

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 08-01-2020

Kabul: 06-08-2020

*Sorumlu Yazar: Zühal Erden
Email: zuhal.erden@atilim.edu.tr

Kişiselleştirilmiş Robot Tasarımı için Kavramsal Tasarım Metodolojisi

Bu makalede, kişiselleştirilmiş robotlardan oluşan robot ürün ailelerinin kavramsal tasarımı için geliştirilen ve mekatronik davranış modüllerine dayanan sistematik bir yaklaşım anlatılmıştır. Çalışma kapsamında mekatronik sistemlerin algılama, muhakeme ve motorik hareket davranışlarını içeren temel davranış modülleri 3 boyutlu bir Tasarım Yapı Matrisi (TYM) ile modellenmiştir. Mekatronik davranış modülleri farklı robot görevlerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Makalede bu çerçeveye dayanan modüler mekatronik tasarım metodolojisinin kavramsal yapısı sunulmuş ve laboratuvarında yapılan bir örnek uygulama anlatılmıştır.

GİRİŞ

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmeleri, artan ve çeşitlenen müşteri gereksinimleri ve beklentileri son yıllarda yeni ürün geliştirme süreçlerini önemli ölçüde etkilemiştir. Ürün çeşitleri (müşteri taleplerini karşılayacak çeşitlendirmeler) artmış, özelleştirilmiş ürünler standart ürünlere göre müşteri memnuniyetini sağlamada daha fazla ön plana çıkmıştır. Küresel pazardaki rekabet ortamında firmaların başarısının ve sürdürülebilirliğinin, giderek daha parçalı hale gelen talebi yönetmekle mümkün olduğu görülmektedir. Müşteri ihtiyaç ve beklentilerine cevap veren ürünler geliştirmeyi hedefleyen mühendislik tasarım süreci de, tüm bu gelişmelerden etkilenmiştir. Bir ürün için kişilere ya da gruplara özel uygulanabilir farklı çözümler geliştirme ihtiyacı tasarımda ve üretimde yeni tekniklerin ve felsefelerin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen yeni felsefelerden biri de kitlesel bireyselleştirme yaklaşımıdır. Kitlesel bireyselleştirme en genel tanımıyla, “bireysel müşterilerin ya da müşteri gruplarının ihtiyaçlarına cevap verecek mal ve/veya hizmetlerin seri üretim verimliliği ile sunulmasını sağlayan teknoloji ve sistemlerin tamamı” olarak tanımlanmaktadır (Tseng ve Jiao, 2001). Kitlesel bireyselleştirmede firmalar ürün çeşitliliğini genel olarak modüler ürün ailelerinin (platform tabanlı ürünlerin) tasarımı ile sağlamaktadır (Huang ve Kusiak, 1998; Huang, 2000; Gerherson vd., 2003; Li vd., 2013; Qiao vd., 2017). Bir ürün ailesi ortak bir platformdan türetilen benzer ürünlerin oluşturduğu ve farklı müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için belirli özelliklere/fonksiyonlara sahip bir grup üründür

(Jiao vd., 2007). Ürün ailesi geliştirme süreci, ürün platformu ile bu platforma monte edilerek birbirinden farklı fonksiyonları olan ürünleri oluşturmada kullanılabilen çeşitli modüllerin tasarımını ve imalatını içermektedir. Ürün aileleri ve platform tabanlı modüler ürün geliştirme son yıllarda tasarım ve üretim yapmakta olan firmaların önem verdikleri konular arasına girmiştir. Platform tabanlı modüler ürün geliştirme yaklaşımı firmaların varolan üretim sistemlerini ölçek ve kapsam bakımından çok fazla değiştirmeden ürün çeşitliliğini artırmalarını sağlamaktadır (Simpson, 2004; Jiao vd., 2007; AlGeddawy vd., 2013; Bonvoisin vd., 2016). Platform tabanlı tasarım temel olarak ürün modülerliğine dayanmakta olup, yüksek kalitede ürün çeşitliliğinin artırılması, hızlı güncelleme, yeni ve katma değeri yüksek ürünlerin kısa zamanda tasarlanması ve üretimi, değişen müşteri beklentilerini zamanında karşılayarak müşteri memnuniyetini artırması ve dolayısıyla küresel pazarda rekabet gücünü geliştirmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Platform tabanlı modüler ürün ailelerinin geliştirilmesi, tasarım ve üretim yapan firmaların mevcut üretim sistemlerini kullanarak ürün çeşitliliğini artırmaları için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ürün ailelerinin geliştirilmesi, temel olarak ürün çeşitliliğinin artmasına, aile içinde yeni ürünlerin hızla tasarlanmasına, güncellenmesine ve üretilmesine olanak sağlayan modüler tasarım metodolojilerine dayanmaktadır. Böylelikle değişen ihtiyaçlar ve beklentiler zamanında karşılanarak müşteri memnuniyetinin artması sağlanır. Bu

yaklaşım, firmaların kitlesel bireyselleştirmeye uyum sağlamlarını, çeşitlenen müşteri talebine cevap vermelerini ve bu talebi yöneterek küresel rekabet ortamında başarılı olmalarını sağlar. Bu nedenlerle, tasarım biliminde yapılan çalışmalarda modüler tasarım metodolojilerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar giderek artmaktadır (Jiao vd., 2007; Gu vd., 2009; Yan ve Stewart, 2010; Wang vd., 2014; Ma ve Kremer, 2016; Bonvoisin vd., 2016)

Tasarım literatüründe, platform tabanlı modüler ürün tasarımı için geliştirilmiş genel amaçlı sistematik yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler ürünlerin tasarım aşamasından sonra analiz edilerek modülerleştirilmesine dayanmaktadır, yani ürünlerin fiziksel elemanlarını temel almaktadır. Ayrıca mevcut uygulamalar daha çok mekanik sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Mekatronik ürünlerin ve robotların modüler tasarımında ise genellikle tasarıma özel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Robot tasarımı için geliştirilmiş ve kavramsal tasarımın ilk aşamalarından itibaren uygulanabilecek, fiziksel elemanlardan bağımsız, sistematik bir modüler tasarım yaklaşımına ise literatürde rastlanmamıştır.

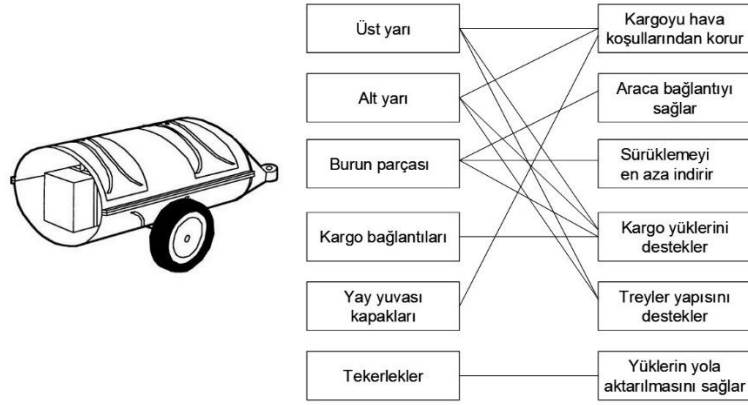
Bu makalede modüler robot ürün ailelerinin sistematik tasarımı için bir altyapı oluşturmak üzere, erken dönem kavramsal tasarım aşamasında kullanılacak ve robotun fiziksel tasarımından bağımsız “davranış modülleri”ne dayalı olarak geliştirilen bir tasarım yaklaşımı anlatılmaktadır. Bu çalışmada robot davranış modüllerinin belirlenmesi için özgün olarak geliştirilen 3 boyutlu (3B) Tasarım Yapı Matrisi (TYM) kullanılmaktadır. Sistematik modüler tasarım literatüründe modül belirlemek için 2 boyutlu (2B) TYM kullanılmaktadır, ancak bu makalede sunulan 3B-TYM tamamen yeni ve özgün bir yöntemdir. Literatürde mevcut 2B-TYM uygulamaları ürünün kavramsal tasarımın ileri aşamalarında belirlenen fiziksel tasarıma bağlıdır ve çoğunlukla mekanik sistemlere uygulanmıştır. Bu nedenle erken dönem kavramsal tasarımda (özellikle tamamen yeni ve özgün robot tasarımları için) kullanılamamaktadır. Robot davranış modüllerine dayalı 3B-TYM yaklaşımı ise, sistemin fiziksel tasarımının henüz yapılmadığı erken dönem kavramsal tasarım aşamasında kullanılacak bir yapı oluşturmaktadır.

