# Havacılık Uygulamalarında Kullanılan Dc-Dc Dönüştürücülerin Nsga-Iıı Tabanlı Tasarım Optimizasyonu

**Taha Yasin KIYMAZ[1], Atiye Hülya OBDAN [2] Kamuran Nur BEKİROĞLU[3]**

**Murat TAŞKIRAN[4]**

[1]E-mail: yasin.kiymaz@std.yildiz.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul / Türkiye.
[2]E-mail: obdan@yildiz.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul / Türkiye.
[3]E-mail: nbekir@yildiz.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul / Türkiye.
[4]E-mail: mrttskrn@yildiz.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul / Türkiye.

***Özet***

Günümüz havacılık uygulamalarında, uçak elektrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 28V gerilimin; tabletler, cep telefonları, taşınabilir GPS cihazları ve eğlence sistemleri gibi cihazların çalıştırılabilmesi için uygun gerilim seviyesine düşürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, 28V gerilimi düşürmek amacıyla hacmi ve kesim frekansı optimize edilmiş 50 kHz anahtarlama frekansında çalışan 5V/2A çıkış sağlayan düşürücü tür DC-DC dönüştürücü tasarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde, dönüştürücünün performansını artırmak ve boyutunu minimize etmek için çok amaçlı optimizasyon tekniği uygulanmış, sonuçlar Pareto-Frontier yöntemi kullanılarak görselleştirilmiştir. Farklı önceliklere sahip üç adet tasarım teorik olarak analiz edilmiş ve bu analizler simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir. Bu sayede, her bir tasarımın filtreleme performansı ve hacimleri karşılaştırılarak en iyi sonuçları veren tasarımlar belirlenmiştir.

***Anahtar Kelimeler:*** Düşürücü tip dönüştürücü, Havacılık, NSGAIII, Optimizasyon, Pareto-Frontier

***Abstract***

In modern aviation applications, the 28V voltage commonly used in aircraft electrical systems needs to be stepped down to an appropriate voltage level to power devices such as tablets, mobile phones, portable GPS devices, and entertainment systems. In this study, a buck-type DC-DC converter operating at a switching frequency of 50 kHz, optimized in terms of volume and cutoff frequency, was designed to provide a 5V/2A output from a 28V input. During the optimization process, a multi-objective optimization technique was applied to enhance the converter's performance and minimize its size, and the results were visualized using the Pareto Frontier method. Three different designs with varying priorities were theoretically analyzed, and these analyses were supported by simulation results. Consequently, the filtering performance and volumes of each design were compared, and the best-performing designs were identified.

***Keywords:*** Aviation, Buck converter, NSGAIII, Optimization, Pareto-Frontier

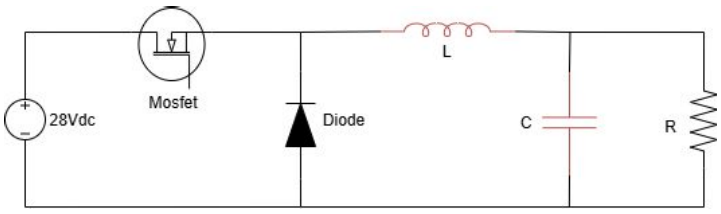
## GİRİŞ

Endüstriyel tasarımlarda, düşürücü dönüştürücülerin genel olarak performans kriteri, çıkış dalgalanmalarını kabul edilebilir aralıkta tutma ile sınırlıdır. Ancak inverterler için geliştirilmiş tasarım çözümlerinde daha farklı tasarım kriterleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu tasarım kriterleri genel olarak maliyet, THD, endüktans gerilim stresi, endüktans gerilim düşümü ve kesme frekansıdır.(Boillat vd., 2015) (Khaligh vd., 2018) (Burkart & Kolar, 2013) optimizasyon çalışmalarında kondansatör tasarımına odaklanılmaktadır. (Pelletier vd., 2005)

