

# Elyaf Takviyeli Polimer Tamir Tasarımının Sistemik Tasarım Yöntemi ile Belirlenmesi

*Bu çalışmada kompozit tamir tasarımına Pahl & Beitz sistemik tasarım yaklaşımı ile karar verilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda kompozit tamir tasarımı için gerekli olan tesis kabiliyetleri, maliyet, malzemeye erişim gibi mühendislik dışı kriterler ile dayanım, sağlamlık gibi mühendislik kriterleri birlikte ele alınmaktadır. En yaygın malzemelerden biri olan elyaf takviyeli polimerlerin tamir tasarımı için ihtiyaç listesi, fonksiyon yapısı ve alt fonksiyonları oluşturulmuş ve çözüm varyantları elde edilmiştir. Çözüm varyantları için karar ağacı, değerlendirme çizelgesi ve değer profil diyagramı oluşturulması ile de optimum tasarım belirlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Kompozit, Tamir Tasarımı, Tasarım Metodolojisi, Pahl ve Beitz, Sistemik Tasarım*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 12.04.2022

Kabul: 04.11.2022

\*Sorumlu Yazar: Öznur Bayraktar Erbudak

Email: [oznurbayraktar@gmail.com](mailto:oznurbayraktar@gmail.com)

DOI: 10.56193/matim.1102561

*Atıf şekli/How to cite: Erbudak Ö.B., Erden O., Elyaf Takviyeli Polimer Tamir Tasarımının Sistemik Tasarım Yöntemi ile Belirlenmesi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2022; 20(2): 86-98.*

## GİRİŞ

Kompozit kelime olarak, iki veya daha fazla malzemeden oluşan yapıları ifade etmektedir. Kompozit malzemeler özet olarak ‘makro ölçüde birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenin bir ara yüzey boyunca bir araya gelmesiyle oluşan malzemeler’ olarak tanımlanmaktadır [1].

Yapılan birçok çalışmada elyaf ile termoset reçinelerin uyumlu olmasından dolayı elyaf takviyeli polimerler yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yer almıştır [2]. Elyaf (Fiber) Takviyeli Polimer (FRP) malzemeler, havacılıkta başlarda yapısal olmayan parçalarda kullanılsa da günümüzde uçuş kritik parçalarda da kullanılmaktadır [3]. Yapısal olmayan parçalarda kullanılmasına örnek olarak 1960’larda alüminyum yerine kompozit kapaklar, kumanda yüzeyleri ve uçuk kontrol parçaları gibi yapılar verilebilir [4]. Uçuş kritik yapılarda kullanımı ise özellikle Boeing 787 yolcu uçağının gövde, kanat ve kaplıların tasarımıyla olmuştur [5].

Kompozit malzemelerin yüksek mukavemete sahip olma, kolay şekillenebilme, yorulma ve korozyona karşı dayanıklı olma gibi avantajları olsa

da imalat ve kullanım sırasında hataların oluşmasına yatkın olmaları dezavantajdır [6]. Kompozit malzemelerde yapışmama, katman yön hataları, buruşma, gözenek, takım izleri gibi Tablo 1’deki hatalar karşılaşılabilmektedir [7]. Bu hatalar mukavemetin düşmesine neden olabilmektedir. Mukavemeti tekrar arttırmak için de hatalı yapıların yenisiyle değiştirilmesi veya yapının tamir edilmesi gerekmektedir [8]. Tablo 2’de sık karşılaşılan hata tipleri için uygulanabilen tamir tasarım örneklerine yer verilmiştir.

Tamir tasarımı sırasında yapısal olan ve olmayan kısıtlar dikkat edilmesi gereken unsurlar arasındadır [9].

Sistemik tamir tasarım yaklaşımı ile üretim tesisinde gelişen teknolojiler ve iyileşen yöntemlerin ile yeniden değerlendirilebilir olması açısından fayda sağlayabilir. Tamir tasarımı gerçekleştiren tesis içerisinde yeni teknolojilerin gelmesi ile daha dayanıklı ve maliyet açısından daha etkili tamir teknolojileri sistemik bir yaklaşımla daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

Nam Pyo Suh tarafından geliştirilen ve matris tabanlı bir sistematik tasarım yöntemi olan aksiyomatik tasarım Elham Fouladi ve Ali Abedian tarafından incelenmiştir [10]. Aksiyomatik tasarım yöntemi ile fonksiyon ile tasarım parametreleri arasında bir matris kurgulanarak tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bunun dışında Doung ve Wang iterasyon tekniği ile tasarım seçimine yönelmiştir, bu yöntemi kullanılırken hasar, takviye yapı ve yapıştırıcı tanımlandıktan sonra malzeme seçiminde iterasyon yararlanılmıştır [11].

Marioli-riga ve Gdoutos ise kompozit tamirini adım adım analiz ederek ilerlemişlerdir. Bu süreci hasarın muayenesi, malzeme seçimi, yük analizi ve tamirin tasarımını, yüzey hazırlamasını, doğrulama testlerini ve uçuşa elverişliliğini içermektedir [12].

Pahl ve Beitz sistematik tasarım yaklaşımı ile tasarım adımlarının modellenmesi, tasarım şartnamesinden başlayarak alt fonksiyonları karşılayan en uygun çözüm prensiplerini bulmaya kadar geçen süreci kapsayan bilgisayar destekli ve web tabanlı bir kavramsal tasarım sistemine bir alt yapı geliştirilebilmektedir [13]. Sistematik bir tasarım yaklaşımı olarak tekstil tasarımında kullanılma durumu incelenerek ve sistematik tasarım adımların kullanılmasıyla bir tekstil ürün koleksiyonu bile oluşturulabilmektedir [14].

## KOMPOZİT TAMİR TASARIMI

Yapılarda bir hata tespit edildiğinde öncelikle hatanın çeşidi, boyutları, etkilediği alanın belirlenmesi gerekmektedir. Alanın belirlenmesi elyaf malzemelerden oluşan katmanlı yapıda etkilenen katman sayısı, konumu, yapışmanın durumunu tespit edilmesini kapsamaktadır. Yapı yüzeyinde veya içerisinde herhangi bir hasara oluşturmadan, mevcut hasarın tanımlanması ve karakterinin belirlenmesi için tahribatsız muayene yapılabilmektedir. Kompozit malzemeler için tahribatsız muayene yöntemleri gözle muayene, vuruş (tap) ile muayene, ultrasonik muayene, termografik muayene, radyografik test, elektromanyetik test, akustik emisyon ve shearografi muayenesi olarak çeşitlendirilebilir [15]. Hasarın tespit ile kompozit tamir tasarımını belli kriterler çerçevesinde gerçekleştirilebilir.

### Kompozit Tamir Tasarım Kriterleri

Tamir tasarımındaki temel hedeflerinden biri hatalı yapıya ait bütünlüğün korunmasıdır. Mühendislik açısından da tamir tasarımının uçak yapısı üzerinde idame edilebilir olması için belli kriterleri sağlaması gerekmektedir. Statik dayanım ve

kararlılık, tamirin dayanıklılığı, sağlamlık, ağırlık ve denge, operasyon sıcaklığı, çevresel etkiler, maliyet ve takvim gibi kriterler mühendislik açısından tamir tasarımını belirleyen ana unsurlardır [16]. Tamir tasarımı için statik dayanım sağlanmalı, yapı kararlılığı korumalı, yolulma ömrünü sağlamalı ve mevcut fonksiyonunu devam ettirebilmelidir. Ek olarak tamir sırasında gerekli ise aerodinamik yüzey değişimi, ağırlık ve yük aktarım değişiklikleri en az seviye tutulmalıdır [17].

Tablo 1. Kompozit İmalat Süreçleri ve Sık Rastlanan Hata Tipleri

Süreç	Hasar Tipi
Katman (kumaş) serimi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yabancı cisimler</li> <li>• Katman hataları</li> <li>• Hatalı katman konumu</li> <li>• Buruşma/katlanma</li> <li>• Serim esnasında kirlenmeler</li> </ul>
Yapıştırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boşluk/Gözenek</li> <li>• Katmanların ayrılması</li> <li>• Yüzeyde gözenek/boşluk</li> <li>• Takım izleri</li> <li>• Yanlış elyaf oranları</li> <li>• Matris mikro çatlakları</li> <li>• Çarpılma/geri yaylanma</li> <li>• Az-çok pişen parçalar</li> </ul>
Pişirme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yapıştırıcının iyi yapışmaması</li> <li>• Yabancı cisimler</li> <li>• Fazla- az pişmiş yapıştırıcı</li> <li>• Çok ince- kalın yapışma hattı</li> </ul>
İşleme ve montaj	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katmanların ayrılması</li> <li>• Yüzey hasarları (çizik, göçük vs.)</li> </ul>
Kullanım	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katman ayrılması</li> <li>• Nem- sıcaklık değişimleri</li> <li>• Yıldırım çarpması</li> <li>• Isıl hasarlar</li> <li>• Su buharı basıncı ayrılmaları</li> </ul>

Tamir tasarımında hasarın tespit edilmesi, tamir tasarımı, malzeme seçimi, süreçler, kalite yönetimi, uçak üzerinde uygulanması, tahribatsız muayene gibi gereksinimleri mühendislik olarak hesaba katılmalıdır [18]. Kompozit tamir tasarımında mühendislik açısından gereksinimler olsa da tasarımın uygulanabilirliği için tesis kabiliyetlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir [19].

