

## Betonarme elemanların çelik lamalarla güçlendirilmesi

**Mahmut KÖSE\***, **Kaya ÖZGEN**

*İTÜ Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34437, Taksim, İstanbul*

### Özet

*Bu çalışmada, betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının güçlendirilmesi ve birleştirilmesi işlemlerinde yoğun olarak kullanılan bir yöntem deneysel olarak incelenmiştir. Hizmet halindeki betonarme elemanların dış yüzeylerinden, mukavemet değerleri yüksek olan çelik lama veya kompozit şeritler gibi malzemelerle yapıştırılarak kuşatılması şeklindeki güçlendirme uygulaması, uzun bir geçmişi olan ve halen yoğun talep gören bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde güvenli bir sonuç elde etmek, özellikle yapıştırma birleşim sorunlarından dolayı her zaman mümkün olmamaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonuçlarına göre belirli işlem kriterlerine bağlı kalındığında söz konusu yapıştırma yönteminin, göçme davranışları, taşıma gücü, aderansın verimli değerlendirilmesi, dolayısı ile kompozit davranışın sağlanabilmesi açısından olumlu sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme taşıyıcı sistem, güçlendirme, yapıştırma.

### Reinforced concrete members strengthening method by steel plates

#### Abstract

*In this work a method, which is frequently used in the strengthening and bonding process of reinforced concrete system members, is studied experimentally. The purpose of this experimental study is to evaluate the strengthening realized by the joining method not only the application criteria and related materials are given but also advantages and inconvenient of the method are pointed out. The strengthening application of the outside surfaces of the existing concrete members covering with materials like steel plate or composite sheets having high stiffening values is a long lasting and still widely demanded method. However getting a reliable result by this method is not always possible especially due to the problems of composite adhesion. In the study, application limitations of the selected bonding type and materials evaluated in detail which are very necessary to consider for such applications. On the other hand, these types of studies should be carried out the experienced staff and workers. According to the results of the experiments subject to this work, in case of obeying the necessary processing criteria, it was observed that the adhesion method provides positive results in terms of failing movements, increasing of loading capacity, efficient use of the adhesive power and so satisfying the composite behavior.*

**Keywords:** Reinforced concrete system, strengthening, adhesion.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mahmut KÖSE. kose@itu.edu.tr; Tel: (212) 293 13 00 dahili: 2327.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Mimarlık Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Betonarme yapı elemanlarının çelik lamalarla güçlendirilmesi ve birleştirilmesi; deneysel inceleme" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 11.03.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.06.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Betonarme yapıım sistemi, en çok tercih edilen yapı teknolojilerinden biridir. Bu sistemin tercih nedeni, ana malzemesi olan betonun olumlu özellikleridir. Dünyada ve ülkemizde betonarmenin yoğun olarak kullanımının başlıca nedenleri;

- Kolay bir üretim evresine sahip olması,
- Bir takım ek önlemler almak ve katkı maddeleri kullanmak şartı ile aşırı olmayan her türlü çevre koşulunda standart kalitede üretim yapılabilmesi,
- Maliyetinin düşük olması,
- Hammadde temini ve kalitesi açısından,

tükenmekte olan önemli doğal kaynaklara bağımlı olmaması şeklinde sıralanabilir. Betonarme yapı sistemine olan bu yoğun talep, betonarme yapı miktarının önemli oranda artmasını beraberinde getirmiştir. Bu anlamda üretilen büyük miktardaki yapı için çeşitli nedenlerle ihtiyaç duyulan, onarım, iyileştirme veya güçlendirme adı verilen rehabilitasyon çalışmaları da önem kazanmıştır.

Son yıllarda, özellikle ülkemizde üretilen betonarme yapıların, projelendirilmesi, uygulanması ve kullanılması esnasında yapılan bir takım hatalar veya verilen yanlış kararlar, yapıya taşıyıcı eleman ve malzeme açısından yapılması gereken bir takım müdahale ve değişiklikleri gerektirmektedir. Betonarme taşıyıcı sistemde yapılan bu tür değişiklik ve eklemeler, yeri ve amacına göre onarım, güçlendirme, iyileştirme adları ile tanımlanarak uygulanmaktadır. Taşıyıcı sisteme müdahale işleminin, sınırlı bir hasarın giderilmesi için yapılmasına veya depremde hasar görüp taşıma gücü azalmış elemanlara deprem öncesi taşıma gücü değerlerini yeniden kazandırma işlemine “onarım” denir. Onarım, güçlendirme ve yenileme iç içe girebilen işlemlerdir (Özgen, 1990).