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, üç amaçlı (güvenilirlik – hacim - kesme frekansı) tasarımı olarak önerilmektedir.(Li vd., 2020) Benzer başka bir çalışmada, senkronize düşürücü dönüştürücünün güç kaybı, hacim ve LC'nin kesme frekansı üç amaç olarak belirlenmiştir. (Li vd., 2019) Ancak, Literatür araştırıldığında havacılıkta kullanılan düşürücü dönüştürücüler için yeterli çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada, havacılıkta kullanılabilecek bir düşürücü dönüştürücü tasarımının çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilecektir. Amaç fonksiyonları havacılık isterleri göz önüne alınarak düşük hacim ve LC filtre performansı olarak belirlenmiştir. Makalede ilk olarak amaç fonksiyonları tanımlanacaktır. Amaç fonksiyonları tanımlandıktan sonra, tasarlanacak olan düşürücü dönüştürücünün tasarım kriterleri belirlenecek ve NSGAIII algoritması kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilecektir. Gerçekleştirilen optimizasyon sonrası Pareto yöntemi ile veriler görselleştirip 3 tane farklı amaçlar hedefleyen tasarım seçilecek. Bu tasarımların teorik analizleri yapılacak sonrasında gerçekleştirilecek olan simülasyonlar ile tasarımın doğruluğu kanıtlanacaktır.

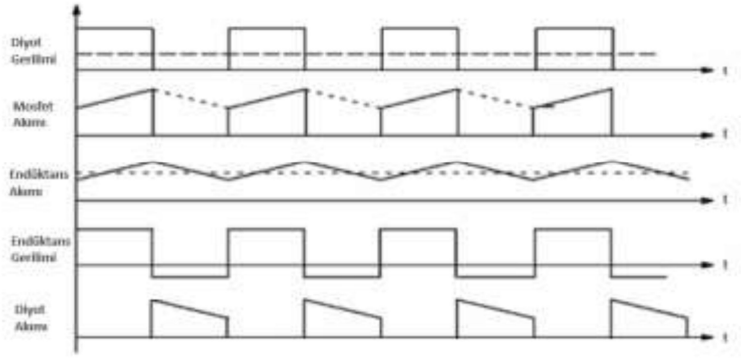
## DÜŞÜRÜCÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ ANALİZİ




**Şekil 2.** Düşürücü Dönüştürücü Devre Şeması

Düşürücü dönüştürücü, girişten çıkışa kontrollü enerji aktarımı sağlayan bir anahtarlamalı güç kaynağıdır. Yüksek taraf anahtarı (MOSFET) açıldığında, indüktör enerji depolar ve çıkışa aktarır. Anahtar kapandığında, düşük taraf anahtarı (diyot) iletime geçer, indüktör depoladığı enerjiyi serbest bırakır ve yüke akım akışını sürdürür. Geri bildirim mekanizması, çıkış voltajını referansla karşılaştırarak sabit ve düzenlenmiş kalmasını sağlar (*Buck Converters* t.y.).

Düşürücü dönüştürücünün akım ve gerilim dalga formları ile çalışma bölgeleri Şekil 3'de gösterildiği gibi tanımlanabilir.



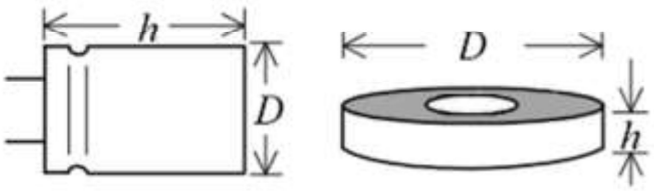

**Şekil 3.** Düşürücü Dönüştürücüde Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

## DÜŞÜK HACİMLİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI DÜŞÜRÜCÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ İÇİN OPTİMİZASYON HEDEFLERİ

- **Hedef-1: LC Filtre Toplam Hacim**

İlk hedef dönüştürücü hacminin düşürülmesidir, havacılıkta uçak üzeri yerleşim için hacim çok önemli bir etkendir. Bu yüzden düşürücü dönüştürücüde büyük bir hacim kaplayan L ve C'nin boyutunun düşürülmesi doğrudan dönüştürücünün hacmini düşürecektir. Bu yüzden optimizasyon hedefi olarak L ve C değerlerinin düşürülmesi belirlenmiştir.