MODÜLER TASARIM METODOLOJİSİ

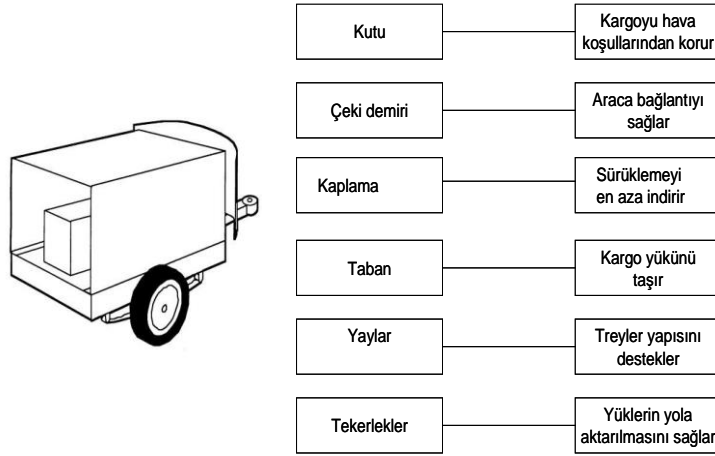
Platform tabanlı ürün ailelerinin sistematik tasarımı için, ürün mimarisinin kavramsal tasarımın ilk aşamalarından başlayarak modüler bir yapıda kurgulanması gerekir. Sistematik tasarımda bir ürün fonksiyonel ve fiziksel olmak üzere iki çeşit eleman grubundan meydana gelecek şekilde tasarlanır (Pahl ve Beitz, 1996). Fonksiyonel elemanlar ürünün istenen

görevi yapmasını sağlayan operasyon veya değişimler olarak ifade edilebilir. Fiziksel elemanlar ise ürünün fonksiyonlarını yerine getirmesini sağlayan alt sistemler ve komponentlerdir. Ürünün fiziksel elemanları çeşitli yapısal bloklar biçiminde organize edilmiştir. Her blok ürünün bazı fonksiyonlarını yerine getirecek parçaların birleşiminden oluşmaktadır. Ürün tasarımında fiziksel elemanların oluşturduğu blokların yapısı ürün mimarisi ile ilgilidir. Ürün mimarisi, ürünün fonksiyonel elemanlarını fiziksel bloklar halinde düzenleyen ve fonksiyonel bileşenlerle fiziksel bileşenler arasındaki etkileşimi sağlayan plan olarak tanımlanmaktadır (Ulrich, 1995; Ulrich ve Eppinger, 1995; Huang, 2000, Höltta ve Otto, 2005). Ürün tasarımında tümleşik (entegre) mimari ve modüler (birimsel) mimari olmak üzere iki çeşit ürün mimarisi bulunmaktadır (Ulrich, 1995). Tümleşik ürün mimarisi fonksiyonel elemanlar ile fiziksel elemanlar arasında kompleks (birebir olmayan) eşleşmeye dayalı bir yapı olarak tanımlanmaktadır. Bu çeşit ürün mimarisinde fiziksel elemanlar arasında etkileşimli arayüzler bulunmakta olup, ürünün fonksiyonunu istenen şekilde yapabilmesi için herhangi bir fiziksel elemanda yapılan bir değişiklik diğer eleman(lar)da da değişiklik yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Modüler ürün mimarisinde ise fiziksel elemanlar ya da eleman gruplarıyla ürünün fonksiyonları arasında birebir eşleşme mevcuttur. Fiziksel elemanlar (eleman grupları, modüller, birimler) birbirleriyle etkileşimli olmadığından, herhangi bir modülde meydana gelen bir tasarım değişikliği diğer modüllerin de değiştirilmesini gerektirmemektedir. Bir başka ifadeyle modüler ürün mimarisinde, modüller belli bir dereceye kadar tanımlanmış fonksiyonları olan bağımsız yapılar olarak düşünülebilir. Tümleşik ve modüler ürün mimarisi arasında yukarıda açıklanan farklar Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen treyler örneğinde gösterilmiştir (Ulrich, 1995).

Modüler ürün mimarisinde modül, bazı özellikleri paylaşan bileşenlerden oluşan bağımsız yapıda, fiziksel veya kavramsal bir gruptur (Jiao vd., 2007). Bir modül diğer modüllerden bağımsız bir şekilde değiştirilebilir. Modülerlik, bir ürünün mimarisinin minimal etkileşimli modüllerden oluşma derecesi olarak tanımlanmıştır (Gerherson vd., 2003). Modüler ürünler genellikle ürün aileleri (platform tabanlı ürünler) biçiminde tasarlanmaktadır (Şekil 3). Bir ürün ailesi ortak bir platformdan türetilen ve farklı müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilecek fonksiyonlara/özelliklere sahip birbirine benzer ürünlerden oluşan ürün seti olarak tanımlanmaktadır (Jiao vd., 2007). Ürün ailesi tasarımında modüllerin tanımlanması, modüller arasındaki ilişkilerin ve arayüzlerin belirlenmesi temel amacı oluşturmaktadır.



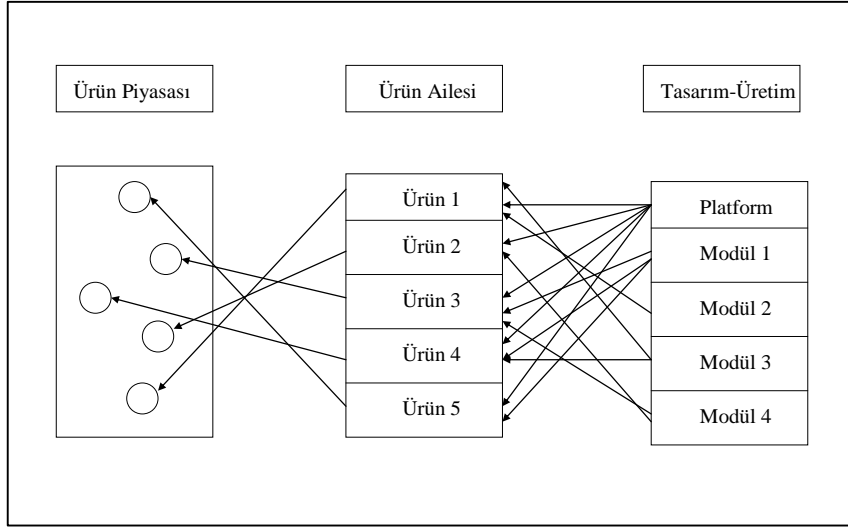
Şekil 1. Tümleşik ürün mimarisi - treyler örneği (Ulrich, 1995)



Şekil 2. Modüler ürün mimarisi - treyler örneği (Ulrich, 1995)

Kitlesel özelleştirme ve platform tabanlı modüler tasarımın, son yıllarda giderek yaygınlaşan mekatronik ürünlerin ve robotların geliştirilmesinde ayrı bir yeri ve önemi vardır (Habib, 2014). Mekatronik tasarım ürünlerinin tarihsel süreci incelendiğinde bu ürünlerin hızlı teknolojik gelişmeler doğrultusunda ve küresel rekabet sonucunda ihtiyaç duyulan daha kısa ürün geliştirme çevrimleri, kaliteli, güvenilir, esnek ve çağdaş müşteri isteklerini karşılayabilecek nitelikte ürünlere olan ihtiyaçlardan doğduğu görülmektedir (Buur, 1990). Mekatronik ürünler çevrelerini algılayabilen, algıladıkları çevre ile ilgili karar verebilen ve çevrelerinde değişiklik yapabilen akıllı ürünler, bir başka deyişle robot teknolojisi ürünleri olarak tanımlanmaktadır (Buur,

1990; Erden, 2007; Isermann, 2008). Mekatronik ürünler teknolojik gelişmelerin etkisi altında, tasarım karmaşıklığı içeren, dinamik ihtiyaçlara hızlı cevap verebilme özelliklerine sahip, seri üretimden çok "siparişe göre mühendislik" (engineering-to-order, ETO) gerektiren ürünlerin tipik bir çeşidi olarak kabul edilmektedir (Li vd., 2013). Bu tür ürünlerin geliştirilmesi çeşitli modüllerin tasarlanması ve bu modüllerin uygun platformlarla entegre edilerek farklı işlevleri gerçekleştirebilecek ürün ailelerinin tasarım sistematığının kurgulanmasını gerektirmektedir. Bu gereksinim platform tabanlı modüler mekatronik ürün ailesi tasarımı için sistematik bir yöntemin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.