Hasar olsun veya olmasın, taşıyıcı sistemin tümünün ya da belli elemanlarının taşıma gücünü artırmak veya ekonomik ömrü boyunca muhtemel bir depremde hasar gören yapının, aynı boyutta depremlerin birçok kez yinelenmesi beklentisi karşısında aynı hasarın tekrarlanmaması için

eski durumundan daha güçlü duruma getirilmesi için yapılan müdahale işlemlerine genel olarak “güçlendirme” denir. Diğer bir tanıma göre; tekrar kullanılmak üzere hasarlı binanın onarım uygulamaları restorasyon (restoration), hasar görmüş yapıların taşıyıcı kısımlarının performanslarını orijinal haline yükseltmek amacı ile yapılan iyileştirme uygulamaları onarım (repair), hasar görmüş yapıların taşıyıcı kısımlarının performanslarını orijinalinden daha yukarıya çıkarmak için yapılan/uygulanan işlemler de güçlendirme (strengthening) diye tarif edilmektedir (Fukuyama vd., 2000).

Ülkemiz nüfusunun önemli bölümü (%95) yüksek derecede deprem riski olan bölgelerde yerleşmiş durumdadır. Ayrıca mevcut deprem tehlikesinden başka yapı ömrünün ortalama 50 yıl olduğu dikkate alındığında, taşıyıcı sistemleri onarım ve güçlendirme uygulaması gerektiren büyük miktarda yaşlı bina yığınının bulunduğu bir gerçektir. Bu bağlamda yapılan onarım ve güçlendirme işlemlerinde, yöntem ve malzemelerin etkin kullanımları açısından bir takım bilgi eksiklikleri olduğu görülmektedir. Bu eksikliklerden dolayı hatalar içeren güçlendirme uygulamalarında büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir. Ülkemizde bu konuyu anlaşılır ve standart bir işlem dizisi ile ortaya koyan, uygulama kriterleri ve sınırlarını belirleyen, ayrıca alternatif yöntemler ile karşılaştırmayı mümkün kılan çalışmalara ihtiyaç olduğu açıktır. Bu anlamda söz konusu yöntemlerden biri olarak günümüzde yoğun talep gören bir güçlendirme işlemi olan; “betonarme elemanların dış yüzeylerinden epoksi reçinesi ile yapııştırılan çelik lamalar ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi ve birleştirilmesi” uygulaması, bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir.

Betonarme yapılarda onarım, güçlendirme gibi çoğu zaman yapı hizmet halindeyken bile kolaylıkla uygulanması istenen işlemleri veya çeşitli nedenlerle yapılacak taşıyıcı sistem değişikliklerini gerçekleştirmek için kullanılacak çeşitli yöntemler vardır. Bu tür yöntemlerden elde edilmesi öngörülen performans kriterleri aşağıda verilmiştir;

- Taşıyıcı sistemin taşıma gücü değerlerinin güvenlik sınırlarına yükseltilmesi,
- Uygulama sonunda ulaşılan değerlerin zaman ve ortam şartlarından etkilenmeden korunabilmesi,
- Hizmet halinde olan bir yapıda uygulanabilecek basit bir işlem dizisine sahip olması,
- Uygulandıktan sonra kısa sürede yüksek taşıma gücü değerlerine ulaşarak hizmete verilebilmesi,
- Maliyet-performans oranının uygun olması

### **Çelik elemanlarla güçlendirme**

Betonarme taşıyıcı elemanların dış yüzeylerine yapıştırılan çelik lamalar ile yapılan güçlendirme işlemi, uzun bir geçmişi olan ve halen yoğun talebin gözlendiği yöntemlerden biridir. Bu yöntem ile taşıyıcı sistem bir bütün şeklinde ele alınarak yapı güçlendirmesi yapılabildiği gibi, eleman ölçeğinde uygulama yapmak da mümkündür.

Betonarme elemanların dış yüzeylerinden yapışkan bağ aracılığı ile güçlendirilmesi işlemi, taşıyıcı yapı sisteminde yapışma ile birleştirme tekniğinin ve buna bağlı olarak yüksek taşıma gücü değerlerine sahip yapı kimyasallarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Taşıyıcı sistemde bu tür yapıştırıcıların kullanılmaya başlanması sayesinde, kısa sürede güvenli iyileştirme ve güçlendirmelerin yapılabilmesi mümkündür. Ayrıca bu tür malzemelerin, basit makina ve aletler ile uygulanabilen bir işlem dizisi gerektirmeleri, bu alanda uygulama açısından da kolaylıklar sağlamaktadır.

