



Journal of Turkish Operations Management

Entegre lojistik sistemler için yeni bir onarım ağı yapısı önerisi

İsmail BIÇAKÇI¹, Yusuf Tansel İÇ^{2*}, Esra KARASAKAL³, Berna DENGİZ⁴

¹ARTEC GMBH, Munich, Germany

e-mail: ismailbicakci@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-1934-5071>

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: yustanic@baskent.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9274-7467>

³Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: koktener@metu.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4095-1858>

⁴Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

e-mail: bdengiz@baskent.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2806-3308>

*Sorumlu Yazar

Makale Bilgisi

Makale Geçmişi:

Geliş: 07.06.2020

Revize: 09.08.2020

Kabul: 21.08.2020

Anahtar Kelimeler:

Onarım seviyesi analizi,
Entegre lojistik destek,
Bakım-onarım faaliyetleri,
Onarım ağı yapıları

Özet

Askeri silah sistemleri gibi ilk yatırım maliyeti yüksek olan sistemlerde onarım seviyesi analizi son yıllarda kritik ve karmaşık bir karar verme problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Onarım seviyesi analizinde, onarım faaliyetleriyle ilgili kararlarının verilmesinde onarım ağı yapılarından faydalanılmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle literatürde yer alan onarım ağı yapıları gözden geçirilmiştir. Ardından onarım seviyesi analizi için daha elverişli olabilecek bir ağı yapısına ilişkin öneriler sunulmuştur.

A new repair network structure proposal for integrated logistics systems

Article Info

Article History:

Received: 07.06.2020

Revised: 09.08.2020

Accepted: 21.08.2020

Abstract

In recent years, the level of repair analysis has become critical and complex decision making problem especially in systems with high initial investment costs such as military weapons systems. In the level of repair analysis, repair network structures are used to decide repair activities. In this study, repair network structures are reviewed from the extant literature. Then, suggestions for repair network structures that could be more convenient for level of repair analysis are presented.

Keywords:

Level of repair analysis,
Integrated logistics support,
Maintenance and repair activities,
Repair network structures

1. Giriş

Düşük maliyetli ürünler arızalandığında çoğu durumda onarımlarını yapmak yerine yenisini almak daha maliyet etkin olabilmektedir. Ancak; uçak, gemi, enerji santralleri gibi ürün yapısı karmaşık ve yüksek ilk yatırım maliyetli sistemler arızalandığında, arızanın giderilmesinden başka seçenek bulunmamaktadır. Bunun yanında arıza ile karşılaşma sayısı arttıkça sistemlerin hem işletme ve idame maliyetleri artmakta, hem de arızalı kaldıkları sürelerde sistemlerin kullanımı mümkün olmamaktadır.

Bu tip karmaşık yapı ve yüksek maliyetli sistemler, ömür devri boyunca kavramsal tasarım, tasarım, geliştirme, üretim, işletme ve envantere çıkarılma gibi farklı süreçlerinden geçerler (ALP-10, 2011). Örneğin savunma sanayi ürünlerinde projelerin özelliklerine göre değişkenlik göstermekle birlikte, genel olarak silah sistemleri ortalama 30-40 yıllık bir kullanım süresi düşünülerek tasarlanır ve üretilir. Bu süre içerisinde hem kapsadığı süre, hem de maliyet açısından en büyük payı alan süreç işletme ve lojistik destek sürecidir (Berkowitz, Gupta, Simpson ve McWilliams, 2005).

Sistemlerinin tam kapasite hizmet verebilmesi için ömür devri sürelerince bakımlarının düzenli olarak yapılıyor olması gerekmektedir. Uygulanan bakımlar, (1) Planlı/Önleyici Bakımlar ve (2) Düzeltici Bakımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (S3000L, 2014). Planlı/Önleyici Bakımlar sistemin görev/operasyon başarısını ve sistemin güvenilirlik seviyesini idame ettirmek için yapılmaktadır (S4000P, 2018). Plansız Bakımlar ise sistemde beklenmedik bir arıza olduğunda arızanın giderilmesi için yapılan faaliyetlerin toplamıdır. Sistemlerin hizmet dışı kalması genelde beklenmedik zamanlarda karşılaşılan arızalar nedeniyle gerçekleşir. Bu gibi hizmet dışında kalma durumunda kullanıcıların katlandıkları maliyetler de oldukça büyük olmaktadır.

Yüksek maliyetlere karşılık gelmesi nedeniyle bu tip sistemlerin ömür devri maliyetleri kullanıcılar için büyük önem taşımaktadır. Satın alma ile ilgili verilen kararlarda ilk edinim maliyetinin yanında, ömür devri maliyeti her geçen gün daha da fazla dikkate alınmaktadır (Ferrin ve Plank, 2002). Amerika Birleşik Devletleri (MIL-STD-1388-1A) ve İngiltere Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanmış (DEF STAN 00-60 (Part 0), 2002) askeri standartlarda silah sistemlerinin tedariklerine ilişkin olarak, ilk edinim maliyetleri yerine toplam ömür devri maliyetinin değerlendirilmesi hususuna yer verilmektedir (Basten, Schutten ve Van der Heijden, 2009).

Ömür devri maliyetlerinin her geçen gün önem kazanması gerçeği sistem üreticilerini daha düşük ömür devri maliyetli üretim yapmaya yöneltmekte ve bunu başaran sistem üreticileri rakiplerine göre büyük avantajlar elde etmektedir. Bir sistemin düşük ömür devri maliyetine sahip olup olmadığının belirlenebilmesi amacıyla sistem üreticileri ömür devri maliyet analizi çalışmaları yapmaktadırlar. Bu çalışmalar hem sözleşme gereksinimi olarak kullanıcılar ile paylaşılır, hem de kullanım dönemi lojistik destek kapsamında ihtiyaç sahibi ve üretici arasında yapılabilecek sözleşmeler için belirli bir alt yapıyı oluşturur.

Ömür devri maliyet analizinin en erken safhalarda yapılması çok önemlidir. Örneğin, kavram tasarım çalışmalarına kadar verilen tasarım ve lojistik kararların sistemin ömür devri maliyetinin %85'ini taahhüt altına alındığı bilinmektedir (ALP-10, 2011). Bunun yanında, ömür devri maliyet analizi (1) sistemin performans ve kullanılabilirlik gereksinimlerinin karşılanabilmesi için üretim programına uyulabilmesi amacıyla geliştirilen alternatiflerin maliyetlerinin belirlenmesi, (2) farklı tasarım ve destek seçeneklerinin toplam ömür devri maliyetine etkisinin tahmin edilebilmesi ve (3) seçilen tasarımın maliyet tahmininin ömür devrinde ilerledikçe iyileştirilebilmesi için de kullanılmaktadır (ALP-10, 2011).

Bu makaleye konu olan sistemler çok yüksek ömür devri maliyetlerine sahiptirler. Yapıları ve üstlendikleri sorumluluklar nedeniyle sistemlerin en üst seviyede hazır bulunma oranına sahip olmaları büyük önem arz etmektedir. Herhangi bir nedenden dolayı hizmet dışı kalmaları durumu ile karşılaşıldığında ise sonuçlar çok ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Örnek vermek gerekirse; bir hidro-elektrik enerji santralinde jeneratör arızası ile karşılaşılması durumunda elektrik üretimi olumsuz bir şekilde etkilenecek ve çok yüksek kurulum maliyetine sahip sistemin tam kapasiteli kullanımı mümkün olmayacaktır. Diğer bir örnek olarak, sahil güvenlik helikopterinin arama kurtarma vincinin arızalanması, sorumlu olduğu bölgede yapılacak bir arama kurtarma faaliyetinde etkin görev alamamasına neden olacak ve hayati tehlikesi olan kazazedelere ihtiyaç duyduğu desteği sağlayamayacaktır. Yine başka bir örnek olarak, firkateyn sınıfı bir savaş gemisinin ana makinesinde yer alan bir alt sistemin arıza yapması tüm gemiyi atıl hale getirebilecek ve yüzlerce kişinin üzerinde görev yaptığı, milyonlarca dolar değerindeki platformun kullanılmamasına neden olacaktır.