Şekil 4'de düşürücü dönüştürücüde kullanılacak olan kapasite ve endüktans basit modelleri gösterilmiştir.

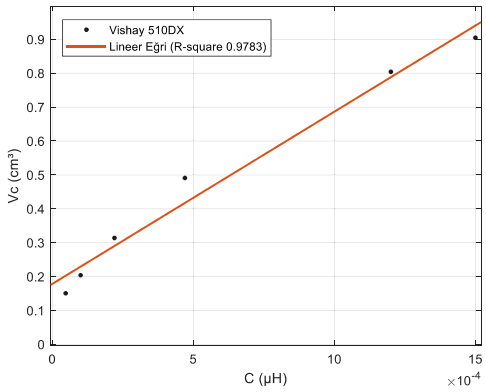



**Şekil 4.** Kapasite ve Endüktans Boyutları

Endüktans ve kapasitenin hacimlerinin hesabı için (1) numaralı denklem kullanılmaktadır.

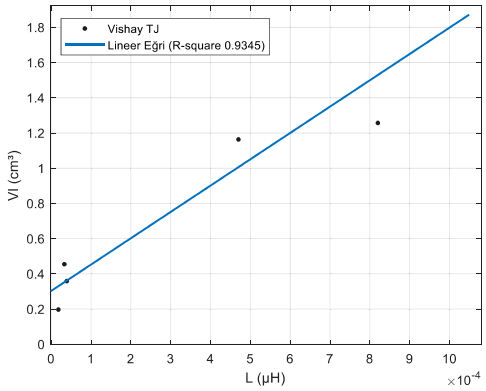
$$V = \frac{\pi D^2 h}{4} \tag{1}$$

510DX Seri numaralı VISHAY kapasitörleri kullanılarak elde edilen kapasitenin değerine bağlı hacim değişimi lineer olarak Şekil 5'de gösterilmiştir.




**Şekil 5.** 510DX VISHAY Kapasite/Hacim Grafiği

TJ Serisinden VISHAY toroidal endüktans kullanılarak elde edilen endüktansın değerine bağlı hacim değişimi lineer olarak Şekil 6'te verilmiştir.




**Şekil 6.** TJ Vishay Endüktans/Hacim Grafiği

Şekil 5 ve Şekil 6'te verilen eğrilerin R-square değeri yaklaşık olarak 1'e eşit olduğundan dolayı eğrilerin hata oranları kabul edilebilir düzeydedir. Kapasite ve endüktans hacminin belirlenmesinde bu eğriler kullanılacaktır.

Dönüştürücüde kullanılan filtrenin boyutu küçüldükçe, dönüştürücünün güç yoğunluğu yükselecektir. Böylelikle daha küçük hacimde daha güçlü bir dönüştürücü tasarlanabilecektir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip dönüştürücüler havacılık uygulamalarında yerleşim problemini azaltacaktır.