Asıl olarak taşıyıcı sistemde yapıştırıcı kullanımı hakkında olumlu ve olumsuz bir çok görüş vardır. Bu görüşler genellikle, fiziko-kimyasal yaklaşımlar kapsamında ele alınarak değerlendirilmektedir (Mouton, 1999). Genel olarak yapısal bir yapıştırıcı ile gerçekleştirilen birleştirme uygulaması, yüksek taşıma gücü değerleri sağlanması, kolay bir işlem dizisi ile hızlı bir şekilde hizmete alınabilmesi ve yapı ile ilgili diğer problemlere etkili çözümler getirmesi nedeni ile geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından tercih edilen yaygın bir birleştirme tekniği olarak kabul edilmektedir. Konu ile ilgili

firmaların bünyesindeki yapımcılar tarafından üretilen yapıştırıcı formülleri, bina onarım ve güçlendirme teknolojilerinin gelişmesini sağlamaktadır. Ancak yapıştırma tekniği bazı ülkelerde, bir çok mimar ve mühendis tarafından yeterli derecede güvenilir bulunmamaktadır. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

- Yapıştırılmış birleşimler titreşimler, yorulma direnci, çevrenin bozucu etkileri ve sürekli yüksek gerilmelere maruz kalma gibi nedenlerle zaman içinde fiziksel kararlılıklarını kaybedebilir.
- Yapıştırılmış birleşimlerde taşıma gücü tespiti yapılması normal şartlarda tahribatlı deney yöntemleri ile mümkündür. Tahribatsız bir kontrol mekanizması ise pahalı cihazlar ve zahmetli bir işlem dizisi ile sağlanabilir. Dolayısı ile yapışkan bağın kullanımdayken sürekli kontrol altında tutulması mümkün değildir.
- Yapışma tabakasını gerektiğinde ayrıştırmak için kullanılan cihazlar karmaşık ve pahalıdır.
- Yapıştırıcı bağ yüksek sıcaklık derecelerinden ve ısınma-soğuma döngüsünden olumsuz etkilendiği için, sahip olduğu taşıma gücü değerlerini koruması mümkün olmayabilir.

Bu olumsuz nedenlerden çoğunun kısmen veya büyük oranda, bazı ek detay önlemleri ve farklı formül ve katkı kullanımı ile üstesinden gelinmesi mümkündür; ancak bu yoldan maliyetin yükselmesi kaçınılmazdır. Dolayısı ile karar aşamasında maliyet-performans oranı dikkate alınmalıdır. Bu tekniğe mimar veya mühendisler açısından bakıldığında, mevcut olan en uyumlu, kolay uygulanabilen ve düşük maliyetli kombinasyonları bulmak önemlidir. Bu nedenle, betonarme elemanları yapıştırarak birleştirme uygulaması, bu isteklerin tümünü karşılayabilen bir güçlendirme tekniği olarak değerlendirilebilir.

Çelik lamaların epoksi reçinesi ile betonarme taşıyıcı sistem elemanlarına dış yüzeylerinden bağlanması tekniği, Avrupa'da 1960' lardan beri betonarme yapıların güçlendirilmesi ve elemanlarının onarılması işlemlerinde, etkin olarak kullanılmaktadır (Adin vd., 1993; Plecnic

vd., 1986). Literatür araştırmasında bu konunun farklı yönleri ile ele alındığı bir çok çalışmaya rastlanmıştır.

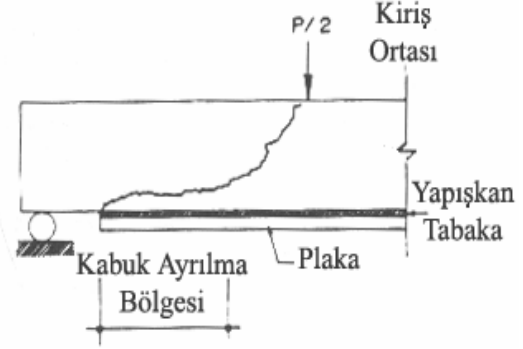
Van Gemert (1982), epoksi ile yapıştırılmış çelik lamalar ile güçlendirilmiş kirişin yük altındaki davranışlarını, zaman ve malzeme özellikleri açısından deneysel olarak incelemiştir; çalışmada kirişin çeşitli zaman periyodları ve farklı ortam koşulları altındaki çeliğin yorulması ve epoksinin yüksek ısı derecelerinden etkilenmesi olasılıkları araştırılmıştır.

