



EGE ÜNİVERSİTESİ
Ulaştırma Yönetimi Araştırmaları Dergisi
Journal of Transportation Management Research
<https://jotmar.ege.edu.tr/>

Geliş/Received: 20.03.2023 Kabul/Accepted: 30.04.2024
 Araştırma Makalesi

Türk Savunma ve Havacılık Sanayiinde Döngüsel Ekonomi ve Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi: Yapay Zekâ Destekli Uygulama Örnekleri

Oğuz VARHAN¹

Özet

Endüstri 4.0'ın getirdiği dijital dönüşüm ve yapay zekâ teknolojileri, birçok sektörde sürdürülebilirlik odaklı iş modellerinin geliştirilmesi ve döngüsel ekonominin güçlendirilmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Savunma ve havacılık sanayiinde de bu bağlamda çevresel sürdürülebilirliğin artırılması, kaynak optimizasyonu sağlanması ve atık üretimi azaltılması gibi birçok uygulama potansiyeli bulunmaktadır. Bu bağlamda mevcut teknolojik gelişmeler ve gelecekteki potansiyel ilerlemelerin araştırılarak bu konudaki dijitalleşme stratejilerinin ortaya konması önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında Endüstri 4.0'ın (dijital dönüşümün) ve yapay zekâ teknolojilerinin döngüsel ekonomi ve ürün yaşam döngüsü yönetimi üzerindeki etkilerinin ve bu teknolojilerin nasıl kullanılabileceğinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu araştırma ile döngüsel ekonominin ve ürün yaşam döngüsü yönetiminin dijital dönüşüm çağında nasıl daha etkin bir şekilde yönetilebileceğine dair bir çerçeve sunulması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijitalleşme, Döngüsel Ekonomi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi.

Turkish Defense and Aerospace Industry: Circular Economy and Product Life Cycle Management with Artificial Intelligence-Supported Innovation and Application Strategies

Abstract

The digital transformation brought about by Industry 4.0 and artificial intelligence technologies offers significant potential for the development of sustainability-focused business models and the strengthening of the circular economy in various sectors. In the defense and aerospace industry as well, there exists considerable potential for applications such as increasing environmental sustainability, optimizing resources, and reducing waste production. In this context, it is important to investigate current technological advancements and potential future progressions to establish digitalization strategies in this regard. This study aims to examine the impact of Industry 4.0 (digital transformation) and artificial intelligence technologies on circular economy and product life cycle management, and explore how these technologies can be utilized. The research targets to provide a framework on how circular economy and product life cycle management can be more effectively managed in the era of digital transformation.

Keywords: Digitalization, Circular Economy, Product Life Cycle Management.

¹ PLM Mühendisi, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, oguz.varhan@tai.com.tr, ORCID: 0009-0000-2240-4207.

1. GİRİŞ

Savunma ve havacılık sanayii, ekonomik, teknolojik ve politik açılardan büyük öneme sahiptir. Bu sektör, ülkelerin küresel rekabet gücünü artıran önemli bir sanayi koludur ve geliştirilen teknolojiler diğer sektörlerle de yayılarak yenilikçi ve rekabetçi bir ekonominin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ulusal güvenliğin sağlanması devletin temel görevlerinden biridir ve günümüzde kalabalık orduların yerini yüksek teknolojik savunma araçları almıştır. Bu nedenle, ülkelerin yüksek teknolojik savunma sistemlerine sahip olmaları ulusal güvenlik açısından kritiktir.

Savunma sanayii sürekli olarak gelişen ve yenilenen bir alandır, çünkü her an yeni teknolojilerle ileriye taşınması gerekmektedir. Uluslararası arenadaki yüksek rekabet nedeniyle silah sistemlerinin, teknolojilerinin ve ürünlerin dışarıdan alınması zordur. Ayrıca, yaptırımlar vs. nedeniyle (ITAR vb.) ürünlerin kullanımı ve paylaşımı tedarikçi firma ve devletlerin iznine tabidir. Bu nedenle, yerli savunma sanayisinin önemi açıktır; çünkü ülkeyi dış tehditlere karşı korumak ve caydırıcı bir güç olabilmek için gelişmiş teknolojiye sahip diğer ülkelerle rekabet etmek gerekmektedir. Bu bağlamda, özgün ve milli kaynaklarla geliştirilen teknolojilerle savunma sektöründe ilerlemek ve araştırma geliştirme projelerine önem vermek gereklidir (Öztürk, 2022: 131). Türk savunma ve havacılık sanayii son yıllarda, elde ettiği başarılarla küresel çapta dikkat çekmiştir. Türkiye'nin jeopolitik konumu, yerli ve milli bir savunma sanayisine sahip olmanın hayati önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Havacılık ve uzay sanayiinde, özellikle uçak üretiminde kullanılan yapısal parçaların çeşitliliği ve sahip oldukları karmaşık geometrileri farklı özelliklere sahip malzemelerin ve üretim tekniklerin kullanımı, mekatronik sistemlerin ve yazılımların gereksinimlerinin yoğunluğu, PLM uygulamalarının zorunlu hale gelmesine neden olmaktadır. Boeing, Airbus gibi havacılık şirketleri, ulusal ve uluslararası düzeyde disiplinler arası ekip çalışmasını vurgulayan PLM yazılımlarına önem vermektedir. Uçak yapımında karşılaşılan önemli sorunlar arasında tedarik zinciri sorunları ve gecikmeler bulunmaktadır. Tedarikteki aksaklıklar ve gecikmeler, havacılık şirketleri için ciddi mali zararlara yol açmaktadır. Bu tür problemlerin üstesinden gelmek için havacılık şirketleri PLM yazılımlarına büyük ölçüde yatırım yapmaktadır (Özden, 2016: 41).

Döngüsel ekonomi, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını sağladığı için savunma ve havacılık sanayiinde kullanılan nadir ve stratejik kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını da sağlama potansiyeline sahip bulunmaktadır. Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management-PLM) ise ürünlerin kullanım ömrü boyunca atıkların azaltılması ve geri dönüşümü teşvik etmektedir. Bu bağlamda PLM, savunma ve havacılık sanayiinde kullanılan malzemelerin daha verimli ve çevre dostu bir şekilde kullanılmasını sağlayabilme potansiyeline sahip bulunmaktadır. Hem döngüsel

ekonomi hem de PLM, savunma ve havacılık sanayiinde çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Atık azaltma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi uygulamalar, karbon ayak izini ve çevresel kirliliği azaltarak doğal kaynakları korumaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından son derece önemli olan bu uygulamalar geliştirilebildiği ölçüde sürdürülebilir kazanımlar elde edilebilecektir. Sürdürülebilirliğin yanı sıra PLM ve döngüsel ekonomi kavramları, savunma ve havacılık sanayinde inovasyon uygulamalarının teknolojik yeniliklerle ilişkisini açıklamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu kavramlar, ürünlerin tüm yaşam döngüsü boyunca kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını ve atıkların minimize edilmesini hedefler. Savunma ve havacılık sanayiinde, ürünlerin tasarımından üretimine, kullanımından geri dönüşümüne kadar olan süreçte bu prensipler dikkate alınmalıdır. Daha sürdürülebilir ürünler tasarlamada teknolojik yeniliklerin önemi büyüktür. Enerji verimliliği sağlayacak motorlar ya da malzemelerin daha uzun ömürlü olmasını sağlayacak teknolojiler kullanım ömürlerini uzatarak atık miktarlarını azaltabilir. Benzer biçimde geri dönüşümü kolaylaştıran tasarım ve malzeme seçimleri de ürünlerin döngüsel ekonomiye uygun hale gelmesini sağlar. Bu nedenle, savunma ve havacılık sanayindeki firmaların, ürün geliştirme süreçlerinde bu kavramları dikkate alarak yenilikçi çözümler üretmeleri ve sürdürülebilir bir gelecek için çalışmaları önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında bu önemden yola çıkarak Türk havacılık ve savunma sanayinde PLM ve döngüsel ekonomi uygulamaları çerçevesinde, yapay zekâ destekli inovasyonun ve uygulama stratejilerinin bu sektörde nasıl kullanılabileceğini araştırılması amaçlanmaktadır. Araştırma, Türkiye'nin savunma ve havacılık sanayisinde sürdürülebilirlik ilkelerini uygulama potansiyelini ve bu alanda yapılacak çalışmaların önemini vurgulamayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında öncelikli olarak teorik ve kavramsal çerçeve açıklanmaktadır. Döngüsel ekonominin ve ürün yaşam döngüsü yönetiminin teorik temelleri ve bu kavramların savunma ve havacılık sektöründeki uygulanabilirliği ele alınmaktadır. Ardından yapay zekâ destekli inovasyonun ve uygulama stratejilerinin bu sektördeki potansiyeli ve avantajları irdelenmektedir. Son kısımda ise Türk savunma ve havacılık sanayisinde döngüsel ekonomi ve ürün yaşam döngüsü yönetiminin önemi vurgulanarak yapay zekâ destekli inovasyonun bu sektördeki etkisi ve gelecekteki önemi tartışılmaktadır.

2. TEORİK VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Endüstri 4.0

Otomasyon, veri alışverişi, bulut teknolojileri ve nesnelerin interneti gibi dijital teknolojilerin entegrasyonunu ifade eden Endüstri 4.0, imalat ortamının dijitalleştirilmesi ve otomasyonu, işletme ile çevresi arasındaki iletişimin dijital bir

değer zinciri oluşturularak sağlanması olarak da tanımlanabilir (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Endüstri 4.0 anlayışının özü, kendi kendini düzenleyen üretimi gerçekleştiren ağ bağlantılı akıllı sistemlerin tanıtılmasıdır. İnsanlar, makineler, ekipmanlar ve ürünler birbirleriyle iletişim kurmaktadır (Gubán & Kovács, 2017: 112).

Resmi olarak ilk defa 2011 yılında Almanya'da Hannover Fuarı'nda duyurulan Endüstri 4.0, aslında temellerini 20. yüzyılın sonlarında atmış ve 21. yüzyılda hızla gelişim göstermiştir (Özsoylu, 2017: 43). Bu kavram akıllı teknolojilerle donatılmış akıllı fabrikalar, fiziksel ve dijital unsurların birleşmesiyle oluşmuş siber-dijital sistemler, otonom sistemler gibi bir dizi kavramı da barındırmaktadır (Lasi vd., 2014: 240). Endüstri 4.0 üzerine akademik yayınlarda en fazla kullanılan terimler ve kelimeler; Dördüncü Sanayi Devrimi, akıllı üretim, nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka, büyük data, siber fiziksel sistemler, inovasyon, otomasyon ve dijital dönüşüm gibi kavramlardır.