### Kompozit Tamir Tasarımına Ait Genel Kavramlar

Bağlantı biçimine göre yapıştırma ile ve bağlantı elemanı ile yama uygulaması yapısal tamir tasarımlarıdır. Bu yazı kapsamında bağlantı elemanı ile yapılan tamirler, reçine enjekte edilmesi gibi yapısal olmayan tamirler ve bakımda izin verilebilir limitler içerisindeki geçici tamirler gibi değerlendirmeye alınmayacaktır. Güçlendirici ile

yapılan yapıştırma bağlantı tamirleri açılı, kademeli eklemeler ve pişirilmiş tabaka eklemeli tamirler olarak ele alınmaktadır. Yapıştırma ile kompozit tamir tasarımı hasarın tespit edilmesi, tamir tasarımı, malzeme seçimi ve uygulanması, pişirme yöntemi ve tamirin kalite kontrol adımlarını kapsayan bir süreçtir.

Tablo 2. Hata Tipleri ve Tamir Uygulama Örnekleri

Hata Tipi	Reçine enjekte etme	Zımparalama ve su geçirmezlik sağlama	Kademeli malzeme kaldırma ve katman yerleştirme	Açılı malzeme kaldırma ve katman yerleştirme	Kabul edilemez	Kabul edilebilir
Kabarcık						
Zengin reçine						
Geçişli reçine						
Yetersiz reçine						
Kirli/yapışkanlı bölge						
Kırıksıklık						
Çizikler						
Çatlak						
Kopma						
Katman ayrılması						
Gözenek						
Yabancı cisim hasarı						
Boyutsal sapmalar						

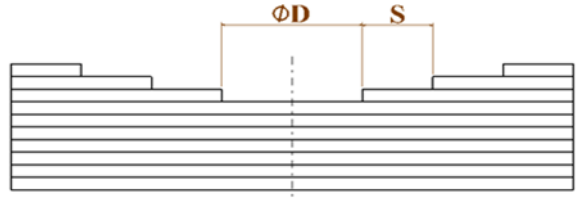
Bağlantı elemanı ile tamirler ise içeriden veya dışarıdan tek bir veya iki yamanın hasarlı yapıya bağlantı elemanı ile bağlanarak tamir edilmesini kapsamaktadır. Tekli veya çiftli taraflı bağlantılar olabilmektedir, her bağlantı şeklinde de kesme yükleri bağlayıcılar ve yama ile aktarılmaktadır. [20]

### Kompozit Yapıların Yapıştırma Tamir Tasarımları

Bu yazı kapsamında değerlendirilen yapıştırma tamirleri; yapı ile yapıştırıcı malzeme kullanılarak kesme kuvvetinin yamaya geçişini sağlayan bir yöntemdir. Açılı veya kademeli olarak iki farklı yama eklemeler yöntemi mevcuttur. Ana yapıya ile aralarında yapıştırıcı uygulanarak katmanların serilmesini içermektedir. Bunlara ek olarak bir diğer yöntem ise daha önceden pişirilmiş takviye yamanın ikincil pişirme yöntemi ile ana yapıya yapıştırılması işlemidir [20].

Kademeli (step) yöntem; kademeli geçiş için her bir katman sayısı için adım aralığı açılarak, merdiven şeklinde bir yapıyla hasarın giderilmesi gerekmektedir. Geometrik kısıtlamaların olduğu

bölgelerde kademeli geçiş uygulamasını engelleyebilmektedir. Açılı geçiş daha esnek olduğundan tercih edilebilmektedir.

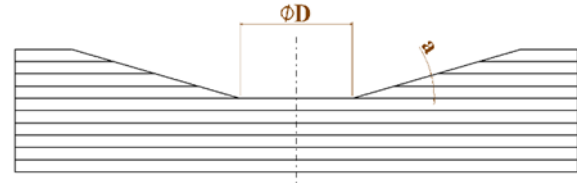


S: Kademe (adım) uzunluğu  
D: Hasarı temizleyen en küçük çap değeri

Şekil 1. Kademeli geçiş ile tamir uygulaması

Açılı (Tapered/Scarf) yöntem ise hasarlı alanın etrafında belli bir eğim değeri kullanarak geçiş sağlanarak tamir edilmesini içermektedir. Kalınlığının belli bir katındaki bir çapta açılı bir şekilde malzeme çıkaracağını göstermektedir. Eğim hesaplanırken hasar sınırından başlayarak eğim hesabı yapılmalıdır.

Açılı yapıştırma ile tamir uygulaması, kompozit yapılarda kullanılan standart prosedürlerden biridir. Hasarlı bölge etrafının bir çember etrafında devam eden bir açı ile malzeme kaldırılmasını içeren bir uygulamadır. Yapının bölgesel kalınlığına göre 1:20 ile 1:60 değer aralığında açı (a değeri) kullanılmaktadır [21].



Şekil 2. Açılı geçiş ile tamir uygulaması

Bir diğer uygulama olan pişirilmiş plaka ile yapıştırma daha önceden pişirilmiş elyaf takviyeli malzemenin yapıştırıcı film ile yapı üzerine sadece yapıştırıcının pişirme sıcaklığına göre pişirme süresi döngüsü ile uygulanması işlemi içermektedir. Pişirilmiş plaka halindeki yamalar ana yapının fiber hacim oranı veya hacim gibi değerlerine sahip olması zorunda değildir. Açılı olarak pişirilip direkt tamir bölgesi üzerine uygulanabileceği gibi, açılı olarak çıkarılan bölgenin formuna uygun olarak şekil verilip uygulanabilmektedir.

### Genel Malzeme Kavramları ile Islak ve Sıcak Serim Tanımları

Kuru elyaf malzemeler, tamir işleminden önce reçine emdirilerek kullanılan malzemelerdir. Kompozit malzeme reçine eşit bir şekilde yayılması

ve hava boşluklarının çıkarılması için haddelenir. Reçinenin fazlası bu şekilde alındıktan sonra tamir bölgesi üzerine yerleştirilmektedir. Prosesin gerçekleşeceği sıcaklık ve süre kullanılacak reçineye bağlıdır [22].

Tablo 3. Yapıştırma Tamir Uygulamalarının Avantajları ve Dezavantajları

Tamir Yöntemi	Avantajları	Dezavantajları
Kademeli	<ul style="list-style-type: none"> <li>Farklı kalınlık ekleme</li> <li>Katmanların birbiriyle örtüşmesi sayesinde daha düzgün ve güçlü yük akışı sağlaması</li> <li>Temiz yüzeyde iyi yapışması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çok uğraştırıcı ve zor bir uygulama olması</li> </ul>
Açılı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Farklı kalınlık ekleme</li> <li>Katmanların birbiriyle örtüşmesi sayesinde daha düzgün ve güçlü yük akışı sağlaması</li> <li>Temiz yüzeyde iyi yapışması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zamana ihtiyaç duyması</li> <li>Yüksek kabiliyet ihtiyacı</li> </ul>
Pişirilmiş Plaka	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çabuk ve yalın bir şekilde uygulanması</li> <li>En az seviyede hazırlanma ihtiyacı olması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kalınlık ve ağırlık eklenmesi</li> <li>Özellikle belli bir kalitede yüzey hazırlanma ihtiyacının olması</li> </ul>

Islak serim yöntemi yaygın bir yöntem olsa da çalışma alanı dışında katmanların reçine emdirilmesi için hazırlanması gerekmektedir. Bu nedenler de yapışma kalitede gözenek ve boşluk gibi farklı hatalar oluşabilir. Uygulayıcının kabiliyetine önemli olabilmektedir. Sonuç olarak sıklıkla problemlerle karşılaşılabilir [23].