Adhikary ve diğerleri (2000), yaptıkları çalışmada betonarme taşıyıcı sistemde, kirişlere dış yüzeylerinden yapıştırılan sürekli çelik lamaların, kesme gerilmesi mukavemetini önemli ölçüde artırdığını görmüşlerdir. Elde edilen bu mukavemet artışının, çelik lamaların kalınlık ve genişliğinin arttırılması ile orantılı olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Bu çalışmalar sonucu, çelik lama boyutları her defasında artırılarak güçlendirilen ve mukavemet artışları tespit edilen kirişlerin, normal kirişlere göre kesme mukavemetlerinde en fazla %84 oranında artış sağlanabilmiştir.

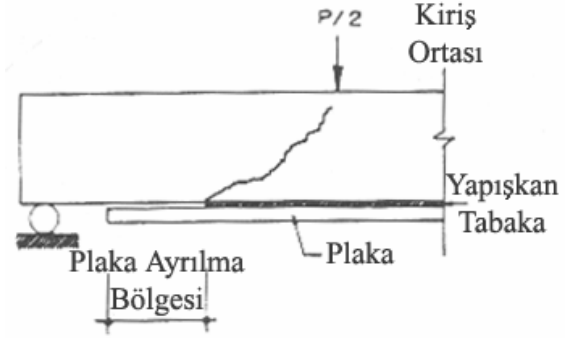
Ziraba ve Baluch (1995) güçlendirmede kullanılan şerit ve çelik lamaların formunun belirlenmesi için oransal yöntem öngören bir çalışma yapmışlardır. Betonarme elemanların güçlendirilmesi işlemlerinde, dış yüzeylere epoksi ile yapıştırılan lamaların malzemesi genellikle çeliktir. Son zamanlarda çeliğe alternatif olarak kullanılan malzemelerden biri, camlı takviyeli polimer şeritlerdir. Bu konuda da yapılmış bir çok çalışma vardır (Swamy vd., 1987). Lamalar gibi betonarme kirişin dış çekme gerilmesine maruz kalan yüzeyine yapıştırılan camlı takviyeli polimer şerit ve tabakaların sunduğu avantajlar, çelik lama kullanımı ile elde edilenlerle aynıdır. Bu çeşit malzemelerin yük altındaki davranışlarını, etkinliğini ve kullanılabilirliğini belirtmek için bir dizi deneysel çalışmanın sonucu sunulmuştur (Şekil 1, Şekil 2).

Yapıştırma lama tekniğinin uygulamada yoğun olarak kullanılmasına rağmen, epoksi ile bağlanan çelik lamalar ile takviye edilmiş taşıyıcı sistem elemanlarının davranışları yapım

sisteminin farklı detay noktalarında kullanılan malzemeler açısından tam olarak bilinmemektedir.



Şekil 1. Kabuk ayrılması ile başlayan yapıştırıcı tabakanın taşıma gücünün yüksek olduğu göçme davranışı



Şekil 2. Lama ayrılması ile başlayan yapıştırıcı tabaka taşıma gücünün düşük olduğu göçme davranışı

Yapıştırma tekniği hakkında yapılan yayınlarda elde edilen olumlu ve olumsuz sonuçlar aşağıda özetlenmiştir (Swamy vd., 1989):

- Bükülme ve eğilme çatlak genişliklerinde önemli azalmalar elde edilmiştir.
- Çelik lamalar, epoksi reçinesi ve betonarme elemandan oluşan güçlendirme sisteminin, her seviyedeki yüklemelerde kompozit davranış göstermesi, yapısal bütünlük açısından olumlu bir özelliktir.
- Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının, yük altında ve çeşitli deformasyon ve hasarlara maruz kaldığı durumlarda bile bu tekniği başarı ile uygulamak mümkündür.

## Materyal ve metod

Birinci bölümde belirtildiği gibi, bu çalışmada üzerinde durulan ana nokta, beton ile çelik lama arasında epoksi ile oluşturulan yapıştırıcı katmanın, fiziksel gereksinimler açısından başarısı ve etkili kullanımının sağlanmasıdır. Güçlendirme / birleştirme uygulaması yapılan betonarme elemanın, kendisini meydana getiren beton, demir donatı, çelik lama ve yapışmayı sağlayan epoksi tabakası ile bir bütün halinde kompozit bir davranış göstermesi beklenmektedir. Örneğin ısınma-soğuma döngüsü ile epoksi reçinesi sertleşirken, kimyasal reaksiyon sırasında çıkan yüksek ısı etkisiyle aynı zamanda betonda bozulmalar ve mukavemet kayıpları olmaktadır (El-Hawary ve Abdel-Fattah, 2000). Dolayısı ile oluşan yeni detayın kapsamındaki malzemelerin birbirleri ile oluşturdukları etkileşimin sonuçlarını değerlendirmek ve gerekli yerlerde uygun değişikliklere gidilerek başarıyı artırmak için, bunların fiziksel ve kısmen de kimyasal niteliklerini belirlemek ve değerlendirmek gerekmektedir.