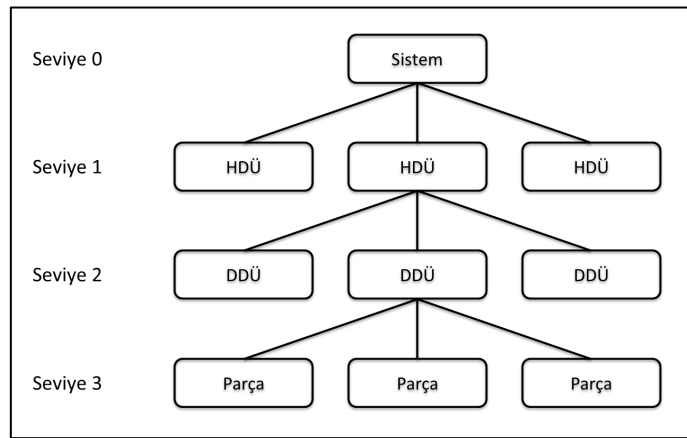
Diğer taraftan, teknoloji alanında her geçen gün yaşanan gelişmeler ile birlikte tasarlanan ürünlerin yapısı daha da karmaşık bir hale gelmektedir. Kaynakların etkin bir şekilde kullanılması ve aynı zamanda sistemlerin yüksek güvenilirlik ve hazır bulunma oranlarına sahip olmaları için ihtiyaç sahibi makamlar ile üretici firmaların çeşitli mühendislik çalışmaları yapması gerekmektedir. Bu kapsamda, sistemlerin lojistik destek gereksinimlerinin en etkin bir şekilde planlanıp geliştirilebilmesi için sistem üreticileri tarafından Entegre Lojistik Destek (ELD) çalışmaları yürütülmüştür.

ABD Savunma Bakanlığının 5000.39 sayılı direktifi ELD'yi şu şekilde tanımlamaktadır: “Entegre Lojistik Destek, tasarlanmış bir sistemin ömür devrinin kullanım aşamasında asgari bir maliyetle desteklenebilmesi için sistemin desteğini etkilemek için kullanılan yönetsel ve teknik yaklaşımdır” (Blanchard ve Fabrycky, 1998).

Yapılan ELD çalışmaları, sistemlerin güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım, desteklenebilirlik ve test edilebilirlik açısından kalitesini arttırmak amacıyla yapılır (ALP-10, 2011). ELD faaliyetleri kapsamında üretici tarafından Lojistik Destek Analizi Kayıtları, Teknik Dokümantasyon, Yedek Parça Desteği, Yer Destek ve Test Ekipmanı Desteği, Kullanıcı ve Bakım Eğitimleri vb. ürün ve hizmetler hazırlanır ve kullanıcıların hizmetine sunulur.

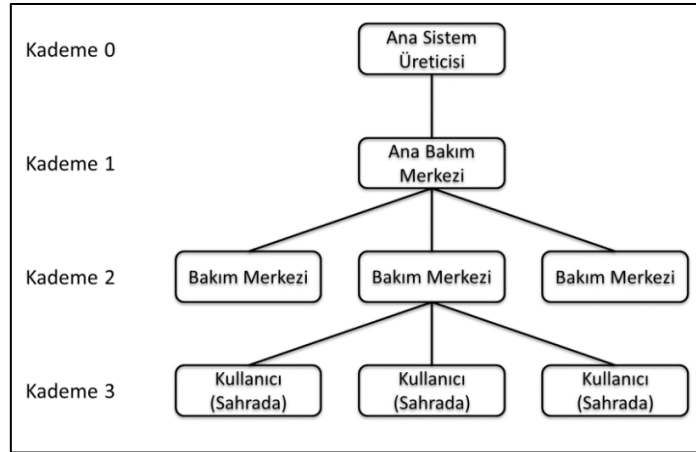
Kullanıcılar, ELD kapsamında sunulan ürün ve hizmetler sayesinde kazandıkları yetenekler ile garanti dönemi sonrasında sistemlerin idamesini kendi imkânları ile gidermeyi tercih edebilir. İdame ihtiyacını kendi imkânları ile gidermek yerine kullanıcı bu ihtiyacı üreticiden aldığı bakım onarım hizmeti ile de giderebilir. Çoğu zaman hizmet satışının mal satışından daha karlı olduğu bilinmektedir (Koudal, 2006; Murthy, Solem ve Roren, 2004; Oliva ve Kallenberg, 2003). Bu nedenle, üretici firmalar bu tip hizmet sözleşmeleri iyi birer gelir kaynağı olarak görmektedirler. Bu doğrultuda değerlendirildiğinde, karlılığın artırılabilmesi için bir sistemin ömür devri boyunca maruz kalacağı bakım-onarımlara ait maliyetler, tasarım aşamasından itibaren değerlendirilmesi gereken önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Karmaşık alt bileşenlere sahip olan sistemler, ürün ağacı yapısıyla modellenen birçok bileşenden oluşmaktadır. Sistemler, Şekil 1’de belirtildiği şekilde baba-oğul ilişkisine sahip çok kademeli ürün ağacı yapısına sahiptirler. Her bir sistem bir veya birden fazla “Hatta Değiştirilebilir Ünite (HDÜ)”den, her HDÜ de bir veya birden fazla “Depoda Değiştirilebilir Ünite (DDÜ)”den oluşmaktadır. Bu kavramların her biri ürün ağacında bir seviyeye karşılık gelmektedir. Sistemlerde meydana gelen arızalar genellikle arızalı HDÜ’nün sökülmesi ve çalışan bir yedeği ile değiştirilmesi ile giderilir. Sökülen arızalı HDÜ onarılmakta ya da hurdaya ayrılmaktadır. HDÜ hurdaya ayrılacaksa yerine yenisinin tedarik edilmesi gerekmektedir. Eğer onarımı yapılacak ise HDÜ’nün arızalı DDÜ’sünün çalışan bir yedeğiyle değiştirilmesi gerekir. Bu durumda da DDÜ’nün de onarımı ya da hurdaya ayrılması söz konusu olur.



Şekil 1. Ürün ağacı yapısı

Gündeme gelen diğer bir konu ise bu onarımların nerede yapılacağıdır. Karşılaşılan arızaların onarımları veya yedek parçaların stoklanması sistem için tanımlanmış bir onarım ağında bulunan bakım noktalarında yapılmaktadır. Bu tip çok aşamalı onarım kademesi ağ yapısının örnek gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Onarımın belirli bir yerde yapılması kararı, katlanılması gereken sabit ve değişken maliyetleri gündeme getirmektedir. Ulaşım maliyetleri, yedek parça maliyetleri, işçilik maliyetleri gibi maliyetler değişken maliyetlere; özel test ekipmanları, tesis maliyetleri, yedek parça tutma maliyetleri gibi maliyetler de sabit maliyetlere örnek olarak verilebilir.



Şekil 2. Onarım ağ yapısı

Yukarıda yapılan açıklamalardan anlaşılacağı gibi hem kullanıcılar, hem de üreticiler açısından bir sistemin ömür devri maliyetinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Ömür devri maliyeti ve hazır bulunma oranı üzerinde en büyük payı beklenmedik arızalara ait onarımlar almaktadır (Basten, 2010). Para ve zaman açısından değerlendirildiğinde bu tip arızaların en düşük maliyetle giderilmesi için sistem tasarım aşamasından başlayarak bazı kararların alınması gerekmektedir.