Şekil 3. Platform tabanlı modüler ürünlerin genel yapısı Modüler ürün tasarımının topolojisi (Liang ve Huang, 2002;

Bonvoisin vd., 2016) “modüllerin tanımlanması”, “modüllerin tasarımı” ve “modüllerle tasarım” olmak üzere birbirini tamamlayıcı nitelikte üç farklı etkinlikten oluşmaktadır. “Modüllerle tasarım”, bir ürünün mevcut olan bir modül havuzundan uygun modüller kullanılarak tasarlanmasıdır. Bu modüller doğrudan tasarım yapıldığı ortamda (örneğin firmada) mevcut olabilir ya da tedarikçi havuzlarından temin edilebilir. “Modüllerin tanımlanması”, bir üründe mevcut bileşenlerin birbirleriyle ilişkilerine göre gruplandırılarak oluşturulacak yeni modüllerin farklı biçimlerde uygun arayüzlerle birleştirilmesini ve böylece yeni ürünler tasarlanmasını ifade etmektedir. “Modüllerin tasarımı” ise bir ürünü tasarlarken fonksiyonel bileşenleri sağlayacak prensiplerin modüllere ayrılması ve ilgili arayüzlerin tasarlanmasını içermektedir. Son iki etkinlik mevcut modülleri kullanmak yerine, yeni oluşturulacak modüller ve arayüzlerini kullanarak yeni ürünler tasarlamayı amaçladığından birbirine benzemektedir. Ancak aralarında tasarım sürecindeki konumları bakımından önemli bir fark vardır. *Modül tasarımı*, tasarım sürecinin erken aşamalarından itibaren sürece entegre edilen bir sentezleme yaklaşımıdır. Buna karşılık, *modül tanımlama* tasarım sürecinin sonunda yapılan bir çalışmadır ve tasarlanmış mevcut ürünü analiz ederek olası bir yeniden tasarım durumunda modüler mimariyi oluşturacak şekilde modüllerin belirlenmesini temel almaktadır. Bu iki etkinlik modüler ürün tasarımında “ürün modülerleştirilmesi” olarak adlandırılır ve yeni ürünlerin tasarımı için özellikle önemlidir. Modüler tasarım literatüründe sistematik “ürün modülerleştirilmesi” için sezgisel yöntem, modüler işlev dağıtımı (MİD) ve tasarım yapı matrisi (TYM) olmak üzere başlıca üç yöntem bulunmaktadır.

Sezgisel yöntem (Stone vd., 2000), ürünün tasarımcı tarafından oluşturulan fonksiyon yapısına bağlı bir yöntemdir. Sezgisel yöntem, sistematik tasarımda kullanılan fonksiyonel modelleme (Pahl ve Beitz, 1996) yaklaşımını temel almaktadır. Buna göre tasarlanmakta olan ürünün fonksiyonel yapısını gösteren blok şema öncelikle ürünün genel fonksiyonunu ifade eden bir kara kutu modeliyle başlar. Daha sonra genel fonksiyonu yerine getirmesi için gerekli olan alt fonksiyonların enerji, malzeme ve bilgi akışını ve birbirleriyle etkileşimlerini de gösterecek şekilde kara kutu içine yerleştirilmesiyle fonksiyonel yapı tamamlanmış olur. Hazırlanan bu fonksiyonel yapıda yer alan malzeme, enerji ve bilgi akışlarına dayalı olarak çeşitli yöntemlerle (baskın akış, dallanan akış ve dönüşüm-aktarım) ürün modülleri belirlenir. Sezgisel yöntem her türlü ürüne uygulanabilecek, fiziksel tasarımdan bağımsız genel bir yöntem olmakla birlikte bu yöntemde ürünün fonksiyonel yapısı tasarımcı tarafından oluşturulmaktadır, bu nedenle ürünün fonksiyon yapısının tasarımcıya bağlı olarak değişmesiyle modüller farklılaşmaktadır. Bu durum da sistematik modüler tasarımdan beklenen nesnel yapıyı zayıflatmaktadır. Sezgisel yöntemin daha sonra genişletilmesiyle bir ürün portföyü oluşturmak için sistematik bir metodoloji önerilmiştir (Dahmus vd., 2001). Ancak bu çalışmada modülerleştirme ürün portföyü için fiziksel prensipler belirlendikten sonra, bir başka ifadeyle kavramsal tasarımın oldukça ileri bir aşamasında (hatta ön tasarım aşamasında) yapılmaktadır. Bu nedenle erken dönem kavramsal tasarımda kullanılması mümkün olmamaktadır. Çünkü bu aşamada tasarlanacak ürün (ürün ailesi) için gerekli fonksiyonlarla/davranışlarla fiziksel prensipler henüz ilişkilendirilmediğinden daha fazla soyutlama

yapılması gerekmektedir. Mekatronik ürünlerin ve robotların, özellikle kavramsal tasarımın bu soyut aşamasında fonksiyonel ve davranışsal olarak modüler yapıda tasarlanması büyük önem taşımaktadır. O nedenle bu yöntemin, robot ürün ailelerinin erken dönem kavramsal tasarımına uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Modüler işlev dağıtımı (MİD) (Erixon,1998) yöntemi de sezgisel yöntem gibi fonksiyonel ayrıştırmaya dayalıdır. Ancak bu yöntem bir ürünün zaman içinde modülerleştirilmesi için geliştirilmiş olup, fonksiyonellik dışında modülerliği etkileyen başka faktörleri de hesaba kattığından yönetim odaklı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Höltta ve Salonen, 2003). MİD ayrıca ürünün fonksiyonları arasındaki arayüzlere bakmamakta, bunun yerine daha çok stratejik konularla, modülerliğin diğer yöntemler tarafından pek fazla düşünülmeyen bakım ve geri dönüşüm kolaylığı gibi faydalarına odaklanmaktadır.

Tasarım yapı matrisi (TYM) yönteminde (Pimmler ve Eppinger, 1994; Browning, 2001) ürünün fonksiyonları ya da ürünü oluşturan elemanlar 2 boyutlu bir matris yapısında satır ve sütunlara yerleştirilir. Elemanlar/fonksiyonlar arasındaki konum/uzay, enerji, malzeme ve veri etkileşimleri yine aynı matris yapısında gösterilir. Elemanlar/fonksiyonlar arasındaki ilişkiler/ etkileşimler çeşitli kümeleme algoritmaları kullanılarak eleman/fonksiyon grupları oluşturulur. Bu gruplar oluşturulurken grup içindeki etkileşimlerin maksimum, gruplar arasındaki etkileşimlerin ise minimum düzeyde olması gerekir. Bu şekilde oluşturulan eleman/fonksiyon grupları modüller olarak adlandırılır. Tasarım yapı matrisi (TYM) kullanılarak geliştirilen kümeleme ve modül belirleme yöntemleri tekrarlanabilir ve hesaplanarak doğrulanabilir nitelikte olduğundan önceki iki yönteme göre daha nesnel ve mühendislik odaklı bir yöntemdir. Modüler ürünlerin geliştirilmesi, etkileşimli eleman gruplarının belirlenmesini ve bunların modüller halinde düzenlenmesini gerektirdiğinden, literatürde TYM kullanarak yapılan kümeleme ve modülerleştirme konusunda önemli çalışmalar mevcuttur (Qiao vd., 2017; Aydın ve Ulutaş, 2016; Helmer vd., 2010; van Beek vd., 2010; Yu vd., 2007). TYM'nin uygulamasına bakıldığında, ağırlıklı olarak bir sistemin fiziksel bileşenlerinin belli olduğu kavramsal tasarımın ilerleyen aşamasında kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca TYM'de satır ve sütuna aynı elemanlar yerleştirilmekte ve bu elemanların birbirleriyle olan ilişkileri tanımlanmaktadır. Bu nedenle TYM sistematik ve mühendislik açısından oldukça yararlı bir yöntem olmakla birlikte henüz fiziksel gerçekleştirilmenin belirgin olmadığı, tasarımın daha çok sistemin fonksiyon ve davranışlarına odaklandığı kavramsal tasarımın erken dönemi için literatürde bilinen bir uygulamasına

rastlanmamıştır. Ayrıca 3 boyutlu ve her bir eksenindeki elemanların birbirinden farklı olduğu bir TYM yapısı da literatür bilgimize göre mevcut değildir.

Literatürde bulunan modüler tasarım yaklaşımları mekanik sistemler üzerinde yoğunlaşmış olup, mekatronik sistemlerin modüler tasarımı için geliştirilmiş sistematik bir yöntem bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürde mekanik sistemlerin modüler tasarımında kullanılan yöntemler sistemin fiziksel elemanlarına bağlı yöntemlerdir ve bu yöntemlerin kullanılabilirliği için sistemin fiziksel tasarım olarak ortaya çıkmış olması gerekmektedir. Mekatronik ürünlerin ve robotların modüler yapısı ise erken dönem kavramsal tasarım aşamasından başlayan ve tasarlanacak sistemin fonksiyonuna ve davranışına odaklanmayı gerektiren bir tasarım felsefesine dayanmaktadır. Bu nedenle modüler robotların erken dönem kavramsal tasarımı için kullanılabilir, fiziksel elemanlardan bağımsız, fonksiyonel/ davranışsal elemanları temel alan ve farklı robotlara uygulanabilecek genel bir sistematik yapıya ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Bu sistematik yapının geliştirilmesine katkı sağlamak üzere çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda “davranış tabanlı robot tasarımı” yaklaşımı (Araz ve Erden, 2014) kullanılarak bir kavramsal çerçeve oluşturulmuş (Erden, 2014), çeşitli vaka çalışmaları ve laboratuvar uygulamaları yapılmıştır (Ayhan ve Erden, 2016, Erden, 2017). Bu araştırmalar sonucunda gelinen noktada platform tabanlı modüler robotların erken dönem kavramsal tasarımında sistematik olarak kullanılabilir ve literatürde mevcut 2B TYM yaklaşımından yararlanılarak tamamen özgün olarak geliştirilen 3B TYM yapısının kavramsal çerçevesi oluşturulmuş ve laboratuvar düzeyinde uygulanmıştır (Erden, 2018, Özer ve Erden, 2018).

