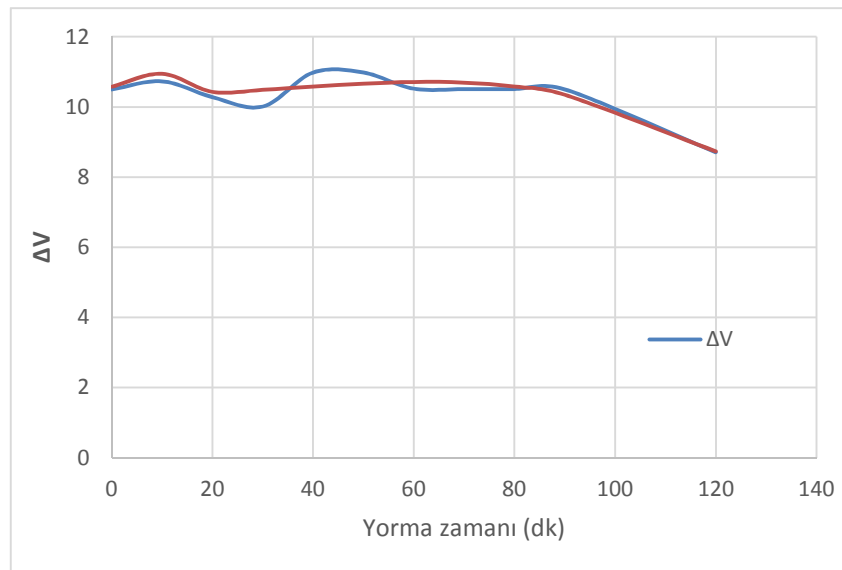


Şekil 4.59: AB sınıfı kuvvetlendirici için maksimum DC kazanç ve benzetimi.

AB sınıfı güç kuvvetlendirici için geribeslemeli ΔV değerinin yormaya bağlı değişimi;

$$K(t) = 0,0000000129t^4 - 0,0000079138t^3 + 0,0008058241t^2 + 0,0203803377t^1 + 10,5763846434 - 0,5e^{-\frac{(t-10)^2}{0,18}} \quad (4.21)$$

şeklinde verilmiştir. Uydurulan eğri için, korelasyon katsayısı, $r \approx 0,93370$ olarak hesaplanmıştır. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 4.60' da verilmiştir.



Şekil 4.60: AB sınıfı kuvvetlendirici için ΔV ve benzetimi.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, güç MOSFET'lerinin geçit uçlarına gerilim yorması uygulanarak yapılan yaşlandırma testleri ile güç kuvvetlendiricilerinin yorulma etkileri incelenmiştir. Yapılan yaşlandırma testlerinde oluşan etkiler zamana bağlı olarak araştırılmıştır. MOSFET'lerin yorma etkisi ile değişim gösteren V_{TH} parametresinin değişimi incelenmiştir. Bu karakteristik parametrenin değişimi üzerinden, tasarımı yapılan güç kuvvetlendiricilerinin çıkış güçleri, AC kazanç, DC kazanç ve verimlilik değişimleri incelenmiştir. Farklı güç kuvvetlendiricisi topolojileri için elde edilen deneysel sonuçların birbiriyle olan ilişkileri irdelenmiştir. Bu bulgular aşağıda detaylandırılmıştır.