Endüstri 4.0 devriminin alt yapısını oluşturan ve devrimi tetikleyen temel unsurlar, imalat sanayinde büyük etki ve dönüşüm yaratan akıllı teknolojiler ve akıllı fabrikalardır. Endüstri 4.0 ortamı, internetle çevrili ve donatılmış dijital ürünler sistemini içerir ve bu sistemdeki birçok bileşen bulut teknolojileri tarafından saklanır ve yönetilir (Fırat & Fırat, 2017: 213).

Endüstri 4.0, 21. yüzyılın akıllı üretimi için henüz geliştirme aşamasında olan yazılım programlarını tanımlar. Küresel olarak, üretim süreçlerinin tümüne ait ana makine sistemleri ve alt sistemlerin internet ağı içinde entegrasyonunu sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, üretimin sensörler ve bilgisayar programları aracılığıyla otomatik olarak akıllı bir şekilde yönetilmesini sağlayan yazılımları içerir. Endüstri 4.0, geleceğin üretim teknolojisi olarak tanımlanır. Aynı üretim hattından farklı ürünlerin hızlı ve esnek, akıllı ve otomatik bir şekilde üretilmesine olanak tanıyan bir üretim teknolojisi ifade etmektedir (Sendler, 2013).

Özetle endüstri 4.0, birçok alanda dijital teknolojilerin ve yapay zekânın kullanımıyla üretim süreçlerinin dönüştüğü bir kavramdır. Endüstri 4.0'ın temel amacı, üretim süreçlerinde verimliliği artırmak, esneklik sağlamak, müşteriye özelleştirilmiş ürünler sunmak ve rekabet avantajı elde etmektir. Bu yaklaşım, fabrikaların akıllı hale gelmesini, verimlilik ve karlılığın artmasını sağlayarak endüstride devrim niteliğinde bir değişim sağlamaktadır.

2.2. Döngüsel Ekonomi ve Endüstri 4.0

Sanayi Devrimi ile birlikte teknolojik ilerleme ve kentsel nüfus artışı, çevresel etkileri artırarak atık miktarlarının önemli ölçüde artmasına yol açmıştır. Bu durum, doğal kaynakların azalması ve iklim değişikliği gibi pek çok olumsuz çevresel etkiyi beraberinde getirmiştir. 1980'lerden itibaren, bu sorunlara çözüm bulmak amacıyla

üretim ve tüketim alışkanlıklarının değiştirilmesi gerektiği dile getirilmiş ve bu bağlamda, ilk olarak sürdürülebilir kalkınma kavramı ortaya çıkmıştır. Günümüzde, döngüsel ekonomi kavramı bu alanda daha ön planda bulunmaktadır (Bozkurt, 2022: 14). Döngüsel ekonominin kavramsallaştırmasını destekleyen teoriler 1960'lı yıllardan beri mevcuttur. Bu kavramsal akım, modern çevre hareketinin 1960'lar ve 1970'lerdeki dönemine dayanmaktadır ve sonrasında onunla simbiyotik bir ilişkiye sahip olmuştur (Ekins vd., 2020: 4). Döngüsel ekonominin arkasındaki fikirler 1990'lı yıllardan bu yana politika gündeminde olmasına rağmen ancak son yıllarda politika yapıcılarının ilgisini çekmiştir (Lazarevic & Valve, 2017: 61).

Ellen MacArthur Vakfı'na göre “Döngüsel ekonomi, amaç ve tasarım açısından restoratif veya yenileyici bir endüstriyel sistemdir. ... 'Yaşamın sonu' kavramını onarma ile değiştirir, yenilenebilir enerji kullanımına yönelir, yeniden kullanımı engelleyen toksik kimyasalların kullanımını ortadan kaldırır ve malzemelerin, ürünlerin, sistemlerin ve bunun içinde iş modelinin üstün tasarımı aracılığıyla atığın ortadan kaldırılmasını amaçlar” (MacArthur, 2013: 7). Döngüsel ekonomi mikro düzeyde (ürünler, şirketler, tüketiciler), mezo düzeyde (eko-endüstriyel parklar) ve makro düzeyde (şehir, bölge, ulus ve ötesi) işleyen, üretim/dağıtım ve tüketim süreçlerinde malzemelerin azaltılması, alternatif olarak yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi ve geri kazanılması ile 'yaşamın sonu' kavramını değiştiren iş modeline dayalı bir ekonomik sistem olarak tanımlanmaktadır (Ekins vd., 2020: 11).

Döngüsel ekonomi, yavaş malzeme akışlarından oluşan mükemmel döngüler meydana getirerek, tüketiciden kullanıcıya geçişi teşvik ederek kaynak kullanımı ile çevresel etkilerin ekonomik büyümeden ayrıştırılmasını sağlamaktadır (Lazarevic & Valve, 2017). Döngüsel ekonomi, amacı itibarıyla onarıcı olan endüstriyel bir ekonomiyi ifade etmektedir. Yenilenebilir enerjiye güvenmeyi hedefler ve toksik kimyasalların kullanımını en aza indirerek, tasarım ile israfı ortadan kaldırır (MacArthur, 2013: 22). Döngüsel ekonomi kaynak verimliliği, atık yönetimi, ekonomik büyüme, inovasyon ve sürdürülebilir kalkınma gibi önemli alanlarda potansiyel yararlar oluşturmaktadır.

Endüstri 4.0 çağında işletmelerin temel amacı, enerji,kaynak verimliliğini ve üretkenliği artırmak, , inovasyonu teşvik etmek ve pazarlama döngüsü sürelerini kısaltmakla birlikte, değer ağları aracılığıyla yatay ve dikey entegrasyonu sağlamak ve mühendisliği tüm değer zincirinde uçtan uca dijital olarak entegre etmektir (Prause, 2015). Endüstri 4.0'ın sağladığı imkanlar sayesinde, kaynak tahsisi -yani ürünler, malzemeler, enerji ve su tahsisi- akıllı ve birbirine entegre değer yaratma süreçleri temelinde daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir (Stock & Seliger, 2016). Dördüncü sanayi devrimi ve altında yatan Endüstri 4.0 olarak bilinen dijital dönüşüm, hızla

ilerlemektedir. Dijital devrim, bireylerin yaşam tarzını ve çalışma şeklini kökten yeniden şekillendiriyor ve toplum, Endüstri 4.0'ın sürdürülebilirlik için sunabileceği fırsatlar konusunda iyimserliğini sürdürmektedir (Ghobakhloo, 2020).

Özetle konumuz açısından önemli olan inovasyon bağlamında değerlendirildiğinde döngüsel ekonomiye geçişin yenilikçi iş modelleri ve teknolojilerini geliştirmeyi teşvik ettiği söylenebilir. Malzemelerin yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve kazanımı için yeni teknolojilerin geliştirilmesini teşvik eden döngüsel ekonomi aynı zamanda ürün tasarımında da değişiklikleri gerektirebilir. Ürünlerin bakım ve onarımı daha kolay hale getirilerek kullanım ömürlerinin uzatılması sağlanır ve bu sayede ürünlerin yaşam döngüsü uzatılarak kaynakların etkin kullanımı sağlanabilir.

2.3. Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Endüstri 4.0

Ürünlerin yaşam döngülerinin kısalması, tüketicilerin daha büyük miktarlarda daha karmaşık, benzersiz ürünler talep etmesi gibi 21. yüzyılın eğilimleri, üretim açısından birçok zorluğu beraberinde getirmiştir. Kaynak kullanımındaki mevcut uygulamaların sürdürülebilir olmadığını, üretimi sınırlayacağını gösteren birçok işaret bulunmaktadır. Sanayi sektörü, üretimde büyük bir paradigma değişiminden geçmektedir. Geleneksel, merkezi olarak kontrol edilen ve izlenen süreçlerin yerini, kendi kendini düzenleme yeteneğine sahip ürünlerin ve iş parçalarının birbirleriyle iletişim kurduğu ve merkezi olmayan kontrol sistemlerinin hâkim olduğu bir yapı almaktadır (Gubán & Kovács, 2017: 112). Endüstri 4.0 üretimde dijitalleşme ve otomasyonun yoğun şekilde kullanılmasıyla karakterize edilen bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Bu dönüşüm, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği, yapay zekâ, robotik ve bulut bilişim gibi yeni teknolojilerin entegrasyonu ile gerçekleşir. Bu teknolojilerin etkisiyle her geçen gün daha fazla veri üretilmekte ve her yeni veri, üretilen her ürün veya hizmetin oluşum sürecinde önemli bir rol oynamakta ve sürece yeni bir yön vermektedir. Bu durumda ortaya çıkan yeni bir ihtiyaç ise Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi olarak karşımıza çıkmaktadır (Çalışkan & Yüksel, 2021: 1481).

PLM ve Endüstri 4.0, günümüzde işletmelerin ürünlerini daha etkin bir şekilde yönetmelerine ve üretim süreçlerini iyileştirmelerine olanak tanıyan önemli kavramlardır. Küresel pazarda rekabet edebilmek için, kuruluşların ürün geliştirme sürecini kaynak ve zaman açısından etkin bir şekilde yönetebilmesi, yalnızca ortak bir platformda mümkündür. Bu platform, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (Product Lifecycle Management - PLM) olarak bilinir. PLM, ürün oluşum süreçlerinin temelini oluşturarak, sunduğu bilgi teknolojisi çözümleriyle ürüne ait proseslerin optimize edilmesinde önemli bir rol oynar. Endüstrinin çeşitli sektörlerinde, otomotivden sağlık sektörüne, büyük ölçekli işletmelerden küçük ve orta ölçekli işletmelere kadar geniş bir yelpazede PLM uygulamaları etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, mega yapı projelerinden

havacılık ve uzay endüstrisine, savunma sanayisinden ambalaj sektörüne kadar çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sayer & Ülker, 2014: 66).

PLM'de, ürüne ait tüm mühendislik, imalat, servis ve atık değerlendirme aşamaları dijital olarak saklanır, denetlenir ve farklı kullanıcı profillerine sunulur. Bu sayede, ürün geliştirme süreci daha etkin bir şekilde yönetilerek, küresel pazarda rekabet avantajı elde edilir (Sayer & Ülker, 2014: 66). Endüstri 4.0'ın temel hedefleri arasında üretkenliği artırmak, üretim süreçlerini esnek hale getirmek, maliyetleri düşürmek ve müşteriye özelleştirilmiş ürünler sunmak yer alır. PLM ise bir ürünün başlangıcından sonuna kadar olan sürecin planlanması, izlenmesi, kontrol edilmesi ve optimize edilmesini ifade etmektedir. Bu süreç, ürünün tasarımından üretimine, dağıtımından kullanım ömrünün sonuna kadar olan her aşamayı kapsamaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte, PLM süreçleri daha akıllı ve otomatik hale getirilir. Örneğin, IoT sensörleri ürünlerin performansını gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve bu veriler analiz edilerek ürünlerin daha verimli ve etkin bir şekilde yönetilmesi sağlanabilir. Ayrıca, yapay zekâ ve büyük veri analitiği kullanılarak ürün tasarımı ve yenileme süreçleri optimize edilebilir. Kısacası PLM ve Endüstri 4.0 birlikte çalışarak işletmelere daha sürdürülebilir, verimli ve rekabetçi üretim süreçleri sağlar. Bu kavramlar, işletmelerin daha iyi kararlar almasını ve müşteri ihtiyaçlarına daha iyi cevap vermesini sağlayarak rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olur.