MEKATRONİK DAVRANIŞ MODÜLLERİ

Mekatronik Davranış Modülü Kavramı

Davranış tabanlı kavramsal robot tasarımı yaklaşımı (Araz ve Erden, 2014), mekatronik sistemlerin Şekil 4'de grafiksel olarak gösterilen ve Ayrık Olay Sistem Spesifikasyonu (Discrete Event System Specification-DEVS) (Ziegler, 1989) ile modellenen operasyonel davranışına dayanmaktadır. Buna göre bir mekatronik sistemin operasyonel davranışı en genel haliyle algılama, muhakeme etme ve motorik hareket olarak tanımlanan üç durumdan oluşmaktadır. Sistem “ALGILAMA” durumundayken çevresinden veri toplar ve bu verileri işleyerek kullanılabilir bilgiye dönüştürür. “MUHAKEME” durumu, sistemin bilgileri kullanarak değerlendirmesi ve bu değerlendirme sonucu gerekli kararları vererek çevresinde meydana gelen değişikliklere göre fiziksel (motorik) davranış geliştirmek için altyapı oluşturmasını ifade eden durumdur. “MOTORİK

HAREKET” ise gerek verilen kararlar doğrultusunda, gerekse çevrede meydana gelen değişikliklere bir refleks olarak fiziksel davranış ortaya konmasını ifade eden durumdur. Sistemin operasyonuna başladığı andan itibaren çevreden veri toplaması gerektiğinden modelin başlangıç durumu “ALGILAMA” olarak varsayılmıştır.

Davranış tabanlı kavramsal tasarımın en önemli özelliği, modelin fiziksel alt sistemlerden ve/veya bileşenlerden bağımsız olmasıdır. Böylece tasarımcılar, sistemin (robotun) gerekli davranışlarını gerçekleştirmek için tasarımın ilerleyen aşamalarında fiziksel bileşen çözümleri için farklı alternatifleri değerlendirebilirler. Bu sayede robot tasarımında mekanik, elektronik, yazılımın erken dönem kavramsal tasarım aşamasından başlanarak tümleşik entegrasyonu gerçekleştirilebilir ve daha yaratıcı/yenilikçi tasarımlar ortaya çıkabilir.

Fiziksel bileşenlerden bağımsız bu davranış modeli kullanılarak, mekatronik ürünlerin ve robotların modüler tasarımı için bir kavramsal çerçeve geliştirilmiştir (Erden, 2014). Buna göre, tasarlanacak robotun operasyonel davranışı en genel haliyle çeşitli durumlar ve durumlar arasındaki geçişlerle ifade

$$S_P = \{SP_1, SP_2, \dots, SP_w\}$$

Burada “w”, robotun davranışını tanımlarken dikkate alınan çevresel değişikliklerin sayısıdır.

“Muhakeme” durumunda sistem(robot), algılama durumunda elde edilen verileri kullanılabilir bilgiye dönüştürür, bu bilgiyi kullanarak ne yapacağına karar

edilir. Şekil 4’de verilen DEVS modelinde sistemin durumları kümesi üç elemandan oluşur:

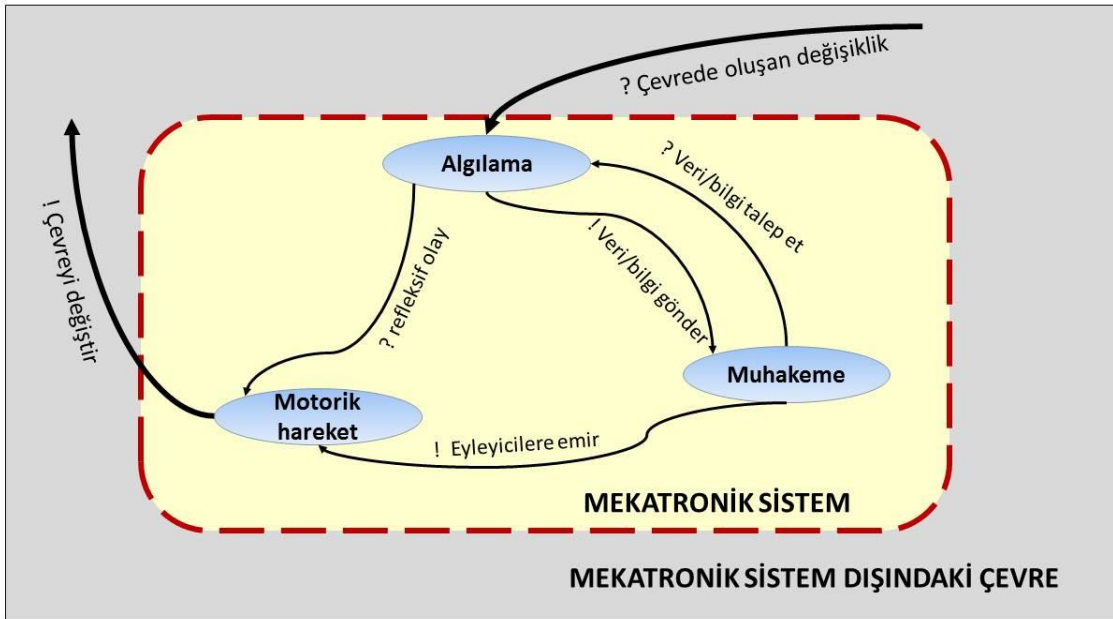
$$S = \{\text{Algılama, Muhakeme, Motorik Hareket}\} = \{S_P, S_C, \dots, S_{MA}\}$$

Şekil 4’deki DEVS modelinde gösterilen durumlar ve durumlar arasındaki geçişler bir mekatronik sistemin en üst düzey davranışını temsil etmektedir. Mekatronik bir sistem bu genel modelden yararlanarak kavramsal olarak modülerleştirilmiştir. Buna göre, “Algılama” durumu, robotun bulunduğu ortamdaki herhangi bir değişiklik ortaya çıktığında “?çevrede değişim” adı verilen bir girdi olayıyla tetiklenen davranışını temsil eder. Genel olarak, algılama davranışı, robotun bulunduğu ortamda “sıcaklık değişimi”, “gürültü oluşması”, “ışık yayılması”, “bir nesnenin varlığı” gibi fiziksel etkilerin neden olduğu çeşitli değişiklikler oluştuğunda görülür. Robotun algılama davranışı, bu çevresel değişikliklerin niteliğine göre farklılık gösterebilir. Bu nedenle S_P , “farklı değişiklikleri algılama davranışlarını” temsil eden elemanlardan oluşan bir küme olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

verir. “Muhakeme” durumu, bu tür dönüşümleri gerçekleştirecek yazılım elemanlarından oluşan bir küme ile gösterilir:

$$S_c = \{SC_1, SC_2, \dots, SC_g\}$$

Burada “g”, yazılım elemanlarının sayısını temsil eder.



Şekil 4. Bir mekatronik sistemin DEVS modeli (Araz ve Erden, 2014)

Robotun üçüncü durumu “Motorik Hareket” durumudur. Tasarlanacak robotun n adet “Motorik Hareket” durumu olduğu varsayılmış ve “Motorik Hareket” durumu (S_{MA}) aşağıda verildiği gibi bir başka küme ile gösterilmiştir.

$$S_{MA} = \{MA_1, MA_2, \dots, MA_n\}$$

Burada MA_i ($i = 1, 2, \dots, n$) kümesinin her elemanı robotun mekatronik organlarının farklı konfigürasyonlarıyla tanımlanan bir motorik hareketi göstermektedir. Bu durum matematiksel olarak aşağıda ifade edilmiştir:

$$MA_i = \{O_{jk} \mid O_{jk} \text{ j numaralı mekatronik organın k sayılı konfigürasyonu}\}$$

Yukarıdaki ifadede $j = 1, 2, \dots, m$ (m : mekatronik organ sayısı) ve $k = 1, 2, \dots, r$ (r : her mekatronik organ için konfigürasyon sayısı) olarak tanımlanmıştır.

Fiziksel olarak robotun “Motorik Hareket” durumu, çeşitli hareketlerin/etkilerin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkan mekatronik organ davranışlarıyla temsil edilir. Burada mekatronik organ belirli, gerekli bir etkiyi (fonksiyonu) yaratmak için fiziksel, kimyasal veya biyolojik prensipleri kullanan parçalardan oluşan bir grup olarak tanımlanmaktadır (Buur, 1990). Bu konuda yapılan araştırmada masaüstü prototip robot tasarımlarında bu davranışların elde edilmesiyle ilgili örnek uygulamalar mevcuttur (Araz ve Erden, 2014). Örneğin, robotun “mutlu” olmasını bir “Motorik Hareket” durumu (MA_1) olarak ifade edebiliriz ve bu durumda robot kafasını (O_1) sallayabilir (O_{11}), gözleri (O_2) parlayabilir (O_{21}), ses çıkarma organı (O_3) ile

“mutlu” sesler üretilebilir (O_{31}) ve bacakları(O_4) ileri geri hareket edebilir (O_{41}).

