



Yenilikçi Tasarım Bakış Açısıyla İnsansı Robot Kol Parçası Tasarımı

Safer ÇOKATAR^{*1}, Muhammet Tarık YILDIRIM¹, Hüseyin Hakkı BULDUK¹,
Oğuzhan Sefa GÜNER¹, Ersin Toptaş²

¹Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği(YL), İstanbul, Türkiye
²Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Öğretim Üyesi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Yenilikçi tasarım,
Robot kol tasarımı,
Optimizasyon

Özet

Gelişen teknoloji ile birlikte parçaların yapısal analizleri bilgisayar ortamında simülasyon ile yapılabilmektedir. Bir parçanın veya sistemin testlerinin gerçek ortamda yapılmasının maliyetinden kaçınmak istenildiği için gelişmiş olan bu ortamlar günümüzde daha da kullanışlı hale gelmiştir. Yapay zeka sistemlerinin kullanımının artması ile birlikte bu simülasyon ortamlarında yapılabileceklerin sayısı da gün geçtikçe artmaktadır. Robot kolun tasarım sürecinde dayanıklılık önemli bir faktördür fakat daha fazla dayanıklılık istemek gelenekçi tasarım yaklaşımında fazladan ağırlıklara sebebiyet verebilmektedir. Gelenekçi tasarım yerine yenilikçi tasarımın kullanılması ile birlikte ağırlığın azaltılıp dayanıklılığın sabit tutulması mümkün olmaktadır. Bu çalışmada Fusion360 kullanılarak, kablo ile sürülen bir robot kol eklemine yapısal simülasyonları, yapay zekâ eklentileri kullanılarak yenilikçi tasarımı yapılacaktır. Yenilikçi tasarım ile geleneksel tasarım sonucu elde edilen parçaların maliyet, ağırlık ve güvenlik katsayısı bakımından karşılaştırılması yapılacaktır.

*e-posta: safercokatar@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için:

Safer ÇOKATAR; Muhammet Tarık YILDIRIM; Hüseyin Hakkı BULDUK; Oğuzhan Sefa GÜNER; Ersin Toptaş, "Yenilikçi Tasarım Bakış Açısıyla İnsansı Robot Kol Parçası Tasarımı", Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 5, s 2, ss. 189-190

How to cite this article:

Safer ÇOKATAR; Muhammet Tarık YILDIRIM; Hüseyin Hakkı BULDUK; Oğuzhan Sefa GÜNER; Ersin Toptaş, "Part Design of a Humanoid Robot Arm with Generative Design Perspective", Bayburt University Journal of Science, vol. 5, no 2, pp. 189-190

Part Design of a Humanoid Robot Arm with Generative Design Perspective

Keywords:

*Generative design,
Design of a robotic
arm,
Optimization*

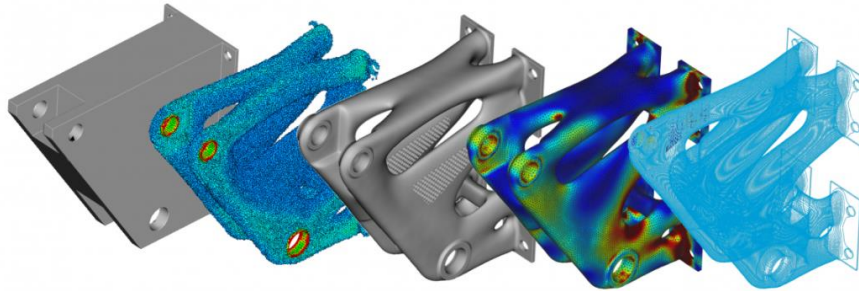
Abstract

With the developing technology, the structural analysis of the parts can be done with simulation in the computer environment. These developed softwares have become even more useful today because it is desired to avoid the cost of testing a part or system in a real environment. With the increase in the use of artificial intelligence systems, the number of things that can be done in these simulation environments is increasing day by day. As it is known, durability is an important factor in the design process of the robot arm, but asking for more durability can cause extra weight in the traditional design approach. With the use of generative design instead of traditional design, it is possible to reduce weight and keep durability constant. In this study, structural simulations of a cable-driven robot arm joint will be made using Fusion360, and innovative design will be made using artificial intelligence add-ons. Comparison of the innovative design and the parts obtained as a result of traditional design in terms of cost, weight and safety coefficient will be made.

1 GİRİŞ

İnsanlar tarih boyunca yaşamlarını kolaylaştırmak üzere sürekli bir arayış içinde bulunup teknoloji geliştirmeye çalışmışlardır. Geliştirmeye çalıştıklarını önce hayal ederek sonrasında ise kâğıda dökerek ilerletmeye gayret etmişlerdir. Bu prosedürlerin sonucunda ise 3 boyutlu, fiziksel icatlarda bulunmuşlar ve insanlığın gelişiminde etkili olmuşlardır. Günümüzde ise bilgisayarların gelişmesi ile birlikte tasarımlar programlar ile yapılmaya başlanmıştır [1].