3. ENDÜSTRİ 4.0 BAĞLAMINDA YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİLERİNİN DÖNGÜSEL EKONOMİ VE ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ YÖNETİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

PLM uygulamaları, bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere paralel olarak 1980'li yıllara kadar uzanmaktadır. Sanayi ürünlerinin tasarımı ve imalatıyla ilgili bilgi verilerinin erişilebilir olması, 2D ve 3D CAD çizimlerinin dijital ortamda kaydedilmesi, depolanması ve düzenlenmesiyle başlamıştır. Bu dijital veriler, tasarım ve imalat süreçlerinde bilgisayarların kullanımını mümkün kılmıştır (Özden, 2016: 37). Endüstri 4.0 devrimi ve bilgi teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte, literatürde PLM uygulamalarına dair örneklerin sayısında artış gözlemlenmektedir. Endüstri 4.0 odaklı yaklaşımlarla üretim sürecinde simülasyonlar gerçekleştirilirken CAD verileri elde edilmekte ve makineler arası iletişim ile makine öğrenmesi kullanılarak yeni veriler üretilmektedir. Müşterilerin ürünü kullanımı sırasında bakım verileri tahmin edilerek servis önerileri geliştirilmektedir. Verinin hızla artması, ürün yaşam döngüsünün etkin bir şekilde yönetilmesini zorunlu hale getirmektedir (Çalışkan & Yüksel, 2021: 1482).

Endüstri 4.0, dijitalleşmenin ve otomasyonun sanayideki yaygın kullanımını ifade ederken, döngüsel ekonomi ve ürün yaşam döngüsü yönetimi gibi sürdürülebilirlik odaklı konuları da etkileyen önemli bir kavramdır. Yapay zekâ teknolojileri ise Endüstri 4.0'ın

önemli bileşenlerinden biridir ve iş süreçlerini optimize etme, verimliliği artırma ve veri analitiği gibi alanlarda büyük potansiyele sahiptir. Bu teknolojilerin döngüsel ekonomi ve ürün yaşam döngüsü yönetimi üzerindeki etkilerini değerlendirildiğinde; verimlilik artışı, tasarım ve üretim süreçlerinde iyileşmeler, gerçek zamanlı takip ve analiz, etkin kaynak kullanımı, yeniden kullanım ve geri dönüşüm imkânları gibi birçok faydasının olduğu söylenebilir.

Karmaşık ve büyük ölçekli sanayi ürünlerinin üretimi ve işletilmesinde, özellikle uçak, gemi ve uzay aracı gibi alanlarda, çok uluslu işbirliği kaçınılmazdır. Bu işbirliği finansal, siyasal ve pazarlama açılarından önemlidir. Bu tür durumlarda PDM, PLM ve Endüstri 4.0 uygulamalarının kullanılması daha iyi sonuçlar doğurabilir. Buna örnek olarak, Avrupa ülkelerinin uçak üretiminde farklı ülkelerde üretilen parçaların bir merkezde birleştirildiği durumlar verilebilir (Airbus ve NATO askeri jetleri gibi projeler).

Bu tür çokuluslu şirketlerin ürettikleri hava araçları, PLM uygulamaları ile gerçekleştirilir. Sonuç olarak, karmaşık ve çoklu tedarik zincirlerinin yönetilmesinde ve işbirliği gerektiren projelerin koordinasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Özden, 2016: 38).

3.1. Savunma ve Havacılık Sanayiinde Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ve Yenilikçi Süreçlerin Döngüsel Ekonomiye Potansiyel Katkıları

Savunma ve Havacılık sanayiinde üretilen ürünlerin tasarımında malzeme optimizasyonu sağlanabilmesi adına önemli bir potansiyel sağlayan inovatif uygulamalar ile ürünler daha verimli ve çevre dostu hale gelebilir. Ayrıca endüstride kullanılan parçaların onarım ve bakım yönetiminde de dijital uygulamalar son derece önemlidir. Nitekim PLM, ürünlerin kullanım ömrünün uzatılabilmesi adına düzenli onarım ve bakım süreçlerinin yönetimini ifade etmektedir. Bir ürünün yaşam döngüsü sonlandığında da geri dönüşüm, malzeme geri kazanımı gibi süreçlerle de atık minimizasyonu hedeflenerek kaynakların yeniden kullanımı sağlanabilir. Endüstride yapay zekâ kullanılan üretim süreçlerinin optimizasyonu sayesinde daha az enerji kullanımı sağlanabilir ve ürünlerin daha kaliteli üretilmesine de katkı sağlanabilir. Yapay zekanın kullanıldığı tahminleme modelleri ve veri analitiği sayesinde bakım süreçleri daha rasyonel planlanarak malzeme kullanımında optimizasyon sağlanabilir. Endüstride kullanılacak enerji kaynaklarının çevre dostu olması döngüsel ekonominin amaçlarına ulaşmaya da katkı sağlayacaktır. Temiz teknolojilerin benimsenmesi açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son derece önemli konulardan biridir. Burada bir dizi örneği verilen uygulamalar ve bunlara ek olarak potansiyel inovatif uygulamaların genişlemesi ve yayılması endüstride döngüsel ekonominin ve PLM'in birlikte uygulanabilirliğinin temel faydalarını da ifade etmektedir. Bu temel konuların bütünleşmiş bir biçimde ele alındığı çalışmalar endüstrinin oluşturacağı çevresel etkilerin

azaltılmasına katkı sağlayarak sürdürülebilirlik açısından önemli bir bakış açısı yaratabilecektir.

3.2. Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ile Gereksinim Yönetiminin Savunma ve Havacılık Özelindeki Faydaları

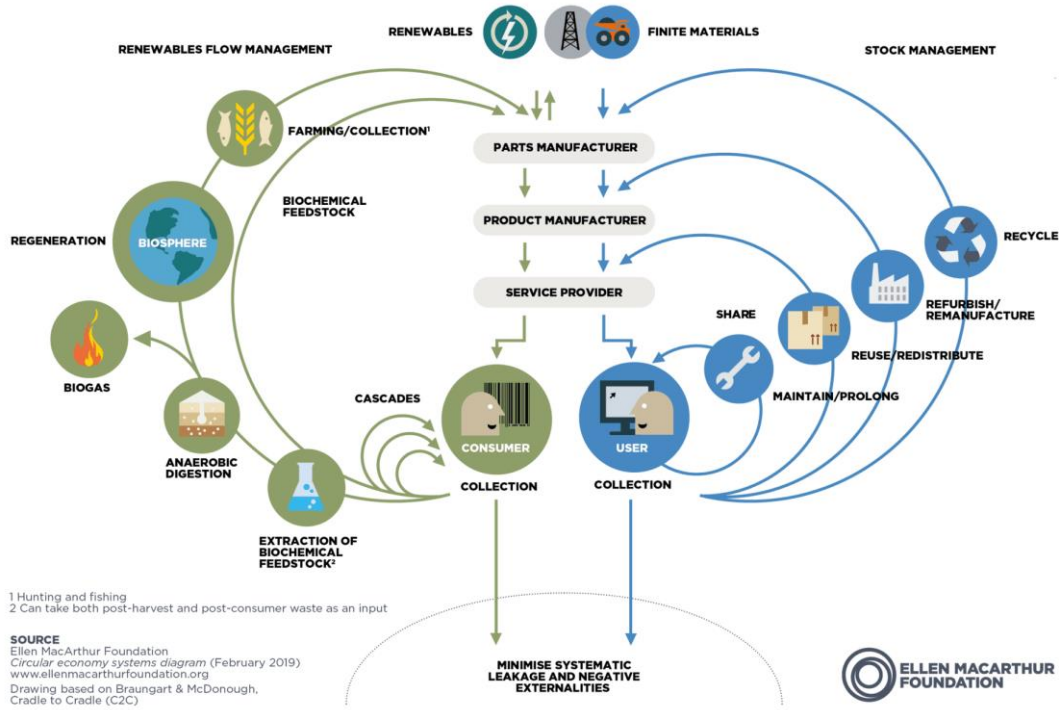
Havacılık, otomotiv ve gemi inşaatı gibi endüstrilerde ürün yaşam döngüsü süreçleri, çok boyutlu ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Pazar koşulları, rekabet şartları ve çevresel faktörler, bu süreçlerin bir parçası olarak ele alınmaktadır. Ürün yaşam döngüsü süreçlerinde karşılaşılan bazı teknik ve ekonomik zorluklar, geleneksel çözüm yöntemleriyle çözülemeyebilir. Sanayi ürünlerinin üretim sistemindeki sorunların üstesinden gelmek için günümüz teknolojilerinin, yeni tekniklerinin, yöntemlerinin ve yazılımlarının kullanılması önerilmektedir. Yeni nesil bilgisayar destekli yönetimsel uygulamalar, özellikle PLM gibi, ürün ve üretim kalitesinin artırılması ve karlılığın artırılmasında tercih edilmektedir (Özden, 2016: 35).

Sektörün üretmiş olduğu ürünlerin karmaşıklığı ve ihtiyaçların zor belirlenmesi nedeniyle, havacılık ve savunma sanayi ürünlerinde, fiziki prototiplerin ve test ekipmanlarının (ekipman, sistem ve uçak) çok fazla sayıda üretildiği ve hurdaya ayrıldığı bilinmektedir. Bu durum ana sebebi, müşteri ya da kullanıcının belirlemiş olduğu işlevsellik ve operasyonel yeterliliğin sağlanabilirliğinin zor olması ya da havacılık yönergeleri doğrultusunda üretilecek olan ürünün, ilk aşamalarındaki ürün prototiplerinde bu standartları yakalayamaması olarak belirlenebilir. Ürünün müşteri/kullanıcı isteklerini yerine getirebilecek şekilde, ayrıca tüm standartlara/kurallara uygun üretiminin ve tasarımının gerçekleşmesi, bu denli karmaşık ve detaylı sistemler bütünü için zorlayıcı bir meydan okumadır. Bu nedenle, havacılık ve savunma sektöründe kaynak (ekonomi, insan gücü, zaman, hammadde vb.) tüketimi de vahim şekilde artmaktadır.