Platform tabanlı bir modüler robot ürün ailesi içinde farklı görevleri yerine getiren birden fazla robot olduğundan robot ailesi için motorik hareket durumlarının tamamı, aşağıda verilen ($l \times p$) boyutlu bir matris ile ifade edilmiştir:

$$\begin{bmatrix} MA_{11} & MA_{12} & \dots & MA_{1p} \\ MA_{21} & MA_{22} & \dots & MA_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ MA_{l1} & MA_{l2} & \dots & MA_{lp} \end{bmatrix}$$

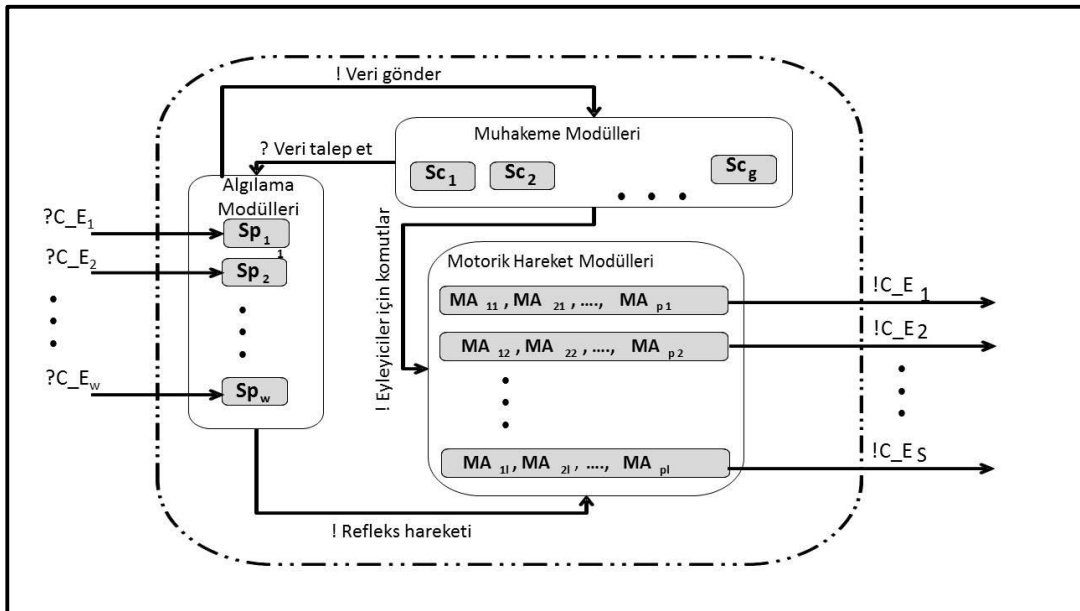
Burada

p : robot ailesindeki bir robot için motorik hareket eylem durumlarının sayısını,

l : robot ailesindeki ürün (robot) sayısını göstermektedir.

Tasarlanan robot ailesindeki tüm robotlar aynı sayıda motorik harekete sahip olmayabileceğinden, yukarıdaki matriste birçok elemanın (MA_{ij} kümesinin) boş küme olması mümkündür.

Modüler robot tasarımı için yukarıdaki modele dayanarak oluşturulan kavramsal yapı Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 5’de “? C_E_w” çevrede meydana gelen ve robotların algılaması gereken değişiklikleri (girdi etkileri), “! C_E_s” ise robotların motorik hareketleri sonucunda çevrede meydana gelen değişiklikleri (çıkış etkileri) temsil etmektedir. “w” ve “s” parametreleri ise sırasıyla bu değişikliklerin sayısını göstermektedir.



Şekil 5. Mekatronik sistemin davranışsal modülleri için kavramsal yapı

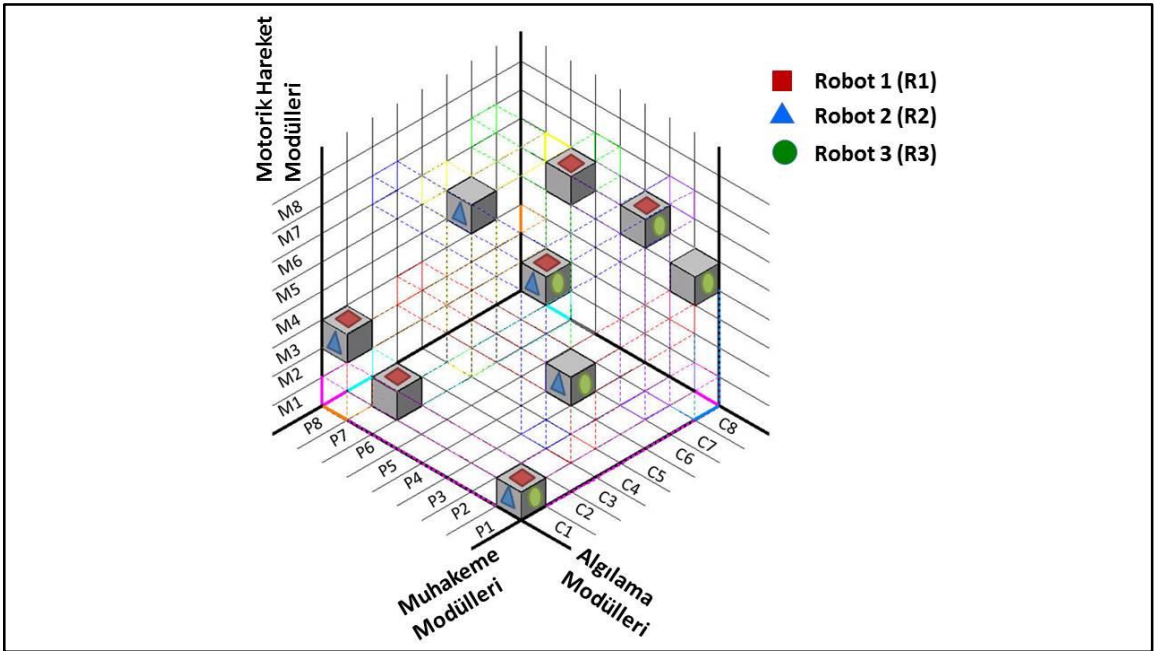
Yukarıda geliştirilen kavramsal modelde yer alan algılama, muhakeme ve motorik hareket gruplarındaki robot davranışları ve bunların birbirleriyle ilişkileri 3 boyutlu tasarım yapı matrisinde (3B-TYM) modellenmiştir.

Mekatronik Ürün Ailelerinin 3B TYM ile Gösterimi

3B-TYM mekatronik sistem ve robot tasarımının algılama, muhakeme ve motorik hareket olarak 3 gruba ayrılan davranış elemanlarını ve bunlar arasındaki ilişkileri gösterebilmek için geliştirilmiş, tamamen yeni ve özgün bir yaklaşımdır (Erden, 2018). 3B-TYM yaklaşımı, literatürde sistem modellemesi ve analizi için kullanılan 2 boyutlu tasarım yapı matrisi (2B-TYM) (Pimmler ve Eppinger, 1994; Browning, 2001) yönteminden yararlanılarak geliştirilmiştir. 2B-TYM, mevcut bir sistemin matris modeli olup, sistemi meydana getiren bileşenler matrisin ilk satır ve ilk sütuna yerleştirilir ve bileşenler arasındaki ilişkiler (bağımlılık, bilgi akışı vb.) diyagonal olmayan hücrelerde gösterilir (Li vd., 2013). Çeşitli araştırmacılar mevcut sistemlerin modülerleştirilmesi için TYM üzerinde çalışmışlardır (Helmer vd., 2010; Li ve Xie, 2015; Qiao vd., 2017). Ancak bu çalışmalar sistemlerde bulunan fiziksel elemanlar arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Robotların erken dönem

kavramsal tasarım aşamasında, henüz fiziksel bileşenleri belli olmadan olası davranışları üzerinden modülerleştirilmesine katkı sağlamayı hedefleyen 3B-TYM'nin, 2B TYM'den iki önemli farkı vardır. Bunlardan biri üç farklı robot davranış grubunu temsil eden 3 boyutunun ve her boyuttaki elemanların da farklı davranış gruplarına ait olması, diğeri de fiziksel elemanlar yerine davranışsal elemanları temel almasıdır. Bu çalışmada geliştirilen 3B-TYM yapısı Şekil 6'da sunulmuştur. Bu örnek modelde, tasarlanan bir robot ailesinde Robot 1(R1), Robot 2(R2) ve Robot 3(R3) olmak üzere 3 farklı robot olduğu varsayılmıştır. Bu robotlar sırasıyla kırmızı, mavi ve yeşil renkte gösterilmiştir. Bu robotların tasarımında algılama (P), muhakeme (C) ve motorik hareket (MA) eksenlerindeki davranış modüllerinin farklı kombinasyonları gerekmektedir.

