

Yapay Zeka Destekli Kavramsal Tasarım: Tekerlekli Sandalye Tasarım Seçenekleri Değerlendirmede Bulanık Mantık Kullanımı

Nurullah YÜKSEL*^{ID}, Hüseyin R. BÖRKLÜ^{ID}

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, ANKARA, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.05.2021
Kabul: 30.11.2021

Anahtar Kelimeler:

Bulanık mantık,
Kavramsal tasarım,
Mühendislik Tasarımı,
Tasarım
değerlendirme, Yapay
zekâ

ÖZ

Mühendislik tasarımı; işlevsellik, üretilebilirlik, estetik, maliyet gibi birçok parametreyi hesaba katma ve optimize etmeyi içerir. Tüm bu parametreleri özenli dikkate alabilmek için sistematik tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Ancak, ürün yaşam döngüsündeki kısaltmalar tasarım ve geliştirme süreçlerini de kısaltmasını gerekli kılmıştır. Yapay zekâ teknolojileri, erken tasarım aşaması değerlendirme ve seçim işlemlerini hızlandırmaya yardımcı olabilir. Bu çalışmada Pahl ve Beitz'in Sistematik tasarım yaklaşımına dâhil edilen bulanık mantık yöntemi ile tasarım değerlendirmesi yapılmaktadır. Tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanılan önceki çalışmalarda tasarım kısmen değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ise tasarım tüm yönleriyle incelenmektedir. Yöntemin geçerlilik ve etkinliği bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ile gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan yöntem ve normal kavramsal tasarım yöntem sonuçları da karşılaştırılmıştır. İki yöntemde de değerlendirme adımları sonunda aynı tasarım seçeneği ideal tasarım olarak belirlenmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile değerlendirme işlemi klasik kavramsal tasarım sürecine göre daha kısa sürmüştür. Ayrıca 0-100 arası değerlendirme ölçeği sonuçların hassasiyetini artırmaktadır. Kavramsal tasarımda bulanık mantık kullanımı basit ve kolay anlaşılır olması yanında hızlı, hassas ve kapsamlı değerlendirmeler de sağlamaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.13>

Artificial Intelligence Asisted Conceptual Design: Using Fuzzy Logic For the Evaluation of Design Variants of A Wheelchair

ARTICLE INFO

Received: 20.05.2021
Accepted: 30.11.2021

Keywords:

Fuzzy logic,
Conceptual design,
Engineering Design,
Design Evaluation,
Artificial intelligence

ABSTRACT

The engineering design process is a comprehensive process in which many parameters such as functionality, manufacturability, aesthetics, and cost are considered and optimized. Systematic design methods can be used to take into account these parameters and not to overlook the details. However, the shortening of the product lifetimes has made it necessary to shorten the design and development processes. Artificial intelligence technologies can help designers speed up selection and evaluation processes in the early design phase. This study, it is aimed to evaluate the design options by including the fuzzy logic method in the systematic design approach of Pahl and Beitz. The design is partially evaluated in previous studies using fuzzy logic method in design. In this study, the design is examined in all its aspects. The validity and effectiveness of the method were demonstrated by a wheelchair conceptual design. In addition, the presented method has been compared with the traditional conceptual design method in terms of its results. In both methods, the same design option was determined as the ideal design at the end of the evaluation steps. With the fuzzy logic method, the evaluation process was completed in a shorter time than the classical conceptual design process. In addition, the rating scale between 0-100 increases the sensitivity of the results. The use of the fuzzy logic method in conceptual design provides fast, sensitive, and comprehensive evaluation besides being simple and easy to understand.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.13>

*Sorumlu yazar: nurullahyüksel@gazi.edu.tr

To cite this article: N. Yüksel and H.R. Börklü, "Artificial Intelligence Asisted Conceptual Design: Using Fuzzy Logic For the Evaluation of Design Variants of A Wheelchair", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 309-319, 2021.
doi:10.30855/gmbd.2021.03.13

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilim ve teknolojiye - özellikle de bilişim, iletişim, ulaşım, alt yapı gibi konularda - yaşanan hızlı gelişmeler ürün tasarım süreçlerini de etkilemiştir [1]. Kullanıcı beklenti değişimleri ürün yaşam süresi kısılmalarına da neden olmaktadır. Değişen beklenti ve ihtiyaçlar yeni ürünler geliştirilerek karşılanabilir. Ancak, yeni ürün geliştirme ise birçok faktörün dikkate alındığı uzun ve kapsamlı bir süreçtir. Problemin belirlenmesi ile başlar, nihai ürünle son bulur. Yeni ürün yaşam sürelerindeki kısalma bu ürünlerin tasarım, üretim ve piyasaya arzlarının da daha hızlı ve kısa olmasını gerekli kılmıştır. Dolayısı ile güncel yeni ürün tasarımlarında; verimli, etkili ve inovatif özellikler yanında zaman ve maliyet tasarrufları da ön plana çıkmaktadır.

Bir firmanın hayatta kalması ve pazar payını koruması yeni ürün tasarımlarıyla mümkündür. Başarılı ürün tasarımı sistematik bir çalışmayla elde edilebilir. Pahl ve Beitz'in Sistematik Tasarım yaklaşımı uzun yıllardır mühendislik problemleri çözümü ve yeni ürün geliştirme süreçlerinde başarıyla kullanılmaktadır [2]. Ancak, bilgisayarların yaygınlaşması ve yapay zekâ teknolojilerinin devreye girmesi ile geleneksel yöntemlerin yerini akıllı ve dijital sistemler almaktadır. İnsan benzeri çıkarım (muhakeme) mekanizması ve sözel ifadelerle işlem yapabilen bulanık mantık bu amaçla kullanılan yöntemlerden biridir. Erken tasarım aşaması karar verme işlemlerinde ve optimizasyon problem çözümlerinde tasarımcılara destek sağlayabilir. Bu araştırmada bulanık mantık yönteminin kavramsal aşamada tasarım seçeneklerini (varyantlarını) değerlendirmede nasıl kullanılabileceği incelenmektedir. Ayrıca, bulanık mantık destekli kavramsal tasarım ve geleneksel kavramsal tasarım yöntem sonuçları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yöntemin geçerlilik ve etkinliği bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ile gösterilmiştir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir. Konuyla ilgili önceki çalışmalar ve genel değerlendirmeler 2. Bölümde yer almaktadır. 3. Bölümde kavramsal tasarım ve bulanık mantık hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kavramsal tasarımda bulanık mantık kullanımı 4. Bölümde ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır. Araştırma bulguları ve sonuçları ile bu çalışmanın devamı olacak yeni araştırma istikametleri ise son bölümde özetlenmektedir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Mühendislik tasarımında işlevsellik, üretilebilirlik, estetik, maliyet gibi birçok parametre dikkate alınır ve optimize edilir. Tasarımcılar en iyi tasarımı elde etmek için çeşitli yöntem ve tekniklerden yararlanır. Bu yöntemler; kolay anlaşılabilir ve kullanılabilir olmalı, farklı problem türlerine uyarlanabilmeli, sistemli ve amaç odaklı olmalıdır. Bu amaçla Pahl ve Beitz kavramsal tasarım aşamasında tasarım seçenekleri (varyantları) oluşturur ve bunları kademeli olarak eleyerek en iyi tasarım konseptine ulaşmaya çalışır [3]. Bu ön tasarımlar; seçim kartı, amaçlar ağacı değerlendirme çizelgesi, değer profil diyagramı gibi bazı yöntemler ile kademeli olarak değerlendirilir ve aralarından en iyisi (optimumu) seçilir. Pahl ve Beitz'in yanı sıra birçok araştırmacı sistematik ve teorik tasarım yöntemleri üzerinde çalışmıştır [4-6].