Her geçen gün gelişen ihtiyaçlar sonucunda CAD programlarında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonlar yapılabilecek eklentiler oluşturulmuştur [2]. Bu sayede denemeler üretildikten sonra değil üretim öncesinde yapılabilmeye başlanmış, bunun sonucunda ise maliyet azalmıştır [3]. Yapay zekânın kullanım alanlarının artması ve tasarım alanında kullanılmaya başlanması tasarımda yenilikçi bakış açılarını beraberinde getirmiştir [4]. Yenilikçi tasarımda asıl amaç bir parçanın dirayetini düşürmeden parçayı hafifletmeye çalışmaktır. Yani bir başka deyişle, parça üzerindeki gereksiz ağırlık oluşturan kısımlar çıkartılarak bu parçanın imal edilirken ki maliyetini azaltmaktır. Buna aynı zamanda topoloji optimizasyonu denmekte ve CAD programlarında bir eklenti sayesinde yapılabilmektedir [5].

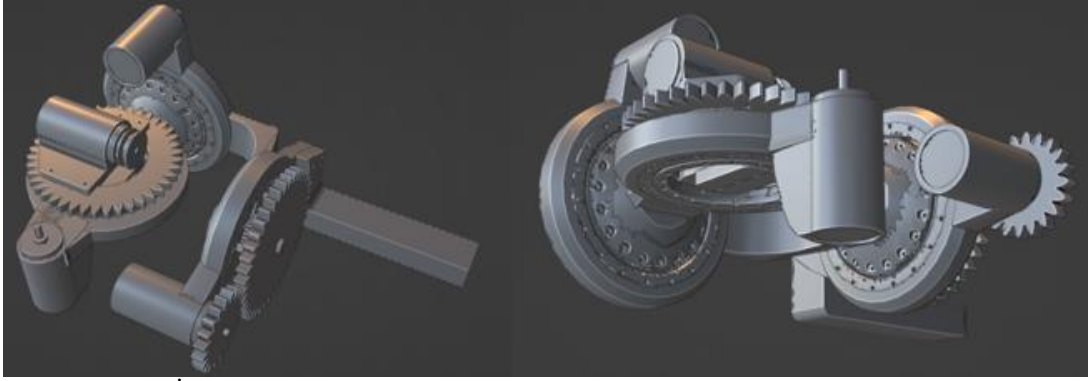


Şekil 1. Geleneksel tasarımdan yenilikçi tasarım aşamasına geçiş [6]

Geleneksel yöntemlere göre robot kol tasarımda aranılan özellikler taşınacak olan yükün ve motorun oluşturacağı momentin gerilmelerine dayanabilecek bir yapı oluşturmaktır. Fakat bu yapı oluşturulurken gerilmelerin diğer bölgelere göre etkisinin fazla olmadığı kısımlar yapısal bütünlük oluşturmak amacıyla aynı kalınlık veya uzunlukta yapılabilir. Yapılacak olan bu tasarım parçanın ağır olmasını, buna bağlı olarak parça üretim maliyetinin artmasını ve seçilecek olan motorun üreteceği tork miktarının artması gerektiğinden seçilecek olan motorun fiyatını yükseltebilmektedir [7]. Yapay zekânın üreteceği parçalar ile simülasyon ortamında girilen sınır değerler ve kuvvetler sonucunda hangi bölgeler diğerlerine göre daha çok gerilme kuvvetlerine maruz kalacak ise bu bölgelerin diğerlerine göre daha kalın veya uzun, hangi bölgeler gerilmeye maruz kalmayacak veya diğer bölgelere göre çok daha az gerilmeye maruz kalacaksa bu bölgelerin de buna göre daha kısa veya ince olmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada insansı ve kablo ile sürülen bir robot kol tasarımının 4. eklemi ile ilgili simülasyonlar yapılacak ve sonrasında üst kol parçası seçilip yapay zekâ destekli modeller ile geleneksel tasarım modeli karşılaştırmaları yapılacaktır.

2 MATERYAL VE METOD

Bu makalede daha önceden bitirme projesinde tasarlanmış olan robot kolun omuz eksenine ek olarak 4. eksen olması planlanan bir parça çizimi gerçekleştirilecektir. Çizimi geleneksel tasarım yöntemlerine göre gerçekleştirilecek olan bu parçanın sonrasında Fusion360 programının 'Generative Design' eklentisindeki yapay zeka ile optimizasyonu yapılmış çıktıları incelenecek ve karşılaştırmalar yapılacaktır. Fusion360 optimizasyon yapabilen, yapay zeka ile birbirinden farklı tasarım örnekleri sunabilen ve bu sunduğu örnekleri grafikler ile destekli bir şekilde nedensel olarak kullanıcının karşısına çıkarabilen bir program olması sebebiyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu robot kol insan kolundan esinlenilerek tasarlanmaya çalışılan olup eklemi hareket ettiren motorların hepsinin omuz eklemine toplanıp kablolar yardımıyla diğer eksenlere ulaşmayı hedefleyen tasarıma sahip bir projedir [8] [9] [10].