Tasarlanan güç kuvvetlendirici devreleri için Vishay firmasının IRF510 n kanallı güç MOSFET'i ve International Rectifier firmasının IRF9540N p kanallı güç MOSFET'i kullanılmıştır. A ve D sınıfı güç kuvvetlendiricileri için IRF510 ile çalışılmıştır. AB sınıfı güç kuvvetlendiricileri için IRF510 ve IRF9540N güç MOSFET'leri eşlenik olarak kullanılmıştır. Öncelikli olarak güç MOSFET'lerinin yorulma etkilerini çıkarmak için gerilim yorması uygulanmıştır. Yorma uygulanacak gerilim değeri belirlenirken, temel yorma MOSFET'i olarak belirlenen IRF510 güç MOSFET'inin V_{TH} geriliminin değişimi ölçeklendirilmiştir. Bu güç MOSFET'i için erken bozulma evresinde en belirgin değişim "63 V" gerilim değeri ile edilmiş ve çalışmalar boyunca IRF510 güç MOSFET'ine bu gerilim uygulanmıştır. IRF9540N güç MOSFET'i AB sınıfı güç kuvvetlendiricilerde IRF510 güç MOSFET'i ile beraber kullanılacağı için aynı büyüklükte yorma gerilimi negatif şekilde "-63 V" olarak uygulanmıştır. Yorma gerilimleri belirlendikten sonra yorma süreleri de güç MOSFET'lerinin katalog bilgilerindeki çalışılabilecek maksimum V_{TH} değerine göre, 120 dakika olarak belirlenmiştir. Yorma süresinin bu şekilde belirlenmesinin sebebi, 120 dakikalık bir yorma sonunda V_{TH} geriliminin çalışma bölgesinin dışına kayması ve güç MOSFET'lerinin çalışmamasıdır. Belirlenen sürenin, güç kuvvetlendirici devreleri için MOSFET'lerin çalışılabilir aralığında olduğu, tasarımlar için doğrulanmıştır. Güç kuvvetlendiricileri için 10'ar dakikalık yorma periyotlarıyla ilk 90 dakika boyunca ve 120.dakika olmak üzere 10 ölçüm yapılmıştır.

Bu yorma işlemleri tamamlandıktan sonra öncelikli olarak güç MOSFET'lerinin $\sqrt{I_{DS}}$ V_{GS} özeğrileri çıkarılarak V_{TH} gerilimleri hesaplanmıştır. Gerilim yorması ile birlikte V_{TH} geriliminin değiştiği gözlemlenmiştir. Sonrasında, güç kuvvetlendiricileri için yormaya bağlı olarak küçük işaret analizi, DC analiz ve verimlilik değişimleri ölçülmüştür. Küçük işaret analizi ve verimlilik için oluşan grafiklerin, V_{TH} değişimiyle benzer bir desen oluşturduğu görülmüştür. Yorma etkisinin kazanç ve verimlilik için birincil derecede etkili olduğu gözlemlenmiştir. V_{TH} geriliminin güç MOSFET'lerinin katalogda belirtilen çalışma değerlerinin altına inmesinden ötürü, belirleyici olduğu görülmüştür. A ve D sınıfı güç kuvvetlendiriciler için geribesleme direnci olan ve olmayan devreler için, güç kuvvetlendirici parametreleri ayrı ayrı incelenmiştir ve güvenilirlik kıstasları açısından sonuçlar tartışılmıştır. A sınıfı geribeslemesiz güç kuvvetlendirici devreleri için AC kazanç yüksek olmasına karşın, yorma etkisine olan dayanımın daha az olduğu görülmüştür. Geribesleme direnci olan devrelerde AC kazançta oransal olarak daha az kayıp ölçülmüştür. Geribesleme direncinin olması, V_{TH} geriliminin, IRF510 güç MOSFET'inin çalışmasında oluşturduğu bozulma desenini değiştirmemiştir. V_{TH} geriliminin çalışma değerlerinin altında bulunduğu noktalarda beklenen çıkış değerleri görülemediği görülmüştür. A sınıfı kuvvetlendiriciler için ilk 60 dakikalık erken yorulma etkileri sonrasında V_{TH} geriliminin çalışma aralığına dönmesi sonrasında, AC kazançta üstel bir azalış olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma ek olarak, maksimum DC kazanç geribeslemeli A sınıfı güç kuvvetlendirici devreleri için de geribeslemesiz devrelere göre daha az olmuştur. Bununla birlikte çıkış formu yorma etkisiyle değişmemiştir. Geribesleme direnci etkisi nedeniyle çıkışın girişe göre doğrusal aralığı, ΔV , artmasına rağmen, kazanç grafiğine benzer şekilde grafik deseni karakteristiğinin yorma etkisiyle farklılaşmadığı görülmüştür. D sınıfı güç kuvvetlendiricileri için, V_{TH} geriliminin çalışma aralığı dışında kaldığı yorma evrelerinde, beklenen çıkışın üretilmediği görülmüştür. Bununla birlikte 60-120 dakikalık yorma periyodu arasındaki yorulmaya karşı dayanımlarının A sınıfı kuvvetlendiricilere göre daha iyi olduğu görülmüştür. D sınıfı güç kuvvetlendiricilerde geribesleme direnci ile A sınıfı kuvvetlendiricilerde sağlanan yorulmaya karşı dayanım artışının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, DC analiz etkileri ve savak verimliliği A sınıfı güç kuvvetlendiricileri ile benzer şekildedir.