Bu aşamada, PLM araçlarından, gereksinim yönetimi ve proje yönetimi gibi tasarım öncesi aşamalarda, daha ürün üretilmeden ve tasarlanmadan, ürünün doğru şekilde anlaşılmasına, kaynakların doğru bir şekilde kullanılmasına, ihtiyaçların ve gereksinimlerin belirgin şekilde oluşturulmasına imkân tanıyan yenilikçi araçlardan faydalanılabilmektedir. Bunlar ile model tabanlı sistem mühendisliği² uygulamaları sayesinde çok daha akıllı sistem ve gereksinim modellemeleri yapılarak, ihtiyaçların karşılanıp karşılanmadığı ve sistemlerin doğru çalışıp çalışmadığı, matematiksel ve fonksiyonel altyapıda doğrulanabilmekte ve dijital ortamlarda etkin analizler yapılabilmektedir. Bu sayede, ürünlerdeki yanlış üretimlerin, hatalı prototiplerin, eksik

² **Model Tabanlı Sistem Mühendisliği:** bir sistemin farklı yönlerini temsil etmek için modelleri kullanan bir sistem mühendisliği yaklaşımıdır. Bu modeller, sistemin davranışını, işlevlerini ve fiziksel özelliklerini yakalamak için kullanılır (INCOSE, 2015: 189).

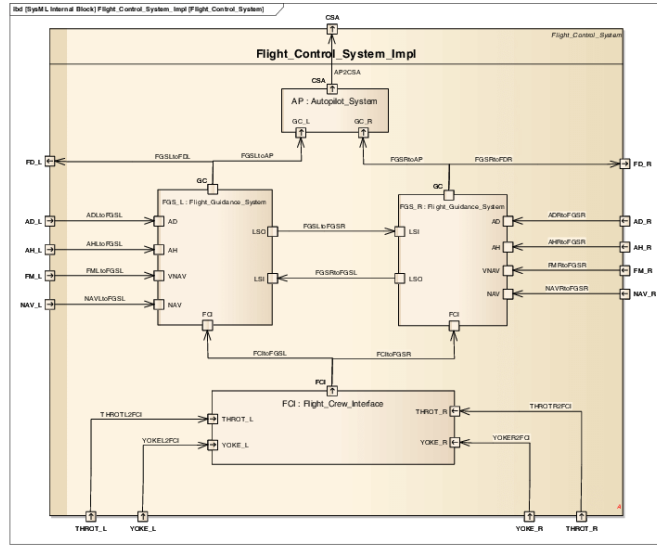
sistem ve ekipmanların üretilmesinin yüksek oranda önüne geçilebilmekte hatta dijital kuş olarak da adlandırılan bir sanal prototipleme ile sanal ortamda çok sayıda test gerçekleştirilebilmektedir (Siemens, 2015: 1-11). PLM ve Model Tabanlı Sistem Mühendisliği sayesinde, döngüsel ekonomi çerçevesinde, ürünün çok daha hızlı ve daha az prototipleme ile üretilmesinin, kaynak tüketiminin azaltılmasında oldukça fazla fayda sağladığı ispatlanmaktadır.



Şekil 1: Ellen MacArthur Foundation Döngüsel Ekonomi Sistem Diyagramı

Kaynak: The Ellen MacArthur Foundation, 2019.

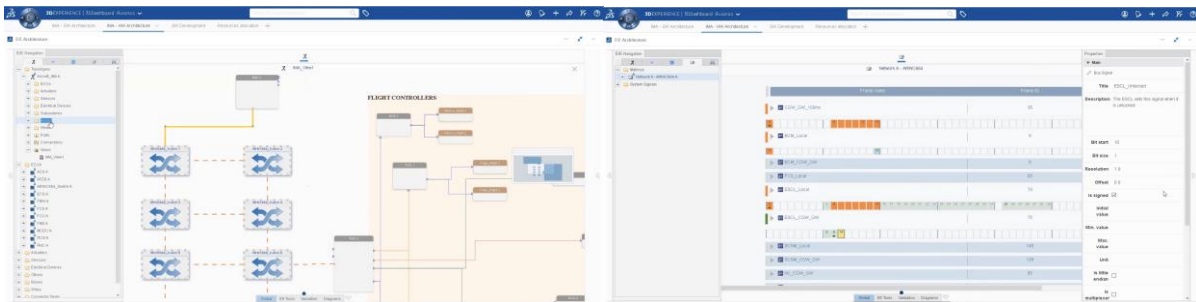
Ayrıca, model tabanlı sistem mühendisliği ve PLM sayesinde, yeni ürün prototipleme ve üretme kısımlarında, ürünün bir önceki sistem modellerinden yararlanılarak, yeni versiyon ile üretilecek üründe, birçok ekipmanın (ekipman altındaki bileşenlerin) “Ellen MacArthur Kelebek Model (Şekil)” diyagramında “Yeniden Kullanım” ve “Yenileme” aşamalarına uygun şekilde yeniden kullanılmasına imkan tanımaktadır.



Şekil 2: Uçuş Kontrol Sistem Modelleri (SysML MBSE)

Kaynak: Cofer, Gacek, Miller, Whalen, LaValley & Sha, 2022: 13.

Geçmiş nesildeki hava araçlarında kullanılan bazı bileşenler, Model Tabanlı Sistem Mühendisliğindeki, sistem modellerinin (Şekil), yeni gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını doğrulayarak, yeniden kullanılabilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu yapıların iterasyon (yineleme) süreçlerinde ise, yapay zekâ destekli araçlar kullanılmaktadır. Bu sayede en optimum tasarım ve mimariler ile, geçmiş sistem modelleri arasından en uygun olanlar seçilebilmektedir (Örn: SpaceX firmasının yeniden kullanılabilir roketinin tüm olasılıklar ile tekrarlı ve değişken parametreler ile doğrulanması (Ackley, 2023).



Şekil 3: Uçuş Aviyonik3 Yazılım ve Ağ Mimarileri

Kaynak: 3DExperience Dassault Systemes, 2023.

³ (İngilizce Avionics: Aviation Electronics) havacılıkta uçaklar, yapay uydular ve uzay araçlarının elektronik sistemleri için kullanılan terimdir.

4. TÜRK SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİİNDE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ İNOVASYON VE UYGULAMA STRATEJİLERİ

PLM, proje planlama, tasarım, imalat, pazarlama, kullanım, bakım-onarım ve hurdalama gibi ürün yaşam döngüsü süreçlerini optimize eden bir organizasyon yazılımıdır. Bu yazılım, genellikle PDM (Ürün Veri Yönetimi) ve PLM yazılımlarına entegre edilen hesaplama, tasarım, analiz ve simülasyon gibi birçok programı içerir. Endüstriyel mal ve hizmet üretiminde, bu yazılımların tek başlarına değil, PLM yazılımı içinde kullanılmaları daha yaygındır. PLM yazılımları, ürün yaşam döngüsü süreçlerini optimize etmeyi amaçlar ve bu alandaki gelişmeler devam etmektedir. Günümüzde, belirli ürünlere özgü olarak geliştirilmiş PDM ve PLM yazılımları bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak CAS (Computer-Aided Styling), CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Manufacturing), VIS (Visualization), PLM (Product Lifecycle Management), PIM (Production Information Management), CIS (Customer Information System), CRM (Customer Relationship Management) ERP (Enterprise Ressource Planning) ve MIS (Marketing Information System) verilebilir (Eigner & Stelzer, 2009).

Savunma sanayiindeki yatırımlar ekonomik, politik ve stratejik birçok faktörden etkilenmelerinin yanı sıra bu alandaki gelişmeler toplumları sosyal ve ekonomik anlamda etkilemektedir (Kar & Çetenak, 2022: 587; Braurer, 1991: 874). Bu alanda meydana gelecek gelişmeler ileri teknolojilerin, özellikle yapay zekâ, otonom sistemler ve dijitalleşme olguları üzerindeki ilerlemelere paralel sürdürülmelidir. Savunma ve havacılık sanayiindeki uygulamaların daha etkin ve verimli hale gelmesi bu ilerlemelerin takip edilmesine bağlı bulunmaktadır. Bu alandaki yeni teknolojilerin takip edilmesi operasyonel avantajlar sağlayabilecek potansiyeller yaratacaktır. Örneğin insansız hava araçları (İHA) ve otonom sistemler, zorlu ortamlar ya da riskli bölgelerdeki operasyonlarda avantaj sağlamaktadır.

Türk Savunma Sanayii ilk kez 5. Kalkınma Planı'nda (1985-1989) yer almış olmasına rağmen, benzer hedefler 11. Kalkınma Planı'na (2019-2023) kadar tüm kalkınma planlarında ilişkin yer almıştır. 11. Kalkınma Planı'nda diğerlerinden farklı olarak, Savunma Sanayii diğer kalkınma hedeflerinden ayrı bir başlık altında ele alınmıştır. Temel amaç, savunma sanayi ekosistemini güçlendirmek ve savunma sanayiinde kazanılan becerilerin sivil sektöre yayılmasını sağlamak olarak belirlenmiştir. Ayrıca Savunma Sanayii Akademisi aracılığıyla eğitim verilerek teknolojiye olan ilgi ve yatınlığın artırılması hedeflenmektedir. Teknoloji bağlamında bir diğer hedef ise bu sanayideki kritik teknolojilerde tamamen milli savunma sanayii oluşturabilmek için temel ve ileri teknolojilere odaklı proje ve yatırımların gerçekleştirilmesi ve desteklenmesi yönündedir (Kalkınma Bakanlığı, 2019: 93).

Savunma ve havacılık sanayinde Endüstri 4.0 kavramı üretimden lojistiğe, bakımdan karar destek sistemlerine kadar geniş bir yelpazede uygulanmaktadır. Bu, üretim süreçlerini daha esnek ve verimli hale getirebilir, kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlayabilir ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini teşvik edebilir. Ayrıca, güvenlik ve veri bütünlüğü gibi kritik konuları da ele alırken, sürekli izleme ve analiz imkânı sağlar. Bu nedenle, savunma ve havacılık sanayindeki gelişmelerin Endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilmesi, sektördeki dönüşümün daha iyi anlaşılmasını ve daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Araştırmanın bu kısmında Endüstri 4.0 bağlamında oluşan yapay zekâ destekli inovasyon uygulama örnekleri açıklanmaktadır.

4.1. Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi ile 3 Boyutlu Modelleme, Analiz ve Optimizasyonun Savunma ve Havacılık Özelindeki Faydaları

Havacılık ve Savunma Sanayi ürünlerinde, özellikle havacılık kolunda üretilen ürünlerde (sabit kanat, döner kanat, uzay aracı vb.), hafiflik ile dayanıklı malzeme kullanımı ve tasarımı büyük önem arz etmektedir. Buna ek olarak, bakım ve işçiliğin hızlı ve parça değiştirilmesinin kolay olması gerekmektedir. Çünkü havacılık sektöründe, parçaların ömürleri belli bir süre/kullanım ile ölçülür ve zamanı gelen parça sağlam olsa dahi değiştirilmelidir. Bu nedenle, bakım, montaj ve de-montajın kolay olması gerekmektedir. Döngüsel ekonomik modelde, malzeme kullanımının, yani kaynak kullanımanın azaltılması, havacılıktaki ağırlık kullanımının azaltılması ile eşleşmektedir. Yine döngüsel ekonomi modelindeki, kolay idame ettirebilir olan ürün, bakımı yapılan ürünlerdeki kullanım ömrünün uzaması da aynı şekilde, havacılıktaki yüksek maliyetler nedeniyle uzun ömürlü kullanıma katkı sağlamaktadır.