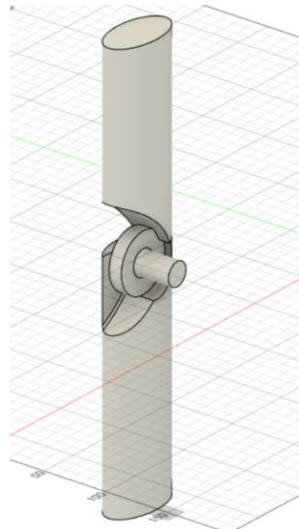
Şekil 2. İnsansı robot kolun omuz eklem yapısına üstten bakış(sol) ve alttan bakış(sağ)

Şekil 2' deki sağda görülen 3. Eksenden 4. Eksene bağlantı için bir hat oluşturulmuştur. Bu hat diğer eksenin sabitleme noktası olarak kabul edilip bir tasarım yapılacaktır. Çizilen bu eklem sol resimde görülen ve 3. eksen çarkının üzerinde konumlanmış olan motorun ucundaki makara sisteminden yeni tasarlanacak olan eklem kablo yoluyla ulaşılacak ve hareketi sağlanacaktır.

2.1 Geleneksel tasarım

Geleneksel tasarıma göre yapılacak olan bir robot kol parçası tasarımı ve bu tasarımdan sonra ağırlıkların, statik analizlerin incelenmesi sağlanacaktır. Bu çizim yapılırken önceden öngörülüp malzemede yüklemeler sonucunda sorun oluşturabilecek bölgeler güçlendirilmelidir [11].

Şekil 3'te bulunan bu eklem yapısında görüleceği gibi rulmanın içerisine yataklanmış bulunan bir mil ve ucunda bir makara sistemi bulunmaktadır. Bu makara sistemi üçüncü eklem hareketini sağlayan eklem üzerinden gelen kablo ile hareket ettirilecektir. Öncelikle iki parça olan bu eklem iki ayrı parçasına kuvvetler altında statik analiz yapılacaktır.



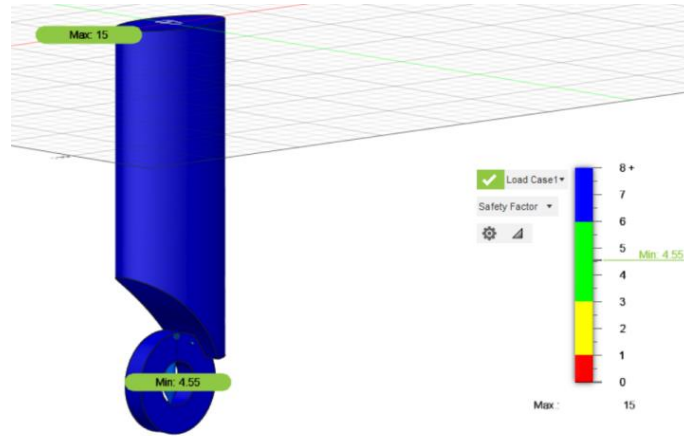
Şekil 3. Geleneksel tasarım yöntemiyle kablo ile sürülen robot kol tasarımı

Üst kol parçasının ağırlığı ABS plastik olarak seçildiğinde 1.618 kilogram, alt kol parçasının ağırlığı ise 1.881 kilogram olarak program tarafından verilmiştir.

2.2 Statik analiz

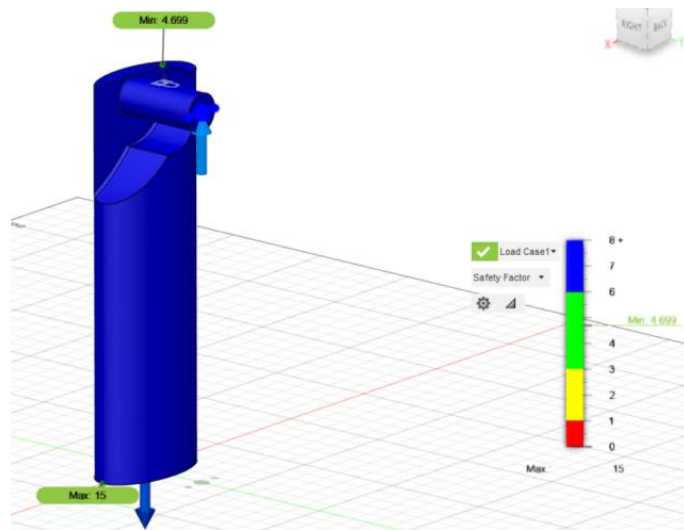
Robot eklemının, CAD programındaki sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanılarak statik olarak analizi yapılacaktır. Bu yöntem ile birlikte parçanın ona etki edeceği kuvvetler altında nasıl davranacağı ve güvenlik faktörünün parçanın farklı kısımlarındaki değeri incelenecektir [12]. Kolun dik bir şekilde aşağıya doğru baktığı ve 2 kilogram yük taşıdığı durum incelenecektir.

Şekil 4' te bulunan eklem için malzeme olarak ABS plastik seçilmiştir. Eklem etki eden kuvvetler olarak alt kolun ağırlığı, taşınacak faydalı yükün ağırlığı ve yer çekimi kuvveti girilmiştir. Eklem en üstünde bulunan düzlemden üçüncü eklemının çarkına sabitleneceği için bu sabitlenme eklenmiş ve kuvvetlerin etki edeceği yüzey olarak rulmanın iç yüzeyi belirtilmiştir. Şekilden görüleceği üzere eklemının genelinde güvenlik faktörü 8+ değerinde çıkmıştır. Kritik sayılabilecek bölge rulmanın olduğu ve üst kol ana yapısına bağlanacağı yer denilebilir.