Matris ile takviye malzemenin bir arada olduğu ve üretim için hazır formda olan ürüne reçine emdirilmiş elyaflar (prepreg) denilmektedir. Doğrusal veya çapraz örülmüş elyafa reçinenin emdirilmesi ve reçinenin belli bir sıcaklıkta kısmi olarak pişirilmiş formunu içermektedir. Prepreg (Genel B seviye reçine) malzemeler belli bir elyaf hacim oranı, katman kalınlığı ve kısmi pişme derecesine sahiptir. Malzeme rulolar halinde farklı genişlikte imal edilip, soyulabilir kağıtlar prepreg ile desteklenmiş şekildedir. Genel olarak ağırlığın %32-42'si oluşturan reçineyi oluşturan yapışkanlığı, şekil alabilirliği, raf ömrü, jel zamanı ve dış zaman kullanımı gereksinimleri belirlenmektedir [18]. Daha hassas bir yöntem olmakla birlikte vakum torbalama ve basınç gerektiren otoklavda pişirme döngüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek sıcaklıklar içeren bu uygulamalara genel olarak sıcak serim (hot lay up) denilmektedir.

Prepreg kullanarak açılı tamir kompozit yapılarla kullanılan tipik bir tamirdir, hasarlı

bölgenin açılıp uygun formda pişmemiş prepreglerden kesilerek, vakum altında ısı uygulanarak pişirmeyi kolaylaştırabilir. Ancak bu yöntem tamir alanının hazırlanması, tamir yamasının hazırlanması, ısıtılması ve pişirilmesi uzun zaman alabilmektedir [23].

### Kompozit Tamirlerin Uygulamalarının Pişirilmesi İçin Gerekli Ekipmanlar/Cihazlar

Kuru veya reçine emdirilen elyafın serimden sonra ve yapıştırıcı ile plakanın yerleştirilmesinden sonra pişirilmesi için kullanılacak olan reçineye uygun olarak belli bir sıcaklık ve zamana ihtiyaç vardır. Bu da portatif olarak kullanılan bilgisayar kontrollü battaniye, lamba gibi ısıtıcılar veya fırın, otoklav gibi sabit cihazlardır. Uçak üzerinde tamir için kullanılan ısıtma yöntemleri elektrikli ısı battanileri, kızılötesi ısı lambaları (IR-infrared lambalar) ve sıcak hava cihazlarıdır. Uçaktan sökülerek pişirme yapabilmek için kullanılan cihaz fırın veya otoklavdır.

IR lamba veya fan ile pişirmede vakum torbalamaya gerek duyulmayan düşük pişme sıcaklıklarında kullanılır. 65°C sıcaklıkların üzerinde ve 1250 mm<sup>2</sup> alanı geçen tamirlerde çok etkili değildir. Bilgisayar kontrollü ısı battaniesi, iki silikon katman arasında metal bir rezistans ısıtıcının yer aldığı esnek bir ısıtıcıdır. Tamir bölgesinden geri dönüşler olarak ısıtmayı otomatik kontrol eden taşınabilir bir cihazdır. Ayrıca vakum torbası içerisinde vakum sağlayan ve görüntülenebilen destek vakum pompaları mevcuttur. Pişme döngüsü tamir alanının yanına yerleştirilen ısı sensörleri (thermocouple) ile kontrol edilmektedir [15].

Kompozit malzemeler farklı basınç uygulamaları ile pişirilebilmektedir. Fırın ise vakum torbası içerisinde sadece atmosferik koşullarındaki basınçla yüksek sıcaklık koşullarında pişirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Tipik fırınlar 120°C-176°C'a kadar işlem görebilmektedir [4]. Otoklav, içerisinde basıncın da mevcut olduğu fırınlardır. Otoklavlar 120°C sıcaklık ve 275 kPa basınçtan, 760°C sıcaklık ve 69,000 kPa basınç değerine kadar aralıkları malzeme ve süreçleri gerçekleştirilebilmektedir.

Yığın halinde kalıp üzerine serilen reçine emdirilmiş elyaflar, ayırıcı film, hava alan malzeme ve vakum torbası ile çevrelenmektedir. Tüm parça vakum ile çekilip ve bütün haliyle otoklav içerisine yerleştirilmektedir. Katmanlar arasında sıkışıp kalan bütün hava kabarcıkları vakum yoluyla uzaklaştırılırken parça bir yandan pişirilmektedir. Özellikle havacılık sanayisinde yaygın olan hassas bir şekilde kontrol sağlayan ve uzun ve yavaş bir pişme döngüsüne sahip bir yöntemdir. Bu hassas kontrol

sayesinde sağlamlık ve emniyet gerektiren yapıların geometrik formundan emin olunabilmektedir. Yavaş olması ve işçilik gerektiğinden dolayı maliyetli bir yöntemdir [4].

Özellikle Boeing 787 gövdesinde olduğu gibi büyük kompozit yapılar, ticari otoklav boyutlarına göre ufak parçalara ayrılamamaktadır. Ayrıca birçok endüstri sektöründe otoklav erişimi bulunmamaktadır. Bu yüzden uçak üzerinde direkt uygulanabilen yüksek kalite ve düşük gözenekli yapıda otoklav dışındaki imalat kabiliyetlerinin tamirlerin arttırılmasına gerek duyulmaktadır [24].

### **Kompozit Tamirlerin Uygulamalarında Yüzey Hazırlanması**

Kompozit malzemelerde yapışma yüzeyinin kalitesini arttırmak için yüzeyin çeşitli kimyasal, mekanik veya enerji yöntemleri kullanılır. Genel olarak uygulamalarda mekanik ve kimyasal uygulama birlikte kullanılır. Aşındırma, zımparalama veya kumlama olarak uygulanan mekanik yöntemler genellikle yapışma birleşmesine yüzey kaplamasının uzaklaştırılması ve yüzeyin pürüzleşmesini içermektedir. Bu işlem herhangi bir elyafa hasar vermeden yapılmalıdır [25]. Plazma ve lazer ile yüzey hazırlama yöntemi de kompozit malzemelerde en çok kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntemlerin en önemli avantajı yapıdan malzeme uzaklaştırmadığından dolayı tamir sırasında hasar oluşturma ihtimali düşüktür. Ancak bu yöntemlerin tesiste uygulanabilmesi için yatırım gerekli olup, maliyeti arttıracak işlemler arasındadır.

### **Kompozit Tamirlerin Uygulamalarında Gelişen Otomasyon Süreçleri**

Otomatik açma yöntemi kullanılarak işlem sırasındaki insan faktörü büyük oranda azaltılabilir. Manuel zımparalamanın yerini numerik kontrollü işlemenin alması için temel gereksinim yüzey konturu ve kalınlık dağılımı gibi bölgesel geometri bilgileri gerekebilir. 3D açılımın mobilize hali henüz yer almamaktadır. Makinenin işleme hızının 1200 mm/dakika olduğunu varsayıldığında, 1:20 ve 3 mm katman kalınlığı olan yerlerde standart bir açılı tamir 40 dakika içerisinde işlenebilmektedir [21].

FRP'lerin katman olarak serilmesinin gerçekleştirildiği diğer işlem bir eklemeli imalat yöntemidir. Güçlendirilen fiberler istenilen kalınlıkta ve matris malzemeler ile yığın halinde serilir, genel olarak termoset olarak epoksi reçineler dikkatli bir şekilde gevrek ama sağlam yapışmanın olduğundan dikkatli uygulanmalıdır. Elle serim zor ve otomatik serime göre çok uzun zaman alabilmektedir. AFP otomatik serim uygulaması, otomatik tape serimi yerleştiren baskı genel olarak geniş alanlar için uygun

olabilir. 300 mm çapının altındaki hızlı ufak ölçekli tamirler için uygun değildir. Uygulama için 3D yazıcı özellikli cihaza ihtiyaç duyabilmektedir. Uygulama açısından cihazın özelliğine göre ıslak serim veya prepreg serim uygulaması yapılabilir. Otomatik serim ile uygulanan tamirler eşit kalınlık dağılımı gösterirken, elle serimde kalınlık eşit olmayıp otomatik serime göre daha kalın olabilmektedir. Kopma dayanımları, çekme testine göre kıyaslandığında çok yakın değerler elde edilebilmektedir [26].

### **SİSTEMATİK TASARIM YAKLAŞIMI İLE KOMPOZİT TAMİR TASARIMININ BELİRLENMESİ**

Sistematik bakımdan, belirlenen hedeflerin kısmen çelişen kısıtlar göz önünde bulundurularak tasarımın en iyi seviyeye getirilmesidir. Gereksinimler zaman içerisinde değişebilir ve eş zamanlı olarak çözümler iyileştirilebilir [27].

Sistematik tasarım, tasarımı ve üretim süreçlerini mantık tabanına oturtmada etkili bir yol sağlar. Orijinal tasarımdaki sıralı ve adimli yaklaşımlar giriş aşamasının kısmi bir seviyesi olsa da tekrar kullanılabilen çözümler sağlayabilecektir. Problemi yapılandırma öncelikli çözümlerin saptama ve tasarım kataloglarını kullanılması ile uygulanabilir olasılıkları anlamayı kolaylaştırabilmektedir. Daha az enerji sarf edilerek tasarımın erken aşamalarda tasarımın iyileştirmesini sağlar ve tespit edilen çözüm prensiplerinin seçimi mümkün kılabilir [27].