- **Hedef-2 LC Filtre Filtreleme Performansı**

İkinci hedef düşürücü dönüştürücüde kullanılan LC filtrenin filtreleme performansının yükseltilmesidir. LC fitrelerde filtreleme kapasitesinin artırılması için LC filtrenin kesim frekansının mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Kesim frekansı denklem (2) de verilmiştir.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

**İki Amaçlı Tasarım Optimizasyonu**

Düşürücü dönüştürücü tasarım parametreleri

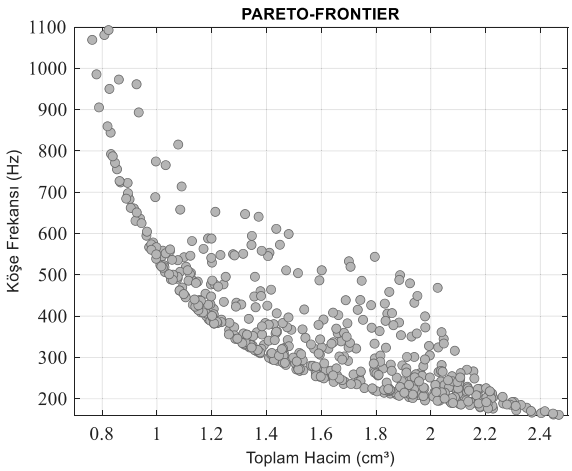
Tablo **7**'de verilmiştir.

**Tablo 7.** Tasarım Parametreleri

| | Değer | Birim |
|---|---|---|
| Vin | 28 | V |
| Vout | 5 | V |
| Iout | 2 | A |
| $f_{sw}$ | 50 | kHz |

Düşürücü dönüştürücü optimizasyonu için NSGA-III algoritması kullanılmıştır (Tian vd., 2017). Optimizasyonda kesim frekansı ve toplam hacim düşürülmeye çalışılmıştır. Bu şekilde düşük hacimde yüksek performanslı düşürücü dönüştürücü tasarımı amaçlanmıştır.

Optimize edilmiş hedeflerin daha iyi görülmesi için, Şekil 7'te 2D Pareto-Frontier grafiği verilmiştir.




**Şekil 7.** İki Hedefli Pareto-Frontier

Pareto-Frontier grafiğinden görüleceği üzere düşürücü dönüştürücünün toplam hacmi ile kesim frekansı arasında ters orantı bulunmaktadır. Toplam hacim düşerken kesim frekansı artmış yani dönüştürücünün performansı düşmüştür. Kesim frekansının düşürülerek filtreleme performansının artması durumunda ise toplam hacim büyümüştür.

**Tasarımların Analizi**

Optimizasyonu gerçekleştirilen düşürücü dönüştürücü için 3 farklı tasarım seçilmiştir. Seçilmiş olan bu tasarımlar Tablo 8'de verilmiştir.

**Tablo 8.** Farklı Amaçlar Hedeflenerek Seçilmiş Tasarımlar

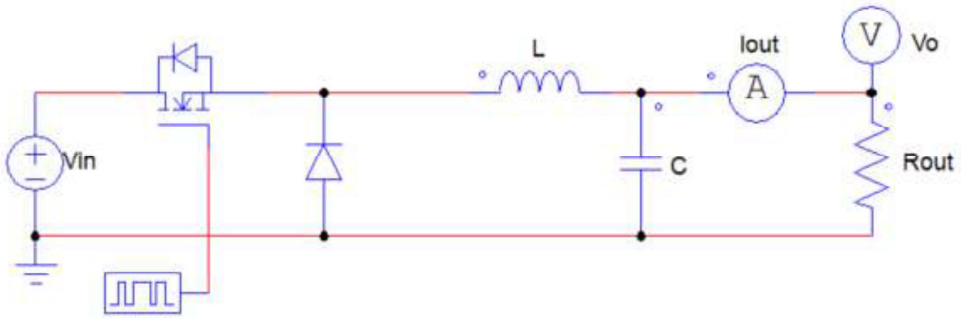
| | L (mH) | C (µF) | Kesim Frekansı (Hz) | Toplam Hacim($cm^3$) |
|---|---|---|---|---|
| Tasarım-1 | 0.92 | 986 | 167 | 2.3 |
| Tasarım-2 | 0.14 | 234 | 879 | 0.81 |
| Tasarım-3 | 0.22 | 757 | 389 | 1.2 |

Tasarım-1'de kesim frekansı en düşük olan L ve C değerleri alınmıştır. Bu şekilde filtreleme performansı en yüksek olan düşürücü dönüştürücü elde edilmiştir. Tasarım-2'de toplam hacmi en düşük olan düşürücü dönüştürücü tasarımı elde edilmiştir. Tasarım-3'te ise filtreleme performansı ve toplam hacmi dengeli olacak şekilde bir tasarım elde edilmiştir.