Askeri uygulamalardaki entegre sistemlerde ise, çalışır durumdaki bir sistemin arızalanması durumunda ilk olarak bu sistemin tekrar nasıl çalışır duruma getirileceğinin belirlenmesi gerekir. Bir arıza ile karşılaşıldığında arızanın çeşidine ya da ihtiyaç duyulacak yedek parça vb. ihtiyaçlara bakılmaksızın ilk olarak arızalı HDÜ sistemden sökülür ve mevcut ise çalışan bir yedeği ile değiştirilir. Eğer yedekte çalışır durumda bir HDÜ yok ise o zaman sistem arıza giderilene kadar hizmet dışı kalır. Hizmet dışı kaldığı sürede operasyonda aktif kullanılmamasından kaynaklanan maliyetler ortaya çıkacaktır. Bu nedenle sistemin uzun süre hizmet dışı kalması istenmez. Arızanın en kısa zamanda giderilebilmesi için arızalanan HDÜ'nün neden arızalandığı tespit edilir ve onarım için ya HDÜ'nün kendisi ya da arızalı HDÜ/DDÜ'sü ilgili onarım kademesine sevk edilir.

Arızalı alt bileşenin onarılıp onarılmaması ile ilgili kararın verilmesi ve bu işlemlerin hangi onarım kademesinde yapılacağı sorularının cevabı yapılan "Onarım Seviyesi Analizi" ile belirlenir. Onarım Seviyesi Analizi, sistemin ömür devri süresince en düşük potansiyel ömür devri maliyetine sahip olmasını hedefler (Basten, Van der Heijden ve Schutten, 2011a). ABD Savunma Bakanlığı tarafından Onarım Seviyesi Analizi şu şekilde tanımlanmaktadır: "Ekonomik, ekonomik olmayan ve duyarlılık değerlendirmelerinin yanı sıra harekât hazırlık gereklilikleri ile elde edilen kısıtlamalara dayanarak, bakım konseptlerinin geliştirilmesinde, tasarımın etkilenmesinde ve arızalı bileşenlerin onarılacağı veya elden çıkarılacağı bakım seviyesini belirlenmesinde kullanılan analitik bir metodolojidir." (MIL-HDBK-1390, 2015).

Bu çalışmada, onarım seviyesi analizinde kullanılan ağ yapıları ele alınmaktadır. İkinci bölümde literatürdeki onarım seviyesi analizinde kullanılan ağ yapıları tanıtılmakta ve çalışmalarda yer verilen ağ yapılarının işleyiş şekilleri detaylandırılmaktadır. Üçüncü bölümde, günümüzdeki karmaşık entegre lojistik sistemlerinde literatürdeki ağ yapılarına nazaran daha kullanışlı olacağı düşünülen ağ yapısının nasıl olması gerektiğine dair öneriler getirilmektedir. Dördüncü bölümde ise çalışmada ulaşılan sonuçlar sunulmaktadır.

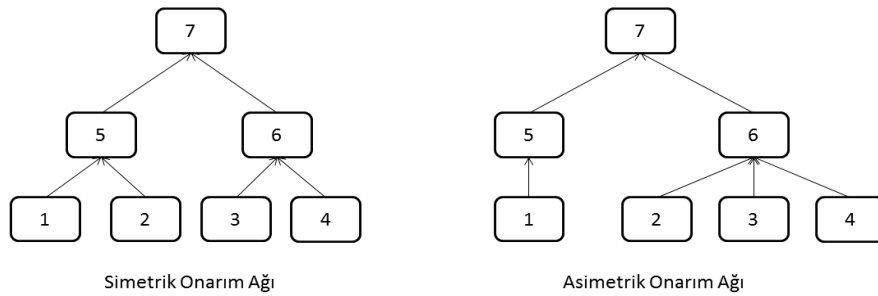
2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatürde onarım seviyesi analizi problemine ilişkin kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. İlk onarım seviyesi analizi modeli Barros (1998, 2001) tarafından önerilmiştir. Bu modelde aynı kademede onarılan alt sistemlerin aynı kaynakları kullandıkları varsayılmıştır. Saranga ve Dinesh Kumar (2006), Barros tarafından önerilen modelden farklı olarak her alt parçanın kendi maliyetlerinin göz önüne alınarak değerlendirildiği ağ yapısını kullanmışlardır. Çalışmada, üç seviyeli yapıya sahip bir sistem ve üç kademeli bir onarım ağı ele alınmıştır. Basten ve diğ. (2009), Barros (1998) ve Saranga ve Dinesh Kumar (2006) tarafından önerilen ağ yapısını geliştirerek yeni bir ağ yapısı geliştirmişlerdir. Basten ve diğ. (2011a), Basten ve diğ. (2009)'nin önerdiği yapıyı, aynı kademe seviyesinde yer alan farklı noktalarda farklı kararların verilebileceği şekilde genişletmiş ve problemi enküçük akış problemi olarak yeniden tasarlamıştır. Basten, Van Der Heijden ve Schutten (2011b), Basten ve diğ. (2009)'nin geliştirdiği modele yönelik başarısız onarım olasılığı, hata bulunmama olasılığı, sonlu kaynak kapasitesi, aynı alt sisteme ait birden fazla hata modu ve onarım hizmetinin dış kaynaktan tedariki gibi

bazı faktörleri tartışmışlar ve ilk üç eklentiye test etmişlerdir. Brick ve Uchoa (2009), onarım seviyesi analizi probleminde iki seviyeli yapıya sahip bir sistem ve iki kademeli bir onarım ağı ele almışlar.

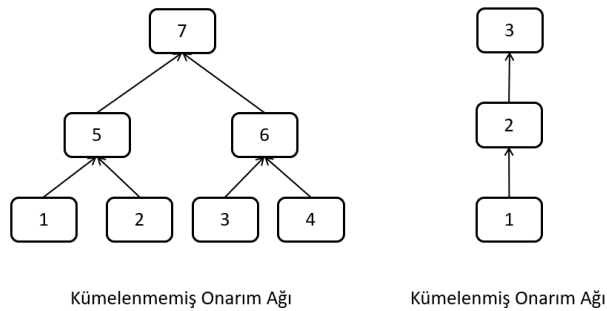
Literatürde yer alan çalışmalar onarım seviyesi analizi problemini farklı açılardan ele almaktadır. Çalışmalarda ele alınan ağ yapısı özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

- **Asimetrik onarım ağı:** Bir onarım ağı simetrik yapıya sahip olmayabilir. Operasyonel gereklilikler nedeniyle onarım tesisleri farklı sayıda sistemi desteklemek durumunda kalabilir. Örneğin; yasa dışı göçün daha yoğun olduğu bölgede konuşlandırılacak sahil güvenlik botunun sayısı diğer bölgelere nazaran daha fazla olacak ve dolayısı ile aynı bölgede yer alan onarım tesisi daha fazla bota destek sağlayacaktır. Simetrik ve asimetrik onarım ağı arasındaki fark şematik olarak Şekil 3'de gösterilmektedir. Basten ve diğ. (2011a, 2011b) çalışmalarında asimetrik onarım ağını ele almışlar ve asimetrik yapıli onarım ağlarının kullanılması ile %7'nin üzerinde maliyet avantajının sağlandığını göstermişlerdir (Basten ve diğ., 2011a). Bu nedenden dolayı, onarım seviyesi analizi için geliştirilecek modellerin asimetrik onarım ağını dikkate alabilmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3. Simetrik ve asimetrik onarım ağı

- **Kümelenmiş onarım ağı:** Ağ yapısını basitleştirmek için aynı onarım seviyesinde yer alan tüm tesisler için verilerin toplanması ve alınan bir kararın o seviyede yer alan tüm tesisler için aynı şekilde kullanılması durumudur. Kümelenmiş onarım ağının simgesel gösterimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Kaynaklarda yaygın olarak kümelenmiş onarım ağı kullanılmaktadır ancak, bu durum geliştirilen modellerin gerçek hayat problemlerine tam olarak cevap verememesine neden olmaktadır. Brick ve Uchoa (2009) tarafından önerilen modelde arızalı bileşenler onarım ağında belirli bir hiyerarşik yapı benimsenmeden tüm lokasyonlara gönderilebilmektedir. Bu sayede onarım ağında yer alan her bir onarım tesisi için ayrı kararların alınması mümkün hale gelmekte ve daha maliyet etkin çözümler elde edilebilmektedir. Bunun yanında, Basten ve diğ. (2011a, 2011b) de çalışmalarında kümelenmemiş onarım ağını kullanmaktadırlar.