Şekil 4. Üst kol parçasının statik analizi

Şekil 5' te görülen eklem alt kol olarak isimlendirilmektedir ve üretilirken üst kol eklemi gibi ABS plastik malzemesi kullanıldığı sisteme girilecektir. Sabitlenme noktası üst kol eklemında bulunan rulmanın içine yataklanacak olan mil seçilmiştir. Parçanın ağırlığı, taşınabilecek olan faydalı yükün ağırlığı ve en son eklenmesi durumunda bir kısaç mekanizmasının tahmini ağırlıklara sisteme kuvvetler olarak girilmiştir. Görüldüğü üzere eklemının genelinde güvenlik faktörü 8+ çıkmıştır. Kritik olan bölge rulmana bağlantı bölgesi sayılabilir.



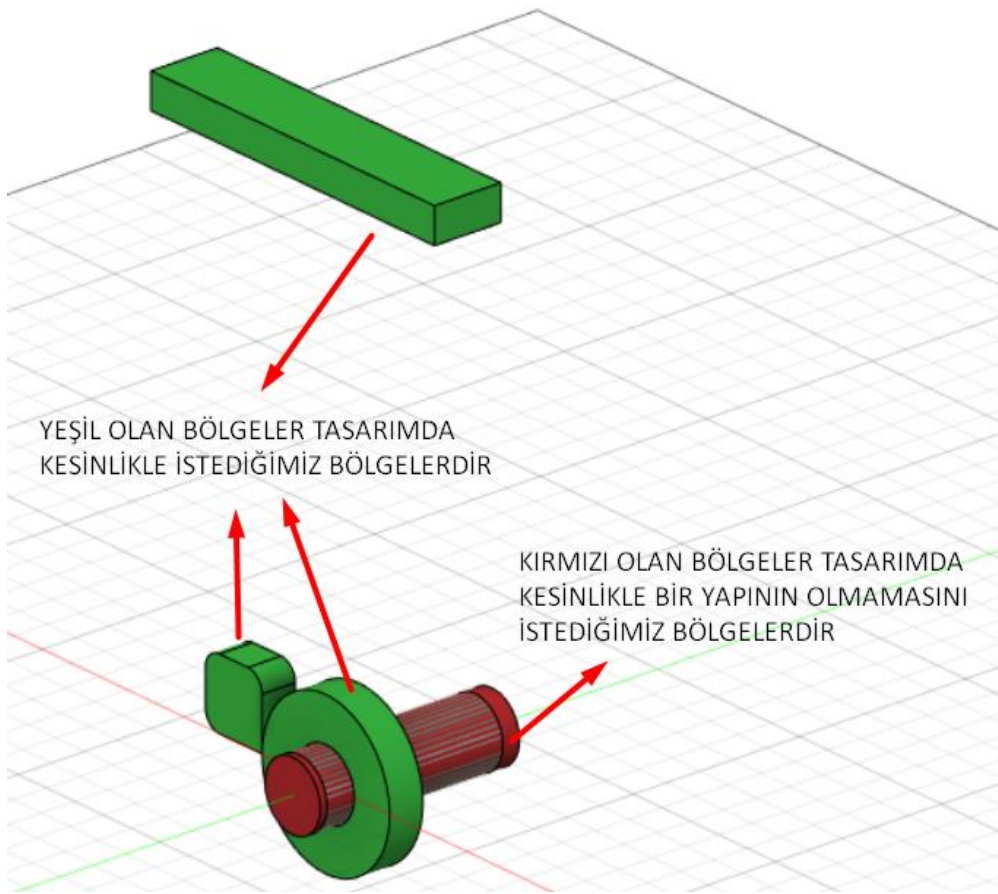
Şekil 5. Alt kol parçasının statik analizi

Statik analizlerden görüldüğü üzere parçalar fazlasıyla güvenli çıkmıştır. Bu sistem için güvenlik faktörünün minimum 2 değerinde olması yeterlidir. Buradan yapılacak olan çıkarım, bu parçaların fazladan ağırlıklarının azaltılarak güvenlik katsayısı kabul edilebilir seviyede kalmak koşuluyla yeni tasarımlar ortaya çıkabileceğidir.

2.3 Yenilikçi tasarım

Fusion360 programı eklentisi olan ‘Generative Design’ kullanılarak yapay zekânın belirli sınır koşullar ve yükler altında yaptığı tasarımlar incelenecektir [13] [14]. Bu uygulama sonucunda alınacak olan çıktılarda güvenlik katsayısı, ortalama imalat maliyeti, parçalar üzerinde oluşabilecek stres gibi değerler yapay zekâ tarafından oluşturulmuş parçalar için görüntülenebilecek ve tablo halinde incelenebilecektir.