Çok sayıda seçeneğin olduğu tasarım süreçlerinde değerlendirme işlemi zor ve zaman alıcı olabilir. Süreci hızlandırma, hassasiyeti artırma ve kapsamı genişletme oldukça önemlidir. Bu amaçla Ayağ, umut vaat etmeyen çözümleri erken değerlendirme aşamalarında elemek için bulanık analitik hiyerarşi sürecini kullanmıştır [7]. Tasarımcı tarafından belirlenen sınır değerini karşılamayan tasarımlar elenir ve diğer tasarımlar ise simülasyon analizi ile değerlendirmeye devam edilir. Ayağ ve Özdemir, başka bir çalışmada analitik hiyerarşi sürecinden daha kapsamlı değerlendirme yeteneğine sahip bulanık analitik ağ sürecini kullanmıştır [8]. Bu karma yöntem kapsamlı çözüm sağlasa da nihai ürüne karar vermek için uzun süre gerektirir. Malekly ve arkadaşları, QFD ve bulanık mantık yöntemlerini birleştirilmiş ve bir köprü tasarımında kullanılmıştır [9]. Ancak bu yöntemin köprü tasarımı için geliştirilmiş olması kullanımını sınırlı kılmaktadır. Kang, müşterilerin duygusal taleplerini karşılamak ve estetik ürünler elde etmek için kaba set teorisi ve bulanık QFD metodunu birleştirmiştir. Kaba set teorisi ürün estetik kalitesini belirlemek için kullanılmış. Bulanık QFD metodu ise ürün estetik gereksinimleriyle tasarım özellikleri arasında ilişki kurar [21]. Bir başka çalışmada kavramsal tasarım sürecinde bulanık mantık destekli hata modu ve etki analizi kullanılmıştır [10]. Belirsiz ve kesin olmayan kriterleri hata modu ve etki analizi çalışmasına dâhil etmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Uzman ürün geliştirme sistemi olarak adlandırılan bu yaklaşım, tekrarlayan tasarım süreçlerini kısaltma, maliyetleri azaltma ve güvenilir ürünler ortaya çıkarmada kullanılabilir. Bu yöntem ürüne ait maliyet ve güvenilirliği değerlendirmede başarılı olsa da ürünün teknik özelliklerini

değerlendirmek için yetersiz kalmaktadır. Mohebbi ve arkadaşları, mekatronik sistemlerin kavramsal tasarım aşamasında Choquet İntegrali, Sugeno İntegrali ve bulanık tabanlı sinir ağı olmak üzere üç farklı yöntem önermiştir [11]. Burada tasarım seçenekleri; zekâ, güvenilirlik, karmaşıklık, esneklik ve maliyet gibi temel tasarım kriterleri ve ilişkili alt kriterlerle değerlendirilmektedir. Ancak, karmaşık mekatronik sistemlerde bileşen sayısına bağlı olarak bulanıklaştırma işlemi zaman alıcı ve zor olabilir. Aguiar ve arkadaşları kavramsal tasarım aşamasında risk değerlendirmesi için bulanık hata modu etki analizi yöntemini önermiş. Ürün hakkında yeterli bilgi olmayan belirsiz durumlarda risk öncelik sayısı (RÖS) belirlemek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır [23]. Huang, tasarım seçeneklerini değerlendirmek için sıralamaya dayalı uyarlanabilir evrimsel operatör genetik algoritma destekli bulanık sinir ağı (RAOGA-FNN) kullanmıştır [12]. Sutono ve arkadaşları, ürün form tasarımı için bulanık tabanlı Taguchi Metodu kullanmıştır. Ürün form seçenekleri dört farklı kanse kelimesiyle değerlendirilmiştir. Belirlenen dört değişkenin birleştirilmesinde bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır [19]. Zhou ve arkadaşları kavramsal ürün seçiminde bulanık ikili anlamsal karar verme yöntemini kullanmışlardır [20]. Ma ve arkadaşları, erken tasarım aşamasında ürün yaşam sonu değerlendirmesi için bulanık mantık yöntemini kullanmıştır. Yaşam sonu stratejisinde karşılaşılan belirsizlikleri ele almada bulanık küme teorisinden yararlanılmıştır [22].

Önceki çalışmalar genelde tasarımı tek bir yönden veya kısmen incelemektedir. Bazı çalışmalarda maliyet değerlendirilirken bazılarında kavramsal tasarımların çevresel etkileri karşılaştırılmaktadır. Ancak kapsamlı ve doğru bir değerlendirme için tasarım; üretim, kullanım, maliyet gibi her açıdan değerlendirilmesi gerekir. Bu çalışmada Pahl ve Beitz'in kavramsal tasarım yaklaşımı bulanık mantık yöntemi ile birleştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi tasarım seçenekleri arasında en ideal olan belirleme sağlayabilir. Bu yöntem basit ve kolay olması yanında hızlı, hassas ve kapsamlı değerlendirme de sağlamaktadır.

3. YÖNTEMLERE GENEL BAKIŞ (AN OVERVIEW OF METHODS)

3.1. Kavramsal Tasarım (Conceptual Design)

Sistemik tasarım; görevi belirleme, kavramsal tasarım, şekillendirme tasarımı ve ayrıntılı tasarım adımlarından oluşur [4]. Yeni ürün geliştirme işleminde çok önemli yere sahip olan kavramsal

tasarım esnasında alınan karar ve stratejiler (konsept / kavram veya temel çözümler) sonraki tüm tasarım iş veya işlemlerini derinden etkiler. Kavramsal tasarım aşamasında; genel ve temel problemler belirlenir, fonksiyon şemaları geliştirilir (tasarımı küçük, soyut ve bağımsız parçalara bölme), alt fonksiyonlara çözümler aranır, bu çözümler bir tabloda gösterilir (morfolojik matris / kart) ve bunların çeşitli birleşimlerinden farklı çözüm seçenekleri (tasarım varyantları) elde edilir. Böylece büyük bir çözüm uzayında alternatif tasarım çözümleri elde edilir. Daha sonra tasarım seçenekleri üzerinde yapılan bazı değerlendirme ve seçme işlemleri ile en uygun tasarım konsepti (varyantı) belirlenir.

