

İNSANIZ HAVA ARAÇLARI HİBRİT İTKİ SİSTEMLERİ İÇİN MİMARİ SEÇİMİNİN ÖNEMİ

Ahmet Yıldız¹
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

ÖZET

Günümüzde enerji kaynaklarının azalması, hava kirliliği vd. sebeplerden dolayı havacılıktan kaynaklanan sera gazı emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmaya yönelik çabalar artmıştır. Havacılık ve uzay endüstrisinin bu talepleri yeni uçak itki teknolojilerine geçişi hızlandırmıştır. İnsansız hava araçları da bundan payını almış ve konvansiyonel itki sistemlerinden elektrikli itki sistemlerine doğru bir yönelim başlamıştır. Ancak tamamen elektrikli itki sistemleri için batarya teknolojilerinin sahip olduğu teknolojik kısıtlamalar gibi birçok kısıtlama ve zorluklar vardır. Bundan dolayı mevcut araştırma ve endüstrideki uygulamalarda, geçiş sistemleri olarak tanımlanan hibrit itki sistemleri daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışma, insansız hava aracı teknolojilerinde mimari seçiminin önemini performans parametrelerine dayalı olarak incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, öncelikle mimarilerin avantaj ve dezavantajları literatürdeki etkili çalışmaların sonuçlarına göre ortaya koyulmuştur. Çalışmanın devamında hibrit itki sistem mimarilerinin değerlendirilmesi için performans parametreleri belirlenmiştir. Ulaşılan tüm bulgular ışığında hibrit itki sistem mimari seçiminin insansız hava araçları için önemi ortaya koyulmuştur.

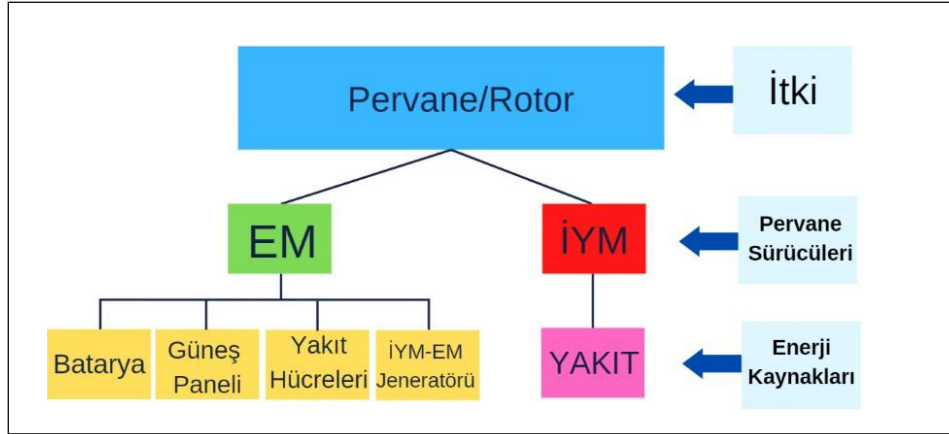
GİRİŞ

Günümüzün havacılık teknolojilerinin başında tarımdan savunma sanayine kadar geniş uygulama alanlarına sahip olup uzaktan veya otonom kontrol edilebilme gibi spesifik özellikleriyle öne çıkan insansız hava araçları (İHA) gelmektedir [Barnhart, Marshall ve Shappee, 2021]. Diğer hava araçlarında olduğu gibi İHA'lar da uçuş için bünyesinde birçok alt sistemden barındırmaktadır. Bu sistemlerden birisi de itki sistemleridir [Keane, Sóbester ve Scanlan, 2017]. Mühendislik yaklaşımına göre hibrit sistemler, birbirlerine bağlı ve birleşik olarak çalışan, farklı teknolojilere sahip iki veya daha fazla sistemden oluşmaktadır. Bu sistemler, genellikle birbirlerinin yetersiz kaldığı durumlarda birbirlerine tamamlayıcı olarak çalışırlar. Havacılık endüstrisinin gelecekte en önemli hedefi daha çevreci ve sürdürülebilir olmaktır. [Sehra ve Whitlow, 2004; Farokhi, 2020; Afonso vd., 2023]. Bu maksatla birçok sistemde olduğu gibi itki sistemlerinde de bazı yönelimler söz konusu olmuştur. Havacılık teknolojilerinde hibrit itki sistemleri elektrikli itki sistemlerine geçiş aşaması olarak kabul edilmektedir. Hibrit itki sistemlerinde temel amaç farklı alt sistem bileşenlerinin avantajlarını bünyesinde toplamaktır. Örneğin, konvansiyonel motorlarda enerji yoğunluğu yüksek, verim düşük iken; elektrik motorlarında enerji verimliliği yüksektir [Fletcher vd., 2016]. Diğer sistemlerin avantajlı yanlarını bünyesinde barındıran hibrit itki sisteminin en önemli avantajları sürdürülebilirlik çerçevesinde gösterdiği düşük yakıt tüketimi, düşük emisyon değerlerine sahip olmasıdır [Lee vd., 2009; Friedrich ve Robertson, 2015].