Eklentinin kullanılabilmesi için öncelikli olarak yapılmasını istediğimiz tasarımda parça veya eklentinin mutlaka bulunmasını istediğimiz veya hiçbir eklenti veya parçanın olmasını istemediğimiz bölgelerin yani sınır koşulların belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonrasında cisme etki edebilme ihtimali olan kuvvetlerin ayrı ayrı senaryolar şeklinde girilmesi, üretim yöntemi seçilmesi, üretimde kullanılması planlanan malzemelerin seçilmesi adımlarının tamamlanmış olması gerekmektedir. Bu adımda sadece çizilmiş olan üst kol parçasının yenilikçi tasarım bakış açısıyla incelenmesi gerçekleştirilecektir.



Şekil 6. Tasarımda istenen veya istenmeyen sınır koşullar

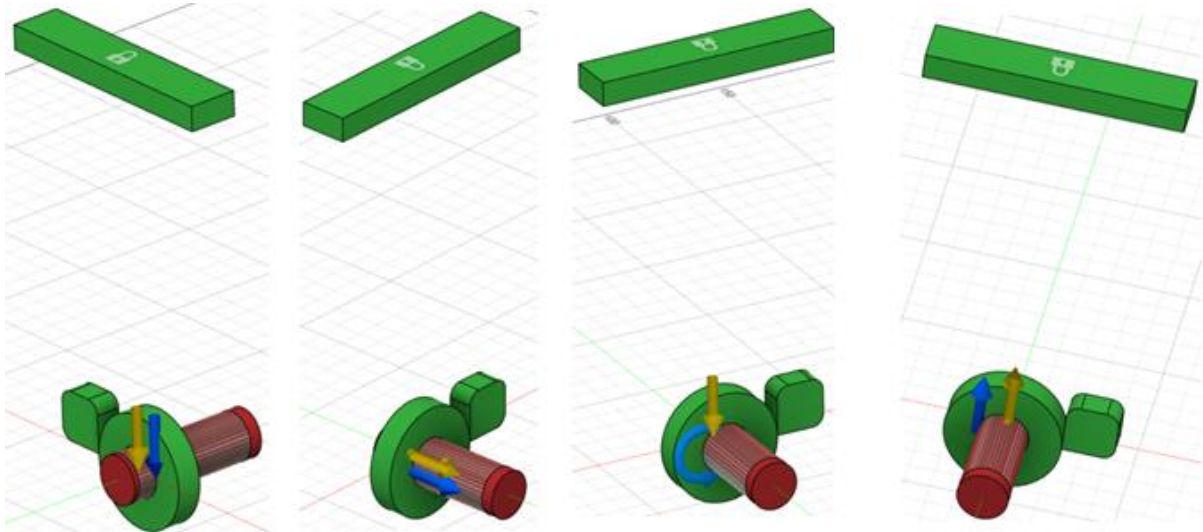
Şekil 6’da robot kolun üst kol kısmı için çizimde mutlaka olmasını istediğimiz (yeşil) ve asla bir parçanın olmasını istemediğimiz (kırmızı) bölgeler gösterilmiştir. Parçanın sabitleme bölgesi parçanın üst kısmındadır. Kırmızı bölgenin belirlenme sebebi alt kol parçasında bulunan milin rulmandan geçeceği kısmı olmasıdır. Yine görüleceği üzere rulman yapısı, parçanın omuz bölgesine bağlantı kısmı olan üst parçası ve insan kolunun hareketinde dirseğin 180° geriye gitmesini engelleyen kemik sistemine benzer bir yapı rulmanın yanına eklenmiştir. İmalat yöntemi olarak eklemeli imalat seçilmiş ve Orgasol Invent Smooth – PA12, Rilsan Invent Natural PA11, Nylon 12, PA 11-Nylon-HP11-30, PEKK-Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon gibi malzemelerin üretimde kullanılacağı seçilmiştir.

Malzeme seçimi yapıldıktan sonra bu parçaya farklı zamanlarda ve farklı türlerde etkiyecek olan kuvvetlerin tanımlanması işlemi yapılacaktır. Bu senaryo düşünülürken bir insan kolunun günlük hayattaki hareketlerinden yola çıkılmıştır.



Şekil 7. Aşağıya doğru düz durması(a), Karşıya bükülmeden uzatılması(b), Dirsekten 90 derece bükülüp durması(c), bükülmeden tam yukarı kaldırılması(d) durumları [15]

Şekil 7’de görüldüğü üzere kolun üst kısmına gelebilecek olan kuvvetler senaryosu hazırlanmıştır. Kolun tam düz aşağıya doğru durduğu andaki, karşıya bükülmeden uzatıldığı, dirsekten 90 derece bükülüp karşıya uzatıldığı ve bükülme olmadan tam yukarı kaldırıldığı andaki durumlara göre üst kol parçasında oluşabilecek kuvvetlerin sisteme tanıtılması gerçekleştirilecektir.



Şekil 8. Soldan sağa kol düz aşağı doğru(a), karşıya bükülmeden uzatılma(b), dirsekten 90 derece bükülme(c), bükülmeden tam yukarı(d) durma pozisyonları

Şekil 8(a)’da görüldüğü üzere yerçekimi kuvveti (sarı ok) ve kol dik aşağı konumda durduğu için alt kol parçasının mil kısmının yatağına aşağı yönlü 125 N dik bir kuvvet (mavi) etki etmektedir. Hesaplanan 125 N kuvvetin içerisinde 2 kilogramlık bir yük ve alt kol parçasının ağırlığı bulunmaktadır. Bu senaryo şekil 7 (a)’da bulunan resim ile eşleştirilebilir.