Pahl ve Beitz (2007) sistematik tasarım yaklaşımı dört aşamayı içerir. Bunlar görevin belirlenmesi (İhtiyaç listesi hazırlama, kavramsal tasarım, şekillendirme tasarımı ve ayrıntılı tasarımıdır [27].

### **İhtiyaçlar Listesinin Hazırlanması**

Sistematik tasarımını yaklaşımı kullanarak gerçekleştirilirken tasarım kriterlerini kapsayan bir ihtiyaç listesi hazırlanması gerekmektedir. Tamir tasarım için mühendislik açısından teknik şartnamede statik dayanım ve kararlılık, tamirin dayanıklılığı, sağlamlık gereksinimleri, aerodinamik yüzey gerekliliği, ağırlık ve denge, operasyon sıcaklıkları, çevresel etkiler, takılı uçak sistemlerine uyumu, maliyet ve takvimden özelliklerini belirleyen teknik bir şartname hazırlanması gerekmektedir. İhtiyaçlar (İ) kısaltması ile gösterilirken, istenilen ve değişken olabilecek özellikler (A) harfi ile kısaltılmıştır. Buna göre Tablo 4'te gibi kompozit tamir tasarımı için genel bir teknik şartname hazırlanmıştır.

İhtiyaç listesi hazırlanması, tasarım görevine netlik kazandırarak ilgili sorunlara odaklanmaya yardımcı olacak ve gerekli bilgi düzeyini büyük

ölçüde arttıracaktır. İhtiyaç listesinin hazırlanması sonraki aşamalar için belirleyici olacaktır. Problemin kaynağını doğrulamaya ve ihtiyaçları tarafsız bir şekilde önem sırasına göre ihtiyaç listesini oluşturmaya dikkat edilmelidir. Fonksiyonel ilişkilerde temel kısıtlamalar ve temel koşullar belirlenmelidir. Belirlenen kısıtlamalar sorgulanmalı ve müşteri isteklerine göre uygunluğu kontrol edilmelidir [27].

### Fonksiyon Yapısının Kurulması

Bir sistem, çevre ile bağlantılarını koparan bir sınırın etkisi ile karakterize edilmektedir. Bu bağlantılar sistem dış davranışını belirler, böylelikle girdi ve çıktılar ilişkisindeki fonksiyonlar ifade edilebilir, sonuç olarak sistem değişkenlerin büyüklükleri değişebilir [27]. Sistematik tasarım açısından teknik bir problemi çözebilmek için, girdi ve çıktılar arasında kolay ve anlaşılır bir yeniden üretilebilir bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu amaçla kompozit tamir tasarımında problemlerin tanımlanması ve çözebilmesi amacıyla istenilen girdi ve çıktı ilişkilerine fonksiyon koşulları uygulanır.

Kompozit tamir tasarımında sisteme malzeme (M), enerji (E) ve sinyaller (S) olarak girdiği tasarımda bir tasarım kriterlerine karşılık bir fonksiyonunu gerçekleştirdikten sonra M', E' ve S' olarak çıkmaktadır. Fonksiyon şeması oluşturulurken, fonksiyonların ilişkilerin tanımlanmasına yönelik sorgulamalar yapılmaktadır. Alt fonksiyon olarak da malzemenin hazırlanması, hasarın tespit edilmesi ve tamir ekipmanının kurulup çıkarılması fonksiyonları içermektedir. Fonksiyon şemasında tanımlanan alt fonksiyonlar, çözüm yolu için matris oluşturmada belirleyici bir unsur olarak değerlendirilecektir. Malzeme seçilmesi ile güçlendirici yamanın hazırlanması ile tamir uygulama ekipmanının sıcaklık, basınç ve süre ile ilgili bağlantı olduğundan kendi içerisinde bir girdi ve çıktılar bulunan alt fonksiyonları olarak değerlendirilebilir. Buna uygun olarak da malzemenin seçimi, uygulanması ve pişirme koşullarını belirleyen bu alt fonksiyonlar kendi içerisinde değerlendirilmesi ve çözüm alternatiflerine buna uygun olarak seçilmesi öngörülmektedir.

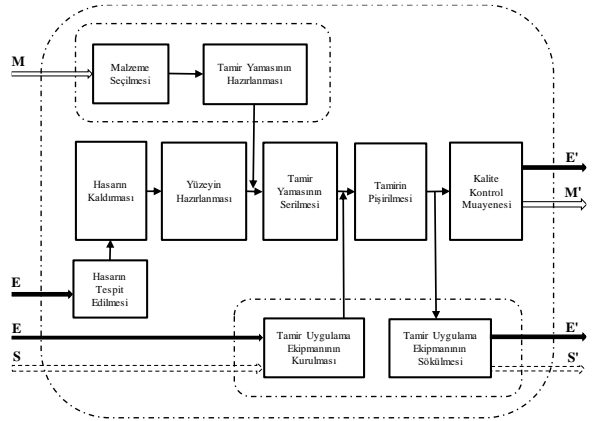
Hasarın tespit edilmesi sinyalinin sisteme girmesi ile başlayan ve hasarın kaldırılmasından kalite kontrol muayenesine kadar olan alt fonksiyonlar da kendi içerisinde değerlendirilecektir. Buna göre iki farklı alt fonksiyon grubuna ait oluşturulan çözüm varyantları arasında uyum ve eşleşme gerçekleştirilebilecektir.

### Alt Fonksiyonlar ve Çözüm Varyantları

Bütün fonksiyonlar alt görevlere karşılık gelen alt fonksiyona bölünebilir. Alt fonksiyonlar arasındaki ilişki ve bütün fonksiyon kesin kısıtlar ile yönetilir.

Tablo 4. İhtiyaçlar Listesi

SIRA	İHTİYAÇ LİSTESİ/İSTENİLEN ÖZELLİKLER	(A)/(İ)	FAKTÖR
1	Tamir boyutu (genişlik, en, yükseklik) mümkün olan en küçük boyutta olmalı	(İ)	Ağır ve Denge
2	Tamir yaması hafif olmalı, simetrik ve dengeli olmalı	(İ)	
3	Tamir yamasının elyaf yönleri ve dizimi tasarıma ait statik yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmalı	(İ)	
4	Kopma yüküne dayanabilmeli ve yapışal bütünlüğü koruyacak şekilde tasarlanmalı	(A)	Dayanım ve Rijitlik
5	Tasarıma ait statik yük dayanmalı	(A)	
6	Darbelerle karşı sönümleyici ve dayanıklı olmalı	(A)	
7	Entegre olacağı parçayla aynı servis ömrüne sahip olmalı	(A)	
8	Aerodinamik düzgünlük istenen yüzeylere uyum sağlayabilmeli	(A)	
9	Reçinenin nem emilimi, sıcak ve ıslak ortamda bulunması önlenmeli	(A)	Çevresel Etkiler
10	Korozyona karşı önlemler alınmış olmalı	(A)	
11	Operasyonel sıcaklıklara dayanabilecek malzeme tercih edilmeli	(A)	
12	Dayanımı sağlayabilecek en hafif malzemelerden tasarlanmalı	(A)	
13	Tamir sırasında yakıt sistemleri kirlenmemeli	(İ)	Malzeme
14	Hareketli parçaları kısıtlamamak şekilde tasarlanmalı	(İ)	
15	Elektriksel iletkenliği sağlamalı, yıldırım/şimşek çarpmalarına karşı korumalı	(İ)	
16	Seri üretime uygun ve erişilebilir malzemeler tercih edilmeli	(İ)	Maliyet ve Zaman
17	Pişirme süresi ve sıcaklığı optimize edilmeli	(İ)	
18	Hızlı ve kolay erişilebilir ekipmanlar kullanılarak imal edilebilmeli	(İ)	
19	Tesis içerisinde veya uçak üzerinde tamir edilebilmeli	(İ)	
20	Delik delme, kesme ve zımparalama gibi işlemleri sırasında hasarlanmamalı	(A)	İmalat, Montaj ve Operasyon
21	Hızlı işleme alınabilmeli, pratik yöntemlerle uygulanabilir olmalı	(A)	
22	Çevresindeki yapılarla uyum sağlayabilmeli, kolay entegre edilebilmeli	(A)	
23	Malzeme depolama (soğutucu), ısıtma-hazırlama süresi, out-time bilgileri kayıtlı olmalı	(A)	
24	Pişirme döngüsüne ait sıcaklık, basınç, vakum bilgilerinin takip ve kontrol edilebilmeli	(A)	Kalite Kontrol
25	Yapışma yüzeyleri kabul edilebilir yeterlilikte olmalı	(İ)	
26	Tamir sonrası tahribatsız muayene ile kontrol edilebilmeli.	(A)	



Şekil 3. Fonksiyon şeması

Diğer bir taraftan, alt fonksiyonları farklı yollarla birbirine bağlamak mümkündür ve bu nedenle varyantlar oluşturulur. Bütün durumlarda bağlantılar uyumlu olmalıdır. Bütün fonksiyonlar içerisindeki alt fonksiyonların anlamlı ve uyumlu birleşimi, fonksiyon yapısı olarak adlandırılır. Bu nedenle süreç ve sistemleri içeren blok diyagram çizilmesi faydalı olabilir [27]. Şekil 3'te kompozit tamir tasarımına ait çizilen fonksiyon şeması için iki farklı alt fonksiyon varyantları belirlenip, değerlendirmeden sonra uyumlu varyantlar eşleştirilebilecektir.