Hibrit İtki Sistem Mimarileri

Hibrit itki sisteminde temel olarak beş ana bileşen mevcuttur. Bu bileşenler Şekil 1'de verilmiştir. Bunlar; pervane, elektrik motoru ve konvansiyonel motor, batarya ve fosil yakıt tankıdır [Krzmar vd., 2020]. Hibrit itki sistem bileşenlerinin çoğu benzer olsa da mimari ve performansları açısından birçok farklılıkları bulunmaktadır [Obertino, 2021].

¹ Yüksek Lisans Öğç., Havacılık Elektrik ve Elektronik Böl., E-posta: aeyildiz.29@gmail.com



Şekil 1: Hibrit İtki Sistem Bileşenleri [Krznar, 2020]

İHA'larda hibrit sistemlerin çalışma konseptleri incelendiğinde; konvansiyonel bir tahrikten ve bir elektrik motorundan gelen gücü, bütün sistemin verimliliğini optimum seviyeye ulaştırmak ve İHA performansını artıracak şekilde en uygun mimaride bir araya getirmek üzerine olduğu görülmektedir. Bu değişik mimari tipleri İHA sistemlerinin görev profillerine uygun olacak şekilde değişiklik göstermektedir [Friedrich ve Robertson, 2015; Abdul Sathar Eqbal vd., 2018].

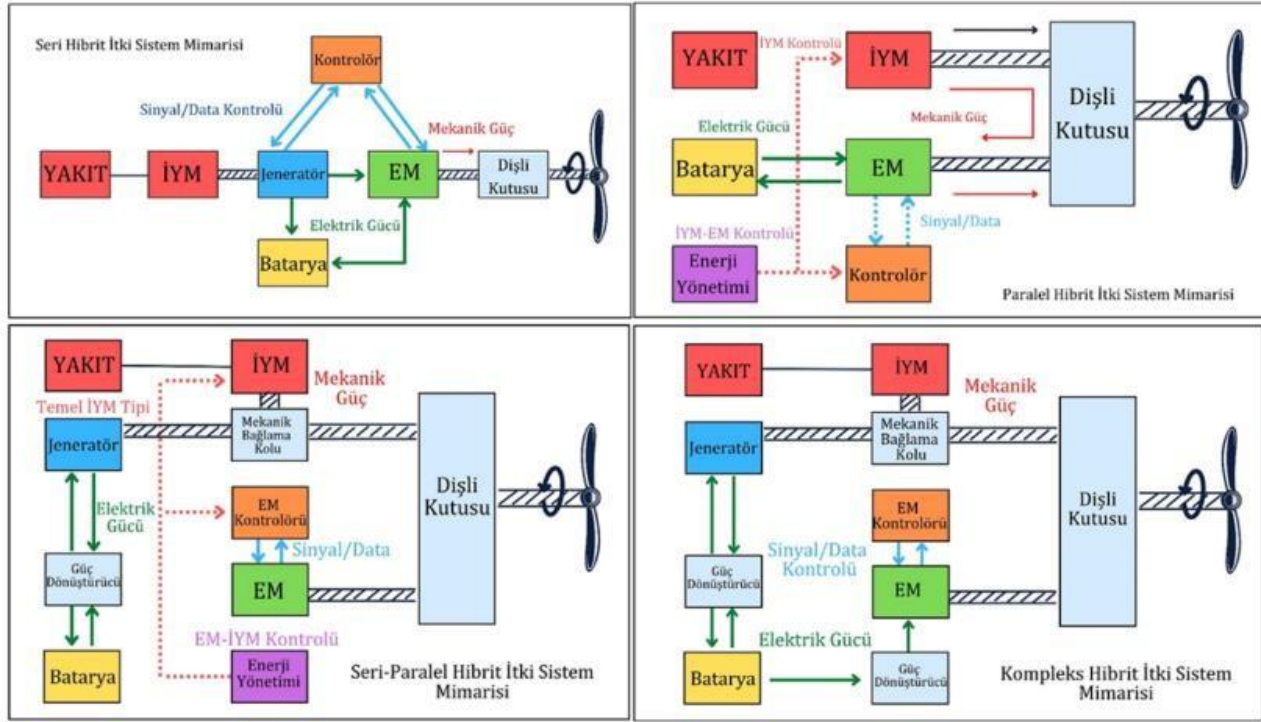
Hibrit elektrikli itki sistemleri şu dört avantajından dolayı tercih edilmektedir:

- Batarya yedeklemesi sağlayarak güvenilirliği artırması,
- Faydalı yük kapasitesindeki artışa göre elektrik motor gücünün optimize edilebilmesi,
- Düşük akustik uçuş için tamamen elektrikli tahrik altında çalışabilme yeteneği,
- Yakıt verimliliği.

Bunun yanında hibrit itki sistemleri şu dezavantajlara da sahiptir [Gundlach, 2014]:

- Elektriksel ve tekrar mekanik güce dönüşümden kaynaklı verimlilik kayıpları,
- Sisteme jeneratörler, motorlar, bataryalar, güç dağıtımı ve güç elektroniği bileşenlerinden kaynaklı sabit ağırlık artışı,
- Konvansiyonel sistemlere kıyasla karmaşıklık.

Literatürde hibrit itki sistem mimarileri; seri, paralel, seri-paralel ve kompleks türlerinde karşımıza çıkmaktadır [Austin, 2011; Gaspari vd., 2017]. Seri hibrit mimari, konvansiyonel motor tarafından üretilen gücü direk olarak sisteme dahil etmeden, elektrik enerjisi üretimi için jeneratörü harekete geçirerek, elektrik motorunu çalışmaya başlatması bu mimarinin en önemli özelliğidir [Şekil 2]. Seri mimaride elektrik motorunun özellikle kalkış ve iniş aşamalarında oluşturacağı itki sayesinde içten yanmalı motorun ürettiği nitrojen oksit miktarında azalma meydana gelir [Tablo 1]. Yüksek irtifada İHA'nın menzilinı artırmak için de elektrik motoru kullanılabilir. Bu sayede enerji verimliliği artar, yakıt tüketimi azalır. Seri mimaride yakıtta depolanan enerji üç dönüşümden geçer; birinci olarak, İYM içinde mekanik enerjiye dönüşür; ikinci olarak, jeneratör aracılığıyla, pili şarj etmek için kullanılabilen elektrik enerjisine dönüşür; üçüncü olarak da pervaneye bağlı elektrik motoruna doğrudan güç vermek için mekanik itkiye dönüşür. Bu enerji dönüşümleri paralel mimariye kıyasla genel verimliliği azaltan doğal kayıplar dezavantaj olarak görülmektedir. Bunun yanında seri mimari konvansiyonel motoru, elektrik motorundan ve pervaneden mekanik olarak ayırarak bağımsız çalışmasını sağlayabilir. Bu konvansiyonel motorun kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Daha karmaşık mimarilerde güç ünitelerinin de kontrol edilebilirliği göz önüne alınacak olursa görev profilindeki güç talepleri yönetilebilir olur. [Beard ve McLain, 2012; Chen vd., 2019; Obertino, 2021].



Şekil 2: Hibrit İtki Sistem Mimarileri [Schömann, 2014; Zhang vd., 2022]

Paralel Hibrit İtki Sistem Mimarisinde, elektrik motoru ve bir içten yanmalı motor mekanik olarak bir kardan miline bağlandığından pervaneye dişli kutusu vasıtasıyla bağlanmaktadır [Şekil 2]. Bu mekanik bağlantılar paralel mimariyi, seri mimariye kıyasla daha karmaşık hale getirir. Paralel hibrit itki sistem mimarisinde elektrik motorunun bir pervaneye, içten yanmalı motorun bir pervaneye itki sağladığı bir varyasyon daha mevcuttur [Harmon, Frank ve Joshi, 2005; Wall ve Meyer, 2020]. Seri-paralel hibrit mimaride; İYM motor, elektrik motoru, jeneratör ve pervane mekanik olarak birbirine bağlıdır [Şekil 2]. Böylece, İYM gücünden faydalanılarak pervanenin çalıştırılması ve pilleri şarj etmek için jeneratör tarafından elektrik gücüne dönüştürülebilmesi sağlanmaktadır. İHA sistemi yüksek olmayan hızlarda çalışırken hibrit itki sistemi seri mimari modunda, yüksek hızlarda ise paralel mimari modunda çalışabilir. İHA sistemi fren modunda ise jeneratör tarafından elektrik enerjisi üretilmekte ve aküde depolayabilir. Tüm bunlardan dolayı bu mimari hem seri hem de paralel itki sistem mimarilerinin verim, yakıt, menzil parametrelerindeki avantajlarını bünyesinde barındırmaktadır. Kompleks Hibrit İtki Sistem Mimarisi, jeneratörü ve İYM'yi daha iyi kontrol etmek için seri-paralel mimarisine bir güç elektroniği eklenerek elde edilmiştir [Lieh vd., 2011; Hu, 2014; Rendón vd., 2021].