**Simülasyon**

Seçilmiş olan bu tasarımlar PSIM programı ile simüle edilmiş ve çıkış akım/gerilim değişimleri verilmiştir. Çıkış akımı ve geriliminde oluşan dalgalanmalar karşılaştırılarak önerilen tasarımların performansları incelenmiştir.

Şekil 8'te PSIM ile yapılan simülasyonda kullanılan devre şeması verilmiştir. Çıkış gerilimi ve akımları devrede gösterilen $V_o$ ve $I_{out}$ noktalarından alınan ölçümler ile yapılmıştır.

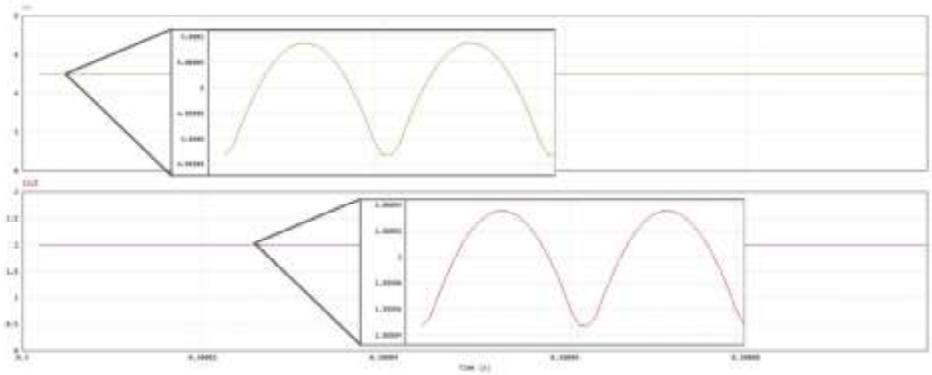



**Şekil 8.** PSIM Simülasyon Devresi

Tasarım-1'de akım ve gerilim dalgalanmasının en düşük seviyede olması amaçlanmıştır. Şekil 9'de gösterilen gerilim ve akım dalga grafiği tasarım-1 parametreleri ile oluşturulmuş simülasyon çıktılarıdır. Tablo 9'te tasarım-1 için yapılan simülasyon sonuçlarındaki akım ve gerilim dalgalanmalarının en yüksek, en düşük ve yüzdelik değerleri verilmiştir.

**Tablo 9.** Tasarım-1 için Dönüştürücü Akım ve Gerilim Tablosu

| | En Düşük | En Yüksek | Dalgalanma Yüzdesi | Birim |
|---|---|---|---|---|
| Vout | 4.99987 | 5.00009 | %0.0044 | V |
| Iout | 1.99995 | 2.00004 | %0.0044 | A |