Üç tip modül grubu arasındaki ilişkiler, robotların hedeflenen operasyonel davranışlarının özelliklerine göre belirlenir. Örnek olarak, P1 algılama modülünü ele alalım. P1'den elde edilen bilginin, C1 muhakeme modülü tarafından yapılan değerlendirme (P1 ve C1 arasında bir ilişki) sonucunda M1 motorik hareketine neden olması (C1 ve M1 arasında bir ilişki) durumunda P1, C1 ve M1 arasında karşılıklı-üçlü bir ilişki mevcuttur ve 3B-TYM'de ilgili kutucukta bulunan kübik elemanla gösterilir.



Şekil 6. Modüler robot ailesi tasarımı için geliştirilen 3 boyutlu Tasarım Yapı Matrisi modeli (Erden, 2018)

Şekil 6'dan, robot ailesindeki üç robotta da P1-C1-M1 ilişkisinin olduğu fark edilebilir. P1'den elde edilen bilginin, C8 muhakeme modülü tarafından yapılan değerlendirme sonucunda M5 motorik hareketine neden olması durumu ise P1, C8 ve M5 arasındaki bir ilişkiyi ifade eder ki bu kombinasyon sadece R3'ün davranışında mevcuttur. Algılama, muhakeme ve motorik hareket modülleri arasındaki farklı ilişkileri kullanarak farklı davranışları olan robotlar elde etmek mümkündür.

Bu çalışmada mekatronik davranış modüllerinin sembolik gösterimleri oluşturulmuş ve robot görevlerinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın amacı mekatronik davranış modüllerini mükemmel bir şekilde tanımlamaktan çok, sistematik platform tabanlı mekatronik tasarımı desteklemek için bir çerçeve oluşturmak olduğundan, bazı basitleştirmeler kullanılmıştır. Örneğin, “algılama” davranış modülleri fiziksel gerçekleştirilmede sensörler olarak kabul edilmiş ve mekatronik sistemlerde sık kullanılan sensörlerin bilinen prensiplerinden yararlanılarak algılama modülleri sembolik olarak ifade edilmiştir.

“Muhakeme” davranış modülleri, “algılama” davranış modülleri tarafından sağlanan çıktı verilerini işleyen ve amaçlanan robot davranış için gerekli görevlere uygun bir motorik hareket üzerinde karar veren yazılım modülleri olarak tanımlanmıştır. “Motorik hareket” davranış modülleri için, aşağıdaki bölümde verilen uygulama örneğinde olduğu gibi, amaçlanan motorik hareketlerin bir listesi oluşturulmuştur.

UYGULAMA ÖRNEĞİ

Kişiselleştirilmiş robotların erken dönem kavramsal tasarımına yönelik olarak geliştirilen ve mekatronik

davranış modülleri ile 3B TYM modellemesine dayanan sistematik yöntem, laboratuvarında örnek bir robot ailesi modelinin tasarımında uygulanmıştır. Bu örnek uygulamada toplam 7 robottan oluşan bir robot ailesi modeli tasarlanmıştır. Bunlar müze ve alışveriş merkezi için 2 rehber robot, bir bekçi robot, bir ev temizlik robotu ile çocuklar, yaşlılar ve evcil hayvanlar için 3 adet refakatçi robottur. Örnek çalışmamızda amaç, bir robot ailesinin erken kavramsal tasarımında davranışsal modüllerin ve 3D TYM modelinin nasıl uygulanabileceğini göstermek olduğundan, robot ailesinin üyeleri için basit robot görevlerini ele alınmıştır. Bu örnek uygulamada tasarlanan robotlardan üçü “Bekçi robot” (R1), “Yaşlılar için refakatçi robot” (R2) ve “Müze için rehber robot” (R3) Şekil 6'da sembolik olarak gösterilmiştir. Bu robotların çeşitli görevleri yerine getirmesini sağlayan davranış modülleri ve bunlar arasındaki etkileşimler tasarımcı tarafından tanımlanmış olup Tablo 1'de verilmiştir.

Örneğin, robotun bir engel algıladığında durma davranışını ele alalım; algılama modülü “Engel” (P1), muhakeme modülü (C1) ve sonuçta “Durma” (M1) motorik hareket modülü etkileşim halindedir. Bu, her üç robotta da mevcut bir davranış ifade etmektedir. Burada C1, robotun engel algıladığında durması için karar veren bir muhakeme modülüdür. Farklı bir durumda ise algılama modülü “Engel” (P1) bir başka muhakeme modülü (C8) etkileşime girerse, ortaya çıkan motorik eylem modülü “Yön değiştirme-dönme” (M4) olarak görünür. Bu durum, robotun bir engel algıladığında durmak yerine yön değiştirmek üzere dönmesini ifade eden bir davranıştır ve yalnızca R3 için tanımlanmıştır.

Tablo 1. Örnek uygulamada bulunan bazı davranış modülleri

<i>Algılama Modülleri</i>	<i>Muhakeme Modülleri</i>	<i>Motorik Hareket Modülleri</i>	<i>Müze için rehber robot</i>	<i>Bekçi robot</i>	<i>Yaşlılar için refakatçi robot</i>
Engel (P1)	C1	Durma (M1)	√	√	√
Dokunma (P2)	C4	Müzik çalma (M3)	√		√
Ses (P3)	C4	Alarm çalma (M7)	√	√	√
Dokunma (P2)	C7	Alarm çalma (M7)	√	√	
Engel (P1)	C8	Yön değiştirme-dönme (M4)	√		
Sıcaklık (P7)	C2	Durma (M1)		√	
Renk (P8)	C1	Müzik çalma (M3)		√	√
Koku (P6)	C8	Alarm çalma (M7)		√	
Sıcaklık (P7)	C5	Alarm çalma (M7)			√

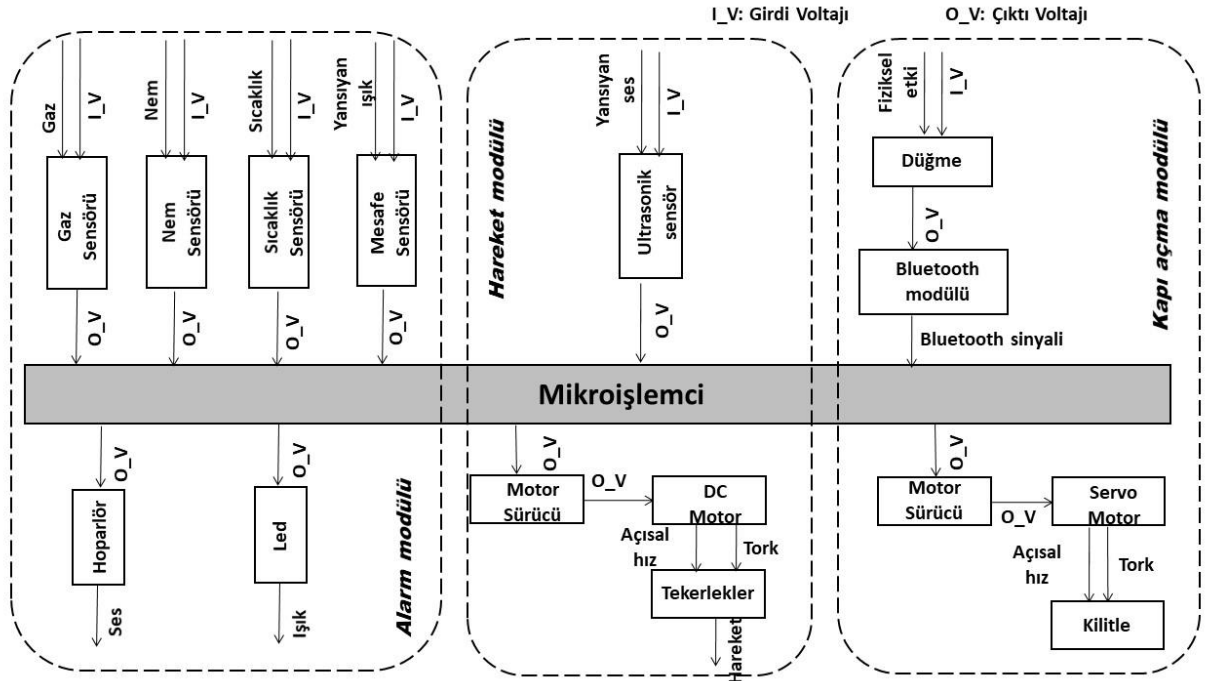
Bu örnek etkileşimlerin ifade ettiği davranışlar şu şekilde yorumlanabilir; her üç robot da “bir engel” (örneğin önüne çıkan bir insan) algıladığında duracaktır; ancak bir müze rehber robotu “başka bir engel” (örneğin müzedeki yolunda önüne çıkan bir sütun) algıladığında yönünü değiştirmek için dönecektir. Burada algılanan engelin bir insan mı yoksa bir sütun mu olduğuna karar veren muhakeme modülüdür. Robotların istenen görevleri yerine getirmesi için gerekli mekatronik davranış modüllerinin karşılıklı etkileşimlerini kurduktan sonra, bu modüller için sembolik modeller geliştirilmiştir. Ayrıca robot ailesindeki tüm robot davranışları için gerekli etkileşimler de tanımlanmıştır. Örnek olarak, yaşlılara refakat edecek bir robotun sembolik davranış modeli Şekil 7’de gösterilmiştir.