## Yapı malzemesi olarak beton

Betonun yapı sistemi açısından en önemli niteliği taşıyıcılıktır. Taşıyıcılık fonksiyonunu yerine getirmesi, basınç kuvvetlerine karşı dirençli bir malzeme olmasına dayanır. Ancak aynı zamanda zayıf direnç gösterdikleri çekme kuvvetlerine karşı mukavemet, çelik donatı çubukları ile sağlanmaktadır. Betonarme yapı elemanının olumlu yönleri aşağıda sıralanmıştır;

- Çelik ile betonun arayüzeyinde oluşan yüksek aderanslı bağ sayesinde betonarme, kompozit özellikler gösterir,
- Beton, çeliğin korozyonuna sebep olabilecek çevresel etkilere karşı direnç gösterir,
- Beton ile çeliğin ısı karşısında etkilenmelerindeki benzerlik sebebi ile ısınma-soğuma döngüsü nedeniyle olumsuz bir duruma sebep olmaz,

Bu çalışmada betonarme taşıyıcılık özellikleri yanında, kullanılan güçlendirme elemanları olan epoksi ve çelik ile yük altında sergilediği performans değerleri ve davranışları açısından geniş olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda betonarme

elemanlar, güçlendirme uygulamasından sonra kompozit davranışlar göstermesi, göçme mekanizması ve sebeplerinin kontrol altında tutulması açısından değerlendirilmiştir.

## Epoksi reçinesi

Epoksi reçineleri, yüksek yapışma mukavemeti, düşük rötre miktarı, ısıl kararlılık, kısa kürlenme süresi ve uygulama sonrası derhal ve güvenle kullanıma başlanabilmesi gibi üstün mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında gittikçe artan oranda bir tüketime sahip olmuşlardır. Üstün yük taşıma kapasitesi ve kimyasal direnç gibi olumlu yönleri yanında alternatif malzemelere göre maliyetinin 3 ile 15 kat daha pahalı olmasına rağmen, uygun fiyat-performans oranı ile diğerlerinden ucuza gelmekte ve mühendislik uygulamaları için avantajlı ve güvenli sayılmaktadır (Swammy vd., 1989). Yapı elemanları sanayisinde kullanılan epoksi reçinesinin temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Özellikle beton ve çelik gibi önemli yapı malzemelerinde, çoğu metal alaşımları ve farklı özellikli katmanlar içeren malzemelerde, üstün bir yapışma performansı gösterir. Çok hassas veya özel bir takım uygulamalar için yüksek mukavemet değerlerini sağlama oranı ve işlenebilirlik kabiliyeti çok yüksektir.
- Her hangi bir süre sınırı olmadan, yaklaşık 150°C' ye varan sıcaklıklarda, işlem yapılabilme özelliğine sahiptir. Ancak 80°C den yüksek sıcaklık derecelerinde yapışkan bağın mukavemet değeri fark edilir miktarda azalır. Dolayısı ile beton ve diğer taşıyıcı sistem elemanlarına göre yangın sırasında oluşan yüksek sıcaklık karşısında ortaya koyduğu direnç oldukça yetersizdir.
- Asitlere, alkalilere ve diğer çoğu kimyasal maddelerin çoğuna karşı yüksek oranda direnç gösterebilme kabiliyetleri vardır. Ancak nitrik asit gibi yoğun olarak oksitleme özelliği olan kimyasallardan etkilenirler.
- Organik solventlere karşı direnci zayıftır.
- Yüksek olmayan sıcaklık derecelerinde, sıcaklık karşısındaki davranışları, beton ve çelik ile karşılaştırıldığında daha olumludur.
- Epoksi reçinelerinin kürlenme sürelerinde veya üretimleri esnasında, meydana gelen

kimyasal reaksiyon sonucunda kalıcı bir uçucu madde açığa çıkmadığı için insan sağlığı açısından basit önlemler çerçevesinde hiçbir mahsuru yoktur. Sertleşmiş epoksi tabakası ise bu bakımdan tamamen zararsızdır.