Şekil 4. Kümelenmemiş ve kümelenmiş onarım ağı

- **Ürün kırılımı:** Sistemlerin ürün ağaç yapısı baba-oğul ilişkisine sahip çok kademeli ürün kırılımı şeklinde tasarlanmaktadır. Tasarlanan sistemin yapısı karmaşıklıkla arttıkça ağaç yapısında yer alan ürün kırılım seviyesi de aynı şekilde artmaktadır. Ürün kırılım seviyesinin artması onarım seviyesi analizi probleminin yapısını daha karmaşık bir hale getirmesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Genelde silah sistemleri gibi karmaşık sistemler çok seviyeli ürün kırılımına sahiptir. Bu gibi sistemler için yapılacak onarım seviyesi analizinde çok seviyeli ürün kırılımı ağ yapısının dikkate alınması gerekir. Aksi şekilde geliştirilen modeller gerçek hayat problemlerine tam olarak yanıt veremeyecektir. Baros (1998), Baros ve Riley (2001) ve Brick ve Uchoa (2009) tarafından yapılan çalışmalarda iki seviyeli

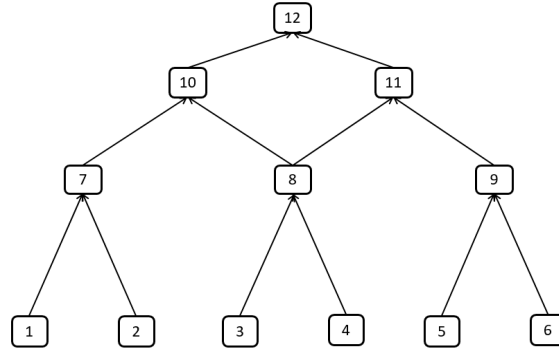
ürün kırılımı kullanılmıştır. Saranga ve Kumar (2006) çalışmalarında üçlü ürün kırılımını ele alırken Basten ve diğ. (2009, 2011a, 2011b) ise çoklu ürün kırılımını modellemişlerdir.

- **Onarım kademe seviyesi:** Onarım ağı birden fazla kademe seviyesinden oluşmaktadır. Örnek bir onarım ağının gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Amerikan ordusunda yapılan bakım onarım faaliyetleri genel olarak kullanıcı (organizational level), birlik (intermediate level) ve depo (depot level) seviyesi olmak üzere üç seviyeden oluşmaktadır (MIL-HDBK-1390, 2015). İngiltere ordusunda ise onarım ağı dört farklı kademe seviyesinden (JSP-886, 2014) oluşmaktadır. Onarım kademe seviyelerinde icra edilecek bakım faaliyetlerinin kapsamı ihtiyaç duyulan özel ekipmanın, tesislerin, personelin, teknik verilerin vb. özelliklerine göre belirlenmektedir. Kaynaklarda, Brick ve Uchoa (2009), Baros (1998) ve Baros ve Riley (2001), Saranga ve Kumar (2006) onarım kademe seviyesi olarak sırasıyla bir, iki ve üç seviyelerini ele almışlardır. İdeal bir onarım seviyesi analizinin çoklu onarım kademe seviyesine sahip olan onarım ağlarını da kapsayabilmesi gerekir. Bu nedenle onarım ağında yer alan kademe seviye sayısı onarım seviyesi problemi açısından büyük önem taşımaktadır. Çoklu onarım kademesini ele alan çalışmalara Basten ve diğ. (2009, 2011a, 2011b) tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir.
- **Onarım seçenekleri:** Onarım Seviyesi Analizi, ürünün arızalanması durumunda, onarılması ile ilgili kararın verilmesi ve bu işlemlerin hangi onarım kademesinde yapılması gerektiğini belirler. Onarım seviyesi analizi kapsamında verilen kararlar aşağıda belirtilmiştir.
 - **Hurda (Discard):** Arızalı bileşen hurdaya ayrılır ve yenisi tedarik edilir.
 - **Onarım (Repair):** Arızalı bileşen kendisi ya da arızalı bir alt bileşeni yenisi ile değiştirilmek suretiyle onarılır.
 - **Sevk (Move):** Arızalı bileşen onarım ağında bir üst kademeye sevk edilir. Sevk edilen bileşen için bir üst kademede de onarım seçeneğinin seçilmesi gerekmektedir. Onarım ağında yer alan en üst seviye için bir üst seviyeye sevk seçeneği bulunmamaktadır (Basten ve diğ., 2011a).

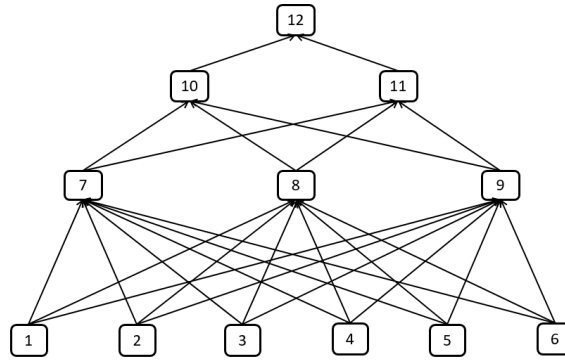
Brick ve Uchoa (2009) tarafından yapılan çalışmada hurda ve onarım seçenekleri olmak üzere iki onarım seçeneği ele alınmıştır. Kaynaklarda bunun haricinde kalan çalışmalarda her üç onarım seçeneği de kullanılmaktadır.