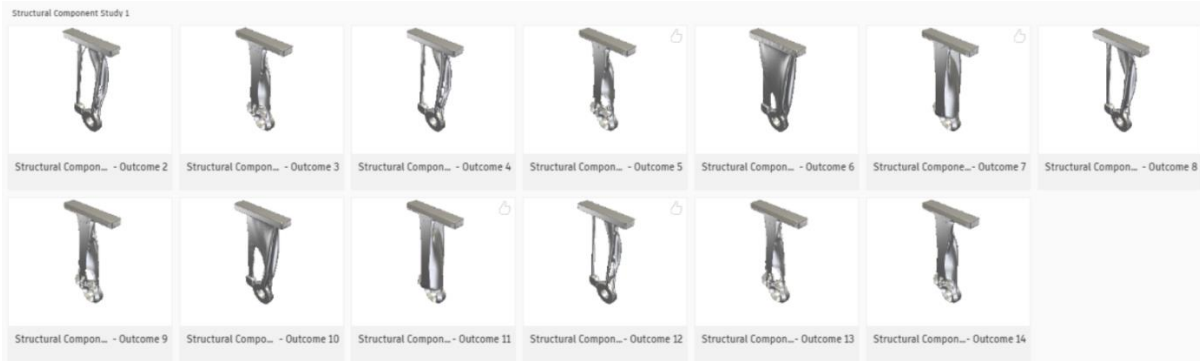
Şekil 8(b)’de omuz yapısının da hareket edecek olduğu düşünülüp kuvvetler şekil 8’de ki yönünden 90 derece farklı yönde gösterilmiştir. 125 N olarak hesaplanan kuvvet içerisinde 2 kilogramlık bir yük ve alt kol parçasının ağırlığı bulunmaktadır. Şekil 7 (b)’de bulunan resim ile eşleştirilebilir.

Şekil 8(c)’de parçanın rulman kısmına milin dönme hareketi yapma isteğinden ve 90 derece açı ile durmasında kaynaklı olarak 22500.00 N mm moment etki edeceği hesaplanmıştır (mavi). Bu kuvvet içerisinde 2 kilogramlık bir yük ve alt kol parçasının ağırlığı bulunmaktadır. Yer çekimi kuvveti (sarı) kolun durduğu konuma bağlı olarak yine dik aşağıya doğrudur. Şekil 7 (c)’de bulunan resim ile eşleştirilebilir.

Şekil 8(d)'de kuvvet uygulanan bölgeler kolun 180° yukarı yönlü duruşu sırasında oluşacak kuvvetlerdir. 2 kilogramlık yük ve alt kol ağırlığı hesaba katıldığında 125N olan kuvvet büyüklüğü sınır ve yük koşulu olarak belirtilmiştir. Bu senaryo şekil 7(d)'de bulunan resim ile eşleştirilebilir.