Buna uygun olarak hasarın kaldırılmasından takviye tasarımını kapsayan süreç için Tablo 5'te yer alan çözüm alternatifleri belirlenmiş olup, Tablo 7'deki gibi on beş adet (15) olası Çv çözüm varyantları eşleştirilmiştir. Tablo 5'te yer alan çözüm varyantları eşleştirirken yüzey hazırlanması ile ilgili uygulanan mekanik ve enerji yöntemleri tüm çözüm varyantlarında aynı şekilde var olabileceği ön görülmektedir. Buna uygun olarak bu aşamada yüzey hazırlanması ile ilgili çözüm varyantı yüzey hazırlamadan bağımsız olarak değerlendirilecektir. Tablo 6'da ise malzemenin kuru, reçine emdirilmiş ekipmanı kabiliyetleri ve kalite kontrol sürecini bütün olarak belirleyeceğinden malzeme seçimi ve tamir ekipmanlarının uygulanması kendi içerisinde çeşitlendirilecektir. Buna uygun olarak Tablo 7'deki on (10) Mv malzeme çözüm varyantı olarak değerlendirilmiştir. Malzeme çözüm varyantı için "Genel Malzeme Kavramları ile Islak ve Sıcak Serim Tanımları" bölümünde bilgi verilmiştir.

Ayrıca birbirinden bağımsız olarak değerlendirilen bu iki çözüm varyantlarının aralarında uyum olduğundan emin olmak için Çv varyantları ile Mv varyantları arasında matris oluşturulmuştur. Aralarında karşılıklı uyum olan çözüm varyantları için eşleşen alternatif Tablo 7b ile belirtilmiştir. Buna uygun olarak Çv1, Çv13 ve Çv15 varyantlarının hepsinin de Mv1 – Mv8 arasındaki bütün varyantlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Çv6 sadece Mv5-Mv8 çözüm varyantları ile uyum sağlarken, Çv5 ise Mv1- Mv4 ile uyum göstermektedir. Malzeme seçimi ve uygulaması için belirlenen Mv9 ve Mv10 varyantları ise geriye kalan Çv2, Çv3, Çv4, Çv5, Çv8, Çv9, Çv10, Çv11, Çv12 ve Çv14 varyantları ile uyum sağlamaktadır. Bu aşamada bu tespit edilen varyantların azaltılabilmesi için iki farklı seçim kartından yararlanılacaktır.

### Çözüm Varyantlarının Seçilmesi

Belirlenen çözüm varyantlarında teorik olarak kabul edilebilir olsa da pratik uygulamada başarılı olmayabilir, bu nedenle erken aşamalarda çözümlerin azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle eleme ve tercih olarak iki aşamalı olarak azaltılabilir. Öncelikli olarak uygun olmayan öneriler elenmelidir ve çok fazla çözüm olduğunda en uygun olarak tercih edilmelidir.

Çok fazla çözüm derlendiğinde seçim kartı uygulanmalıdır. Seçim kartı uygulanırken, görevler birbiriyle uyumlu olmalı, ihtiyaç listesini karşılanmalı, performans yerleşim gibi kriterlere göre gerçekleştirilmeli ve izin verilen maliyetler içerisinde olmalıdır [24]. Buna uygun olarak kompozit tamir tasarımına ait Tablo 7'de elde edilen çözüm varyantlarının eleme ve tercih yapılması için Tablo

8'de Çv ve Mv için iki ayrı seçim kartı uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Hasarın Kaldırılması, Yapının Hazırlanması ve Güçlendirilmesi Alt Fonksiyonlarına Ait Çözüm Yolları

Çözüm Yolu	A	B	C	D	E
1. Hasarı Kaldırması					
2. Yüzeyin Hazırlanması	Mekanik	Enerjik			
3. Takviye Yama Serilmesi - Dolgu Tasarımı	N/A				
4. Takviye Yamanın Serilmesi- Takviye Tasarımı					

Tablo 6. Malzemenin Hazırlanması, Pişirilmesi ve Kalite Kontrolü Alt Fonksiyonlarına Ait Çözüm Yolları

Çözüm Yolu	A	B	C	D
1. Yapıştırıcı Malzeme	N/A	Yapıştırıcı (C stage termoset)		
2. Serim Yöntemi				
3. Güçlendirici Malzemenin Belirlenmesi	Kuru Elyaf + A Stage Termoset	Reçine Emdirilmiş Elyaf (Prepreg -B stage Termoset)	Pişirilmiş Plaka (Prepreglen)	
4. Vakumlama	Ticari Vakum Torbası	Çift Vakum Yığını		
5. Pişirme Döngüsü ( Sıcaklık-Süre-Basınç)	Sıcaklık: 25°C, Süre: 3-5 gün Basınç: 1 atm	Sıcaklık: 80°C Süre: 3-5 saat Basınç: 1 atm	Sıcaklık: 120°C-180°C Süre: 2-3 saat Basınç: 1 atm	Sıcaklık: 120°C-180°C Süre: 2-3 saat Basınç: 3-7 atm
6. Pişirme Ekipmanı	Oda Koşulları	Portatif Isıtıcı (Heat Bonder- Isıtıcı Battanije)	Sabit Isıtıcı (Firm/Otoklav)	
7. Kalite Kontrol	Gözle/Vuruş (Tap)	Ultrasonik/ X-Ray		

Tablo 7. Çözüm Varyantları Ve Uyum Tablosu

	1	2	3	4	5	6	7		MV1	MV2	MV3	MV4	MV5	MV6	MV7	MV8	MV9	MV10	MV11	MV12	
CV1	A	AB	AA					CV1													
CV2	A	AB	AB					CV2													
CV3	A	AB	AC					CV3													
CV4	A	AB	AD					CV4													
CV5	A	AB	AE					CV5													
CV6	B	AB	CA					CV6													
CV7	B	AB	DA					CV7													
CV8	B	AB	CB					CV8													
CV9	B	AB	CC					CV9													
CV10	B	AB	CD					CV10													
CV11	B	AB	CE					CV11													
CV12	C	AB	AB					CV12													
CV13	C	AB	BA					CV13													
CV14	D	AB	AB					CV14													
CV15	D	AB	BA					CV15													

Seçim kartına uygulandıktan sonra Çv1, Çv3, Çv4, Çv13, Çv14 ve Çv15 olarak altı (6) varyant ile Mv2, Mv5, Mv6 ve Mv9 dört (4) varyant ön plana çıkmaktadır. Çözüm varyantlarında eleme gerçekleştirirken kuru elyaf ile ıslak serim içeren tasarım çözümleri hem yapısal açıdan yeterli olmadığı öngörülerek ve tamir sonrası gözenek,

yapışmama gibi hatalar tespit edilme ihtimalinin yüksek olduğu düşünülerek tercih edilmemiştir. Bu nedenle Mv2 ve Mv6 çözüm varyantları bu aşamada tercih edilmemiştir. Bu göre seçilen altı (6) Çv ve kalan iki (2) Mv varyantları arasında Tablo 7c'ye göre aralarında bulunan uyum için Tablo 9'daki gibi yeniden değerlendirilmiştir. Eşleştirilme yapıldıktan sonra Çv1-Mv5, Çv3-Mv9, Çv4-Mv9, Çv13-Mv5, Çv14-Mv9 ve Çv15-Mv5 olası çözüm varyantları olarak ilerleyen değerlendirmede göz önünde bulundurulabilecektir.