Farklı tasarım seçeneklerini değerlendirme ve bunlardan en uygununun seçimi hala üzerinde çalışılan güncel bir araştırma konusudur. Bu amaçla geliştirilecek yöntemin basit, güvenilir ve hızlı olması arzulanır. Farklı problemlere uyarlanabilmeli ve ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını dikkate almalıdır. Pahl ve Beitz'in kavramsal tasarım yöntemi erken tasarım aşamasında tasarımcılara eksiksiz ve kapsamlı değerlendirme imkanı sunmaktadır. Özellikle, çözüm uzayının geniş olduğu büyük ölçekli tasarım projelerinde bu yöntem uzun zamandır kullanılmaktadır.

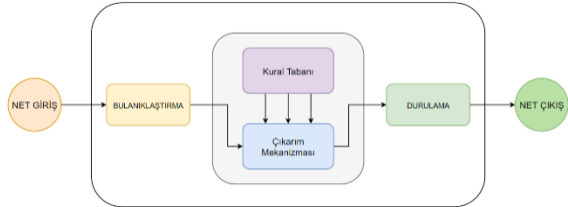
Tasarım ve değerlendirme süresini kısaltmak ve hassasiyetini artırmak ürüne rekabet avantajı kazandırabilir. Bu amaçla mevcut yöntemleri hızlandıracak yeni yollar aranmalıdır. Bu çalışma kavramsal tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanımı ele almaktadır.

3.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Akla, bilime, toplumsal değerlere uygun ve tutarlı düşünme şekline mantık denir. Önceden kazanılan bilgi ve tecrübelerden yeni bilgi veya sonuçlar elde etmeyi sağlar. (Klasik / ikili) mantık işlemleri; var-yok, açık-kapalı, siyah-beyaz, saydam-opak gibi zıt / tezat ilişkilere dayanır. Bulanık mantık ise siyah ve beyaz arasında birçok farklı (gri) ton olduğu ve bunlar hesaba katılmaz ise problem formülasyonunun eksik kalacağı tezine dayanır [13]. Klasik mantıktan farklı olarak bulanık mantık sisteminde bir eleman aynı anda iki farklı kümenin üyesi olabilir. Üyelik dereceleri 0-1 arasındaki sayılarla (0.15, 0.35, 0.93 vb.) ifade edilir. 0 (sıfır), bir elemanın o kümeyle ait olmadığını gösterirken, 1 (bir) ise küme özelliklerini tamamen taşıdığını belirtir. Bulanık mantık, (klasik/ikili) mantığın genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Klasik mantığın yetersiz kaldığı durumlarda veya karmaşık problem çözümlerinde kullanılabilir [14].

Lotfi Zadeh'in 1960'lı yılların ikinci yarısında ortaya koyduğu bu yaklaşım yarım asırlık geçmişe rağmen hala güncel yapay zekâ araştırma alanlarından biridir [15]. Otomasyon ve kontrol sistemleri başta olmak üzere biyoloji, tıp, ekonomi, psikoloji, sosyoloji, pazarlama, yönetim, çevre, mühendislik vb. alanlarında yoğun kullanılmaktadır. Araç ve ev fiyatlarının belirlenmesi, tanı ve tedavi işlemleri, fabrika yeri ve maliyet tahminleri, ses ve görüntü tanıma sistemleri, kalite-kontrol işlemleri, suç izleme ve tespiti gibi birçok uygulama mevcuttur.

Bulanık mantık yöntemi; bulanıklaştırma (fuzzification), çıkarım (inference) ve durulama (defuzzification) işlemlerinden oluşur. Burada günlük hayatta kullanılan bazı sözel ifadelerin ("çok az, biraz, az, çok, çok fazla" gibi) üyelik fonksiyonlarına dönüştürme işlemine bulanıklaştırma denir. Giriş verileri, bulanıklaştırma işlemi ile 0-1 arasında sayısal değerlere dönüştürülür [16]. Çıkarım işlemi için kural tabanına ihtiyaç vardır. Kural tabanı oluşturmak ve kullanabilmek için mantıksal operatörlerden (ve, veya, değil) yararlanır. Kural tabanına kayıtlı veriler ve giriş değerleri çıkarım birimi vasıtasıyla işlenir ve sonuç elde edilir. Probleme uygun çıkarım yöntemi, bulanık mantık tasarımcısı tarafından belirlenir ve düzenlenir [17]. Elde edilen sonuçları anlamlandırmak ve gerçek dünya değerlerine dönüştürmek için durulama işlemi gereklidir. Bulanık mantık işlem modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Bulanık mantık işlemi (Process of fuzzy logic)

4. KAVRAMSAL TASARIMDA BULANIK MANTIK KULLANIMI (USE OF FUZZY LOGIC IN CONCEPTUAL DESIGN)

Örnek olarak burada yürüme engellilerin hareketlerini kolaylaştıran ve yaşam kalitesini artıran inovatif bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ele alınmaktadır. Özellikle ayaklarını kullanamayan bireyler diğer uzuvları ile bu ürünü kolayca kullanabilmeleri istenmektedir. Farklı zeminlerde (toprak, asfalt, beton, halı vd.) hareket edebilmeli ve kullanıcı emniyetini sağlamalıdır. Ayrıca tekerlekli sandalye engelli birey ihtiyaçlarına göre pozisyon değiştirebilmeli ve ortam şartlarına uyum sağlamalıdır. Bu tasarım için, değerlendirme sürecinde bulanık mantık destekli, Pahl ve Beitz'in

kavramsal tasarım işlemi kullanılacaktır. Kavramsal tasarım işlemi; (a) İhtiyaçları belirleme, (b) fonksiyon şeması oluşturma, (c) tasarım seçenekleri (varyant) oluşturma, (d) ön değerlendirme, (e) önemli tasarımları belirleme, (f) kriter ağacı oluşturma (g) bulanık mantık ve (h) değerlendirme adımlarını içermektedir.

4.1. İhtiyaçları Belirleme (Identifying Requirements)

İhtiyaç listesi / şartname, kavramsal tasarım işleminin temelini oluşturur ve tasarımcının hareket noktasıdır. Bu liste; tedarik, malzeme, tasarım, ergonomi, üretim, montaj, nakliye, kullanım, bakım / onarım, maliyet vb. gibi bilgileri içermelidir. İhtiyaçlar açıkça ifade edilmeli, kesin ve tam bilgiler yer almalıdır [3, 18]. İstek ve arzu olmak üzere iki tür ihtiyaç vardır. İstekler, tasarım çözümü tarafından kesinlikle karşılanması gerekir. Arzu ise teknolojik, psikolojik ve ekonomik koşullara göre dikkate alınabilir. Tasarım sürecinde ihtiyaç listesine ekleme ve çıkarma yapılabilir. Tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı için hazırlanan genel bir ihtiyaç listesi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Tekerlekli sandalye tasarım ihtiyaç listesi (Design specification for the wheelchair)