İki farklı tip güç MOSFET'i ile tasarlanan AB sınıfı güç kuvvetlendiriciler A ve D sınıfı güç kuvvetlendiriciler ile benzer güç kuvvetlendirici parametreleri açısından

karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada temel motivasyon, yorma etkisine maruz kalan MOSFET'lerin sayısı arttığında oluşacak farklı etkilerin de tartışılması olmuştur. IRF510 ve IRF9540N güç MOSFET'leri benzer temel çalışma parametrelerine sahip olmalarına rağmen, kırılma gerilimi ($V_{BR(GS)}$) değerlerinin farklı olduğu görülmüştür. Bu farklılık her iki güç MOSFET'inin aynı çalışma periyodunda farklı yorulma evreleri içinde yer alacağı sonucunu doğurmuştur. Bu nedenle, tasarımı yapılan devreler için besleme gerilimi seçilirken tasarımda kullanılacak olan MOSFET'lerin kırılma gerilimlerinin göz önünde bulundurularak, devrenin çalışma performansını güvenilirlik açısından en zayıf halkası olan elemanın belirleyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, AB sınıfı güç kuvvetlendiriciler için yorma gerilimi belirlenirken, IRF510 güç MOSFET'inin IRF9540N güç MOSFET'ine oranla daha yüksek bir kırılma gerilimi olması ve her iki MOSFET'inde yorulma etkilerinin kümülatif şekilde incelenebilmesi için IRF510 güç MOSFET'inin yorma gerilimi esas alınmıştır. Kırılma gerilimi düşük olan IRF9540N güç MOSFET'inin seçilmesi durumunda, IRF510 güç MOSFET'i için seçilen yorma gerilimi çok düşük kalacağı için yorulma etkilerinin tam olarak incelenemeyeceği göz önünde bulundurulmuştur. Bu seçimdeki bir diğer ödüneşim de IRF510 için kuantalanmış bir yorulma grafiği elde edilirken, seçilen yorma gerilimi IRF9540N için kırılma gerilimine yakın olduğundan, yorulma etkileri daha hızlı olmuş ve V_{TH} gerilimi çok hızlı artarak efektif çalışma alanının dışına kaymıştır. Bu nedenle baz alınan yorma gerilimine göre çıkış etkilerinin görüleceği düşünülmelidir. Bu çalışma da IRF510 güç MOSFET'inin yorma gerilimi baz alındığı için görülen etkiler A ve D sınıfı kuvvetlendiricilere benzer şekilde olmuştur.

AB sınıfı güç kuvvetlendiriciler için yorma testleri uygulandıktan sonra, küçük işaret analizi, DC analiz ve savak verimliliği irdelenmiştir. IRF9540N, V_{TH} geriliminin aşırı azalmasından ötürü çok az etkili olmuştur. Bunun sonucunda yapılan tasarımda çalışma noktasının (Q) belirlenmesinin önemi ortaya çıkmıştır. İyi belirlenen bir Q değeri için çıkış grafiğinde p kanallı MOSFET'in kuvvetlendirme yapamadığı noktalarda n kanallı MOSFET çıkış üretmeye devam etmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında, güç kuvvetlendirici devrelerinin çalışma performansını etkileyen farklı MOSFET parametreleri bulunmasıyla birlikte, V_{TH} geriliminin yormaya bağlı değişiminin etkin şekilde belirleyici bir çalışma parametresi olduğu görülmüştür. Farklı güç kuvvetlendirici sınıflarındaki tasarımlar için benzer V_{TH} etkileri olduğu görülmüştür. Bu nedenle, ölçüm sonuçları için eğri uydurma yapılmıştır. Uydurulan