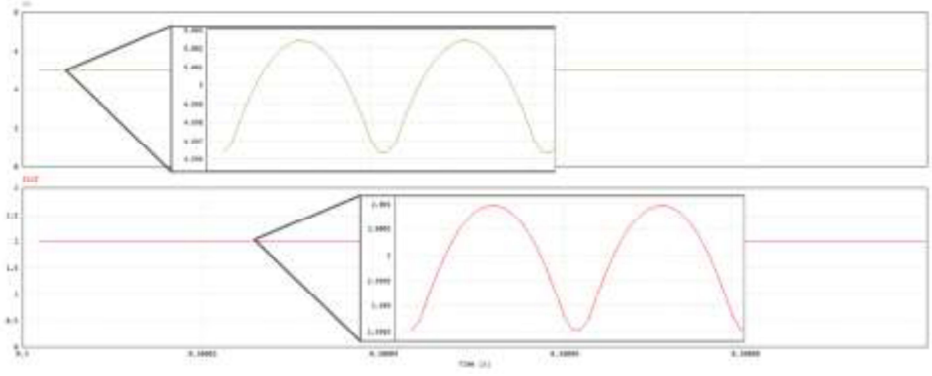


**Şekil 9.** Tasarım-1 için Dönüştürücü Çıkış Akımı ve Gerilim Değişimleri

Tasarım-2'de toplam hacmin en düşük seviyede olması amaçlanmıştır. Şekil 10'da gösterilen gerilim ve akım dalga grafiği tasarım-2 parametreleri ile oluşturulmuş simülasyon çıktılarıdır. Tablo 10'te tasarım-2 için yapılan simülasyon sonuçlarındaki akım ve gerilim dalgalanmalarının en yüksek, en düşük ve yüzdelik değerleri verilmiştir.

**Tablo 10.** Tasarım-2 için Dönüştürücü Akım ve Gerilim Tablosu

| | En Düşük | En Yüksek | Dalganma Yüzdesi | Birim |
|---|---|---|---|---|
| Vout | 4.99634 | 5.00242 | %0.1216 | V |
| Iout | 1.99854 | 2.00097 | %0.1216 | A |

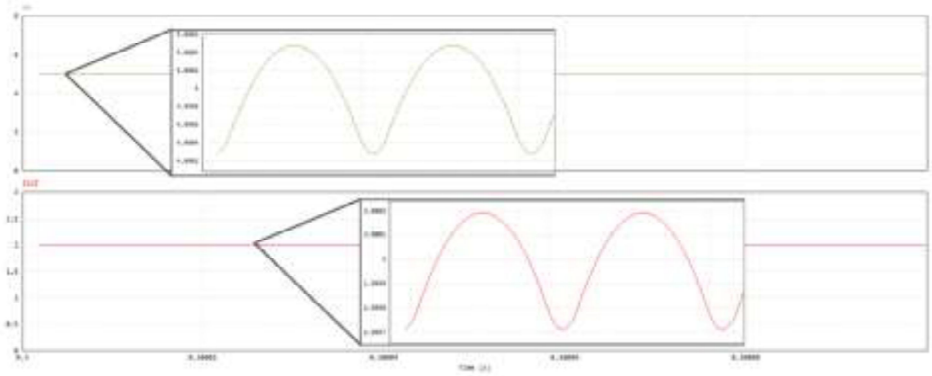


**Şekil 10.** Tasarım-2 için Dönüştürücü Çıkış Akımı ve Gerilim Değişimleri

Tasarım-3'te toplam hacmin ve dalgalanmaların en düşük seviyede olması amaçlanmıştır. Şekil 11'da gösterilen gerilim ve akım dalga grafiği tasarım-3 parametreleri ile oluşturulmuş simülasyon çıktılarıdır. Tablo 11'te tasarım-3 için yapılan simülasyon sonuçlarındaki akım ve gerilim dalgalanmalarının en yüksek, en düşük ve yüzdelik değerleri verilmiştir.

**Tablo 11.** Tasarım-3 için Dönüştürücü Akım ve Gerilim Tablosu

| | En Düşük | En Yüksek | Dalganma Yüzdesi | Birim |
|---|---|---|---|---|
| Vout | 4.99929 | 5.00048 | %0.0238 | V |
| Iout | 1.99972 | 2.00019 | %0.0238 | A |



**Şekil 11.** Tasarım-3 için Dönüştürücü Çıkış Akımı ve Gerilim Değişimleri

Tasarım-1 en düşük gerilim ve akım dalgalanmasını sunarken en yüksek hacme sahiptir. Tasarım-2'de ise bu durum tam tersi gerçekleşmiştir. En düşük hacme sahip olan tasarımda en yüksek dalgalanmalar gözükmektedir. Tasarım-3 ise Pareto-Frontier grafiğine göre en optimize çözümdür. Tasarımların dalgalanma değerlerinin ve hacimleri Tablo 12'te karşılaştırılmıştır.