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Mimariler	Avantajları	Dezavantajları
Seri [Cinar, Garcia ve Mavris, 2020; Huang, 2021]	- Basit yapı, - Kontrolü ve bakımı kolay, - Düşük maliyetli	- Yüksek emisyon, - Düşük verimlilik, - Yalnızca elektrik modu
Paralel [Kong vd., 2018; Boggero, Fioriti ve Corpino, 2019]	- Yüksek maksimum güç, - Yakıt ve elektrik moduna sahip, - Yüksek güvenilirlik, Yüksek hız	- Yüksek emisyon, - Düşük verimlilik, - Kısa dayanıklılık
Seri-Paralel [Lieh vd., 2011; Kuśmierk, Galiński ve Stalewski, 2023]	- Yüksek verim, - Yüksek güvenilirlik, - Uzun dayanıklılık	- Karmaşık yapı, - Sıkı kontrol, - Yüksek fiyat
Kompleks [Sliwinski vd., 2017; Abdul Sathar Eqbal vd., 2018]	- Yüksek verim, - Çeşitli çalışma koşulları, - Daha iyi performans	- Karmaşık yapı, - Daha zor Kontrol, - Yüksek maliyet

Tablo 1: Hibrit İtki Sistem Mimarilerinin Avantaj ve Dezavantajları

Tablo 1 ve Tablo 2'deki bulgular ışığında paralel mimarinin diğer mimari türlerine göre yüksek güç, güvenilirlik ve hızı sahip olması özellikle askeri alanda kullanılmakta olan orta irtifa uzun dayanım/menzil sınıfındaki İHA sistemlerinin beklentisini karşılamaktadır. Seri ve seri-paralel mimariden farklı olarak, paralel mimaride elektrik jeneratörünün olmaması da İHA'lar için yaklaşık %10'a kadar kütle avantajı sağladığı görülmüştür. Daha düşük kalkış ağırlığına sahip küçük sınıfta yer alan İHA sistemlerinde ise basitlik, düşük maliyet ve bakım kolaylığından dolayı seri mimarinin tercih edilebilir. Karmaşık mimarilerdeki İHA sistemlerinin acil durumları için itki sistemleri gerekli itkiyi sağlamada eksiklik göstererek dezavantaj sağlarken, paralel mimariye sahip İHA sistemlerinde çeşitli modlar sayesinde elektrik ve İYM tarafından sağlıklı bir şekilde yönetilebilir.

Performans Parametreleri	Seri Mimari	Paralel Mimari	Seri-Paralel Mimari	Kompleks Mimari
İtki Performansı	Orta	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek
Yakıt Tüketimi	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Ağırlık	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Hacim	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Maliyet	Düşük	Yüksek	Orta	Çok Yüksek
Uçuş Süresi	Orta	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek

Tablo 2: Hibrit İtki Sistem Mimarilerinin Performans Parametrelerine göre Karşılaştırılması [Austin, R., 2011; Hu, 2014; Chakraborty, 2015; Cinar, 2018; Pornet, 2018; Finger, 2020; Rendón vd., 2021]

Tablo 2 incelendiğinde, hibrit itki sistem mimari türlerinin itki performansı, yakıt tüketimi, ağırlık, hacim, maliyet, uçuş süresine göre analiz edildiği görülmüştür. Buna göre:

- İtki performansı açısından: paralel ve kompleks mimarinin yüksek performans gösterildiğine ulaşılmıştır. Akademik çalışmalarda hibrit itki sistem modellemelerinde ve endüstrideki uygulamalarda yüksek itki ihtiyacının sivil kullanım dışında daha çok askeri alanlardaki İHA uygulamaları için önemli bir parametre olduğu karşımıza çıkmaktadır. NATO'nun yapmış olduğu İHA sınıflandırmasına göre taktik, orta irtifa uzun dayanım (MALE) ve yüksek irtifa uzun dayanım (HALE) İHA sistemleri bu kapsama girmektedir. Bu açıdan yüksek itki ihtiyacı olan İHA sistemlerinde paralel mimarinin seçimi faydalı olacaktır.
- Yakıt tüketimi açısından: Yakıt tüketimi sürdürülebilir havacılık politikalarında azaltımı en başta hedeflenen konulardan biridir. Hibrit itki sistemlerini konvansiyonel itki sistemlerinden ayıran en önemli farklılıklardan birisi de yakıt tüketiminin azaltımıdır. Konvansiyonel sistemlerle kıyaslandığında bütün itki mimari türlerinin yakıt tüketimi daha düşüktür. Kendi aralarında karşılaştırıldığında ise yine İHA sistemlerinin büyüklüğü ve itki gücü bu tüketimi etkilemektedir.
- Ağırlık ve hacim açısından: İHA sistemlerinin sınıflandırılmasında da en önemli parametrelerden biri olan ağırlık, itki mimarileri açısından da genelde küçük sınıfta yer alan İHA sistemleri için düşüktür. Paralel ve kompleks mimari türlerinde ağırlık daha fazladır. Hacim için de ağırlık parametresine benzer çıkarımlar yapılabilir.
- Maliyet: Seri mimarinin çoğunlukla kullanıldığı küçük ve orta sınıfta yer alan İHA sistemleri için maliyet düşükken, sistem ağırlık-hacmi yanında karmaşıklığı arttıkça da maliyeti artmaktadır.
- Uçuş süresi: Bu parametre aynı zamanda dayanımı da ifade etmektedir. Hibrit itki sistem bileşenlerinin ağırlık ve hacimleri fazla olan ve çoğunlukla paralel ve kompleks hibrit mimariye sahip MALE İHA'lar 24 saat havada kalabiliyorken, boyut-ağırlık-hacimleri küçük olan nano-mikro-mini-küçük İHA sistemlerinin havada kalış süreleri çok daha azdır.

SONUÇ

Sürdürülebilir hibrit elektrikli havacılık çalışmalarında en önemli konulardan birisi de itki sistemleridir. İHA'ların tasarım ve performansını etkileyen parametrelerin başında itki sistem mimarileri gelmektedir. Bu çalışmada, hibrit itki sistem mimari bileşenleri görsel bütünlük içinde sunulmuş, mimarilerin avantaj-dezavantajları literatürdeki önemli çalışmalara göre incelenmiş ve çalışmalarda ulaşılan sonuçlara dayalı olarak dört mimari türü performans parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Her mimari türünün birbirine kıyasla üstünlükleri ve zayıflıklarına ulaşılmıştır. Bu çalışmanın ulaştığı sonuçlarla, İHA sistemleri için hibrit itki mimarilerinin seçiminin önemi performans parametrelerine dayalı olarak ortaya koyulmuştur.