eğriler incelendiğinde, V_{TH} parametresinin zamana bağlı yorma grafiği için elde edilen formülasyonun güç kuvvetlendiricilerin incelenen çıkış parametreleri için aynı olabildiği gösterilmiştir. Elde edilen bulgularda korelasyon katsayısının 1'e yakınsadığı görülmüştür. İleri çalışmalarda, elde edilen ampirik formülasyonlar yardımıyla, çıkış parametrelerinin V_{TH} -yorma matematiksel bağıntısının kurulması hedefi belirlenmiştir. Elde edilecek olan bağıntı sayesinde, bu tezde çalışılmayan güç kuvvetlendiricileri için de güç kuvvetlendirici parametrelerinin ne şekilde değişebileceği anlaşılabilir hale getirilmiş olacaktır. Ayrıca elde edilen sonuçlarla yorma etkilerinin pasifize edildiği bir devre modellemesi yapılması amaçlanmıştır. Bu sayede aşırı gerilim kaynaklı oluşan bozulma etkilerinin tasarım evresinde minimize edildiği ürünlerin ortaya çıkarılması sağlanacaktır.

Bu çalışmada MOSFET içeren farklı güç kuvvetlendirici sınıflarının sabit gerilim yorma yöntemiyle üzerindeki oluşan etkiler incelenmiş ve sonuçlar verilmiştir. Ortaya konulan sonuçların, ürünlerin erken tasarım süreçlerinde yorulma etkilerinin göz önünde bulundurularak daha güvenilir tasarımlar yapılması sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. R. R. Schaller, 1997, Moore's Law: past , present , future, *IEEE Spectr.*, vol. 34, no. 6, pp. 52–59.
- [2]. L. Ciani, M. Catelani, E. A. Carnevale, L. Donati, and M. Bruzzi, 2015, Evaluation of the aging process of dye-sensitized solar cells under different stress conditions, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 5, pp. 1179–1187.
- [3]. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2015, More Moore, Itrs, pp. 1–52.
- [4]. D. Grant and J. Gowar, *Power MOSFETS : theory and applications*. 1989.
- [5]. USA Department of Defence, MIL-STD-721RevC Definitions of Terms for Reliability and Maintainability. 1970.
- [6]. X. Li, J. Qin, and J. B. Bernstein, 2008, Compact modeling of MOSFET wearout mechanisms for circuit-reliability simulation, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 8, no. 1, pp. 98–121.
- [7]. A. Castellazzi, Y. C. Gerstenmaier, R. Kraus, and G. K. M. Wachutka, 2006, Reliability analysis and modeling of Power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 603–612.
- [8]. M. White, 2008, Microelectronics reliability: physics-of-failure based modeling and lifetime evaluation, *JPL Publ.*, pp. 1–216.
- [9]. Q. Cheng, H. Fu, and J. Ma, 2016, Reliability Modeling and Testing Techniques for RF / Microwave Power Amplifiers, pp. 173–175.
- [10]. S. Liu and Y. Liu, *Modeling and Simulation for Microelectronic Pack*. 2011.
- [11]. S. Saha, J. R. Celaya, V. Vashchenko, S. Mahiuddin, and K. F. Goebel, 2011, Accelerated aging with electrical overstress and prognostics for power MOSFETs, *IEEE 2011 EnergyTech, ENERGYTECH 2011*, no. December 2013.
- [12]. W. B. Nelson, *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. 2004.
- [13]. L. A. Escobar and W. Q. Meeker, 2006, A Review of Accelerated Test Models, *Stat. Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 552–577.
- [14]. J. R. Celaya, P. Wysocki, V. Vashchenko, S. Saha, and K. Goebel, 2010, Accelerated aging system for prognostics of power semiconductor devices, 2010 *Ieee Autotestcon*, pp. 1–6.
- [15]. Reliasoft Corporation, 2015, *Accelerated Life Testing Reference*, Reli. Corp.
- [16]. T. Rac, *Accelerated Testing of Systems and Assemblies*, pp. 1–4.
- [17]. J. R. Celaya, N. Patil, S. Saha, P. Wysocki, and K. Goebel, 2009, *Towards Accelerated Aging Methodologies and Health Management of Power MOSFETs (Technical Brief)*, pp. 1–8.
- [18]. N. Stojadinovic, I. Manic, S. Djoric-Veljkovic, V. Davidovic, S. Golubovic, and S. Dimitrijevic, 2002, Effects of high electric field and elevated-temperature bias