A/İ	İhtiyaçlar
1	İ İnsan antropometrisine uygun tasarım
2	A En az 3 kademeli hız değiştirme sistemi
3	İ 20 km/saat hıza kadar hareket yeteneği
4	İ Akslar arası mesafe 120 cm'yi geçmemeli
5	A Maks. araç genişliği 75 cm'yi aşmamalı
6	İ Min. 10 Hp güç üretebilmeli, Min. 50 cm ³ motor hacmi
7	A Düşük enerji sarfiyatı, enerji depolayabilme ve tekrar kullanma
8	İ Hafif ve dayanıklı olmalı (min. 100kg)
9	A Kaza ve devrilme önleme sistemi
10	İ Aydınlatma (min. 3 lux)
11	İ Farklı zeminlerde ilerleyebilecek mekanizma
12	İ Kullanıcının doğrulması sağlayacak tasarım
13	A Min. 50% oranda standart malzeme kullanımı
14	İ Ürün maliyetini 50.000,00 TL'yi aşmamalı
15	İ Modüler ve çekici tasarıma sahip olmalı
16	A Bakım maliyetleri yıllık 500,00 TL'yi geçmemeli
17	İ Sesli uyarı / ikaz sistemi olmalı
18	A Yük taşıma için min 0.5 m ³ hacim
19	A Merdiven çıkma fonksiyonu

4.2. Fonksiyon Şeması Oluşturma (Establishing A Function Structure)

Ürünün yerine getirdiği temel işleve genel (tüm) fonksiyon denir. Tekerlekli sandalyenin genel fonksiyonu engelli bireyin hareketini sağlamaktır. Teknik sitemlerde bileşen fonksiyonlarının anlaşılması ve fonksiyonlar arasındaki ilişkinin belirlenmesi için tüm sistem, belli kurallar çerçevesinde alt sistemlere ayrılır. Enerji (E), malzeme (M) ve sinyal (S) akışı ile alt sistemlerin anlamlı birleşimleri fonksiyon yapısını oluşturur [2]. Tekerlekli sandalyeye ait fonksiyon şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Sistemin önemli alt fonksiyonları; güç elde etme, kontrol, torku iletme, hareket, koltuk hareketi, emniyet sistemi ve aydınlatma / ikaz olarak tasarımı seçenek sayı ve kaliteleri de artabilir. Bu çalışmada oluşturulan kavramsal tasarım seçenekleri Tablo 3'de verilmiştir ve burada 6 farklı alternatif vardır.

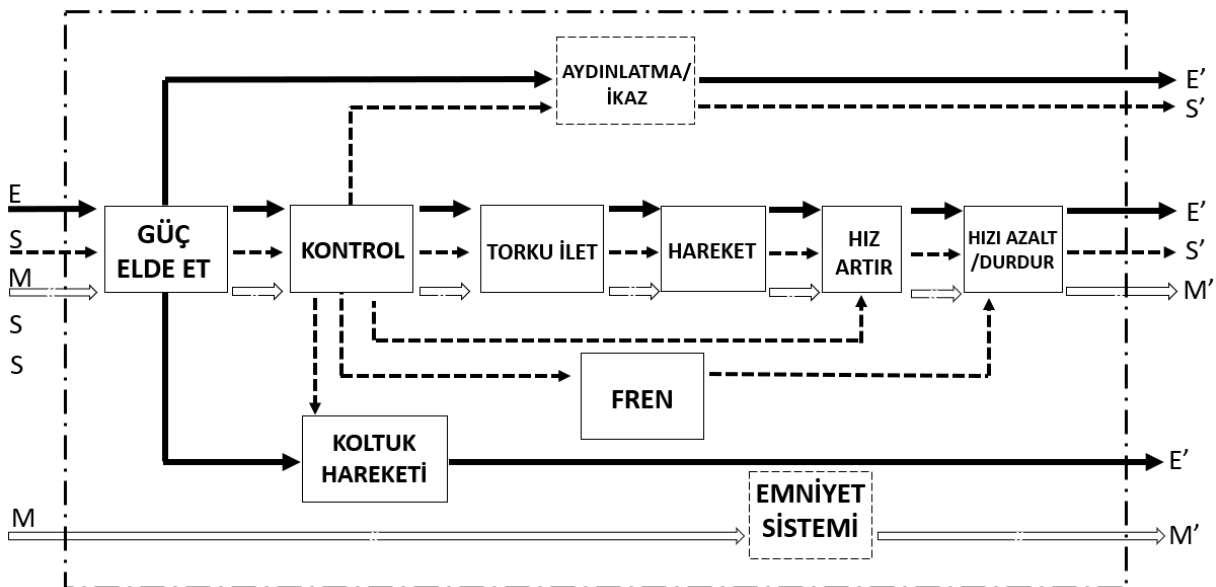
4.3. Tasarım Seçenekleri Oluşturma (Development of Design Variants)

Önemli alt fonksiyonların her birine çözüm önerileri geliştirilerek bir tablo oluşturulur. Muhtelif çözüm önerilerinin uygun birleşimleriyle tasarım seçenekleri (varyantlar) elde edilir. Tablo 2'de gösterilen tekerlekli sandalyeye ait morfolojik matraste önemli alt fonksiyonlar birinci sütuna yerleştirilmiştir. Her bir alt fonksiyonun bulunduğu satıra uygun çözüm önerileri sıralanır. Mevcut teknolojilerle olası tüm alternatif çözümler bu tabloda yer alabilir. Sisteme güç elde etmede elektrik motoru, içten yanmalı motor veya kas gücü kullanılabilir. Kontrol ve idare için uzaktan kumanda, bilgisayar

destekli kontrol, direksiyon, zihin kontrolü ve el ile idare seçenekleri düşünülmüştür. Torku iletmede; kayış-kasnak mekanizması, dişli kutusu, zincir dişli ve her teker için ayrı motor çözümleri kullanılabilir. Tekerlekli sandalyenin farklı zeminlerde ilerleyebilmesi için 2 büyük - 2 küçük teker, 2 büyük - 1 küçük teker, 4 eş boyutlu teker, palet-tekerlek ve yalnızca paletli hareket birimlerinden biri tercih edilebilir. Kullanıcı pozisyonunu ayarlama sabit koltuk ve hareketli koltuk olmak üzere iki seçenek vardır. Emniyet kemeri, kafes ve hava yastığı koruyucu sistem amaçlı alternatif çözümler olabilir. Aydınlatma ve ikaz için led lamba, flaş lamba veya korna kullanılabilir. Alt çözüm öneri sayılarına bağlı olarak tasarım seçenek sayı ve kaliteleri de artabilir. Bu çalışmada oluşturulan kavramsal tasarım seçenekleri Tablo 3'de verilmiştir ve burada 6 farklı alternatif vardır.


