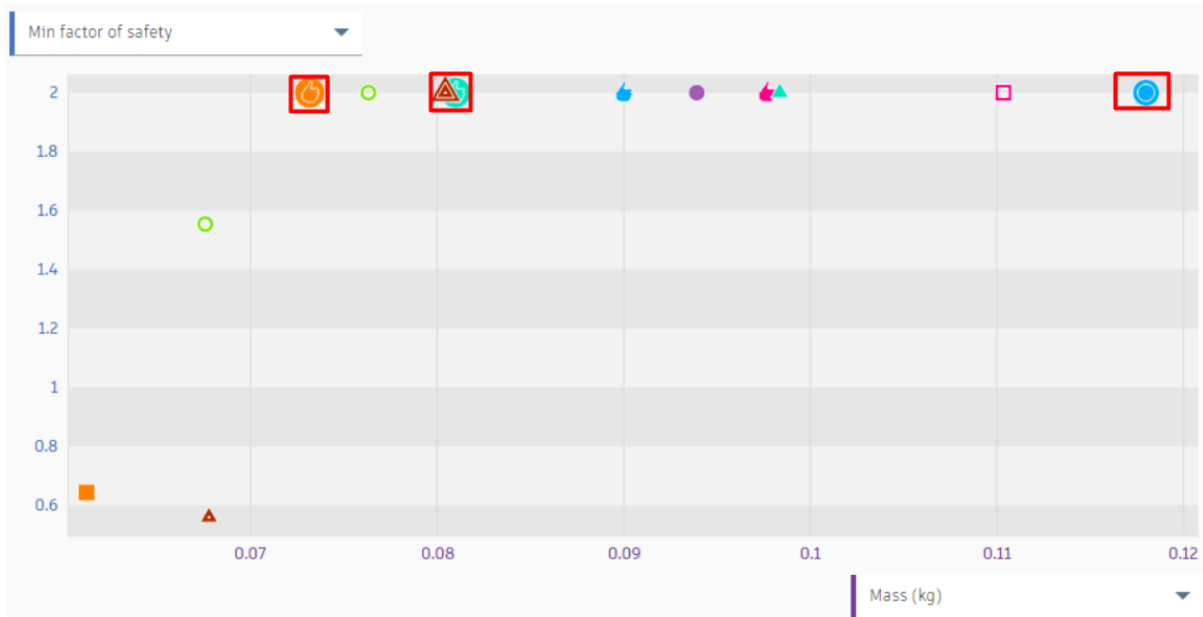
3 BULGULAR

Belirlenen sınır koşul ve yüklemeler altında yapay zekâ tarafından kullanıcıya 13 tane farklı çıktı verilmiştir. Bu çıktılar tamamen belirlenen materyal, üretim yöntemi ve sınır koşullara göre filtrelenmiş bir biçimde sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Çıktılar Şekil 9'da görülebilmektedir. Bu çıktılar tablo halinde incelemeye alınıp güvenlik faktörü-ağırlık cinsinden değerlendirilecektir.



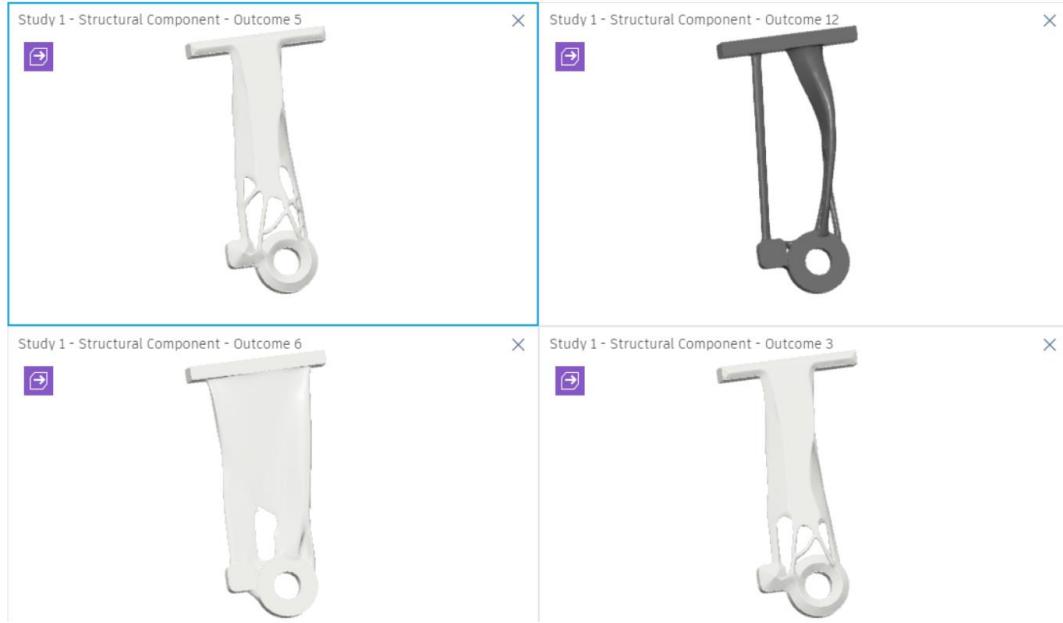
Şekil 9. Yenilikçi tasarım uygulaması sonucunda yapay zekâ tarafından verilen çıktılar

ABS plastik ile geleneksel yöntemlerle tasarlanmış olan ilk şeklin 1.681 kg olduğu göze alındığında, Şekil 10'da bulunan ve program tarafından verilen tablodaki değerlerin en ağırının 120 gram olduğu görülebilmektedir. Yenilikçi tasarım çıktısını alırken girilen materyaller ABS plastik materyaline yapısal olarak benzerdir.



Şekil 10. Program tarafından verilen güvenlik faktörü-kilogram çıktısı

Tablodan dört tane farklı çıktı alınıp daha detaylı olarak incelenecektir. Bu seçim yapılırken ilerde kullanılacak olan parçanın kullanım detayları göz önünde bulundurulacaktır. İncelenmek üzere seçilen dört parça Şekil 10'da kırmızı kare ile işaretlenmiştir. Bazı çıktılarının güvenlik faktörünün daha önceden belirlenen sınır 2 değerinden daha az çıktığı görülmektedir. Bu çıktılar incelemeye alınmayacaktır.



Şekil 11. Seçilen 4 parçanın görüntüsü

Şekil 11'den görüldüğü üzere 'Generative Design' tarafından verilen dört parçaya bakıldığında çok farklı dört tane tasarım olduğu görülmektedir. Bu tasarımlardan yola çıkılarak tasarımcıya parça için seçilen materyaller ile tasarımların çok farklılık gösterebileceği anlaşılmaktadır. Aynı sınır koşullarında bulunan fakat Şekil 11'de bulunan sol üstteki parça için 'Orgasol Invent Smooth', sağ üstteki için 'PEKK', sol alttaki için 'HP 3D HR', sağ alttaki için 'Rilsan Invent Natural' malzemeleri ana malzemeler olarak seçilmiştir. Malzemelerin farklı akma mukavemetlerine ve diğer özelliklere sahip olması yenilikçi tasarıma direkt olarak etki etmektedir.