- Mahallinde yapılacak uygulamalarda, reçine ve katkılarının yeterli performansı sağlayabilmeleri için, uygulama yapılacak yüzeyler mutlaka kuru olmalı, ortam şartları ve nispi nem değerleri belirli sınırlar içinde kalmalıdır. Ayrıca reçinenin üreticisi olan firmanın sağladığı kılavuz doğrultusunda, kullanılacak epoksinin uygulanma koşullarına uygun olarak işlem yapılmalıdır.
- Epoksi reçinesi ile yapıştırma işleminde yüksek oranda başarı elde etmek için, yapıştırılacak yüzeye yüksek basınç uygulama gerekliliği yoktur. Sadece küçük bir baskı oluşturacak bir tutturma işlemi ile kür sonuna kadar sabit tutulması, iyi bir sonuç elde etmek için yeterli olmaktadır.
- Eğer yapıştırma uygulanacak yüzeyler iyi hazırlanmış ve ortamdaki nem oranı normal değerlerde ise, kürlenme işleminde oldukça az miktarda rötne oluşur.

Yapı taşıyıcı sisteminde kullanılan epoksi reçineleri, bu işlevlerine yönelik kimyasal formüller doğrultusunda üretilirler. Çok geniş bir kullanım alanı olmakla beraber epoksi reçineleri, yoğun olarak iki ana kategoride sınıflandırılır (Plecnic vd., 1986):

- Reçinenin tek başına veya harç katkısı ile beraber kaplama oluşturması şeklindeki uygulama; bu şekildeki uygulamalarda, betonu geçirimsiz hale getirmek ve dış etkilere karşı direncini artırmak amaçlanır. Aynı amaçla kullanılan diğer bir polimer ise poliüretandır.
- Agregata ve/veya çimento ile karıştırılarak beton üretiminde veya sertleşmiş beton üzerinde yapılacak onarım ve güçlendirme uygulamalarında kullanılır.

### **Çelik lama**

Bu çalışmada ve güçlendirme uygulamalarında kullanılan çelik lama, piyasadan standart kalitede temin edilebilen ve farklı kalınlıktaki

çelik tabakalardan istenilen boyutta kesilerek satılan bir malzemedir. Yapıştırma işleminde kullanılacak çelik lamalara ek işlem olarak sadece aderans artırmak amacıyla epoksi içeren astar boya uygulaması yapılmaktadır.

### **Uygulanan metodun ve amacın açıklanması**

Yapıştırılmalı birleşim içeren güçlendirme tekniklerinde, yeterli performansın garanti altına alınmasını, başka bir deyişle bu tekniğin uygulandığı betonarme elemanların yük altındaki davranışlarının önceden tahmin edilebilmesini sağlayan birkaç değişken vardır:

- Doğru işlem dizisinin seçimi,
- Doğru epoksi türünün seçimi,
- Uygulayıcının performansı.

Bu çalışmanın diğer bir amacı, ortaya konmuş hesap metodlarının hükümsüz kaldığı yukarıdaki ve bunun gibi bazı değişkenlerin deneyler kapsamında irdelenmesi ve sebep-sonuç ilişkisi kurmak sureti ile değişken sayısının ve/veya değişme oranının azalmasını sağlamaktır.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen sebepler çerçevesinde elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle sonuçlara ulaşılması planlanmış ve çelik lamanın epoksi reçinesi ile betonarme elemana dış yüzeylerinden yapıştırılması şeklinde uygulanan söz konusu tekniğin, bir güçlendirme ve bir de birleştirme detayında incelenerek başarılı bir uygulama için bazı prensiplerin deneysel olarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu bağlamda cevap aranan noktalar aşağıda verilmiştir:

- Güçlendirme ve birleştirme uygulamalarında bu tekniğin sağladığı verimin karşılaştırmalı olarak ortaya konulması; bu amaçla tek parça üretilmiş eleman ile çelik levhalar ile yapıştırılarak birleştirilmiş elemanların göçme yükleri ve yer değiştirme miktarlarının belirlenmesi, karşılaştırılması.
- Göçme mekanizmasının araştırılması ve sebeplerinin ortaya konularak yapıştırma şekilleri ve çelik lamaların verimli kullanımı açısından çözüm geliştirilmesi.

- Epoksinin, çelik ve betonla oluşturduğu bağın gerilme değerlerinin ayrı ayrı tespit edilmesi ve buna bağlı olarak elemanın kompozit davranış göstermesini temin ederek, minimum malzeme kullanımının denemesi.
- Güçlendirilen elemanın göçme yükü ve davranışlarının aynı koşullarda aynı sonuçları vermelerini sağlamak için işlem uygulama kriterlerinde bu duruma etki edebilecek noktaların tespiti ve mümkünse kontrol altına almak için çözüm geliştirilmesi.