4.4. Ön Değerlendirme (Pre-evaluation of sample design)

İhtiyaç listesi, fonksiyon yapısı geliştirme ve morfolojik kart oluşturma adımları sonrası tasarım seçenekleri oluşturulur. Bundan sonraki süreçlerde tasarım seçenekleri değerlendirilir ve en ideal / optimum tasarım belirlenir (seçilir) [2]. Şekil 3'de gösterilen seçim kartı, değerlendirme araçlarının ilki olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Tekerlekli sandalye tasarımı için bir önceki adımda oluşturulan tasarım seçenekleri (6 farklı tasarım alternatifi), belirlenen kıstaslara göre değerlendirilmiş ve uygun/uyumlu olmayan üç seçenek elenmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Bulanık mantık işlem akışı (Flow chart of fuzzy logic)

Tablo 2. Örnek tasarım için morfolojik matris (Morphological matrix of the sample problem)

		1	2	3	4	5
A	GÜÇ ELDE ET					
		ELEKTRİK MOTORU	İÇTEN YANMALI MOTOR	KAS GÜCÜ		
B	KONTROL					
		EL İLE	UZAKTAN KUMANDA	BILGISAYAR DESTEKLİ	DİREKSİYON	ZİHİN KONTROLÜ
C	TORKU İLET					
		KAYIŞ-KASNAK	DİŞLİ KUTUSU	ZİNCİR DİŞLİ	HER TEKER İÇİN AYRI	GÜÇ İLETİMİ YOK
D	HAREKET					
		2 BÜYÜK 2 KÜÇÜK	2 BÜYÜK 1 KÜÇÜK	4 EŞ BOY TEKER	PALET	PALET + TEKER
E	KOLTUK HAREKETİ					
		SABİT KOLTUK	HAREKETLİ KOLTUK	KOLTUK YOK		
F	EMNİYET BİRİMİ					
		EMNİYET KEMERİ	KAFES SİSTEMİ	HAVA YASTIĞI	YOK	
G	AYDINLATMA /İKAZ					
		LED	FLASH	KORNA		

Tablo 3. Elde edilen kavramsal tasarım seçenekleri (Conceptual design variants obtained)

Seçenek No	Alt Fonksiyonlara Çözüm Önerileri
Seçenek 1	A1-B3-C4-D3-E2-F2-G1
Seçenek 2	A3-B1-C5-D1-E1-F4-G3
Seçenek 3	A2-B2-C3-D4-E2-F3-G2
Seçenek 4	A3-B1-C1-D2-E1-F1-G2
Seçenek 5	A1-B5-C4-D5-E3-F2-G1
Seçenek 6	A1-B4-C2-D1-E1-F1-G2

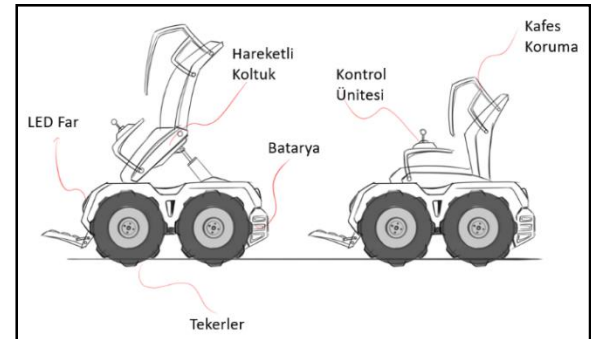
4.5. Önemli Tasarımlar (Promising Designs)

Ön (kaba) değerlendirme işlemi sonucunda kıstasları karşılayan ve umut vadeden üç tasarım seçeneği belirlenmiştir (diğer üçü ise elenmiştir).

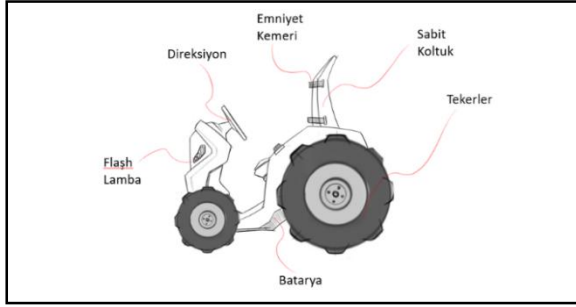
Seçim kartı ile ön elemeyi geçen tasarım seçeneklerine (varyantlarına) ait eskizler (kavramlar/konseptler) aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4-6). Bunlardan tasarım seçeneği 1 hareketli koltuk mekanizmasıyla kullanıcıya doğrulma (ayağa kalkma) imkânı sağlamaktadır. Ayrıca her teker ayrı bir motora sahip olduğundan engebeli arazilerde kolaylıkla hareket edebilir. Tasarım seçeneği 2 kullanıcının kas gücüyle hareket edebilmektedir. Öndeki iki küçük tekerlek aracılığıyla ise kolay kullanılabilir. Tasarım seçeneği 3, direksiyonla yönlendirilir ve 2 büyük - 2 küçük tekerleğe sahiptir. Burada emniyet kemeri ile kullanıcının güvenliği sağlanır.

SEÇİM KARTI	
SEÇİM KRİTERLERİ	KARAR
Çözüm seçeneklerini değerlendirilir Evet (+) Hayır (-) Bilgi yetersiz (?) Tanımı kontrol et (!)	Çözüm seçeneklerini işaretle (+) Çözümü sürdür (-) Çözümü elimine et (?) Bilgi topla çözümü tekrar değerlendir
Tüm işlevle uyumlu	
Sartname isteklerini karşıla	
Üretilebilirlik	
Müsaade edilebilir maliyet	
Emniyet şartlarını doğrudan karşılar	
Kolay tasarım	
Yeterli bilgi	
Açıklama	
S ₁	+ + + ? + + +
S ₂	? - + + ? + +
S ₃	- + - + ? + +
S ₄	+ - + + - - ?
S ₅	+ + - - + ? -
S ₆	+ + + + ? + +

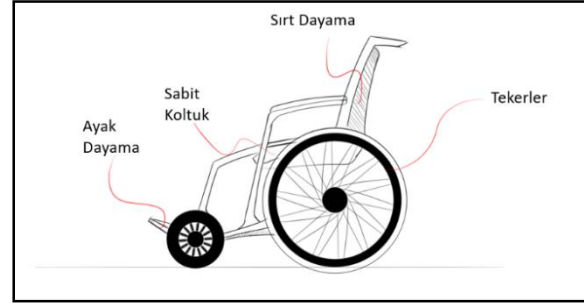
Şekil 3. Ön değerlendirme seçim kartı (Pre-evaluation selection card)



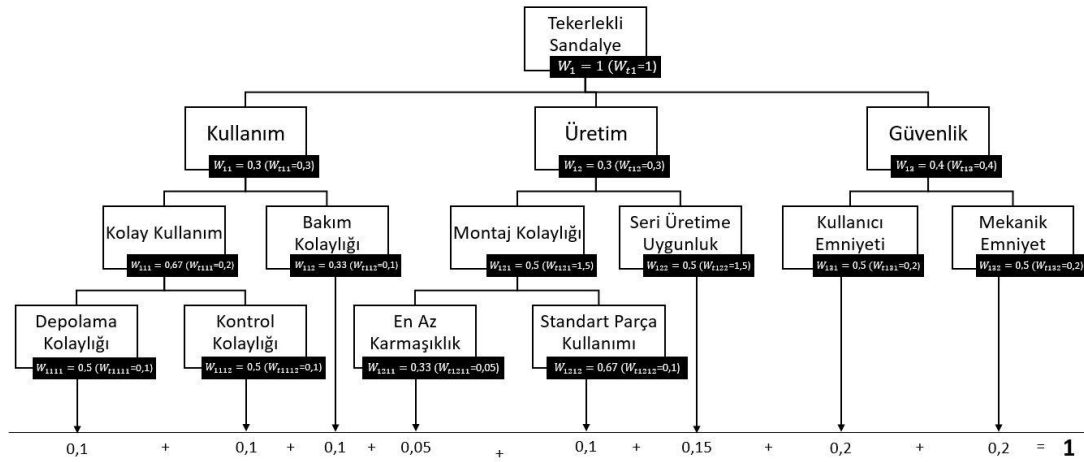
Şekil 4. Kavramsal tasarım seçeneği 1 (Design variant 1)