PLM Sistemleri, bu isterler için üretilecek ürünlere ve döngüsel ekonomiye, özelleştirilmiş tasarım, analiz ve üretim araçları ile büyük katkılar sağlamaktadırlar. Bu sistemler, mühendislerin tasarım ve analizlerine, üretim planlamaya, malzeme kullanımı ve geri dönüşüm gibi birçok alanda, yeri geldiğinde yapay zekâ, yeri geldiğinde öngörebilme tüm bu süreçlerde ve süreçler arası izlenebilirlik gibi yetenekler ile havacılık ve savunma sanayi ürünlerine değer katmakta ve döngüsel ekonomik modele uygun ürünlerin meydana gelmesine imkân vermektedir. Aşağıdaki kısımda bu süreçler açıklanmaktadır.

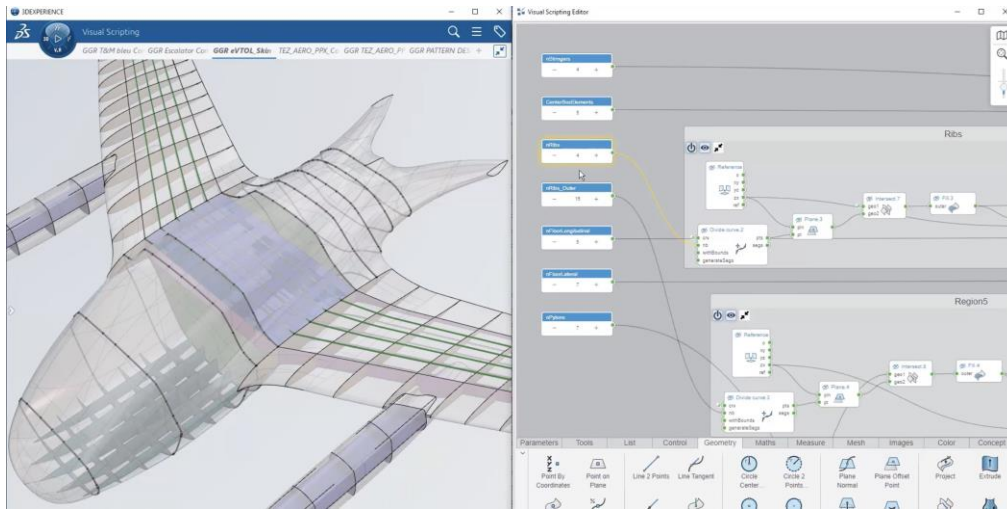
4.1.1. Tasarım ve Yapay Zekâ Destekli Optimizasyon

Havacılık sektöründeki karmaşık ve fazla gereksinime sahip ekipman, bileşen ve yapısal parçaların tasarlanması oldukça zorlu ve zaman alıcı bir süreçte sahiptir. Bu parçalar, birçok gereksinimi karşılayacak şekilde ve belirli standartlara uygun bir biçimde tasarlanmalıdırlar. Tasarımlar yapılırken, analiz ve tasarım mühendisliği arasında onlarca

iterasyon yani döngü olmakta, parça nihai ve optimum olgunluk seviyesine gelip, üretime aktarılana kadar geçen süreç uzamakta ve hatalara sebep vermektedir. Ayrıca, üretilen parçaların gelecek hava aracı prototiplerinde ağırlık azaltma vb. süreçlere dahil olması gerekmekte, bu da tasarımı yeniden döngülere sokmaktadır.

PLM Sistemlerinde yer alan analiz destekli yapay zeka ile tasarım araçları sayesinde, bir mühendisin tasarlamış olduğu konsept bir yapısal ya da fonksiyonel bir ekipmanın, belli sınır şartları ve gereksinim koşulları, tasarım programına tanımlandıktan sonra, bilgisayar destekli yapay zeka sayesinde, tasarım üzerine gelen yükleri ya da koşulları karşılayacak durumlara göre bir tasarım optimizasyonu yapılabilmektedir. Bu optimizasyon sonucunda, üretim metodolojisine (eklemeli üretim, talaşlı üretim, döküm vb.) göre seçimler yapılarak parçalarda, %50 oranlarında (Airbus & Dassault Systemes, 2019) parça hafifletilmesi ve malzeme kullanımında 6:1 (hammadde: ürün) oranından 3:1 oranına düşüş sağlanabilmektedir (Şekil 3)(Şekil 4)(Şekil 5).

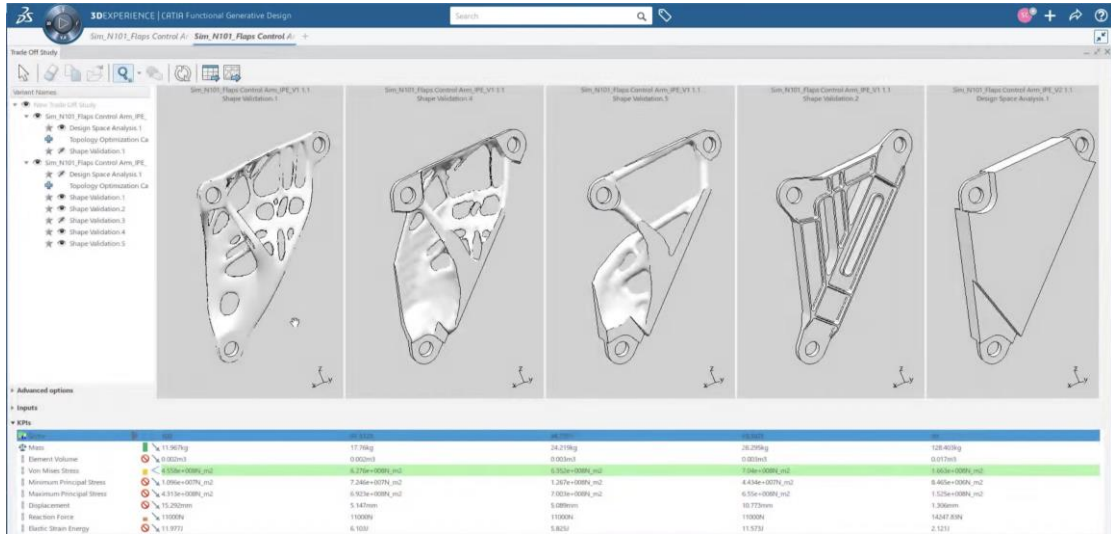
Bunlara ek olarak, daha hızlı ve tekrarlı ürün tasarımlarında en uygun ürün konsept tasarımını sağlamak için, yazılım ve algoritma tabanlı tasarım araçları ile, yüksek hızda kavramsal tasarımlar yapılabilmektedir. Bu araçlar sayesinde ürünler, daha çabuk ve daha az karmaşıklık ile tasarlanabilmektedir.



Şekil 4: Yazılım ve Algoritma Tabanlı Tasarım Yapısı*

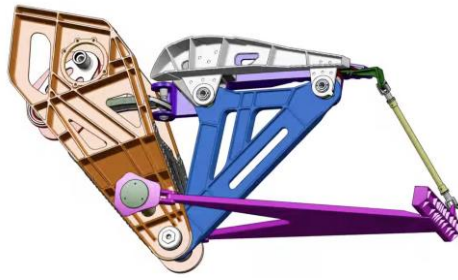
*Değişkenleri belirlenmiş bir tasarımda, en optimum ürünü tasarlamak için, belirli gereksinim koşullarının tanımlandığı ve bu gereksinim sınırlarındaki parametrik optimum yapay zeka destekli tasarım aracı. Örn. Kanat yapısal elemanlarının (rib, spar ve stringer) gereksinimler dahilinde kodlanmış tasarıma göre adet ve tasarımının belirlenmesi (Airbus & Dassault Systemes, 2019).

Bu durumun sonucu olarak hem zaman hem de kaynaktan tasarruf sağlanması, ekonomik açıdan ürünlerin daha sürdürülebilir olmasına imkân tanımaktadır.



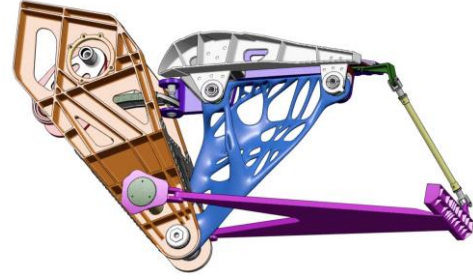
Şekil 5: İmalat Türlerine Göre AI Tasarım Optimizasyon Sonuçları

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.



Şekil 6: Konsept Tasarım

(İniş Takımı Mekanizması)



Şekil 7: AI Tasarım Optimizasyonu

(İniş Takımı Mekanizması)

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.

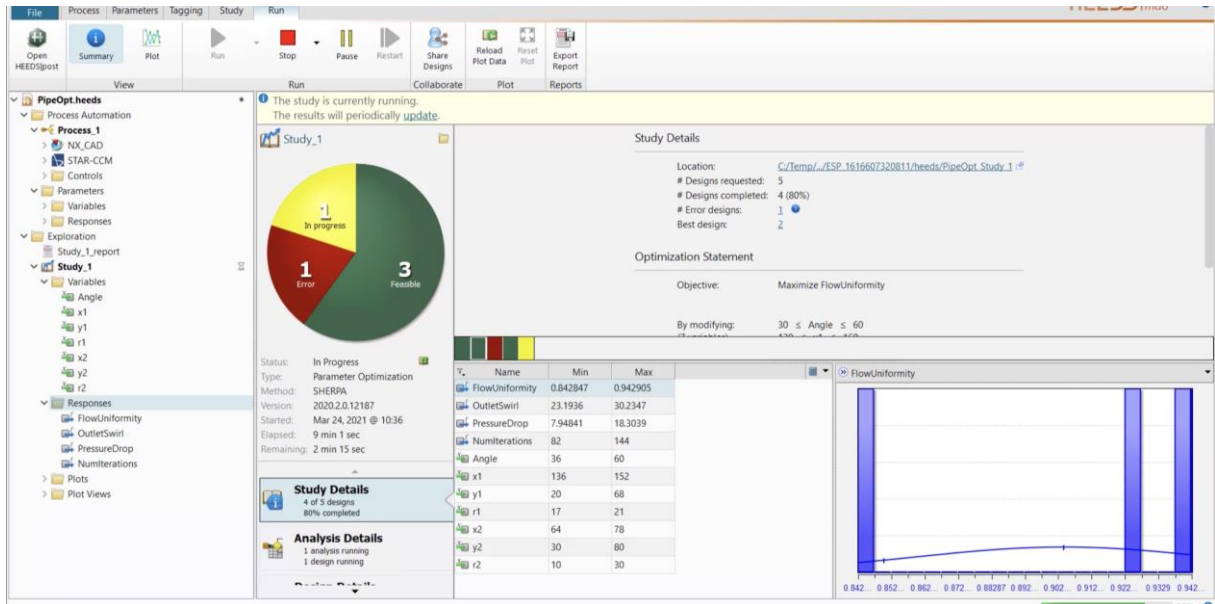
3.1.2. Analiz, Sanal Ön Sezi ve Sanal Sistem Doğrulama