Tablo 8. Mv Çözüm Varyantları İçin Seçim Kartı

SEÇİM KARTI		KARAR							
Çözüm varyantları (Sv)	Şularla değerlendirilen çözüm varyantları (Sv)	KARAR							
	Seçim Ölçütleri	Çözüm Varyantlarının İncelenmesi							
	(+) Evet	(+ Çözümü Sürdür							
	(-) Hayır	(- Çözümü İptal Et							
	(?) İhtiyaç Listesini Kontrol Et	(?) Bilgi Topla ve Çözümü Tekrar Değerlendir							
	Uyum Güvencesi	(?) Değişiklikler İçin İhtiyaç Listesini Kontrol Et							
	İhtiyaç Listesini Karşılama	İlke Olarak Gerçekleşme							
	Maliyet Hedefleri Limitin İçerisinde	Doğrudan Emniyet Önlemi Sağlaması							
	Tasarımcı Şirketin Tercih Etmesi	Yeterli Bilgi							
	Notlar	KARAR							
A	B	C	D	E	F				
MV1	+	?	+	+	-	-	-	Uzun zaman ihtiyacı	-
MV2	+	?	+	+	+	!	!	Dayanım açısından zayıf	-
MV3	-	-	+	-	+	-	-	Serim maliyeti ve yapıma kalitesi	-
MV4	-	-	+	-	+	+	+	Serim maliyeti ve yapıma kalitesi	-
MV5	+	+	+	+	?	+	-	Serim maliyeti ve yapıma kalitesi	+
MV6	+	+	+	-	+	-	?	Tesis kabiliyeti	+
MV7	-	-	+	!	?	+	-	Dayanım açısından zayıf	-
MV8	-	-	+	!	?	-	-	Parçada hasar oluşturma	-
MV9	+	-	+	+	-	+	-	Yapısmada yeterlilik riski	+
MV10	+	-	+	-	-	-	-	Parçada hasar oluşturma	-
MV11	+	+	+	?	!	?	-	Yeni uygulama ihtiyacı	-
MV12	+	+	+	?	!	?	-	Yeni uygulama ihtiyacı	-

### Çözüm Varyantlarının Tanıtımı

Seçim kartı kullanılarak Çv1-Mv5, Çv3-Mv9, Çv4-Mv9, Çv13-Mv5, Çv14-Mv9 ve Çv15-Mv5 çözüm varyantları değerlendirilmesine için karar verilmiştir. Çözüm varyantı olarak Çv1, Çv3 ve Çv4 çözüm varyantlarının ortak özelliği hasarı kaldırmadan yapı üzerine serim yapılmasıdır. Çv13, Çv14 ve Çv15 çözümlerinin ortak özellikleri malzeme kaldırmayı önermesidir. Bunu Çv13 için adım ile açılmasını içerirken, Çv14 ve Çv15'te açılı olarak açılması önermektedir. Mv5 varyantında önceden reçine emdirilerek imal edilen malzemelerin adım kesitinde açılan yapıya örtüştürülerek serimi içermektedir.

Mv9'da ise farklı konfigürasyonlara sahip pişirilmiş plaka halindeki yapıların kullanılmasını önermektedir. Mv9'daki varyant ise Çv3 ve Çv4 arasındaki fark tesisin kabiliyetleri açısından değerlendirilmelidir. Tüm varyantların ortak özellikleri takviye yamasının pişirilmesi için tesis içerisinde veya uçak üzerinde portatif ısıtıcı ekipman kullanılarak tamir edilmesidir Tablo 10'da bu altı farklı kompozit tamir tasarım çözüm varyantı için modelleme yapılarak, tasarımın içeriği kısa şekilde ifade edilmiştir. Tabloda yer alan varyantların en

uygunun seçilmesi için ek değerlendirilmelere ile eleme gerçekleştirilecektir.

Tablo 9. Çv Çözüm Varyantları İçin Seçim Kartı

SEÇİM KARTI		KARAR							
Çözüm varyantları (Sv)	Şularla değerlendirilen çözüm varyantları (Sv)	KARAR							
	Seçim Ölçütleri	Çözüm Varyantlarının İncelenmesi							
	(+) Evet	(+ Çözümü Sürdür							
	(-) Hayır	(- Çözümü İptal Et							
	(?) İhtiyaç Listesini Kontrol Et	(?) Bilgi Topla ve Çözümü Tekrar Değerlendir							
	Uyum Güvencesi	(?) Değişiklikler İçin İhtiyaç Listesini Kontrol Et							
	İhtiyaç Listesini Karşılama	İlke Olarak Gerçekleşme							
	Maliyet Hedefleri Limitin İçerisinde	Doğrudan Emniyet Önlemi Sağlaması							
	Tasarımcı Şirketin Tercih Etmesi	Yeterli Bilgi							
	Notlar	KARAR							
A	B	C	D	E	F				
CV1	+	-	+	+	!	+	-	Uzun zaman ihtiyacı	+
CV2	+	-	+	+	!	-	-	Dayanım açısından zayıf	-
CV3	+	-	+	-	+	?	+	Kabiliyet ihtiyacı	+
CV4	+	-	+	-	+	?	+	Pişirme ekipmanı ihtiyacı	+
CV5	+	+	+	-	?	?	-	Otomatik serim maliyeti	-
CV6	+	-	+	-	?	?	-	Serim maliyeti ve yetersiz bilgi	-
CV7	+	+	+	+	?	-	-	Dayanım açısından zayıf	-
CV8	+	+	+	+	?	-	-	Parçada hasar oluşturma	-
CV9	?	-	+	+	-	+	-	Yapısmada yeterlilik riski	-
CV10	?	-	+	+	-	+	-	Parçada hasar oluşturma	-
CV11	?	-	+	+	-	?	-	Uzun zaman ihtiyacı	-
CV12	+	-	+	-	-	+	+	Parçada hasar oluşturma	-
CV13	+	+	+	-	+	?	+	Uzun zaman ihtiyacı	+
CV14	+	-	+	-	+	-	+	İmalat açısından zor	+
CV15	+	+	+	-	+	?	+	İmalat açısından zor	+

Tablo 10. Seçilen Çözüm Varyantları ve Uyumluları

	MV1	MV2	MV3	MV4	MV5	MV6	MV7	MV8	MV9	MV10	MV11	MV12
ÇV1												
ÇV2												
ÇV3												
ÇV4												
ÇV5												
ÇV6												
ÇV7												
ÇV8												
ÇV9												
ÇV10												
ÇV11												
ÇV12												
ÇV13												
ÇV14												
ÇV15												

### Çözüm Varyantlarının Elenmesi

Önerilen çözümler için final değerlendirilmesi yapmadan önce daha detaylı ve ölçülebilir kriterler kullanılarak elenmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme teknik, emniyet, çevre ve ekonomik değerleri içermelidir. Seçim sürecinin daha detaylandırılır ve çözümlerin mevcut değerlerinin tespit edilir.

Değerlendirme olarak değer, kullanılabilirlik veya dayanım gibi çözümler amaç olarak belirlenir. Çözüm varyantlarının karşılaştırılması ideal çözüm için puanlama ya da ideale yakınlık derecesi olarak karşılaştırmayı kapsamaktadır

Maliyet kazanç analizi hiyerarşik bir sıralama ile amaçlar ağacı sistemi oluşturulması anlamı gelmektedir. Ağırlık değerlendirme kriteri bir



değerlendirme kriteri olarak tüm çözümler içerisinde göreceli katkısına değer verilmesi ve göreceli olarak daha önemsiz olanlar başlamadan önce elenebilir. Ağırlık faktörü olarak değerlendirme aşamasında hesaba katılması gerekir.

Amaçlar ağacı hazırlanırken, problemleri ortadan kaldırıp, çözebilecek pozitif etkilere dönüştüren bir yapıyı içermektedir. Buna uygun olarak amaçlar ağacında bulunan tasarım kriterlerini olumlu yönde etkileyecek yapıda kriterlerden oluşturulmasına ihtiyaç duymaktadır.

### Değer Profili Karşılaştırması

Kabul edilebilir kompozit tamir tasarım varyantlarının arasında en uygun olanın seçilebilmesi için zayıf bölgelerin araştırılması gerekmektedir. Ortalama ağırlık değeri Tablo 10'a göre hesaplanan çözüm varyantlarının bu değer altında kalan bölgeler eksik alan olarak hesaba katılır. Buna göre de en az eksikliği olan çözüm varyantı en ideal tasarım çözümü olarak belirlenir. Buna göre değerlendirildiğinde en yüksek değere sahip olan Çv1-Mv5 ve Çv4-Mv9 değer profil diyagramları karşılaştırılmalı olarak Tablo 12'deki gibi çizilmiştir

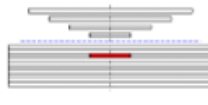
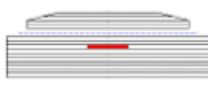
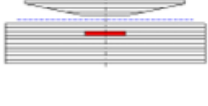
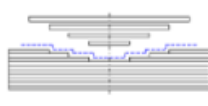
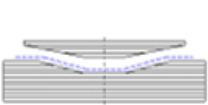

Ortalama değeri 7,53 olan Çv1-Mv5 varyantının bu değer altında kalan alanın toplamı %8,29 hesaplanmaktadır. Diğer Çözüm varyantı Çv4-Mv9 içinse ortalama değer 8,04 olup, bu değer altında kalan alan %4,54'tür. Sonuç olarak Çv4-Mv9 çözüm varyantının daha az eksikliği tespit edilmiş olup, en uygun tasarım çözümü olarak önerilmektedir.