- **Kapasite kısıtı:** Gerçek hayat problemlerinde kapasite her zaman zorlayıcı bir kısıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Onarım ağında yer alan tesislerin de belirli bir kapasitesi vardır. Kapasite kısıtlarını göz ardı etmek, gerçek hayat problemlerine cevap vermeyen basitleştirici bir yaklaşımdır. Onarım seviyesi analizinin amaçlarından biri de onarım için kullanılacak gerekli kaynağın nerede konuşlanacağına belirlenmesidir. Gerçek hayat problemlerine cevap verebilmek için onarım seviyesi analizi çalışmalarında kaynak kısıtlamaları dikkate alınmalıdır. Brick ve Uchoa (2009) ile Basten ve diğ. (2011a, 2011b) tarafından yapılan çalışmalarda kapasite kısıtı bulunmaktadır.
- **Onarım ağının esnekliği:** Sistemler görev şartları ve tasarım özelliklerine göre farklı onarım ağlarına tabi olabilirler. Yukarıda da bahsedildiği gibi bazı onarım ağlarının yapısı asimetrik olabilir. Bu gibi durumlarda onarım ağının zorunlu değişikliklere müsaade edebilecek bir esneklikte olması gerekir. Onarım ağının esnekliği Şekil 3’de belirtilen simetrik ve asimetrik ağlar arasındaki hareket serbestisi açısından sağlanabilen avantajın kullanılabilmesini sağlar. Kaynaklarda yer alan çalışmalar arasında Brick ve Uchoa (2009) ve Basten ve diğ. (2011a, 2011b) tarafından önerilen modeller asimetrik onarım ağının kullanımına olanak sağlayabilmektedir.
- **Hurda seçeneği için sabit maliyet:** Hurdaya ayırma kararı verilen bir bileşenin hurda işlemlerinin yapılabilmesi için çeşitli maliyetlere katlanması gerekebilir. Özellikle, askeri amaçlar için tasarlanmış ekipmanların elden çıkarılma aşamasında, çevre güvenliğinin sağlanması, doğanın korunması ve ekipmanların askeri yönlerinin kaldırılması gibi hususlar için sabit maliyet gerektiren ilave önlemler alınır. Ömür devri süreçlerinde bu durum genelde ihmal edilir (ALP-10, 2011). Onarım seviyesi analizi çalışmalarında hurda işlemleri için yapılan ve sabit maliyet gerektiren bu gibi durumların dikkate alınması gerekir. Kaynaklarda Baros (1998) ve Baros ve Riley (2001) haricinde kalan tüm çalışmalarda hurda seçeneği için sabit maliyet öngörülmektedir.
- **Tek / Çoklu yukarı akış seçeneği:** Onarım ağında yer alan tesisler, kademe seviyelerine göre bir üst seviyedeki onarım tesislerine malzeme sevki yapabilmektedirler. Bir onarım ağında, alt kademe seviyesindeki bir tesis üst kademe seviyesinden sadece tek bir tesise malzeme sevki yapabiliyorsa bu onarım ağı “tekli yukarı akış (single upstream)” seçenekli onarım ağı şeklinde tanımlanır. Bu durum aynı onarım kademe seviyesinde yer alan farklı tesisler için mükerrer yatırım harcamalarının yapılmasına neden olabilmektedir. Arızalanan parçaların birden fazla üst kademe onarım tesisine (multiple upstream) sevk edilebilmesi seçeneğinin bulunduğu durumdaki onarım ağlarına ise “çoklu

yukarı akış (multiple upstream)” seçenekli onarım ağı denmektedir. Tekli ve çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarının simgesel gösterimi sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Kaynaklarda yer alan çalışmalarda önerilen modellerin tümü sadece tekli yukarı akış seçenekli onarım ağları için çözüm sağlayabilmektedirler.



Şekil 5. Tek yukarı akış seçenekli onarım ağı



Şekil 6. Çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı

Onarım ağındaki tesisler, özellikle de aynı kademe seviyesinde yer alan tesisler, benzer özelliklere sahip olduğundan çoklu yukarı akış seçeneğine sahip onarım ağlarının büyük maliyet avantajı getireceği görülebilmektedir. Bilindiği gibi malzeme sevk işlemleri yatırım maliyetlerine oranla çok daha düşük bütçeler ile gerçekleşir. Normal şartlarda onarım ağındaki tesislerde kapasite sıkıntısı yaşanmamasına rağmen, onarım ağının sadece tek yukarı akış seçeneğine müsaade ediyor olması nedeniyle, aynı sabit maliyetin farklı tesislerde de yapılması durumu ile sıkça karşılaşılır. Bununla birlikte, çoklu yukarı akışa izin verildiği durumlarda ise örneğin belirli bir makine için yapılacak yatırımın birden fazla tesiste yapılması yerine bir tesis için yapılması yeterli olabilecektir. Öte yandan, çoklu yukarı akış seçeneğine sahip onarım ağlarının toplam malzeme sevk maliyetini arttıracakları öngörülebilmektedir ancak, değişken maliyetlerden çok daha önemli bir maliyet kalemi olan sabit maliyetlerde ise önemli ölçüde tasarrufa olanak sağlayacaktır. Bu yaklaşımın kullanılması ile aynı veya farklı kademe seviyesinde yer alan tesisler için yapılacak yatırımların yetersiz kullanımından kaçınılacak ve daha uygun maliyetli çözümler sağlanabilecektir.

Tablo 1. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması

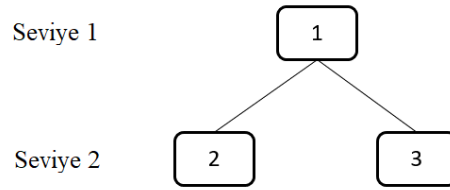
| # | Problem Özellikleri | Barros (1998), Barros ve Riley (2001) | Saranga ve Kumar (2006) | Brick ve Uchoa (2009) | Basten vd. (2009) | Basten vd. (2011a, b) |
|---|------------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | Asimetrik Onarım Ağı | Hayır | Hayır | Hayır | Hayır | Evet |
| 2 | Kümelmiş Onarım Ağı | Evet | Evet | Hayır | Evet | Hayır |
| 3 | Ürün Kırılımı | İki | Üç | İki | Çoklu | Çoklu |
| 4 | Onarım Kademe Seviyesi | İki | Üç | Bir | Çoklu | Çoklu |
| 5 | Onarım Seçenekleri | S, O, H | S, O, H | O, H | S, O, H | S, O, H |
| 6 | Kapasite Kısıtı | Hayır | Hayır | Evet | Hayır | Evet |
| 7 | Onarım Ağının Esnekliği | Hayır | Hayır | Evet | Hayır | Evet |
| 8 | Farklı Hata Türlerini Dikkate Alma | Hayır | Hayır | Evet | Hayır | Hayır |
| 9 | Hurda Seçeneği için Sabit Maliyet | Hayır | Evet | Evet | Evet | Evet |

| | | | | | | |
|----|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10 | Tek/Çoklu Yukarı Akış Seçeneği | Tek | Tek | Tek | Tek | Tek |
|----|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|

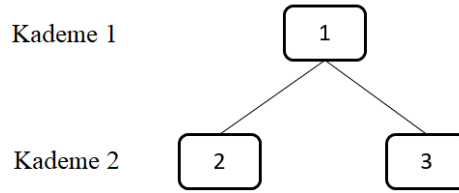
Onarım seviyesi analizinde kullanılacak modelin çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağlarına çözüm getirebilmesi daha düşük maliyetli çözümler ortaya çıkarabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda yapılan açıklamalar kapsamında, literatürde yer alan çalışmaların ele aldıkları özelliklere göre karşılaştırmalı gösterimi Tablo 1’de verilmiştir.

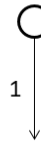
Onarım seviyesi analizi için literatürde yer alan çalışmalar arasında sadece Basten ve diğ. (2011a) tarafından önerilen model asimetrik onarım ağını ele alabilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi gerçek hayatta karşılaşılan durumlarda onarım ağı her zaman simetrik bir yapıya sahip değildir. Bu nedenle, önerilen modelin asimetrik onarım ağı için de çözüm getirebilmesi büyük önem taşımaktadır. Basten ve diğ. (2011a) tarafından önerilen modelin detaylı anlatımına yönelik örnek ağ yapısı ve ürün yapısının şematik gösterimi Şekil 7 ve 8’de verilmiştir. Onarım ağında yer alan düğümler Şekil 9-13’te verilmektedir. Basten ve diğ. (2011a) çalışmasında önerilen modelin anlatımı için, Şekil 7’de verilen 2 seviyeli ve toplam 3 bileşenli bir ürün yapısı ile Şekil 8’de verilen 2 seviyeli ve toplam 3 onarım tesisinin bulunduğu bir onarım ağı yapıları kullanılmıştır.