- stressing on radiation response in power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.*, vol. 42, no. 4–5, pp. 669–677.
- [19]. H. L. Kao et al., 2006, Electrical-Stress Effects and Device Modeling of 0.18- μ m RF MOSFETs, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 53, no. 4, pp. 636–642.
- [20]. C. Yu and J. S. Yuan, 2007, Electrical and temperature stress effects on class-AB power amplifier performances, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 6, pp. 1346–1350.
- [21]. N. Stojadinovi et al., 2003, Effects of Gate Bias Stressing in Power VDMOSFETs, *Serbian J. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 89–101.
- [22]. Y. Bai, C. Guo, S. Feng, K. Ding, S. Zhuang, and R. Su, 2009, Reliability Evaluation of Power VDMOSFET, no. 3.
- [23]. N. Tosic, B. Pesic, and N. Stojadinovic, 1997, Reliability testing of power VDMOS transistors, 1997 21st Int. Conf. Microelectron. Proc., vol. 2, no. 10, pp. 1759–1762.
- [24]. H. G. Sezgin, 2014, MOSFET'lerde Aşırı Gerilim Kaynaklı Kapasite Değişimlerinin Zamana Bağlı İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [25]. Y. Özcelep, A. Kuntman, H. Kuntman, and S. Yarman, 2011, High voltage stress effects on power MOSFETs in switching DC-DC converters, 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot., pp. 1278–1282.
- [26]. N. Stojadinovic, S. Djoric-Veljkovic, I. Manic, V. Davidovic, and S. Golubovic, 2002, Effects of positive gate bias stress on radiation response in power VDMOSFETs, 2002 23rd Int. Conf. Microelectron. MIEL 2002 - Proc., vol. 2, no. Miel, pp. 723–726.
- [27]. V. Barkhordarian, 2000, AN-1084 Power MOSFET Basics.
- [28]. R. J. Trew, *Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers*. 2011.
- [29]. L. Vestling, 2002, *Design and Modeling of High-Frequency LDMOS Transistors*, p. 58.
- [30]. P. R. Devices and S. K. Leong, 2001, Vdmos vs . LDMOS How to Choose Vdmos vs Ldmos, *Current*, pp. 1–11.
- [31]. N. Chevaux and M. M. De Souza, 2009, Comparative Analysis of VDMOS / LDMOS Power Transistors for RF Amplifiers, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pp. 1–9.
- [32]. T. H. Lee, *The Design of CMOS Radio-Frequency*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
- [33]. D. Automation and T. Road, *RF Power Amplifiers - Classes A Through F (Overview)* [shortened version of 4-hour tutorial presented at ELECTRO ' 951, Development, pp. 7–11.
- [34]. B. Razavi, *RF microelectronics* 2nd edition. Prentice Hall, 1998.
- [35]. P. A. Dal Fabbro and M. Kayal, *Linear CMOS RF Power Amplifiers for Wireless Applications*. 2010.
- [36]. H. Kobayashi, J. M. Hinrichs, and P. M. Asbeck, 2001, Current-mode class-D