### Değerlendirme kriterleri

Yukarıda belirtilen amaçlara ulaşma doğrultusunda yapılacak deneysel çalışmalar için üretilen deney modelleri aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilecektir:

- Göçme yükü – yer değiştirme ilişkisi; bu kriter deney modellerinin yük altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla tespit edilecektir. Eğilme deneyi cihazı ve komparatör kullanılarak, yüklenen modellerin göçme yükleri ve her yük seviyesindeki yer değiştirme miktarı, taşıma gücü, yük altında yavaş ve dengeli bir yer değiştirme hareketi, göçme hareketinin mümkün olduğunca yavaş olması ve göçtükten sonra da bir süre yük taşımaya devamın sağlanmasıdır. Ayrıca birleştirilmiş deney modelleri ve tek parça olarak üretilen mukayese modelinin sağladığı taşıma güçleri karşılaştırılmıştır.
- Çatlak oluşumu; göçme mekanizmasının başlamasına sebep olan çatlama sürecinin ve başlangıç noktasının belirlenmesi, elde edilen verilerle lama yerleşimi ve yapıştırma tekniğinin planlanmasıdır.
- Yüzey hazırlama teknikleri; yapıştırma işleminde elde edilmesi öngörülen yeterli ve standart taşıma gücüne, yüzey pürüzlerinin ve hazırlama işlemlerinin etkisinin belirlenmesidir.
- Elde edilen sonuçlar, betonarme yüzeye epoksi reçinesi kullanılarak yapıştırılan çelik lama ile güçlendirme tekniğinden, optimum malzeme kullanılarak yüksek performans elde edilmesi amacıyla işlem ve malzemelerin verimli kullanımına ilişkin bir takım sonuçları ve işlem önerilerini ortaya koymaktadır.

### Deneysel çalışmalar

Bu çalışmanın kapsamındaki tüm deneyler, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nın mevcut olanakları ile yapılmıştır. Çalışmanın deney programı, literatürde çelik lamaların dış yüzeylerinden yapıştırılması ile güçlendirilen çeşitli betonarme elemanları konu alan çalışmalarda yapılan deneyler, deney teknikleri deney örneği üretim kriterleri ve standartlarını referans alarak geliştirilmiştir.

Yapılan pilot deneylerle elde edilen veriler değerlendirilerek ana deneyler planlanmıştır. Bu kapsamda 100x150x750mm boyutlarındaki deney elemanlarının her iki adetinin yatay olarak ve çeşitli uygulama değişkenleri kullanarak birleştirilmesi ile 100150x1500mm boyutlarında kiriş modelleri oluşturulmuştur. Çelik lama boyutları, yapıştırma bölgeleri ve yapıştırılan tarafların yüzey koşulları deney değişken girdileri olarak, betonarme elemanların taşıma güçleri ise sabit değer olarak kabul edilmiştir.

Çelik lama boyutlarının yapıştırma birleşimlerin taşıma gücüne etkisini belirlemek için lama miktarı her bir deney modelinde artırılmıştır. Ayrıca aynı yapıştırma şekli ile üretilen modellerde, farklı kalınlıkta lamaların kullanımı ile lama boyutlarındaki değişimin etkisi eğilme deneyi düzeneğinde karşılaştırma yöntemi ile araştırılmıştır. Her yükleme seviyesinde oluşan yer değiştirme miktarı komparatör cihazından okunarak kaydedilmiştir. Bu sayede deney modellerinin yük altındaki davranışları detaylı olarak yorumlanmıştır. Yapışan taraflar arasındaki aderansın modelin taşıma gücüne etkisini ve başarılı bir yapışma için kriterlerin belirlenmesi için farklı yüzey koşullarına sahip betonarme elemanlara yapıştırılan çelik lamalar ile oluşturulan sisteme çekme-koparma testi uygulanmıştır (Tablo 1, Şekil 3).

Deneysel ortam koşulları, uygulanan tekniğin malzeme özelliklerine ve şantiyede uygulanabilme amacına bağlı olarak +5<sup>0</sup>C'nin üzerindeki normal ortam koşulları olarak kabul edilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan epoksi reçinesinin standart mukavemetini tespit etmek için 50mm çapındaki çelik başlık, geniş yüzeyli çelik bir

Tablo 1. Çelik lamaların betonarme yüzey ile oluşturdukları aderans değerleri

| Malzeme        | Yapıştırılan Yüzey Koşulları                     | Ortalama Kopma Değeri  |
|----------------|--|------------------------|
| Çelik lama (1) | Hazırlanmamış betonarme yüzey                    | 1.73 N/mm <sup>2</sup> |
| Çelik lama (2) | Basınçlı hava ve tel fırça ile hazırlanmış yüzey | 2.18 N/mm <sup>2</sup> |
| Çelik lama (3) | Yüzey Hazırlığı + az miktarda pürüzlendirme      | 1.93 N/mm <sup>2</sup> |
| Çelik lama (4) | Yüzey Hazırlığı + çok miktarda pürüzlendirme     | 1.70 N/mm <sup>2</sup> |