Şekil 5. Kavramsal tasarım seçeneği 2 (Design variant 2)



Şekil 6. Kavramsal tasarım seçeneği 3 (Design variant 3)



Şekil 7. Tekerlekli sandalye kriter ağacı (Objectives tree for the design of wheelchair)

4.6. Kriter Ağacı (Objective Tree)

Optimum tasarım seçeneğini bulabilmek için elde kalan tasarımlar ek seçim / değerlendirme işlemlerine tabi tutulur. Kriter ağacı ayrıntılı bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Kriter ağacının toplam ağırlık değeri 1 veya 100 olarak belirlenir. Toplam ağırlık değeri ağacın en uç dallarına kadar önem derecesine göre pay edilir. En alt dallardaki ağırlık değerleri toplamı 1 veya 100 olmalıdır. Tekerlekli sandalyenin karşılması istenen üretim, montaj, kullanım, depolama, güvenlik vb. kriterler hiyerarşik şekilde yazılmış ve bu kriterlerin ağırlık değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Engelli kullanıcılar için tasarlanan bir sistemde güvenlik en önemli kriter olacaktır. Bu nedenle güvenlik kriterinin ağırlık (önem) değerleri nispeten daha yüksektir.

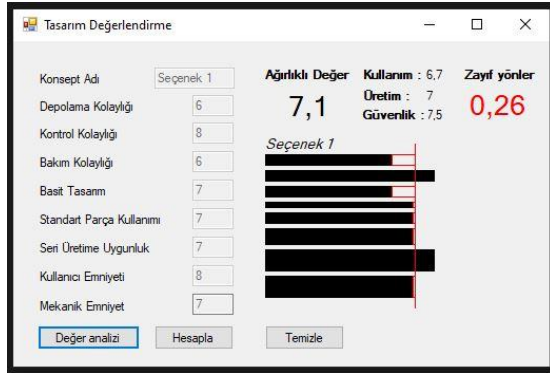
Elde kalan tasarım seçenekleri, kriterleri karşılama durumlarına göre değerlendirilip 0 ile 10 arasında puanlandırılır (0 puan: hiç karşılamıyor, 10 puan: tamamen karşılıyor). Bu puanlar bir sonraki değerlendirme adımı olan bulanık mantık denetleyicisi için giriş değişkenleri olacaktır.

4.7. Bulanık mantık ile değerlendirme (Using Fuzzy logic for the evaluation)

Kullanıcı beklentilerinin tespiti ve tasarım sürecine dahil edilmesi ürün başarısını doğrudan etkiler. Müşteriler, çoğu durumda beklentilerini güzel, sağlam, dayanıklı, güvenli vb. gibi sözel terimlerle ifade eder. Sözel terimlerin teknik sistemlere uyarlanmasında bulanık mantık yaklaşımı kullanılabilir.

Tasarımın başarısı birçok etkenin bir araya gelmesiyle sağlanabilir. Bir tasarımın iyi olarak kabul edilebilmesi için üretilebilir, kullanımı kolay, estetik, fonksiyonel, yenilikçi, ekonomik ve emniyetli olması gerekir. Ayrıntılı bir tasarım değerlendirmesi için bu özellikleri oluşturan alt bileşenler de hesaba katılmalıdır. Bu çalışmada tekerlekli sandalye için 8 farklı değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Üç tasarım seçeneği; depolama kolaylığı, kontrol kolaylığı, bakım kolaylığı, basit tasarım, standart parça kullanımı, seri üretime uygunluk, kullanıcı emniyeti ve mekanik emniyet kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çok sayıda girdi değişkeni ile

işlem yapmak bulanık mantık modelini karmaşık hale getirebilir ve değerlendirme süresini uzatabilir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen 8 kriter; kullanım, üretim ve güvenlik olmak üzere 3 ana grupta toplanmıştır. Tasarım seçeneklerini değerlendirme ve ağırlık oranlarını belirlemek için Visual Basic dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır (Şekil 8). Bu program, 8 kritere verilen puanların 3 temel kritere dönüştürmede kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bu kriterlere ait puanlar ise bulanık mantık modeli giriş değişken değerlerini oluşturmaktadır. Ayrıca aynı program ile değer profil diyagramı da oluşturulabilmektedir (-ki bu diyagram seçenek sayısı ikiye düşürüldüğü ve bunların da kriterlerden aldığı puanlar birbirine yakın olması halinde kullanılır. Böylece iki tasarım seçeneğinden hangisinin daha dengeli puanlara sahip olduğu belirlenebilir). Değer profil diyagram sonuçları ve bulanık mantık işlemi sonuç değerleri karşılaştırılabilir ve işlemlerin uyum ve doğruluğu kontrol edilebilir.



Şekil 8. Tasarım değerlendirme program arayüzü
(Interface of the developed design evaluation program)

Tekerlekli sandalye bulanık mantık modeli üç giriş ve bir çıkış değişkeninden oluşmaktadır. Giriş değişkenleri kullanım, üretim ve güvenlik kriterlerine ait toplam puanlardır. Çıkış değişkeni ise tasarımın 0 ile 100 (0 en düşük, 100 en yüksek) arasında aldığı başarı puanını ifade eder. Bulanık mantık yönteminde sayısal giriş değerleri bulanıklaştırma işlemi ile “çok az, az, orta, fazla, çok fazla” gibi üyelik fonksiyonlarına dönüştürülür. Üyelik fonksiyonları, bir elemanın bir kümeye hangi oranda ait olduğunu belirtmektedir [14]. Problemin durumuna göre üyelik fonksiyon sayıları değişebilir. Daha hassas sonuçlar isteniyorsa üyelik fonksiyonları artırılabilir. Giriş ve çıkış değişkenleri arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu nedenle üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir.

Üretim, kullanım ve güvenlik, Tekerlekli sandalye bulanık mantık modelinin giriş değişkenleridir. Bu giriş değişkenleri üçer üyelik fonksiyonundan

oluşmaktadır. Kullanım ve üretim değişkenleri için zor, ortalama, kolay; güvenlik değişkeni için ise kötü, ortalama ve iyi üyelik fonksiyonları belirlenmiştir (Şekil 9). Tekerlekli sandalye engelli kullanıcılara yönelik araçtır. Kullanıcı emniyeti ve mekanik emniyet tasarımca mutlaka karşılanmalıdır. Bu nedenle güvenlik değişkeni için düşük puanlar kabul edilemez. Şekil 9’da da görüldüğü gibi güvenlik değişkeni için 3 ve daha düşük puanlar %100 “kötü” olarak değerlendirilmektedir. Diğer giriş değişkenlerinde üyelik fonksiyonları 0-10 aralığında simetrik olarak sıralanmaktadır. Çıkış değişkeni ise çok kötü, kötü, ortalama, iyi, çok iyi olmak üzere 5 üyelik fonksiyonundan oluşur. Tüm üyelik fonksiyonları ve sınır değerleri Şekil 9’da gösterilmiştir.