Örnek laboratuvar uygulamasında, fiziksel gerçekleştirilmesi yapılan modüller kullanılarak model robot ailesinin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Model robotların üretimi sırasında bazı kısıtlardan dolayı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin, bir palet sistemi kullanmak yerine, 4 tekerlekli bir sistem kullanılmıştır. Şekil 8’de model robot ailesinde bulunan bazı robotların tasarımları ile aile üyelerinden biri olan "ev temizlik robotu" nun fiziksel modeli gösterilmiştir.

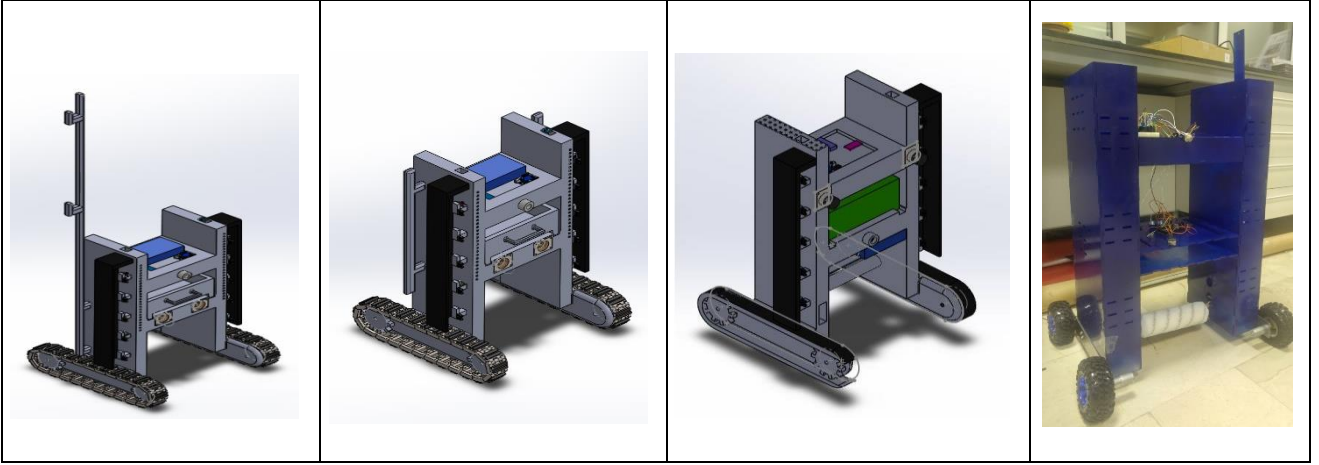
SONUÇ

Modülerleştirme, şirketlerin özelleştirme ve esneklik avantajlarıyla rekabet gücünü artırarak ürün ailelerinin tasarımı ve geliştirilmesi için önemli bir odak noktasıdır. Mekatronik ürünler için modüler tasarım yöntemlerinin uygulanması, bu tür ürünlerdeki değişen müşteri gereksinimlerine en uygun yenilikçi tasarım çözümleri sağlar. Bu, kitlesel özelleştirmede mekatronik ürünler üreten şirketlerin manevra kabiliyetini artırır. Mekatronik ürün ailelerini tasarlamak ve geliştirmek için, bu tür ürünlerin entegre ve çok disiplinli doğası nedeniyle modülerleştirme için alandan bağımsız sistematik yöntemler gereklidir. Bu makale, daha önce geliştirilmiş sistematik davranış tabanlı robot tasarımı yaklaşımını kullanarak geliştirilen modüler robot tasarım metodolojisi için kavramsal bir model sunmaktadır. Bu model, mekatronik bir sistemin amaçlanan görevlerini yerine getirmek için gereken “algılama”, “muhakeme” ve “motorik hareket” davranış modüllerini temel almaktadır. Davranış modülleri arasındaki karşılıklı etkileşimler yeni ve özgün bir model olan 3 boyutlu tasarım yapı matrisinde gösterilmiştir. Bu yaklaşımın literatüre getirdiği özgün katkı üç açıdan ortaya çıkar;

- Mekatronik sistemlerde bulunan 3 tip davranışsal elemanın karşılıklı etkileşimlerini temsil etmek için klasik 2B TYM'den esinlenilerek yeni ve özgün 3B TYM geliştirilmiştir.



Şekil 7. Yaşlılar için refakatçi robotun sembolik gösterimi



Şekil 8. Örnek robot ailesi modeli tasarımları ve fiziksel model

• 3B TYM'nin her boyutundaki öğeler davranışsal elemanlardır. Buna karşılık makine tasarımında kullanılan klasik 2B TYM'de fiziksel elemanlar dikkate alınır. Bunun nedeni, erken kavramsal tasarım aşamasında fiziksel bir sistemin mevcut olmaması ve sistem davranışının modüler yapıda temsil edilmesi ihtiyacıdır.

• Klasik 2B TYM'de, matrisin her iki boyutunda aynı elemanlar bulunmaktadır. 3B TYM'de ise tasarlanacak robotun algılama, muhakeme ve motorik hareket davranışları farklı eksenlere yerleştirilerek birbirleriyle olan etkileşimleri gösterilir.

Bu makalede, geliştirilen kavramsal modelin laboratuvar ortamında bir uygulama örneği verilmiştir. Kavramsal modelin sosyal robotların kişiselleştirilmesi amacıyla yönelik olarak geliştirilmesi ve kapsamlı bir laboratuvar uygulaması üzerinde ayrı bir araştırma devam etmektedir. Araştırmanın sonuçları ilerleyen dönemde yayınlanacaktır.

Bu çalışmada geliştirilen 3B TYM yapısı modüler robot ürün ailelerinin tasarımında temel alınacak genel amaçlı bir model niteliğindedir. İlerdeki araştırmalarda bu model kullanılarak belirlenecek olan robot davranış modülleri ve arayüzleri, robot tasarımı ve imalatı konularında çalışan firmaların ürün geliştirme süreçlerinde ürün yelpazelerini genişletmelerini sağlayabilecek bir altyapı ve tasarım sistematiği oluşturacaktır.

Platform tabanlı modüler robot tasarımı için geliştirilen kavramsal modelin oluşturduğu altyapı ileriye dönük çeşitli araştırmalara da öncülük etme potansiyeline sahiptir. Bunlardan biri gerek günümüzde, gerekse gelecekte işbirliği yaparak çeşitli görevleri yerine getirmesi mümkün olan çoklu robotların sistematik tasarımı konusudur. Bu tür işbirlikçi robotlar için, algılama ve motorik hareket modüllerinin robotlar arasında görev odaklı olarak

paylaşımı gerekebilir. Ayrıca yine bu tür çoklu robot uygulamalarında ihtiyaç duyulan ve robot ekibinin verilen görevleri yerine getirmesini sağlayan üst bilinç, muhakeme modülleri aracılığıyla geliştirilebilir. Bir başka önemli alan tasarım uzayının genişliği ile ilgilidir. Modül sayılarının ve kombinasyonlarının artmasıyla birlikte tasarımcılar için yazılım desteği ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla oluşturulan sistematik altyapının tasarımcı tarafından kullanılabilir hale gelmesi için yazılım geliştirme konusunda çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Tasarım sürecinde optimizasyon büyük önem taşımaktadır. Makalede sunulan kavramsal model, sistematik bir altyapı oluşturmaktadır. Bu modelin, hedeflenen bir robot ailesini elde etmek için gerekli minimum modül sayısını, belli ölçütlere göre belirleyecek biçimde geliştirilmesi bir başka önemli araştırma alanıdır.

Günümüzün önemli gelişmelerinden biri de kendi kendine öğrenen robotlardır. Bu makalede anlatılan kavramsal metodoloji, fiziksel yapıdan bağımsız olarak robot davranışlarına odaklandığından robotların farklı durumlarda nasıl davranacaklarının tanımlı olmadığı, kendi kendilerine öğrenerek davranışlarını belirledikleri bir sürece uygun şekilde, ilerleyen araştırmalarda geliştirilebilecektir. Bu tür bir geliştirmede mevcut (tanımlanmış) davranışlardan oluşacak veri tabanının, robotun öğrenme sürecinde ortaya çıkan yeni davranışların eklenmesiyle dinamik bir yapıya dönüşmesi için gerekli algoritmaların geliştirilmesi önem kazanacaktır.