Havacılık ve Savunma sanayisinde ürün tasarımı ve prototip hazırlığı sonrasında, birçok test döngüsü (Mantıksal Analizler, Matematiksel Analizler, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizleri vb.) gerçekleştirilir, bu süreç boyunca çok fazla sayıda veri üretilir. Bu testler, farklı örnekleme oranlarında ölçülen birden fazla değişkeni içerebilir ve çeşitli ürün varyantları için yapılır. (Örneğin, Blok 0 KAA, Blok 10 KAA TF-X uçak varyantları gibi)

Başarılı ve başarısız test sonuçlarını karşılaştırarak tasarımı geliştirmek, veri ön işleme, görselleştirme ve çıkarım yapmak gibi çok adımlı bir süreçtir. Bu süreç özellikle hava araçlarının tasarımlarında çok fazla tekrar içerebilir, ancak bu, ürün kalitesini

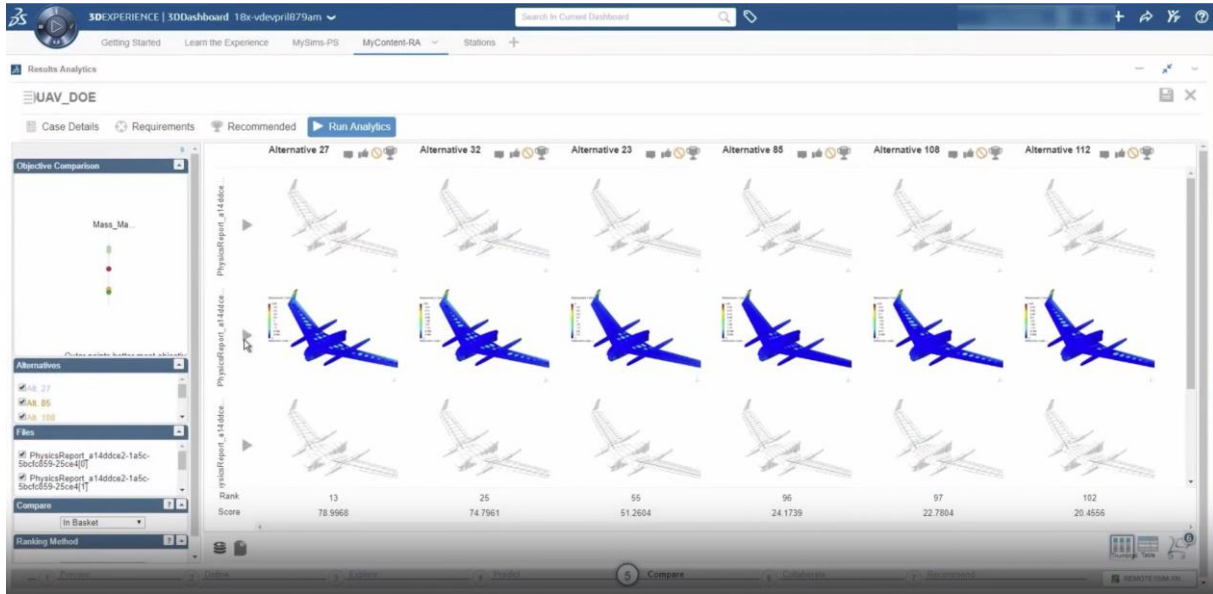
artırmak için önemlidir. Diğer durumlarda ise her yeni bilgi güncellemesi değerlidir. Makine öğrenimi algoritmaları ve PLM sayesinde bu veriler çok daha anlamlı ve sistemli bir hale gelebilmektedir. Bu kazanım ile, yapısal, ekipman ve sistem mimari tasarımları hızlı ve çok daha kaliteli olabilmektedirler.

Herhangi bir anomali tespiti ve zaman içinde ölçeklenen sinyallerin işlenmesi için algoritmalar PLM ortamında oldukça gelişmiştir ve özelleştirilebilir. Bu, tekrarlayan süreç ve görevler otomatikleştirmek (Şekil 8) (tasarım, gereksinim kontrolü vs.) ve bilgi paylaşımını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, ürün tasarımı ve üretim ekipleri arasında çok daha verimli iş birliği ortamı sağlayabilmekte, hataları minimize etmektedir.



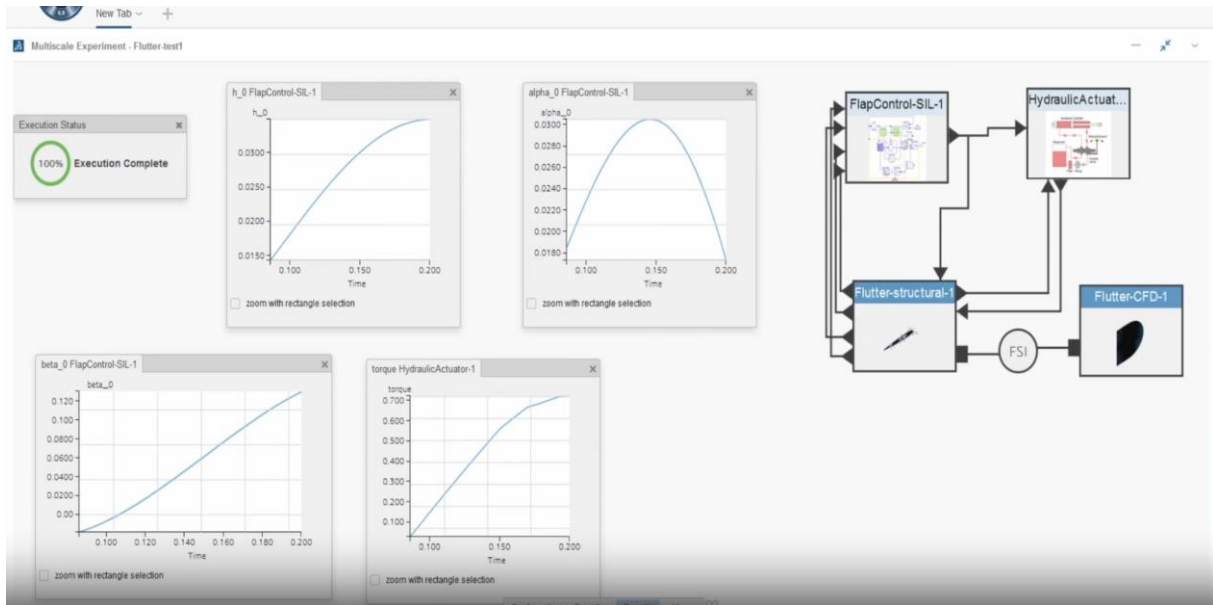
Şekil 8: Otomatikleştirilmiş bir tasarım optimizasyonu çalışması örneği*

*Tasarım girdileri (kalınlık, çap, büküm açısı vs.), gereksinim sınırları (maksimum 10mm, minimum 1mm kalınlık) ve analiz koşulları (400kmh uçuş süratindeki sürtünme bölgelerindeki iyileştirme) ile otomatikleştirilmiş bir tasarım optimizasyonu çalışması örneği (Siemens, 2015).



Şekil 9: Hava Aracı tasarım ve analiz optimizasyonu sonuç puan karşılaştırma örneği

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.



Şekil 10: Bir kanat "Flap" tasarımında, çoklu disipline sahip (elektronik, hidrolik, yapısal ve mekanik) modellemelerin karşılaştırmalı optimizasyon çalışması örneği

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.

⁴ Flaplar; uçakların genellikle kanat fılar kenarında bulunan, kanat kamburluğunu artırarak öncelikle taşıma kuvvetini ve kısmen de sürüklemeyi artıran kumanda yüzeyleri. Flaplar uçuşun, özellikle iniş ve kalkış gibi düşük süratlerde daha yüksek taşıma kuvvetine ihtiyaç duyulan safhalarında kullanılırlar (Perkins & Hage, 1949: 20).

Tüm bu gelişmiş yapay zekâ ve bilgisayar öğrenmesi destekli yetenekler, döngüsel ekonomi modelindeki, uzun ömürlü ürün, daha az fire (hammadde kullanımı), sanal prototipleme ve validasyon (doğrulama) sayesinde, enerji, mamul ve iş gücü tüketimi oldukça azaltılmaktadır.

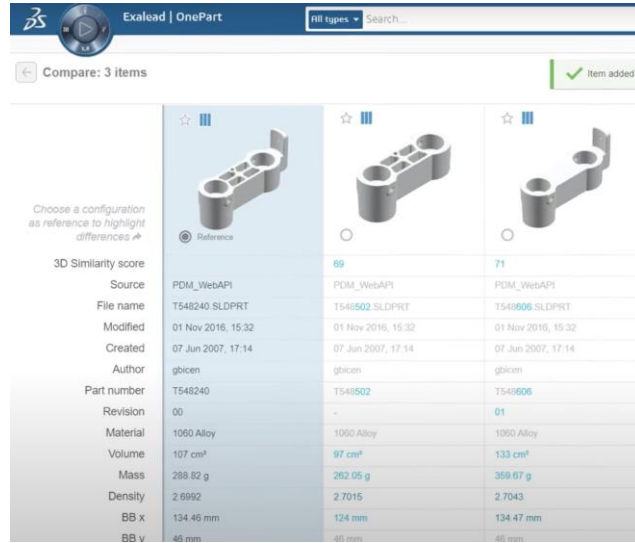
4.1.3. Sanal Görüntü İşleme ile Yeniden Kullanılabilirlik

Savunma sanayi ve havacılık ürünlerinde kullanılan ekipmanlar ve standart parçaların adetleri ve çeşitleri çok fazladır. Bir ürün üzerinde binlerce aynı türden bağlayıcı eleman olabileceği gibi, onlarca farklı türden ama aynı fonksiyonu yerine getiren braket ve sabitleme elemanları olabilmektedir. Tasarımcılar, sistemlerin yerleşimlerini tasarlarken, hava aracı yapısal iskeletlerinin üzerine inşa edecek şekilde tasarımlarını yaparlar, bu yapısal iskeletlere, bağlayıcıları ya da braketleri kullanarak, hava aracının kabuğunu (skin) ya da ekipmanları sabitlerler. Ancak, özellikle son teknolojik gelişmeler ile ve askeri amaçlar ile üretilen hava araçlarında kullanılan ekipman ve sistemlerin sayısı fazlaca artmıştır. Bu araçlar gök yüzünde ilerleyen süper bilgisayar ve sensörler bütününe dönmüşlerdir. Daha iyi anlaşılabilmesi adına, günümüzde hemen hemen her evde yer alan Robot Süpürgelerin içerisinde bile onlarca yüksek teknoloji ekipman ve sensör yer almaktadır (LIDAR sensör, yüksek çözünürlüklü kamera, kızılötesi sensör, Wi-fi anten, Bluetooth anten vs.). Üst düzey görevleri icra etmek için geliştirilen ve zorlu koşullara uyum sağlama gereksinimleri bulunan hava araçlarında, standart parça ve bağlayıcıların adedi ve önemi fazladır.