Bir konuda karar vermek için bilgi ve tecrübeden yararlanır. Bu tecrübelerin bilgisayar alanındaki karşılığı ise kural tabanlı ilişkilerdir. Bulanık mantık modelde IF-THEN (EĞER-İSE) yapısı / formatı ile gerekli bilgiler kural tabanına eklenir. Giriş değişkeni birden fazla ise aralarında OR-AND-NOT (VEYA-VE-DEĞİL) bağlaçları kullanılabilir. İyi bir kural tabanlı sistem tüm olasılıkları hesaba katmalıdır. Tekerlekli sandalye bulanık mantık modeli için 27 (= 3 x 3 x 3) kuraldan oluşan bir kural veri tabanı geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalye tasarımı için oluşturulan kural tabanının bir kısmı Tablo 4’te görülmektedir.

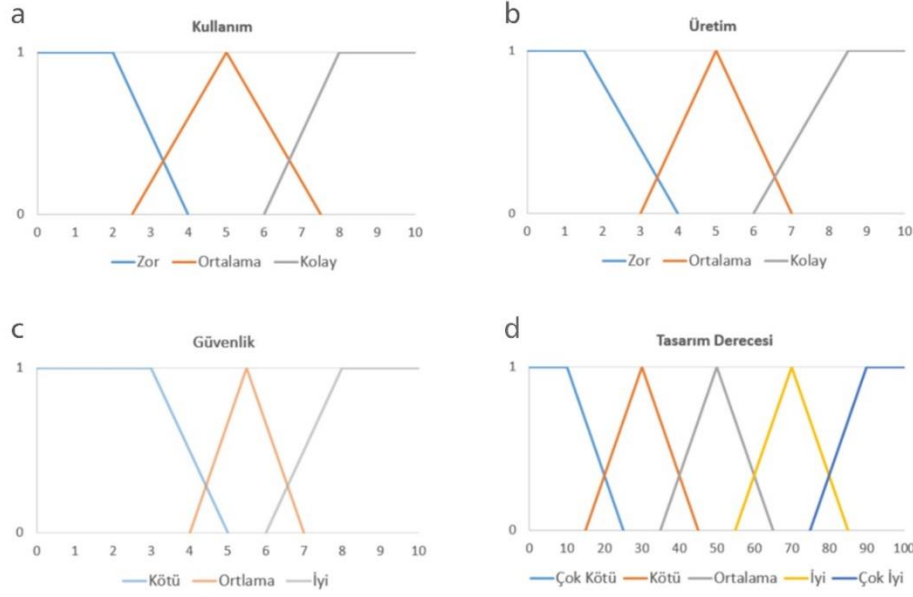
Tablo 4. Tekerlekli sandalye için oluşturulan kural tabanı (Rule base for wheelchair design)

	Kullanım		Üretim		Güvenlik	Tasarım Derecesi		
1	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	İse	Çok Kötü	
2	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	Ortalama	İse	Çok Kötü
3	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	İyi	İse	Kötü
4	Eğer	Zor	Ve	Ortalama	Ve	Kötü	İse	Çok Kötü
5	Eğer	Zor	Ve	Ortalama	Ve	Ortalama	İse	Kötü
.
.
.
25	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	Kötü	İse	Ortalama
26	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	Ortalama	İse	İyi
27	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	İyi	İse	Çok İyi

Çıkarım mekanizması, bulanık giriş değerlerini kural tabanı vasıtasıyla yorumlar ve bir sonuç bulur. Mamdani, Larsen, Tagaki-Sugeno vd. gibi modeller çıkarım işleminde kullanılabilir. Bu çalışmada basit yapısı ve hesaplama kolaylığından dolayı Mamdani (Max-Min) modeli kullanılmıştır. Çıkarım işlemi sonucunda elde edilen bulanık ifadeler (çok kötü, kötü, ortalama, iyi, çok iyi) durulama işlemi ile sayısal

değerlere dönüştürülür. Bu amaçla ağırlık merkezi, ağırlıklı ortalama, alan merkezi, en büyüklerin ortalaması gibi yöntemler kullanılabilir [24]. Bu

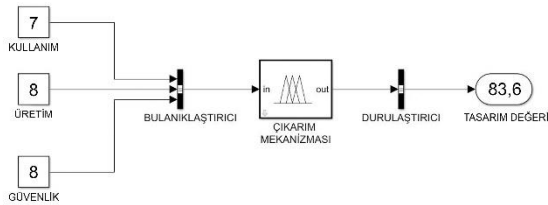
çalışmada durulama işlemi için en sık tercih edilen yöntemlerden ağırlık merkezi (centroid) uygulanmıştır.



Şekil 9. Üyelik fonksiyonları: (a) Kullanım (b) Üretim, (c) Güvenlik ve (d) Tasarım Derecesi (Membership functions: (a) Usage, (b) Production, (c) Security and (d) Design Degree)

4.8. Değerlendirme (Evaluation)

Tüm seçim ve değerlendirme işlemleri sonucunda seçenek 1'in nihai tasarım olması karar verilmiştir. Her tekerlek için ayrı bir elektrik motoruna sahip tekerlekli sandalye, farklı zemin türlerinde ve engebeli arazilerde kolaylıkla hareket edebilir. Hareketli koltuk, kullanıcının günlük işlerini daha kolay yapmasını sağlayacaktır. Ayrıca, bu sayede kullanıcının araca binip-inmesi de daha kolay ve zahmetsiz olabilir. Kafes sistemi, kullanıcıyı çarpma, devrilme gibi kazalardan en az hasarla kurtulmasını sağlayabilir. Bilgisayar destekli kontrol ünitesi; arıza durumu, hız, batarya doluluk oranı, menzil, sıcaklık vb. gibi bilgileri kontrol etmeye olanak sağlar. Led ışıklı aydınlatma, kullanıcının gece yolculuğu yapmasına izin verir.



Şekil 10. Tasarım değerlendirmede bulanık mantık modeli (Fuzzy logic model in the design evaluation)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kavramsal tasarım, birçok ürün ve makine tasarımında kullanılan sistematik bir yöntemdir. Mevcut çözüm uzayında olmayan yenilikçi çözümler ile ideal tasarıma ulaşmayı hedefler. Önce istenilen özelliklere sahip tasarım seçenekleri oluşturulur, sonrasında adım adım bu seçenekler elenerek ideal tasarıma ulaşılır. Ancak değerlendirme işlemleri zordur ve uzun zaman alır. Bu çalışmada; değerlendirme hassasiyetini artırma, süreci hızlandırma ve otomatikleştirme için kavramsal tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanımı açıklanmıştır. İhtiyaç listesi oluşturma ile işleme başlanır. İstek ve arzuların açık ve tam olarak ifade edilmesi ideal tasarım sonucuna ulaşmada önemlidir. Fonksiyon şemasında problem formülasyonu ile alt fonksiyonlar belirlenir. Bu fonksiyonların her birine morfolojik kart kullanılarak öneriler sunulur. Çözüm önerilerinin uygun birleşimleriyle tasarım seçenekleri (varyantlar) oluşturulur. Tasarım seçeneklerini değerlendirmek ve en iyi tasarımı (konsepti) bulmak için sırasıyla; seçim kartı ve bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

Kavramsal tasarım aşamasında verilen kararlar ürün başarısını doğrudan etkiler. Bu aşamada üretim, montaj, nakliye, kullanım, bakım, geri dönüşüm gibi pek çok kriter hesaba katılır. Ancak tasarımın erken

aşamalarında bilgiler (genelde) eksik veya belirsizdir. Belirsizliğin üstesinden gelmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan en önemli farkı pek çok kriteri dikkate alması ve ürünü tüm yönlerden değerlendirmesidir. Yazılan bilgisayar programı ile tasarım kriterleri 3 ana gruba (üretim, kullanım ve güvenlik) indirgenmiştir. Böylece işlem kolaylığı ile değerlendirme süresinin kısaltılması hedeflenmiştir.