Şekil 7. Örnek ürün yapısı

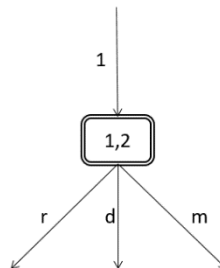


Şekil 8. Örnek onarım ağı



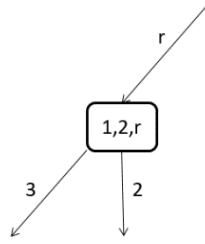
Bileşen 1’de karşılaşılan arızayı temsil etmektedir

Şekil 9. Kaynak düğümü



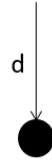
Bileşen 1’in 2 numaralı onarım tesisinde alacağı kararı temsil etmektedir. “r” onarım kararını, “d” hurda kararını ve “m” bir üst kademeye sevk kararını temsil etmektedir.)

Şekil 10. Karar düğümü



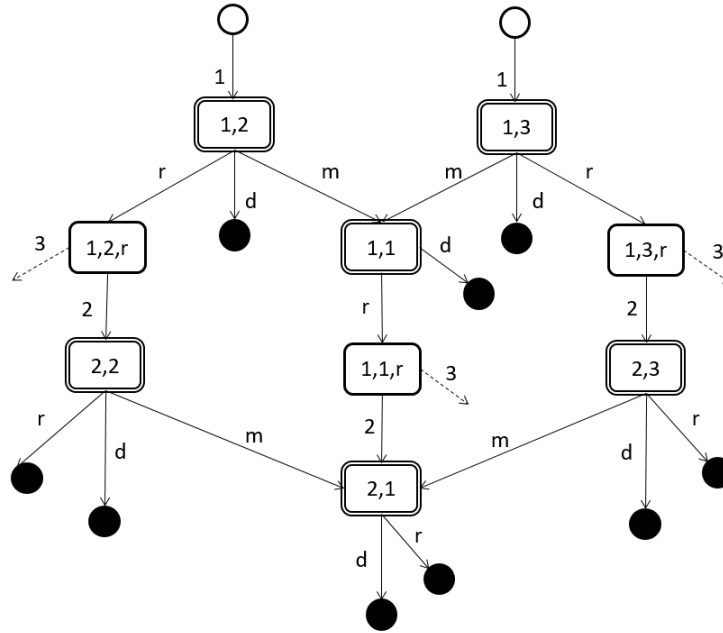
Bileşen 1'in 2 numaralı onarım tesisinde onarım kararına ilişkin gösterimdir. 3 ve 2 sırasıyla 1 numaralı bileşenin alt bileşenlerini temsil etmektedir.

Şekil 11. Dönüşüm düğümü



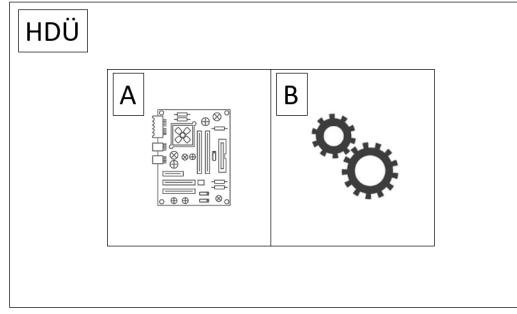
Bileşenin hurdaya ayrıldığını temsil etmektedir

Şekil 12. Bitiş düğümü



Şekil 13. Ağ yapısı

Basten ve diğ. (2011a)'nin çalışmasında ele alınan asimetrik onarım ağında yer alan tesisler bir üst onarım kademesinde sadece tek bir yukarı akış seçeneğine sahiptirler ve bir üst kademeye sevk edilmesi ihtiyacı doğduğunda arızalı bileşenler sadece bağlı oldukları bu üst kademedeki tesise sevk edilebilmektedir. Ancak, bu özellik gerçek hayatta karşılaşılan problemlere çözüm getirmesi açısından yetersiz kalmaktadır. Gerçek hayatta onarım tesisleri, yatırım maliyetlerinin yüksek olması, fiziki alan yetersizliği, personel sayısının ve niteliğinin yetersiz olması gibi kısıtlardan dolayı belirli konularda uzmanlık geliştirmek durumunda kalırlar. Örnek vermek gerekirse; doğası gereği bir silah sisteminde hem mekanik hem de elektronik parçalar bulunmaktadır. Sistemin bir HDÜ'sü içerisinde (A) DDÜ'sü elektronik bir ekipman, (B) DDÜ'sü de ile mekanik bir ekipman olsun.



Şekil 14. Örnek HDÜ

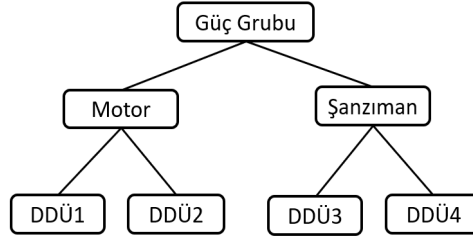
(A) elektronik ekipmanı ile (B) mekanik ekipmanının onarımı için farklı ham maddeye, farklı tezgahlara ve farklı iş gücü niteliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Zaman içerisinde kısıtlı kaynakların etkin bir şekilde kullanılması maksadıyla onarım aşında yer alan onarım tesislerinden (X) onarım tesisi elektronik ekipmanlar konusunda uzmanlaşırken, (Y) onarım tesisi mekanik konularda uzmanlaşmış olsun. Sevk maliyetlerinin yatırım maliyetlerine oranla çok düşük olduğu göz önüne alındığında arızalı parçaların uzmanlık alanlarına uygun tesislere sevk edilmesinin, yatırım maliyetlerini ve dolayısıyla onarım maliyetlerini azaltacağı ortadadır. Bu durumda (A) parçası elektronik ekipmanlar konusunda uzman olan (X) onarım tesisine sevk edilirken, (B) ekipmanı mekanik konularda uzman olan (Y) tesisine sevk edilecektir. Benzer bir durum Türk Silahlı Kuvvetleri'nde de yaşanmaktadır. Örneğin; füze sistemleri karşı saldırılardan korunmak için hareketli özelliğe sahip olmalıdırlar. Bu da füze sistemlerinin tekerlekli araçların üzerine monte edilmesini gerektirmektedirler. Sistemin bütününe dikkate aldığımızda sistemde yer alan atış kontrol sisteminin hassas bir elektronik kartı onarımı ile kamyon süspansiyon sisteminin onarımı farklı uzmanlıklar gerektirmektedir. Bu nedenle elektronik ekipmanlar farklı onarım tesislerine, mekanik parçalar ise farklı onarım tesislerine gönderilmektedir.

Bir diğer örnek de sahil güvenlik botlarından verilebilir. Sert hava şartlarının ve yasa dışı göçün nispeten düşük olduğu (ABC) bölgesinde çelik yapıli sahil güvenlik botları tercih edilmektedir. Hem hava ve deniz şartlarının nispeten daha iyi olduğu hem de yüksek oranda yasa dışı göçle mücadele edilen (DEF) bölgesinde ise fiber tekneler tercih edilmektedir. Bu durum çelik botların tercih edildiği (ABC) bölgesinde fiber, fiber botların tercih edildiği (DEF) bölgesinde çelik botların kullanılmadığı anlamına gelmemektedir. Sayıca az da olsa bu bölgelerde diğer sınıf botlar da kullanılır. Mesafe açısından değerlendirildiğinde bot sayıları ile orantılı olarak (ABC) bölgesinde yer alan onarım tesisinin çelik botlar üzerinde, (DEF) bölgesinde yer alan onarım tesisinin fiber botlar üzerinde uzmanlaşması; (ABC) bölgesinde bulunan fiber teknelerin (DEF) bölgesinde bulunan onarım tesisine, (DEF) bölgesinde yer alan çelik botların da (ABC) bölgesine sevk edilmesi daha maliyet etkin olabilir.