- power amplifiers for high-efficiency RF applications, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2480–2485.
- [37]. A. Mazzanti, L. Larcher, and R. Brama, 2006, Analysis of reliability and power efficiency in cascode class-E PAs, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 5, pp. 1222–1229.
- [38]. J. Fritzin, T. Sundström, T. Johansson, and A. Alvandpour, 2010, Reliability Study of a Low-Voltage Class-E Power Amplifier in 130nm CMOS, *ISCAS Symp.*, pp. 1907–1910.
- [39]. U. R. Nair, S. Munk-Nielsen, and A. B. Jørgensen, 2017, Performance analysis of commercial MOSFET packages in Class e converter operating at 2.56 MHz, 2017 19th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2017 ECCE Eur., vol. 2017–Janua, pp. 1–9.
- [40]. F. Kaçar, MOSFET’lerdeki Sıcak Taşıyıcı Etkisinin Modellenmesi İçin Yeni Yaklaşımlar, 2005.
- [41]. S. Naseh, M. J. Deen, and O. Marinov, Effects of hot-carrier stress on the RF performance of 0.18 μm technology NMOSFETs and circuits, *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, vol. 2002–Janua. pp. 98–104, 2002.
- [42]. M. S. Input, 2014, Impact of Hot Carrier Degradation on Features.
- [43]. Renesas Technology Corporation and NEC Electronics Corporation, 2008, *Semiconductor Reliability Handbook*, Electronics, p. 410.
- [44]. R. Degraeve, G. Groeseneken, R. Bellens, M. Depas, and H. E. Maes, A consistent model for the thickness dependence of intrinsic breakdown in ultra-thin oxides, *Proc. Int. Electron Devices Meet.*, pp. 863–866.
- [45]. B. E. Deal, M. Sklar, a. S. Grove, and E. H. Snow, 1967, Characteristics of the Surface-State Charge (Q_{ss}) of Thermally Oxidized Silicon, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 114, no. d, p. 266.
- [46]. Z. Sun, S. Sadiqbatcha, H. Zhao, and S. X. Tan, 2018, Accelerating Electromigration Aging for Fast Failure Detection for Nanometer ICs, pp. 623–630.
- [47]. B. Li et al., 2018, Electromigration Characteristics of Power Grid Like Structures, pp. 2–6.
- [48]. ReliaSoft Corporation, 2015, *Life Data Analysis Reference*, Tools to Empower Reliab. Prof., pp. 103–154.
- [49]. E. Pomès, J. Reynès, P. Tounsi, J. Dorkel, and A. Technology, 2012, Investigation of Failure Mechanisms in Low-Voltage Power VDMOSFETs Linked with Gate Oxide Process Quality, no. Miel, pp. 13–16.
- [50]. N. Toiie and N. Stojadinovic, 1997, Investigation of Failure Mechanisms in Power VDMOSFETs, pp. 191–195.
- [51]. J. Millán, 2007, Wide band-gap power semiconductor devices, *Circuits, Devices Syst. IET*, vol. 1, no. 5, pp. 372–379.

- [52]. C. D. Presti, F. Carrara, A. Scuderi, S. Lombardo, and G. Palmisano, 2007, Degradation Mechanisms in Cmos Power Amplifiers, *Reliab. Phys.*, no. c, pp. 86–92.
- [53]. G. T. Sasse, F. G. Kuper, and J. Schmitz, 2008, MOSFET degradation under RF stress, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 55, no. 11, pp. 3167–3174.
- [54]. C. Kulkarni, G. Biswas, X. Koutsoukos, G. Kai, and C. Jose, 2010, Physics of Failure Models for Capacitor Degradation in DC-DC Converters, *Maint. Reliab. Conf. MARCON 2010*, pp. 1–13.
- [55]. H. Niu, M. Lv, S. Wang, and Y. Zhou, 2015, A robust design method for MOSFET degradation in SMPS, *Proc. 2015 1st Int. Conf. Reliab. Syst. Eng. ICRSE 2015*.
- [56]. Y. Özcelep, A. Kuntman, and H. H. Kuntman, 2012, On the degradation of OTA-C-based CMOS low-power filter circuits for biomedical instrumentation, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 20, no. SUPPL.2, pp. 1359–1368.
- [57]. S. Mahato and G. Gielen, 2013, Impact of transistor aging on RF low noise amplifier performance of 28nm technology: Reliability assessment, *Proc. IEEE Int. Conf. Electron. Circuits, Syst.*, pp. 413–416.
- [58]. Vishay Intertechnology, IRF510 Power MOSFET Datasheet, 2017.
- [59]. International Rectifier, 1998, IRF9540N Power MOSFET.
- [60]. ST Microelectronics, UM0919 User Manual, 2011.
- [61]. Prolific, 2013, PL-2303 Product Datasheet.
- [62]. Microchip, 2007, MCP3004/3008 Datasheet.
- [63]. A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez, J.J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada, Y. Yue, 2002, A Review of Recent MOSFET Threshold Voltage Extraction Methods, *Microelectronics Reliability*, Volume 42, Issues 4-5, Pages 583–596.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehmet Akif MEYDANCI
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	03/07/1990 , İstanbul
Telefon	05373958027
E-mail	mehmet.meydanci@ogr.iu.edu.tr, mehmetakifmeydanci@hotmail.com
Web adres	http://github.com/akifmeydanci



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği Programı

Makaleler / Bildiriler

M. A. Meydanci, C. Adali, M. Ertas, M. Dizbay and A. Akan, 2013, RFID based hand hygiene compliance monitoring station, 2013 *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Mindeb, pp. 573-576.