Tasarımcıların, birçok varyasyon içeren ve sürekli değişkenlik gösteren (üretim ve analizden gelen geribildirimler nedeniyle) ürün tasarımlarını yaparken, benzer özelliklerdeki ve şekillerdeki braket vb. bağlayıcı objeleri (bir standart parça kütüphaneleri olsa bile) sıfırdan tasarlamakta, ürettirmekte ya da denemektedirler.

Hâlbuki ürünlerde, döngüsel ekonomi modeline de sadık olacak şekilde, eski veya başka projelerde kullanılmış birçok standart parçanın yeniden kullanılabilirlik oranı oldukça yüksektir. Ancak, tasarımcı ve sistem mühendisleri tarafında, geçmişe ya da yeniye dönük olarak, bu denli büyük kapasitede bir kütüphane ve erişebilirlik becerisi genellikle bulunmamaktadır.

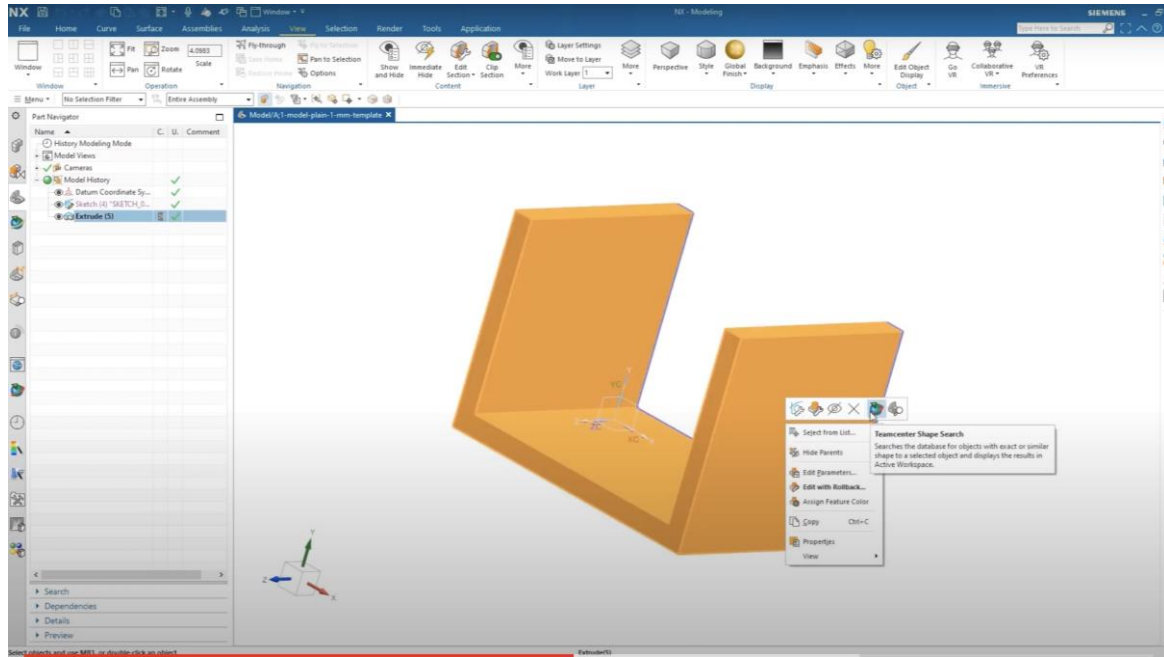
PLM sistemlerinde, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve görüntü işleme teknolojilerinin bir arada kullanıldığı, istenilen standart parçaya ve tek bir veriye erişim araçları mevcuttur. Bu araçlar sayesinde, kavramsal ya da nihai tasarımı yapılmış parçaları (bağlayıcı, tutucu, basit yapısal vs.), gelişmiş bir arama motoru sayesinde, benzer parçalar (Şekil 12) ile eşleştirerek, daha önceki ürünlerde ya da başka projelerde kullanılmış, benzer fonksiyonellikte ve özelliklerdeki (en, boy, ağırlık, çap, kalınlık, şekil vb. özellikleri analiz ederek) parçalara ulaşabilmeyi mümkün kılmaktadır (Şekil 13).



	Reference	69	71
3D Similarity score		69	71
Source	PDM_WebAPI	PDM_WebAPI	PDM_WebAPI
File name	T548240 SLDPR	T549502 SLDPR	T549606 SLDPR
Modified	01 Nov 2016, 15:32	01 Nov 2016, 15:32	01 Nov 2016, 15:32
Created	07 Jun 2007, 17:14	07 Jun 2007, 17:14	07 Jun 2007, 17:14
Author	gbcen	gbcen	gbcen
Part number	T548240	T549502	T549606
Revision	00	-	01
Material	1060 Alloy	1060 Alloy	1060 Alloy
Volume	107 cm³	97 cm³	133 cm³
Mass	288.82 g	262.05 g	359.67 g
Density	2.5992	2.7015	2.7043
BB x	134.46 mm	124 mm	134.47 mm
BB y	46 mm	45 mm	45 mm

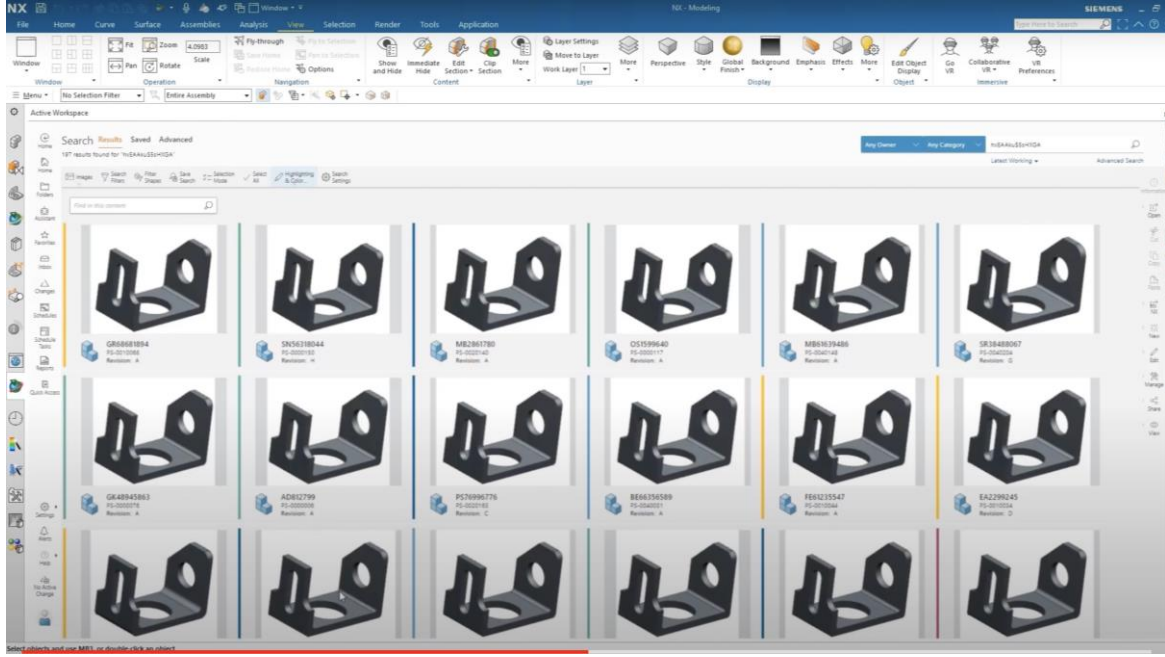
Şekil 11: 3 Boyutta benzer braketlerin karşılaştırılması örneği

Kaynak: Dassault Systemes, 2019.



Şekil 12: Kavramsal tasarımı yapılmış braket objesinin, 3 boyutlu yapay zekâ ve görüntü işleme destekli arama işlemi ve sonuçların gösterilmesi işlemi örneği

Kaynak: Siemens NX & TeamCenter®, 2022.



Şekil 12: Kavramsal tasarımı yapılmış braket objesinin, 3 boyutlu yapay zekâ ve görüntü işleme destekli arama işlemi ve sonuçların gösterilmesi işlemi örneği

Kaynak: Siemens NX & TeamCenter®, 2022.

Bu yetenekler sayesinde sonuç olarak, döngüsel ekonomi modelindeki, yeniden kullanma adımının uygulanabilirliği kolaylaşmaktadır. Ayrıca, eski projelere ait komponentlerin kullanılabilmesi, diğer kazanımlardaki gibi hammadde kullanımı ve enerji kullanımını da azaltmaktadır.

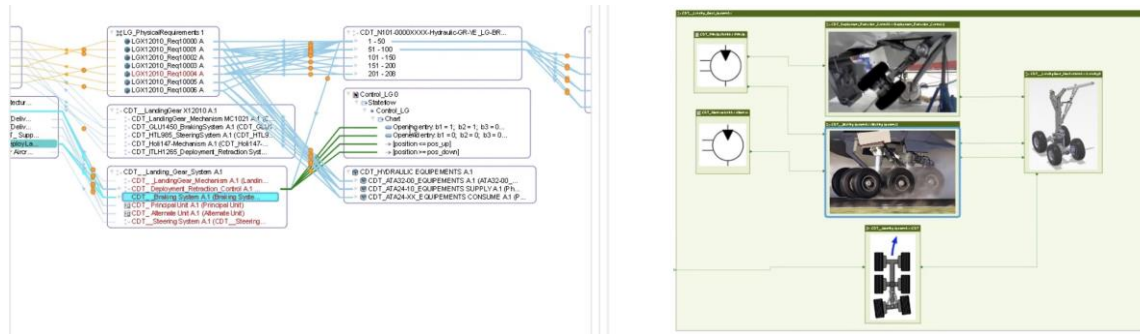
4.1.4. Süreçler Arası İzlenebilirlik ve Sezgisel Değişiklik Kontrolü

Bir hava aracındaki en önemli ve en kritik süreç değişiklik ve konfigürasyon yönetimidir. Çünkü hava araçlarında, çok karmaşık bir sistemler yapısı bulunmakta, gereksinim sayısı oldukça fazla olmakta, ürünlerin farklı konfigürasyonlarda muadilleri olmakta ve son olarak, ürünlerin hatasız olarak üretilmesi gerekmektedir.