Basten ve diğ. (2011a)'nin kullanmış olduğu ağ yapısında yukarıda bahsedilen husus dikkate alınmamıştır. Gerekli yatırımların yapılması ile tüm onarım tesislerinin aynı kabiliyetlere sahip olabilecektir. Şekil 14'de verilen örnek üzerinden gidilecek olursa Basten ve diğ. (2011a)'nin önerdiği modele göre (A) ve (B) ekipmanı tek bir onarım tesisine gönderilebilmektedir. Ancak, sevk maliyetlerinin yatırım maliyetlerine oranla çok düşük olduğu göz önüne alındığında, arızalı parçaların uzmanlık alanlarına uygun tesislere sevk edilmesinin, yatırım maliyetlerini, onarım maliyetlerini ve dolayısıyla sistemlerin ömür devri maliyetlerini azaltacağı değerlendirilmektedir. Dolayısıyla yeni bir ağ yapısına ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Bu yeni ağ yapısının, arızalı bileşenlerin bir üst kademe seviyesinde farklı onarım tesislerine sevk edilebilme seçeneklerini sunabilmesi gerekir. Bu şekildeki yeni bir ağ yapısı modeli sonraki bölümde bir örnekle açıklanmaktadır.

3. Çoklu yukarı akışlı onarım ağı

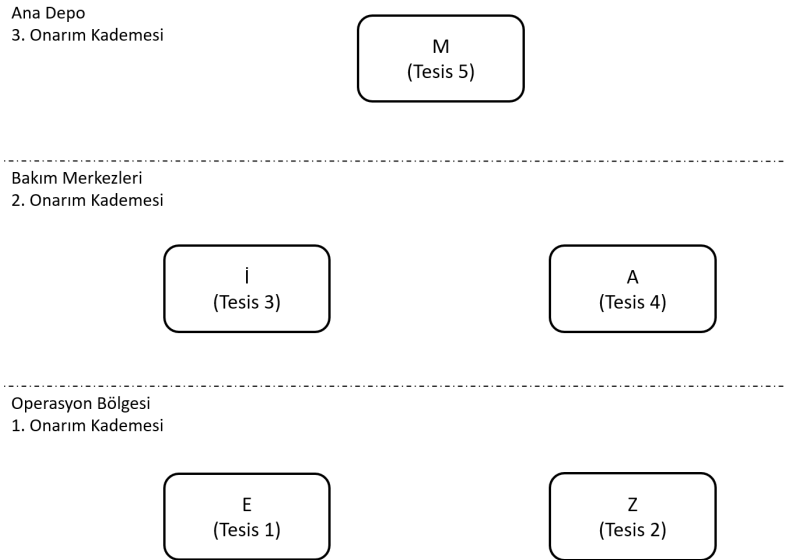
Farklı lokasyonlarda konuşlanmış olan zırhlı bir muhabere aracına ait güç grubu, motor ve şanzıman olmak üzere iki farklı HDÜ'den oluşan bir sistemi ele alalım. Her bir HDÜ ikişer adet DDÜ'den oluştuğunu ve güç grubuna ait ürün ağacının Şekil 15'de gösterildiği gibi olduğunu varsayalım.



Şekil 15. Güç grubu ürün ağacı

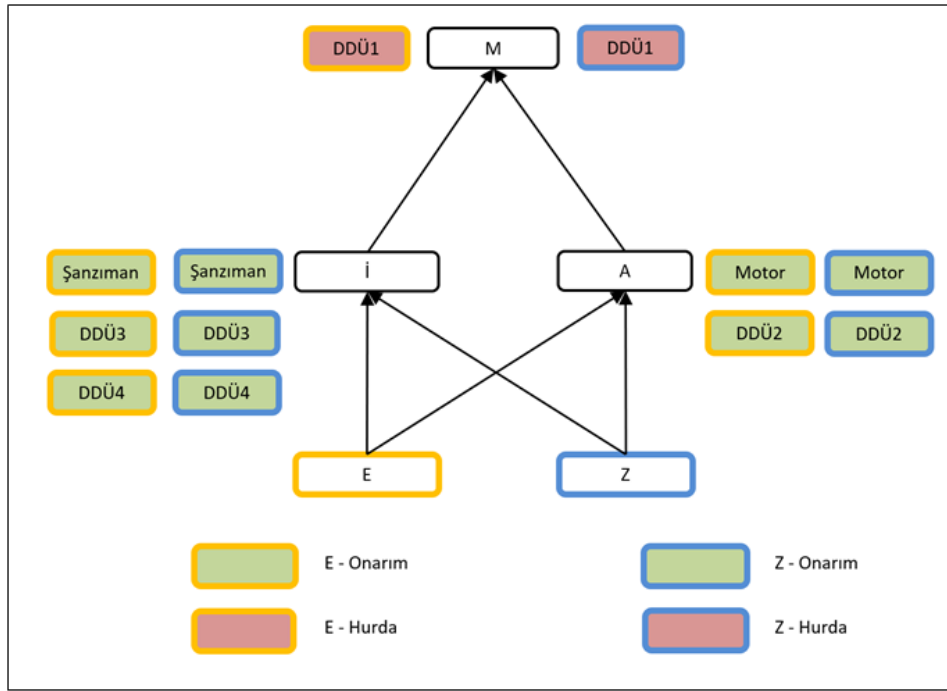
Söz konusu zırhlı araçlar (E) ve (Z) olmak üzere iki farklı şehirde konuşlanmış durumda olsun. Araçların bulunduğu tesislerde mevcut imkanlar dahilinde güç grubunun sökme takma işlemleri yapılabilir olsun.

Zırhlı araçların tabi olduğu onarım ağı üç kademededen oluşacaktır. Araçların konuşlu olduğu (E) ve (Z) bölgesindeki tesisler 1. Onarım Kademesini (Kullanıcı Seviyesi - Operator Level), (İ) ve (A) bölgesinde yer alan Bakım Merkezleri 2. Onarım Kademesini (Birlik Seviyesi - Intermediate Level) ve (M) bölgesinde yer alan Ana Bakım Merkezi 3. Onarım Kademesini (Depo Seviyesi - Depod Level) oluşturacaktır. Buna göre onarım ağının yapısı Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Örnek onarım ağı

Yapılan onarımlara ilişkin değişken ve sabit olmak üzere iki çeşit maliyet oluşacak ve bu maliyetler onarım kademelerine göre değişiklik gösterecektir. Buna göre Basten ve diğ.'nin (2011a) ağ yapısı kullanılarak oluşturulan tek yukarı akış seçenekli onarım ağı yapısı Şekil 17'de gösterilmiştir. Söz konusu gösterimde (E) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler sarı, (Z) bölgesinde konuşlu sisteme ait bileşenler ise mavi çerçeve ile işaretlenerek belirtilmiştir. Dolgu rengi olarak belirlenen yeşil ve kırmızı sırasıyla onarım ve hurda onarım seçeneklerini ifade etmektedir.



Şekil 18. Çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı modeli

İki farklı ağ yapısı örneği karşılaştırıldığında “tek yukarı akış seçenekli” onarım ağından farklı olarak bu çalışmada önerilen “çoklu yukarı akış seçenekli” onarım ağında (E) bölgesinde yer alan bileşenlerin (A) bölgesine, (Z) bölgesinde yer alan bileşenlerin (İ) bölgesine sevk edilebildiği görülmektedir.