Tablo1. Karşılaştırma Tablosu

	Minimum Güvenlik faktörü	Ağırlık (kg)	Kullanılabilirlik (1-10)
Geleneksel tasarım	15+	1.681	8
Yenilikçi tasarım Orgasol materyali ile	2	0.073	7
Yenilikçi tasarım PEKK materyali ile	2	0.081	8

4 SONUÇLAR

Bu çalışma ile geleneksel yöntemlere göre tasarımı yapılan parçaların fazladan ağırlıklara sahip olabileceği ve bunun aynı zamanda üretim maliyetinin artması gibi sonuçlara yol açabileceği gözlenmektedir. Özellikle ağırlığın yapılacak işlemin büyük bir faktörü olduğu uygulama alanlarında yapay zekânın verdiği çıktılar tasarımcının ufku genişletecek niteliktedir. Tablo1'de incelenebileceği üzere üst robot kol parçasının ağırlığının yaklaşık olarak 20 kat daha azaltılması, seçilecek olan motorlara doğrudan etki etmektedir ve bu sebeple maliyetin hem malzeme maliyeti hem de elektronik malzemedan azaltılmasına katkı sağlamış bulunmaktadır. Programın bu çıktıları yapay zekâ ile çözmesi zamandan da tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Üretim yöntemlerinin gelişmesi, eklemeli imalatın yaygınlaşması ve bu çalışmada kullanıldığı gibi yapay zekâ sistemlerinin gelişmesi ile yenilikçi tasarımda elde edilebilecek çıktılar daha da gelişmeye devam edecektir. Erişimi ve kullanımının kolay olması sebebiyle Fusion360 uygulamasındaki 'Generative Design' eklentisinin kullanımı malzemedan ve zamandan tasarruf sağlayacak ve iş gücü daha farklı alanlara yoğunlaştırılabilecektir.

Yazar Katkıları

Safer Çokatar: Kavramlaştırma, Metodoloji, Veri analizi, Araştırma, Materyaller / Kaynaklar, Yazım - Özgün Taslak, Yazım - Değerlendirme & Düzenleme, Proje yönetimi

Muhammet Tarık Yıldırım: Doğrulama, Veri analizi, Veri İyileştirme, Görselleştirme

Hüseyin Hakkı Bulduk: Kavramlaştırma, Veri analizi, Veri İyileştirme, Yazım - Değerlendirme & Düzenleme,

Oğuzhan Sefa Güner: Doğrulama, Araştırma, Görselleştirme

Ersin Toptaş: Metodoloji, Doğrulama, Yazım - Özgün Taslak, Yazım - Değerlendirme & Düzenleme,

Süpervizyon, Proje yönetimi

Yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

- [1] J. Osmond, "The Threshold of Uncertainty in Teaching Design," p. 8.
- [2] H. J. G. Diersch, FEFLOW, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [3] Y. Horiba, "Proposal of Method for Estimating Clothing Pressure of Tight-Fitting Garment Made from Highly Elastic Materials: Hybrid Method Using Apparel CAD and Finite Element Analysis Software," *Journal of Fiber Science and Technology*, vol. 77, no. 2, pp. 76-87, 2021.
- [4] A. P. G. Milla, "Expertise, playfulness and analogical reasoning: three strategies to train Artificial Intelligence for design applications," *Architecture, Structures and Construction*, 2022.
- [5] N. Kallioras, "MLGen: Generative Design Framework Based on Machine Learning and Topology Optimization," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 12044, 2021.
- [6] T. Laughlin, "nTopology," 25 04 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://ntopology.com/blog/2019/04/25/topology-optimization-in-a-world-of-fields-and-implicit-geometry/>. [Erişildi: 07 04 2022].
- [7] H. M. Al-Qahtani, "Dynamics and Control of a Robotic Arm Having Four Links," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, no. 5, pp. 1841-1852, 2017.
- [8] F. D. Crescenzo, "Generative design of 3D printed hands-free door handles for reduction of contagion risk in public buildings," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 16, no. 1, pp. 253-261, 2022.
- [9] C. P. J. P. C. L. S. L. Taeyoon Lee, "A hybrid dynamic model for the AMBIDEX tendon-driven manipulator," *Mechatronics*, p. 102398, 2020.
- [10] Y. J. Kim, "Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness Manipulator for High-Speed Safe Interaction," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1358-1374, 2017.
- [11] R. Wu, "DeepCAD: A Deep Generative Network for Computer-Aided Design Models," arXiv:2105.09492 [cs], 2021.
- [12] G. L. S. S. Lopez, "A finite element approach to statical and dynamical analysis of geometrically nonlinear structures," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 46, no. 12, pp. 1093-1105, 2010.
- [13] R. F. M. C. L. G. Francesco Buonamici, "Generative Design: An Explorative Study," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 18, no. 1, pp. 144-155, 2020.
- [14] B. Aman, "Generative Design for Performance Enhancement, Weight Reduction, and its Industrial Implications," p. 21.
- [15] "Koç üniversitesi hastanesi," [Çevrimiçi]. Available: <https://www.kuh.ku.edu.tr/fizik-tedavi-ve-rehabilitasyon/omuz-egzersizleri>. [Erişildi: 03 06 2022].
- [16] B. Ma, "Design of Surgical machine manipulator based on TOPOLOGY OPTIMIZATION method," 2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT), Changzhou, China, 2021.