Kaynaklar

- Abdul Sathar Eqbal, M., Fernando, N., Marino, M., ve Wild, G., 2018. Hybrid propulsion systems for remotely piloted aircraft systems, *Aerospace*, 5(2), 34.
- Afonso, F., Sohst, M., Diogo, C. M., Rodrigues, S. S., Ferreira, A., Ribeiro, I., ... ve Suleman, A., 2023. Strategies towards a more sustainable aviation: A systematic review, *Progress in Aerospace Sciences*, 137, 100878.
- Austin, R., 2011. *Unmanned Aircraft Systems UAVs Design, Development and Deployment*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Barnhart, R. K., Marshall, D. M. ve Shappee, E. (Eds.), 2021. *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*, Crc Press, USA.
- Beard, R. W., ve McLain, T. W., 2012. *Small unmanned aircraft Theory and practice*. Princeton university press, New Jersey, USA.
- Boggero, L., Fioriti, M., ve Corpino, S., 2019. Development of a new conceptual design methodology for parallel hybrid aircraft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(3), 1047-1058.
- Chakraborty, I., 2015. *Subsystem architecture sizing and analysis for aircraft conceptual design*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Cinar, G., 2018. *A methodology for dynamic sizing of electric power generation and distribution architectures*, Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Cinar, G., Garcia, E., ve Mavris, D. N., 2020. A framework for electrified propulsion architecture and operation analysis, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(5), 675-684.
- Farokhi, S., 2020. *Future propulsion systems and energy sources in sustainable aviation*. Wiley & Sons, Kansas, USA. s.188
- Finger, D. F., 2020. *Methodology For Multidisciplinary Aircraft Design Under Consideration Of Hybrid-Electric Propulsion Technology*. Doktora Tezi, RMIT University, Australia.
- Fletcher, S., Flynn, M. C., Jones, C. E., ve Norman, P. J., 2016. Hybrid electric aircraft: State of the art and key electrical system challenges. *The Transportation Electrification eNewsletter*.
- Friedrich, C. ve Robertson, P. A., 2015. Hybrid-Electric Propulsion For Aircraft. *Journal of Aircraft*, 52(1), 176-189.
- Gaspari, F., Trainelli, L., Rolando, A. ve Perkon, I., 2017. Concept of Modular Architecture for Hybrid Electric Propulsion of Aircraft. <https://mahepa.eu/wp-content/uploads/2017/12/D1.1-Concept-of-Modular-Architecture-fro-Hybrid-Electric-Propulsion-of-Aircraft.pdf>. (Accessed 3 April 2024).
- Gundlach, J., 2014. *Designing unmanned aircraft systems*. Reston American Institute of Aeronautics & Astronautics, Manassas, Virginia.
- Harmon, F. G., Frank, A. A., Joshi, S. S., 2005. Application Of A CMAC Neural Network To The Control Of A Parallel Hybrid-Electric Propulsion System For A Small Unmanned Aerial Vehicle. In *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 1, pp. 355-360.
- Hu, Y., 2014. *Design and optimization of a general aircraft's hybrid electric propulsion system*. Doktora Tezi, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China.
- Huang, J., 2021. Survey on design technology of distributed electric propulsion aircraft, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 42(3), 624037.
- Keane, A. J., Sóbester, A. ve Scanlan, J. P., 2017. *Small Unmanned Fixed-Wing Aircraft Design A Practical Approach*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK.
- Kong, X., Zhang, Z., Lu, J., Li, J., ve Yu, L., 2018. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 39(1), 46-62.
- Krznar, M., 2020. *Modelling And Control Of Hybrid Propulsion Systems For Multirotor Unmanned Aerial Vehicles*. Doktora Tezi, University of Zagreb, Hırvatistan.
- Krznar, M., Pavković, D., Kozhushko, Y., Cipek, M., Zorc, D. ve Crneković, M., 2020. Control system design for hybrid power supply of an unmanned aerial vehicle based on linearized averaged process models. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 582-587). IEEE.

- Kuśmierk, A., Galiński, C., ve Stalewski, W., 2023. Review of the hybrid gas-electric aircraft propulsion systems versus alternative systems, *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100925.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C., Lim, L. L. ve Sausen, R., 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric environment*, 43(22-23), 3520-3537.
- Lieh, J.; Spahr, E.; Behbahani, A.; Hoying, J., 2011. Design of hybrid propulsion systems for unmanned aerial vehicles. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, CA, USA, 31 July–3 August.
- Obertino, D., 2021. Design and Simulation Study of a Hybrid Electric Propulsion System for a VTOL Tilt-Rotor UAV. Doktora Tezi, Politecnico di Torino, Spain.
- Pornet, C., 2018. Conceptual design methods for sizing and performance of hybrid-electric transport aircraft, Doktora Tezi, Technische Universität München, Deutschland.
- Rendón, M. A., Sánchez R, C. D., Gallo M, J. ve Anzai, A. H., 2021. Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges And Opportunities. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(5), 1244-1268.
- Schömann, J., 2014. Hybrid-Electric Propulsion Systems For Small Unmanned Aircraft. Doktora Tezi, Technische Universität München, Deutschland.
- Sehra, A. K. ve Whitlow Jr, W., 2004. Propulsion and power for 21st century aviation, *Progress in aerospace sciences*, 40(4-5), 199-235.
- Sliwinski, J., Gardi, A., Marino, M., ve Sabatini, Rve., 2017. Hybrid-electric propulsion integration in unmanned aircraft, *Energy*, 140, 1407-1416.
- Wall, T. J., Meyer, R. T., 2020. Hybrid electric aircraft switched model optimal control. *Journal of Propulsion and Power*, 36(4), 488-497.
- Zhang, B., Song, Z., Zhao, F., ve Liu, C., 2022. Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles, *Energies*, 15(2), 455.