Çalışmamızda önerilen “çoklu yukarı akış seçenekli” onarım ağı temel alınarak modellenecek onarım seviyesi analizi problemlerinin çözülebilmeleri için yeni matematiksel modellerin önerilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Önerilecek yeni matematiksel modellerden (çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı temel alınarak tanımlanmış) elde edilecek sonuçlarının Basten ve diğ.’nin (2011a) önerdiği modele (tekli yukarı akış seçenekli onarım ağı temel alınarak tanımlanmış) göre daha etkin sonuçlar sunması beklenmelidir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, “çoklu yukarı akış seçenekli” onarım ağının temel alındığı, onarım seviyesi analizlerinde kullanılmak üzere yeni matematiksel modellerin geliştirilmesi gelecek dönem çalışma konusu olarak önerilebilir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Sonuçlar

Yüksek maliyetlere karşılık gelmesi nedeniyle karmaşık ürün ağ yapısına sahip sistemlerin ömür devri maliyetleri kullanıcılar için büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, bir sistemin ömür devri boyunca maruz kalacağı maliyetler tasarım aşamasından itibaren değerlendirilmesi gereken önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında üstlendikleri sorumluluklar nedeniyle de bu tip sistemlerin en üst seviyede hazır bulunma oranına sahip olmaları büyük önem arz etmektedir.

Arızalı alt bileşenin onarılıp onarılmaması ile ilgili kararın verilmesi ve bu işlemlerin hangi onarım kademesinde yapılacağı sorularının cevabı onarım seviyesi analizi sonucunda ile verilebilir. Bu çalışma kapsamında verilen örnekte çoklu ürün kırılımına sahip bir sistem ve çoklu onarım kademe seviyesine sahip bir onarım ağı dikkate alınmıştır. Örnek problem kapsamında verilen sisteme ait onarım seviyesi analizi tekli ve çoklu yukarı akış seçenekli olmak üzere iki farklı yapıya sahip onarım ağı için ayrı ayrı gösterilmiştir. Verilen örnekten görüleceği gibi çoklu yukarı akış seçenekli onarım ağı dikkate alındığında onarım kararları daha gerçekçi bir şekilde verilebilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde ömür devri süresince katlanılacak maliyetlerin de daha düşük olması beklenmektedir. Dolayısıyla onarım seviyesi analizine ilişkin önerilecek modellerin çoklu yukarı akış seçeneğini dikkate alacak şekilde kurgulanmasının ömür devri maliyetlerinin en küçüklenmesi açısından büyük katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

İlerleyen dönemki çalışmalarda çoklu yukarı akış seçenekli matematiksel modeller geliştirilip farklı örnekler üzerinde uygulanarak Basten ve diğ.’nin (2011a) önerdiği tek yönlü yukarı akış seçenekli modelin çözümü ile

karşılaştırılabilir. Yazarlar, çoklu yukarı akış seçenekli matematiksel modellerin gerçek hayat problemleri için daha kullanışlı çözümler üretebileceğini değerlendirmektedirler.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; İsmail Bıçakçı, problemin ortaya konması, literatür taraması ve makalenin oluşturulmasında, Yusuf Tansel İç, Esra Karasakal ve Berna Dengiz ise kavramsal çerçevenin oluşturulması, makalenin sunumu ve makale yazım kontrolünün yapılarak düzenlenmesinde katkı sağlamışlardır.

Teşekkür

Makalenin daha iyi bir hale gelmesine katkı sunan hakemlere teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

ALP-10 - NATO Guidance on Integrated Logistics Support for Multinational Armament Programmes (2011). NATO Standardization Agency (NSA).

Barros L. L. (1998). The optimization of repair decisions using life-cycle cost parameters, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry* 9, 403–413. doi:<https://doi.org/10.1093/imaman/9.4.403>

Barros, L., Riley, M. (2001). A combinatorial approach to level of repair analysis, *European Journal of Operational Research* 129, 242–251. doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00221-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00221-6)

Basten, R. (2010). *Designing logistics support systems - Level of repair analysis and spare parts inventories* (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://research.utwente.nl/en/publications/designing-logistics-support-systems-level-of-repair-analysis-and->

Basten, R.J.I., Schutten, J.M.J & Van der Heijden, M.C. (2009). An efficient model formulation for level of repair analysis, *Annals of Operations Research* 172, 119–142. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0516-5>

Basten, R.J.I., Van der Heijden, M.C. & Schutten, J.M.J. (2011a). A minimum cost flow model for level of repair analysis. *International Journal of Production Economics* 133 (1), 233–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.03.025>

Basten, R.J.I., Van der Heijden, M.C. & Schutten, J.M.J. (2011b). Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research* 211, 333-342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.015>

Berkowitz, G. D., Gupta, J. N., Simpson, J. T. & McWilliams, J. B. (2005). Defining and implementing performance based logistics in government. *Defence Acquisition Review Journal*, 255-267. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/235158342_Defining_and_Implementing_Performance-Based_Logistics_in_Government

Blanchard, B. S. & Fabrycky, W. J. (1998). *Systems Engineering and Analysis. Third edition.* United States: Prentice Hall.

Bouachera,, T., Kishk, M. & Power, L. (2010). Level of Repair Analysis based on Genetic Algorithm with Tabu Search. *World Congress on Engineering*, London, U.K.

Brick, E. S. & Uchoa, E. (2009). A facility location and installation or resources model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research, Issue 192(2)*, 479–486. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.043>

DEF STAN 00-60 (Part 0) Application of Integrated Logistics Support (2002). Ministry of Defence – United Kingdom. Erişim adresi: <ftp://ftp.iks-jena.de/pub/mitarb/lutz/standards/dstan/00/060/00000500.pdf>

Ferrin, B. G. & Plank, R. E. (2002). Total cost of ownership models: An exploratory study. *Journal of Supply Chain Management*, 18-29. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00132.x>

Gutin, G., Rafiey, A., Yeo, A. & Tso, M. (2006). Level of repair analysis and minimum cost homomorphisms of graphs. *Discrete Applied Mathematics 154*, 881–889. doi: https://doi.org/10.1007/11496199_46

JSP 886 - Defence Logistics Support Chain Manual - Volume 7 Supportability Engineering (2014). United Kingdom Ministry of Defence.

Koudal, P. (2006). The Service Revolution in Global Manufacturing Industries. Deloitte Services LP. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/267268075_The_Service_Revolution_in_Global_Manufacturing_Industries

MIL-HDBK-1390 Level of Repair Analysis (2015). Department of Defence - United States of America. Erişim adresi: http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-1300-1499/MIL-HDBK-1390_52260/

MIL-STD-1388-1A Logistics Support Analysis (1983). Department of Defence - United States of America. Erişim adresi: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1300-1399/MIL_STD_1388_1A_552/

Murthy, D. N. P., Murthy, D. N. P., Solem, O. & Roren, T. (2004). Product warranty logistics: Issues and challenges. *European Journal of Operational Research, 156(1)*, 110-126.
doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00912-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00912-8)

Oliva, R. & Kallenberg, R. (2003). Managing the transition from products to services. *International Journal of Service Industry Management*, 160–172. doi: <https://doi.org/10.1108/09564230310474138>

S3000L - International Procedure Specification for Logistics Support Analysis (2014). AeroSpace and Defense Industries Association of Europe. Erişim adresi: <https://www.s3000l.org/>

S4000P - International Specification for Developing and Continuously Improving Preventive Maintenance (2018). AeroSpace and Defense Industries Association of Europe.

Erişim adresi: http://www.s4000p.org/docs/S4000P_Issue_2.0.pdf

Saranga, H. & Dinesh Kumar, U. (2006). Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms - Level of repair. *Annals of Operations Research*, 91-106. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-006-7374-1>

Shields, M. D. & Young, S. M. (1991). Managing product life cycle costs: an organizational model. *Journal of cost management*, 39-52. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/313724559_Managing_product_life_cycle_costs_an_organizational_model