### Tasarım Çözümü

Sistemik tasarım yaklaşım adımlarının uygulanması sonucunda Çv4-Mv9 çözüm varyantının, en uygun tasarım çözümü olarak önerilmektedir. Bu tasarım çözümü kapsamında tamir tasarımı gerçekleştirirken mevcut yapıda malzeme kaldırmadan uygulanması önermektedir. Bu uygulamada hasarın kaldırılması sırasında ek hasarlar verilmesine ve yapının daha da yük kapasitesini düşürülmesine engel olunabilecektir. Reçine emdirilen ve yığın halde hazır bulunan tamir yamasının yapı üzerinde hasarın merkezi belirlenerek konumlandırılması gerekmektedir. İkincil yapıştırma modeli olan tasarımda iki pişirilmiş yapının yapıştırılabilmesi için yüksek sıcaklıklarda pişebilen yapıştırıcı film uygulanması gerekmektedir. Tamirin uygulanması için portatif ısıtıcılar aracılığıyla ile gerçekleştirilecektir. Bu da mevcut yapının sökülüp takılmasına gerek olmadan gerçekleştirilmesine imkân vermektedir. Özellikle yapıştırma bağlantılarında yamaların uçlarının açılı olarak çıkarılması yapışkanın soyulma etkisini

azaltabileceğinden dayanımına olumlu bir etki sağlamaktadır.

Tablo 11. Çözüm Varyantların Tanıtılması

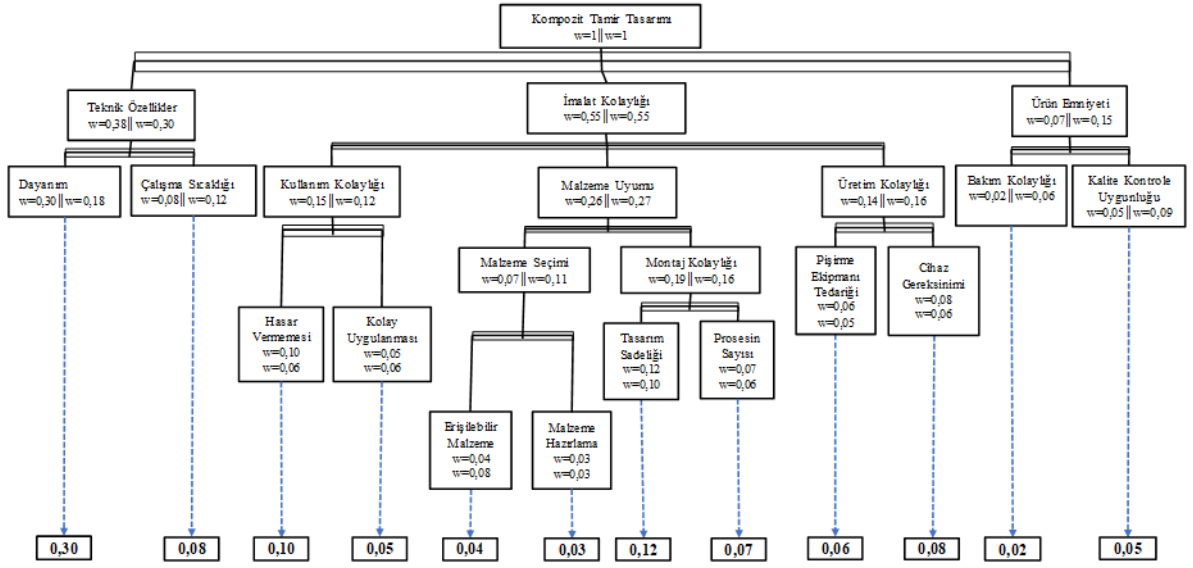
Çözüm Varyantı	Tasarım Modeli	Tasarımın Tanımı
Çv1-Mv5		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı kaldırmadan</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Adımlı katman serim</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- Prepreg malzeme</li> </ul>
Çv3-Mv9		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı kaldırmadan</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Pişmiş yama ekleme</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- Dışa bakan uç açılı</li> </ul>
Çv4-Mv9		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı kaldırmadan</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Pişmiş yama ekleme</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- İçe doğru açılı yapı</li> </ul>
Çv13-Mv5		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı adım kaldırma</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Adımlı katman serim</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- Prepreg malzeme</li> <li>- Dolgu eklemeli</li> </ul>
Çv14-Mv9		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı açılı kaldırma</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Pişmiş yama ekleme</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- İçe doğru açılı yapı</li> <li>- Dolgu eklemelen</li> </ul>
Çv15-Mv5		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasarı açılı kaldırma</li> <li>- Yapıştırıcı film kullanımı</li> <li>- Açılı katman serim</li> <li>- Manuel uygulama</li> <li>- Portatif ısıtıcı</li> <li>- Prepreg malzeme</li> <li>- Dolgu eklemeli</li> </ul>

### SONUÇLAR

Sistemik tasarım yaklaşımı amacıyla oluşturulan ihtiyaç listesine en uygun olarak çözümün belirlenmesinde alt fonksiyonlar içerisinde hem dayanım, hafiflik gibi mühendislik kavramları içeren hem de firma kabiliyetleri ve maliyet gibi mühendislik dışı kriterlerin değerlendirmesi sonucu en iyi tasarım önerisi oluşturulmuştur. Bunları gerçekleştirirken çözüm varyantları arasında eleme yapılması için karar ağacı oluşturulmuştur ve değer analiz çizelgesine yansıtılarak en uygun iki tasarıma ulaşılmıştır. Bu tasarımlar arasında sistematik olarak

karar verilmesi için de değer profil diyagramları karşılaştırılmıştır ve ortalama değere en çok sağlayan tasarım en iyi tasarım olarak elde edilmiştir. Fiber takviyeli polimerler için gerçekleştirilen bu tamir tasarımı sistematik tasarım adımlarına uyarlanmıştır ve gelişen tamir teknolojileri göz önünde bulundurulduğunda belirlenen alt fonksiyonlara ait çözüm varyantları

çeşitlendirmesi ön görülmektedir. Ayrıca tamirin uygulanacağı tesisin kabiliyetlerinde gelişmeler için çözüm varyantları için oluşturulan değerlendirme çizelgelerin güncellenmesi söz konusu olabilecektir. Bu kapsamda sonuç olarak kompozit tamir tasarımı ait sistematik tasarım adımlarına uyum sağlayarak, en uygun tasarım çözümünün belirlenmesine rehberlik etmiştir.