CONCEPTUAL DESIGN METHODOLOGY FOR CUSTOMIZED ROBOT DESIGN

High competition in global market enforces companies to diversify their product ranges to meet customers' changing needs and adopt their product

development strategies for “mass customization”, which requires designing platform-based modular products. Product modularity is achieved via platform-based systems, in which various combinations of different modules are assembled within a common platform in product families. In the literature, there is considerable amount of research on modularity for mechanical products. On the other hand, research on modularity of smart systems such as mechatronic products, is quite limited. The objective of this research is to develop and implement fundamental behavioural modules to facilitate systematic design of platform-based mechatronic product families for mass customization. In this study, fundamental mechatronic behaviour modules are developed using a modified form of Design Structure Matrix (DSM) existing in the literature. DSM is adopted to mechatronic systems as a 3D matrix, which includes sensorial, motoric and cognitive behaviours. Symbolic representations of mechatronic behaviour modules are generated and they are used in describing robot tasks. Mechatronic behaviour modules developed in this study, is implemented on a demonstrative task-based mechatronic product family model (robot family model) composed of 7 robots as guide robots for museum and shopping mall, a guard robot, a home cleaning robot and 3 companion robots for children, the elderly and pets.

Keywords: Mass customization in mechatronic design, modular mechatronic design, mechatronic product family, behavioural modules in design, platform-based product

TEŞEKKÜR

Bu makalede yer alan uygulama örneği Atılım Üniversitesi Lisans Araştırma Programı (LAP) desteği ile gerçekleştirilmiştir (Proje No: ATU-LAP-A-1617-06). Uygulama örneğindeki katkılarından dolayı Ergin Aydın, Seda Buyurgan, Yağız Han Doğan, Ali Elmadağ ve Serkan Kazdağ'a, ayrıca Şekil 6'nın hazırlanmasındaki yardımı için S. Betül Güney'e teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

1. AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., 2013. “Reactive design methodology for product family platforms, modularity and parts integration”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(1), pp.34-43.
2. Araz, M., Erden, Z., 2014. Behavioural representation and simulation of design concepts for systematic conceptual design of mechatronic systems using Petri Nets. *International Journal of Production Research*, 52(2), pp. 563-583.
3. Aydın, M., Ulutaş, B.H., 2016. “A new methodology to cluster derivative product modules: an application”. *International Journal of Production Research*, 54(23), pp.7091-7099.
4. Ayhan, E., Erden, Z., 2016. “Implementation of Function Structure Heuristics for Modular Design of an Educational Mechatronic Product Family”. *Proceedings of the 17th Int. Conf. on Machine Design and Production (UMTIK 2016)*, July 12-15, Bursa, Turkey.
5. Browning, T. R., (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), pp. 292-306.
6. Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., Stark, R., 2016. "A systematic literature review on modular product design", *Journal of Engineering Design*, 27(7), 488-514.
7. Buur, J., 1990. *A Theoretical Approach to Mechatronics Design*. Lyngby, Denmark: Institute for Engineering Design
8. Dahmus, J.B., Gonzales-Zugasti, J.P. and Otto, K.N., 2001. Modular Product Architecture. *Design Studies*, 22(5), pp.409-424.
9. Erden, A., 2007. *Mekatronik Mühendisliği-Kavramlar ve Uygulamalar*. Ankara. Makina Mühendisleri Odası (MMO/2007/422).
10. Erden, Z., 2014. “Conceptual Structuring of Modular Design Methodology for Mechatronic Systems: Behaviour Based Design Perspective”, *Proceedings of the 16th Int. Conf. on Machine Design and Production (UMTIK 2014)*, June 30 - July 3, s. 87-100, İzmir, Turkey.
11. Erden, Z., 2017. “Smazzle: A Demonstrative Case Study for Modular Design of Mechatronic Products”. *Proceedings of the Int. Conf. on Engineering Technologies (ICENTE'17)*, December 7-9, Konya, Turkey.
12. Erden, Z., 2018. “Development and Implementation of Behavioural Modules for Platform-Based Mechatronic Design”, *Proceedings of the 12th Int. Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE2018)*, May 7-11, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, pp. 625-634.
13. Erixon, G., 1998. *Modular function deployment: a method for product modularisation*. Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division.
14. Gerherson, J.K., Prasad, G.J., Zhang, Y., 2003. Product Modularity: Definitions and Benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), pp.295-313.
15. Gu, P., Xue, D., Nee, A.Y.C., 2009. Adaptable Design: Concepts, Methods, and Applications. *Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(11), pp. 1367-1387.

16. Habib, T., 2014. *System Design of Mechatronic Products Models and Methods to Utilize Mass Customization*. Denmark. Aalborg University.
17. Helmer, R., Yassine, A., Meier, C., 2010. Systematic Module and Interface Definition Using Component Design Structure Matrix. *Journal of Engineering Design*, 21(6), pp. 647–675.
18. Huang, C.C., Kusiak, A., 1998. Modularity in Design of Products and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-A: Systems and Humans*, 28(1), pp. 66–77.
19. Huang, C.C., 2000. “Overview of modular product development”, *Proceedings-National Science Council Republic of China Part a Physical Science and Engineering*, 24(3), pp. 149-165.
20. Hölttä, K.M., Otto, K.N., 2005. “Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment”. *Design Studies*, 26(5), pp.463-485.
21. Hölttä, K.M., Salonen, M.P., 2003. “Comparing three different modularity methods”. *Proc. of the ASME 2003 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 533-541). American Society of Mechanical Engineers.
22. Isermann, R., 2008. “Mechatronic systems-Innovative products with embedded control”. *Control Engineering Practice*, 16(1), pp.14-29.
23. Jiao, J., Simpson, T. W., Siddique, Z., 2007. Product Family Design and Platform-Based Product Development: A State-of-the-Art Review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(5), pp.5-29.
24. Li, Z., Cheng, Z., Feng, Y., Yang, J., 2013. An Integrated Method for Flexible Platform Modular Architecture Design. *Journal of Engineering Design*, 24(1), pp. 25-44.
25. Li, B. M., Xie, S. Q., 2015. Module Partition for 3D CAD Assembly Models: A Hierarchical Clustering Method Based on Component Dependencies. *International Journal of Production Research*, 53(17), pp. 5224–5240
26. Liang, W.Y., Huang, C.C., 2002. “The agent-based collaboration information system of product development”. *International Journal of Information Management*, 22(3), pp.211-224.
27. Ma, J., Kremer, G.E.O., 2016. “A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5-8), pp.1509-1539.
28. Nanda, J., Thevenot, H.J., Simpson, T.W., Stone, R.B., Bohm, M., Shoter, S.B., 2007. Product Family Design Knowledge Representation, Aggregation, Reuse and Analysis. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 21(2), pp.173-192.
29. Ozer, I., Erden, Z., 2019. Systematic Generation of a 3D DSM by Extracting Social Robot Behaviors from Literature. In *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), pp. 3731-3740, Cambridge University Press.
30. Pahl, G., Beitz, W., 1996. *Engineering Design-A Systematic Approach*. London: The Design Council.
31. Pimmler, T.U., Eppinger, S.D., 1994. “Integration Analysis of Product Decompositions”. In *Proceedings of the ASME 6th International Conference on Design Theory and Methodology*, Minneapolis, MN.
32. Qiao, L., Efatmaneshnik, M., Ryan, M., Shoval S., 2017. Product modular analysis with design structure matrix using a hybrid approach based on MDS and clustering. *Journal of Engineering Design*, 28(6), pp. 433-456.
33. Simpson, T.W., 2004. Product Platform Design and Customization: Status and Promise. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 18(1), pp.3-20.
34. Stone, R.B., Wood, K.L., Crawford, R.H., 2000. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures. *Design Studies*, 21(1), pp.5-31.
35. Tseng, M., Jiao, J., 2001. *Mass Customization*. Handbook of Industrial Engineering, Gaviel Salvendy (Ed.), Wiley, New York.
36. Ulrich, K., 1995. “The role of product architecture in the manufacturing firm”. *Research Policy*, 24(3), pp.419-440.
37. Ulrich, K., Eppinger, S., 1995. *Product Design and Development*. Singapore. McGraw-Hill.
38. van Beek, T.J., Erden, M.S., Tomiyama, T., 2010. Modular Design of Mechatronic Systems with Function Modelling. *Mechatronics*, 20(8), pp. 850-863.
39. Wang, Z., Chen, L., Zhao, X., Zhou, W., 2014. “Modularity in building mass customization capability: The mediating effects of customization knowledge utilization and business process improvement”. *Technovation*, 34(11), pp.678-687.
40. Yan, X., Stewart, B., 2010. *Developing Modular Product Family Using GeMoCURE within an SME*. *International Journal of Manufacturing Research*, 5(4), pp. 449-463.
41. Yu, T., Yassine, A.A., Goldberg, D.E., 2007. An Information Theoretic Method for Developing Modular Architectures Using Genetic Algorithms. *Research in Engineering Design*, 18(2), pp.91-109.
42. Ziegler, B.P., 1989. DEVS Representation of Dynamic Systems: Event-Based Intelligent Control. *Proceedings of the IEEE*, 77(1), pp.72-80.