Bu zorlukların içerisine, askeri koşullar için gereklilikler de eklendiği zaman, ürünlerde yer alan her bir tasarım ve diğer objelerin yönetilmesi karmaşık ve zor bir hal almaktadır. Hataların meydana gelmesi kolaylaşmakta ve üretimde yanlış ürün üretimi (Örneğin; hava aracına takılacak olan yapısal bir parçada, müşteri isterlerinden kaynaklı yansıtılan gereksinim değişikliğinin, tasarım objesine geç yansıtılması, üretimdeki iletişim yetersizliğinden dolayı değiştirilmemiş tasarıma göre üretilmesi ve bu yapısal objenin, kullanılmadan hurdaya ayrılması durumu gibi.) sıklıkla yapılmaktadır.

PLM sistemindeki veriler arasındaki izlenebilirlik becerisi ve yapay zekâ destekli, değişikliklerin neleri etkilediğinin haritasının çıkarılabilmesi sayesinde, gereksinim

aşamasında yansıtılan bir parametre verisinin, tasarım objesinde kullanıldığı yerde de değişmesi nedeniyle, üretim ve servis planlamaya kadar olan süreçlerdeki tüm etkilenen durumların gözlemlenebilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 13: İniş takımı modellemesi*

Kaynak: (Airbus & Dassault Systemes, 2019.)

*Bir inış takımı modellemesi ve mimari tasarımımda, RFLP⁵ (Gereksinim, Fonksiyon, Mantıksal ve Fiziksel) yapısı ile izlenebilirlik örneği, bu sayede, ürünün gereksinim koşullarında yaşanan herhangi bir değışiklik, PLM sistemindeki izlenebilirlik yeteneği sayesinde, tasarımda hangi komponentleri etkileneceğinin haritalamasına ulaşılabilmektedir.

Tüm bu faydaların sonucu olarak, hatalı ürün üretilmesi, servis parçasının yanlış gönderilmesi, ürünlerdeki değişikliklerin yönetilmemesinden kaynaklı ömür kaybı vb. durumlar azaltılmış, döngüsel ekonomik modeldeki karşılıklarına katkı sağlanmış olmaktadır.

4.1.5. Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, Savunma Sanayi ve Havacılık Sektörüne Katkılarının Diğerleri ve Gelecek Yol Haritası

Havacılık sektörünün popülaritesi her geçen gün daha da artmaktadır. Ülkelerdeki ve dünyadaki politik ve siyasi nedenlerden dolayı da havacılık ve savunma sanayi daha da ileri teknolojilere yatırımlar yapmaktadır. Tüm bu süreçler devam ederken, kaynak tüketimi her geçen gün artmakta, ancak erişilebilecek kaynak rezervleri tükenmektedir. PLM araçları sayesinde, üretimden, servis ağı ve yedek parça tedarikine kadar tüm süreçlerde verimlilik arttırmaktadır ve gelişen yapay zekâ teknolojileri sayesinde de PLM araçları akıllanmaktadır.

Dijital ikiz, sanal ürün vb. teknolojilerin PLM araçları ile önümüzdeki zamanlarda daha kolay ve işbirlikçi bir şekilde yönetilebilmesi ile havacılık için elzem olan, uçuş öncesi testlerin birçoğu prototip üretilmesine bile gerek kalmadan (kaynak ve zaman tüketimi minimum seviyede tutularak) yapılabilecektir. Aynı şekilde, sivil ve askeri

⁵ RFLP: Requirement, Functional, Logical, Physical mimari yapısının kısa adıdır.

havacılıkta yer alan birçok prosedür, norm ve standartları geçmesi gerekmekte, bu da fazla sayıda prototipleme anlamına gelmektedir. Prototipleme, ürünün üretilebilirliğinin kontrolünden, fonksiyonelliğinin test edilmesine kadar birçok süreç içi ihtiyaçtır. PLM ve Akıllı araçları sayesinde, gelecekte, tamamen sanal ortamlarda doğruluğu sağlanan hava araçlarının üretilebileceği ve doğrulama (validasyon ve verifikasyon), sertifikasyon, operasyonel yeterlilik gibi çoğu aşamayı sanal ortamda geçebileceği öngörülmektedir. Bu sayede ürünün büyük bir yüzdesi, daha fiziksel olarak meydana gelmeden, regülasyonları geçebilecek ve uçuşa elverişlilik sertifikasını almaya çok yakın bir şekilde üretilebilecektir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma ile havacılık ve uzay sanayiinde PLM uygulamalarının önemi vurgulanmıştır ve Endüstri 4.0 bağlamında uygulama örnekleri verilmiştir. Bu araştırma ile Türk havacılık ve uzay sanayiinde PLM ve Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, PLM ve Yüksek teknolojiyi yapay zekâ destekli araçlar sayesinde, gelecekte savunma ve havacılık sektöründe, döngüsel ekonominin fazlarında yer alan başlıkların büyük bir yüzdesine katkı sağlanabilecektir. Gelecekte dijital ikiz, makine öğrenmesi ve yapay zekâ gibi temaların PLM ile işbirlikçi bir şekilde çalışması, kaynakları (nakit, hammadde, insan, zaman vb.) yıkıcı bir şekilde kullanan havacılık ve savunma sanayi bünyesinde, kaynak tüketim alışkanlıklarını kritik seviyede düşüreceği öngörülmektedir.

Daha akıllı ve ekonomik modeller (zaman, kaynak ve işgücü) sayesinde, rekabetin üst düzey olduğu ve ulusal güvenliğin de ihtiyacı olan havacılık ve savunma sanayisindeki ürün üretim hızı ve maliyetleri oldukça düşürülmüştür. Bu sayede, ülkemizin silahlı kuvvetlerinin ihtiyacı olan ürünlere daha kolay ve öncelikli olarak, yerli projeler ile destek verilebilmektedir.

Yeni teknolojilerin uygulanmasının getirdiği yeni fırsatlar ve kolaylıklar genellikle bilinmektedir. Ancak, yeni teknolojilerin ve yazılım programlarının kullanımıyla, ülkelerin ve şirketlerin dışa bağımlılıklarının arttığı, serbest rekabetin azaldığı, monopolleşmenin arttığı hatta bazı durumlarda şirketleri ve ülkeleri ekonomik olarak zor duruma düşürebileceği gerçeği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum PLM ve Endüstri 4.0 yazılım uygulamaları için de geçerlidir.

Kaynak kullanımının özellikle düşüş eğilimi gösterdiği PLM destekli döngüsel ekonomik modele uygun havacılık ve savunma sanayi üretimi sayesinde, yüksek teknoloji ürünler için gerekli kritik kaynakların ve geri dönüşümü zor olan prototip üretimlerinin azaltılması sağlanarak hammadde konusunda dışa bağımlılık önemli ölçüde

azaltılmıştır. Örneğin, kompozit, titanyum vb. malzemeler kullanılarak yapılan havacılık ürünlerinin komponentleri, genel anlamda dış kaynaklar kullanılarak tedarik edilmektedir, günümüzde ise PLM'in bahsi geçen yetenekleri sayesinde tüketim ve buna bağlı dış tedarik azalmıştır.

PLM sistemleri öncelikle uzay endüstrisi gibi karmaşık süreçlere sahip işletmelerde başlamış olsa da günümüzde otomotiv, gemi inşaatı, havacılık, enerji, savunma sanayisi, gıda üretimi, tarım, giyim ve tekstil, taşımacılık, haberleşme, lojistik gibi çeşitli sektörlerde uygulama örnekleri bulunmaktadır. Bu kapsamda özellikle ulusal literatürü genişletmek adına benzeri çalışmaların farklı sektörlerde yapılması ile de araştırmalar genişletilebilir.

Kaynaklar

Ackley, M. (2023) "Systems Engineering at SpaceX," Valispace, [Online]. Available: <https://www.valispace.com/systems-engineering-at-spacex/>.

Airbus and Dassault Systèmes, (2019). Embark on strategic partnership to create the European aerospace industry of tomorrow.

Bozkurt, G. K. (2022). Döngüsel Ekonomi Kavramı ve Bu Alanda Dünya Ve Türkiye'deki Gelişmeler, Anahtar, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 34 (402), 14-16.

Cofer, D. D., Gacek, A. S., Miller, M., Whalen, W., LaValley, B. & Sha, L., (2022). Compositional Verification of Architectural Models, from 10.1007/978-3-642-28891-3_13, Proceedings of the 4th international conference on NASA Formal Methods.

Çalışkan, Z., & Yüksel, H. (2021). Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) Yazılımlarının Seçiminde Kullanılan Kriterlerin ANP Yöntemi İle Sıralanması. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 16(63), 1480-1495.

Eigner, M., & Stelzer, R. (2009). Product lifecycle management: Ein Leitfaden für product development und life cycle management. Springer-verlag.

Ekins, P., Domenech Aparisi, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N., & Lotti, L. (2020). The circular economy: What, why, how and where.

Fırat, O. Z., & Fırat, S. Ü. (2017). Endüstri 4.0 yolculuğunda trendler ve robotlar. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 46(2), 211-223.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of cleaner production, 252, 119869.

Gubán, M., & Kovács, G. (2017). Industry 4.0 Conception. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 10(1).

International Council on Systems Engineering (INCOSE), (2015). System Engineering Handbook, in 9.2. Model Based System Engineering, San Diego, USA, WILEY, 189-190.

Kalkınma Bakanlığı, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023). https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On_Birinci_Kalkinma_Plani-2019-2023.pdf

Kar, M., Çetenak, Ö. Ö. (2022). Milli Teknoloji Hamlesi, İçinde; Türk Havacılık Ve Savunma Sektörünün Dönüşümü ve Ekonomik Etkileri, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA),

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & information systems engineering, 6, 239-242.

Lazarevic, D., & Valve, H. (2017). Narrating expectations for the circular economy: Towards a common and contested European transition. Energy Research & Social Science, 31, 60-69.

MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. Journal of Industrial Ecology, 2(1), 23-44.

Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. Computers in Industry, 83, 121-139.

Özden, H. (2016). Endüstriyel Mal Ve Hizmet Üretimlerinde PDM, PLM Uygulamaları. Mühendis ve Makina, 57(672), 34-43.

Özsoylu, A. F. (2017). Endüstri 4.0. Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21(1), 41-64.

Öztürk, H. T. (2022). Türk Savunma Sanayisinde Ar-Ge ve Yenilik Sistemleri. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 1(20), 129-137.

Perkins, C. & Hage, R. (1949). 20 "Chapter 2," in Airplane Performance Stability and Control, ISBN 0-471-68046-X.

Prause, G. (2015). Sustainable business models and structures for industry 4.0 Journal of Security and Sustainability Issues, 2(5), 1-11.

Sayer, S., & Ülker, A. (2014). Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi. Engineer & the Machinery Magazine, (657).

Sendler, U. (2013). Industrie 4.0–Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems lifecycle management) (pp. 1-19). Springer Berlin Heidelberg.

Siemens, (2015). Using model-based systems engineering to develop the next-generation A350 XWB. <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-airbus-a350-xwb>

Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use - Procedia CIRP, 40, 536–541.

The Ellen MacArthur Foundation, (2019) "The butterfly diagram: visualising the circular economy," [Online]. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>