**Tablo 12.** Tasarımların Karşılaştırılması

| | Dalganma Yüzdesi | Toplam Hacim($cm^3$) | Açıklama |
|---|---|---|---|
| Tasarım-1 | %0.0044 | 2.3 | Yüksek Performans |
| Tasarım-2 | %0.1216 | 0.81 | Düşük Hacim |
| Tasarım-3 | %0.0238 | 1.2 | Düşük Hacim, Yüksek Performans |

Çıkışta direnç yükü olduğundan dolayı gerilim ve akımdaki aynı fazdadır ve bu yüzden dalgalanma yüzdeleri eşittir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, hacim ve kesim frekansının minimize edilmesi amacıyla çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden olan NSGA-III kullanılarak 3 farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar için simülasyon yapılmış ve teorik analizler bu simülasyonlar ile doğrulanmıştır. Yapılan simülasyonlar incelendiği zaman kesim frekansının artması ile dönüştürücünün performansın düştüğü görülmüştür.

Tablo 12'da gözüktüğü üzere kesim frekansının düşürülmesinin hedeflendiği tasarım-1'de çıkış akım ve gerilimdeki dalgalanma %0.0044'e kadar düşürülmüştür. Hacmin düşürülmesinin hedeflendiği tasarım-2'de ise hacim 2.8 kat düşürülmüş ancak dalgalanma yüzdesi %0.1216'ya yükselmiştir. Tasarım-3'te ise pareto grafiğindeki en optimum tasarım alınmıştır. Hacim Tasarım-2'ye göre 1.4 kat artarken dalgalanma yüzdesi Tasarım-2'ye göre 5 kat daha iyidir.

İlerleyen çalışmalarda; optimize edilecek amaçların sayısı arttırılabilir, farklı optimizasyon algoritmaları ile optimizasyonlar gerçekleştirilebilir. Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri ile düşürücü dönüştürücü haricindeki diğer topolojilerin de optimizasyonu mümkündür.

## KAYNAKÇA

*510DX Aluminum Electrolytic Capacitors | Vishay*. (t.y.). Geliş tarihi 23 Şubat 2025, gönderen https://www.vishay.com/en/product/42050/

Boillat, D. O., Krismer, F., & Kolar, J. W. (2015). Design Space Analysis and ρ– η Pareto Optimization of LC Output Filters for Switch-Mode AC Power Sources. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(12), 6906-6923. IEEE Transactions on Power Electronics. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2393151

*Buck Converters (Step-Down Converter)*. (t.y.). Geliş tarihi 23 Şubat 2025, gönderen https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/buck-converters?srsltid=AfmBOorVCc7Gq7jHauL7ar7toM3caR6OgKaAbfZGHZYJNGIhcammJRGQ

Burkart, R., & Kolar, J. W. (2013). Component cost models for multi-objective optimizations of switched-mode power converters. *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2139-2146. https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646971

Khaligh, H., Torkaman, H., & Ebrahimian, A. (2018). Novel algorithm for optimum output passive filter design in 400 Hz inverter. *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 335-340. https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2018.8343819

Li, X., Lin, F., Zhang, X., Huang, M., & Wang, H. (2019). Multi-objective Design of LC Filter for High-efficiency, High-power-density and High-performance Buck Converter. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5132-5136. https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8913162

Li, X., Zhang, X., & Lin, F. (2020). Pareto-Frontier-Based Multi-Objective Design of Output LC Filter for High Efficiency, High Reliability, and High Power-Density Buck Converter. *2020 IEEE 9th International*