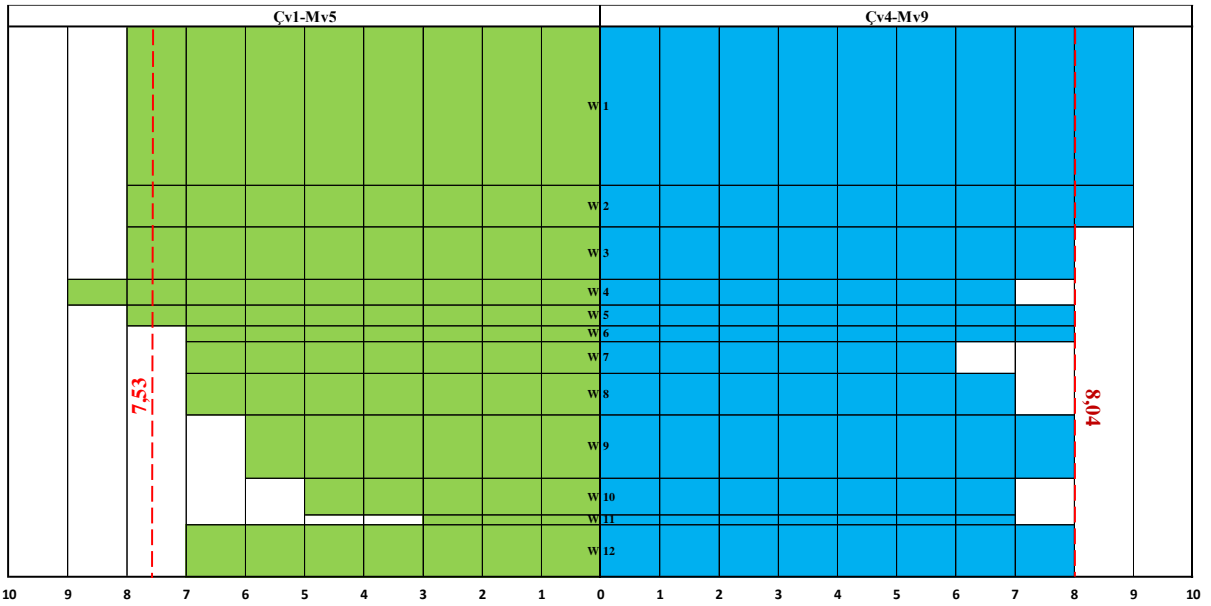


Şekil 4. Amaçlar ağacı

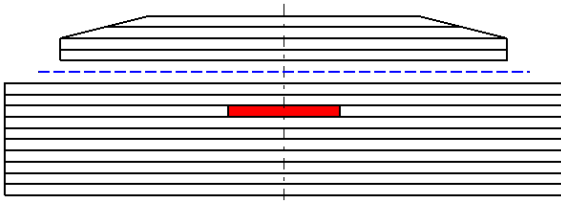
Tablo 11. Değer Analiz Çizelgesi

Değerlendirme Çizelgesi			CV13-MV5			CV14-MV9			CV15-MV5		
Kriter	W	Parametreler	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri
1	0,3	Dayanım	Çok iyi	8	2,4	Çok iyi	9	2,7	Çok iyi	9	2,7
2	0,08	Çalışma Sıcaklığı	Çok iyi	8	0,64	Çok iyi	9	0,72	Çok iyi	9	0,72
3	0,1	Hasar vermemesi	Uygun	5	0,5	Uygun	4	0,4	Uygun	4	0,4
4	0,05	Kolay uygulanması	iyi	7	0,35	iyi	6	0,3	iyi	6	0,3
5	0,04	Erişilebilir Malzeme	Çok iyi	8	0,32	Çok iyi	8	0,32	Çok iyi	8	0,32
6	0,03	Malzeme Hazırlama	Uygun	4	0,12	iyi	7	0,21	iyi	6	0,18
7	0,06	Pişirme Ekipmanı Tutarlığı	iyi	7	0,42	iyi	6	0,36	iyi	7	0,42
8	0,08	Çihaz Gereksinimi	iyi	6	0,48	iyi	7	0,56	iyi	7	0,56
9	0,12	Tasarım Sadeliği	iyi	7	0,84	Uygun	5	0,6	iyi	6	0,72
10	0,07	Prosesin Sayısı	Çok iyi	8	0,56	Uygun	4	0,28	Uygun	5	0,35
11	0,02	Bakım Kolaylığı	iyi	7	0,14	iyi	7	0,14	Çok iyi	8	0,16
12	0,05	Kalite Kontrolü Uygunluğu	iyi	7	0,35	Uygun	5	0,25	iyi	7	0,35
ΣWt= 1			ΣAd4= 82 Σd4= 7,12			ΣAd5= 77 Σd5= 6,84			ΣAd6= 82 Σd6= 7,18		

Değerlendirme Çizelgesi			CV1-MV5			CV3-MV9			CV4-MV9		
Kriter	W	Parametreler	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri
1	0,3	Dayanım	Çok iyi	9	2,7	Çok iyi	8	2,4	Çok iyi	9	2,7
2	0,08	Çalışma Sıcaklığı	Çok iyi	9	0,72	Çok iyi	8	0,64	Çok iyi	9	0,72
3	0,1	Hasar vermemesi	Çok iyi	8	0,8	iyi	7	0,7	Çok iyi	8	0,8
4	0,05	Kolay uygulanması	iyi	7	0,35	iyi	6	0,3	iyi	7	0,35
5	0,04	Erişilebilir Malzeme	Çok iyi	8	0,32	Çok iyi	8	0,32	Çok iyi	8	0,32
6	0,03	Malzeme Hazırlama	iyi	6	0,18	iyi	7	0,21	Çok iyi	8	0,24
7	0,06	Pişirme Ekipmanı Tutarlığı	iyi	6	0,36	iyi	6	0,36	iyi	6	0,36
8	0,08	Çihaz Gereksinimi	iyi	7	0,56	iyi	7	0,56	iyi	7	0,56
9	0,12	Tasarım Sadeliği	iyi	6	0,72	Uygun	5	0,6	Çok iyi	8	0,96
10	0,07	Prosesin Sayısı	Uygun	5	0,35	iyi	6	0,42	iyi	7	0,49
11	0,02	Bakım Kolaylığı	iyi	6	0,12	Uygun	4	0,08	iyi	7	0,14
12	0,05	Kalite Kontrolü Uygunluğu	iyi	7	0,35	iyi	6	0,3	Çok iyi	8	0,4
ΣWt= 1			ΣAd1= 84 Σd1= 7,53			ΣAd2= 78 Σd2= 6,89			ΣAd3= 92 Σd3= 8,04		



Şekil 5. Değer profili diyagramı



Şekil 6. Tasarım kararı

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR

1. D. V. Rosato, Designing With Reinforced Composites. Carl Hanser Verlag GmbH & Co, 1997.
2. Tri-Dung Ngo, Introduction to Composite Materials. InnoTech Alberta-Alberta Innovates, University of Alberta, 2019
3. E.P. Irving, C. Soutis, Polymer Composites in the Aerospace Industry. Woodhead Publishing, UK, 2014
4. FAA & ASA, Aviation Maintenance Technician Handbook: *Airframe, Volume 1*. USA 2018
5. "Out of Autoclave Structural Prepreg Composites" Sampe Journal- pp. 13, 2017.

6. S. Budhe, M: D: Banea, S. De Barros, "Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues", *Applied Adhesion Science*, Vol. 6 Article number: 3, 2018.
7. F.C. Campbell, Structural Composite Material. ASM International Chapter 12, USA, 2010.
8. A. Baker, A Gunnion and J. Wang" On the Certification of Bonded Repairs to Primary Composite Aircraft Components". *Journal on Adhesion* 2015. Do: <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.883315>.
9. C. Duong, C. H. Wang Composite Repair: *Theory & Design*. Elsevier BV., Netherlands, 2007
10. Elham Fouladi ve Ali Abedian, Systematic Design Method for Bonded Repair Based on Axiomatic Design Methodology, 9th International Conference on Axiomatic Design – ICAD 2015, 2015.
11. Doung, Cong N., and Chu Hui Wang. Composite repair theory and design. 1st. USA, Australia: Elsevier, 2007.
12. Marioli-Riga, Z., and E. E. Gdoutos. "Composite Patch Repair Methodology for Damaged Aircrafts Structural Components." 2004 SEM Annual Conference. 2004. 7-10.
13. Mayda M., Börklü Hüseyin R., Yeni Bir Kavramsal Tasarım İşlem Modeli, Tünav Bilim Dergisi, 2018

14. Gürcüm B. H., Ezer Ö., Tekstil Ürün Tasarımında Sistemik Yaklaşım: Kavramsal Tasarım Metodu, Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2016
15. Nondestructive testing of damage in aerospace composites, pp. 437
16. R. B. Heslehurst, Engineering Repairs of Composite Structures, CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, USA, 2019.
17. FAA, "AC20-107- and JAA ACJ 25.603-Composite Aircraft Structure". USA, 2007.
18. Davis, M.J., "Bonded Repairs: Principles and Practice", Int. Conf. On Aircraft Damage Assessment and Repair". Melbourne, 1991
19. R. B. Heslehurst (Engineering Repair Of Composite Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, USA, 2019.
20. MIL-HDBK-17-3F, Composite Materials Handbook, Volume 3, Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, And Analysis, USA 1997
21. D. Holzhüter, A. Pototzky, C. Hühne and M. Sinapius, "Automated Scarfing Process for Bonded Composite Repairs" *Adaptive, Tolerant And Efficient Composite Structures*. pp. 297-307, 2012. do: 10.1007/978-3-642-29190-6\_23.
22. M. D. Isaac, O. Ishai, Engineering Mechanic of Composite Material, Second Edition. Oxford University Press, UK, 2006.
23. M. Suhara, T. Shimizu, K. Hasegawa, T. Shigetom, M. Kambayashi ve Y. Sato, "Development of Quick Repair Method for Aircraft Composite Structure" *Mitsubishi Heavy Industries Tehnical Review* Vol. 53, No. 4, 2016.
24. H.M. Chong, S.L. Liu, A.S. Subramanian, S.P. Ng, S.W. Tay, S.Q. Wang and S. Feih. "Out-of-autoclave scarf repair of interlayer toughened carbon fibre composites using double vacuum debulking of patch" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 107, pp. 224-234, 2018.
25. İnternet sitesi, [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=surface\\_preparation\\_for\\_adhesive\\_bonding](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=surface_preparation_for_adhesive_bonding) (28.01.2022).
26. HJ. Kim, HS. Kim, GY. Lee, MS. Kim, SH. Kim, R. Keller, JB. Ihn and SH. Ahn, "Three-dimensional carbon fiber composite printer for CFRP repair" *Composites Part B: Engineering* Vol. 174, 2019.
27. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldusen and K. H. Grote Engineering Design: A Systematic Approach 3rd Edition. Springer-Verlag, London, 2007.