Yöntemin uygulanabilirlik ve başarısını değerlendirmek için aynı çalışma klasik kavramsal tasarım yaklaşımı ile tekrar yapılmıştır. İki yöntemde de değerlendirme adımları sonunda tasarım seçeneği 1'in ideal tasarım olduğu görülmüştür. Bulanık mantık yöntemi ile değerlendirme işlemi normal kavramsal tasarım sürecine göre daha kısa sürede tamamlanmıştır. Ayrıca 0-100 arası değerlendirme ölçeği sonucun hassasiyetini artırmaktadır. Bu sonuçlar, değerlendirme süreçlerinin otomasyonu için kavramsal tasarımda bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği göstermektedir.

Özellikle çok sayıda tasarım seçeneğinin olduğu durumlarda değerlendirme işlemi için bulanık mantık yöntemi tercih edilebilir. Ancak yöntemin farklı problemlere uyarlanabilmesi için kural tabanının daha kapsamlı ve hassas düzenlenmesi gerekir. Benzer problemlerin çözümünde aynı bulanık mantık modeli kullanılabilir de özellikle farklı sektörlerde ürün tasarımlarına uyarlamak için düzenlemeye ihtiyaç olabilir. Gelecek çalışmalarda tasarım değerlendirme adım sayısını azaltmak ve seçenek oluşturma adımları da dâhil tüm süreci otomatikleştirme konusu ele alınabilir ve irdelenebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] M. Cantamessa, F. Montagna, S. Altavilla, and A. Casagrande-Seretti, "Data-driven design: The new challenges of digitalization on product design and development," *Design Science*, vol. 6, no. 27, pp. 1-33, September 2020.
doi: 10.1017/dsj.2020.25.

[2] H. R. Börklü, N. Yüksel, K. Çavdar, and H. K. Sezer, "A practical application for machine design education," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 12, no. 2, pp. 1-11, March 2018.

doi: doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0036.

[3] H. R. Börklü, *Mühendislik Tasarımı: Sistematik Yaklaşım*. Ankara: Hatiboğlu Yayınları, 2010.

[4] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design: A systematic approach*. London: Springer, 1997.

[5] S. Pugh, *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley, 1991, p. 278.

[6] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*. McGraw: Hill Inc, 1991.

[7] Z. Ayağ, "A fuzzy AHP-based simulation approach to concept evaluation in a NPD environment," *IIE Transactions*, vol. 37, no. 9, pp. 827-842, September 2005.
doi:10.1080/07408170590969852.

[8] Z. Ayağ and R. G. Özdemir, "A hybrid approach to concept selection through fuzzy analytic network process," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 368-379, February 2009.
doi: 10.1016/j.cie.2008.06.011.

[9] H. Malekly, S. Meysam Mousavi, and H. Hashemi, "A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 7, pp. 4910-4920, July 2010.
doi: 10.1016/j.eswa.2009.12.024.

[10] K.-S. Chin, A. Chan, and J.-B. Yang, "Development of a fuzzy FMEA based product design system," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 7, pp. 633-649, March 2008.
doi: 10.1007/s00170-006-0898-3

[11] A. Mohebbi, S. Achiche, and L. Baron, "Multi-criteria fuzzy decision support for conceptual evaluation in design of mechatronic systems: a quadrotor design case study," *Research in Engineering Design*, vol. 29, no. 3, pp. 329-349, July 2018. doi: 10.1007/s00163-018-0287-6

[12] H.-Z. Huang, Y. Liu, Y. Li, L. Xue, and Z. Wang, "New evaluation methods for conceptual design selection using computational intelligence techniques," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 733-746, March 2013.
doi: 10.1007/s12206-013-0123-x.

- [13] R. Belohlavek and G. J. Klir, *Concepts and Fuzzy Logic*. London: The MIT Press, 2011.
- [14] R. Sarfaraz Khabbaz, B. Dehghan Manshadi, A. Abedian, and R. Mahmudi, "A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design," *Materials & Design*, vol. 30, no. 3, pp. 687-697, March 2009.
doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.026.
- [15] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965.
doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [16] C. R. Alavala, *Fuzzy Logic and Neural Network: Basic Concept & Application*. New Delhi: New Age International Limited, 2008.
- [17] F. Deroncourt, "Introduction to fuzzy logic," *Massachusetts Institute of Technology*, vol. 21, 2013.
- [18] M. Mayda and H. R. Börklü, "An integration of TRIZ and the systematic approach of Pahl and Beitz for innovative conceptual design process," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 859-870, October 2014. doi: 10.1007/s40430-013-0106-y
- [19] S. B. Sutono, S. H. Abdul-Rashid, H. Aoyama, and Z. Taha, "Fuzzy-based Taguchi method for multi-response optimization of product form design in Kansei engineering: a case study on car form design," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 10, no. 9, December 2016.
doi: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0108.
- [20] X. Zhou, Y. Wu, and V. Polochova, "Product Conceptual Design Method Based on Intuitionistic Fuzzy Binary Semantics Group Decision Making," *Journal of Service Science and Management*, vol. 12, pp. 742-754, October 2019.
doi: 10.4236/jssm.2019.126050.
- [21] X. Kang, "Aesthetic product design combining with rough set theory and fuzzy quality function deployment," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, pp. 1131-1146, July 2020.
doi: 10.3233/JIFS-192032
- [22] J. Ma, G. E. O. Kremer, and C. D. Ray, "A comprehensive end-of-life strategy decision making approach to handle uncertainty in the product design stage," *Research in Engineering Design*, vol. 29, pp. 469-487, November 2018.
doi: 10.1007/s00163-017-0277-0
- [23] J. d. Aguiar, R. K. Scalice, and D. Bond, "Using fuzzy logic to reduce risk uncertainty in failure modes and effects analysis," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, November 2018.
doi: 10.1007/s40430-018-1437-5.
- [24] H. T. Nguyen, C. L. Walker, and E. A. Walker, *A First Course in Fuzzy Logic*, 4 ed. (Textbooks in Mathematics). Boca Raton: CRC Press, 2019.

This is an open access article under the CC-BY license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