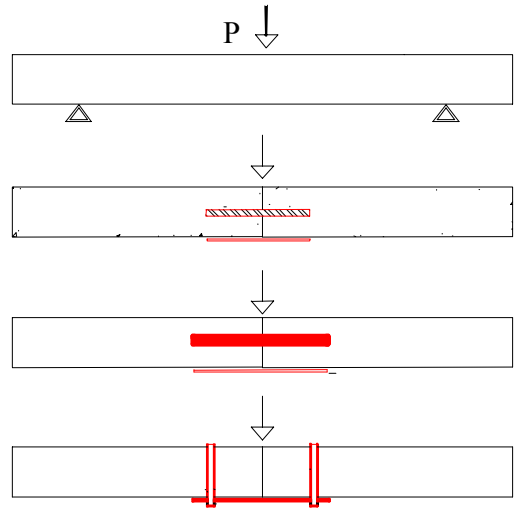


Şekil 3. Çekme-koparma deneyi

levhaya yapıştırılarak çekme deneyi uygulanmıştır (TS EN 12188). Epoksi reçinesi ve sertleştirici malzemenin karışım oranı 2:1 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, malzemeyi temin eden firmanın tavsiyesi doğrultusunda belirlenmiştir. Yapılan pilot deneylerde epoksi reçinesinin oluşturduğu bağın yaklaşık sekiz saat sonra el ile hissedilen sertleşmeye ulaştığı, yaklaşık 24 saat sonra ise en yüksek taşıma gücü değerini sağladığı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında aşağıda tanımlanan örnekler üretilmiştir (Şekil 4):

- 100x150x1500mm boyutlarında betonarme kiriş modeli olarak üretilmiş 2 adet deney mukayese örneği.
- 100x150x750mm boyutlarında 2 adet birim modelin, 40 ve 50cm uzunluğundaki çelik lamalar kullanılarak birleştirilmesi ile üretilmiş 3 adet deney örneği.
- 100x150x75mm boyutlarında 2 elemanlı modelin, 40 ve 50cm uzunluğunda ve iki farklı kalınlıkta lama kullanılarak birleştirilmesi ile 3 adet üretilmiş deney örneği.

- 100x150x75mm boyutlarında 2 elemanlı modelin, 40 ve 50cm uzunluğunda ve iki farklı kalınlıkta lama kullanılarak birleştirilmesi ile üretilmiş 2 adet deney örneği.



Şekil 4. Deney modelleri

## Sonuçlar

Deneysel sonuçlardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı sonuç ve değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

Yapılan deneylerde birleşim elemanı olarak, ülkemizde temin kolaylığı nedeniyle çelik lamalar seçilmiş ve bunların etkinliği araştırılmıştır. Benzer uygulamalar elyaf türü malzemeler içeren elemanlarla da yapılmaktadır. Bu doğrultudaki deneyler başka bir çalışmanın konusu olabilir.

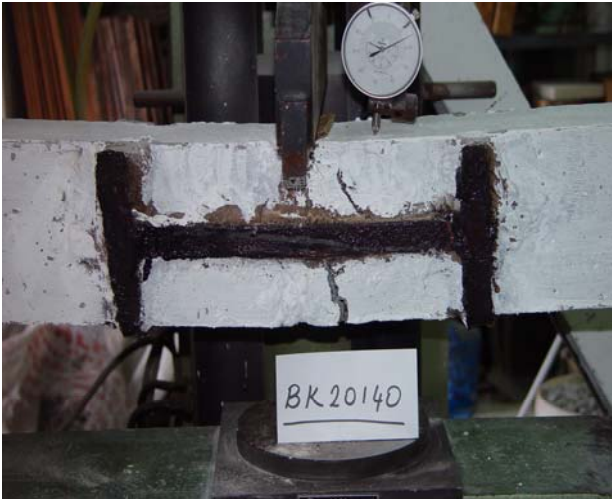
İki farklı deney örneğinden elde edilen sonuçların karşılaştırma modeli ile mukayese edilmesi sonucunda, epoksi reçinesi ile yapıştırılmış çelik lamalarla birleştirilen ideal kiriş ve çerçeve



köşesi modellerinin, yük altında yüksek oranda kompozit davranış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 5 ve 6). Eğilme ve çekme mukavemet değerlerinde belirgin artış kaydedilmiştir (Şekil 7).



Şekil 5. Karşılaştırma modeli ve deney düzeneği

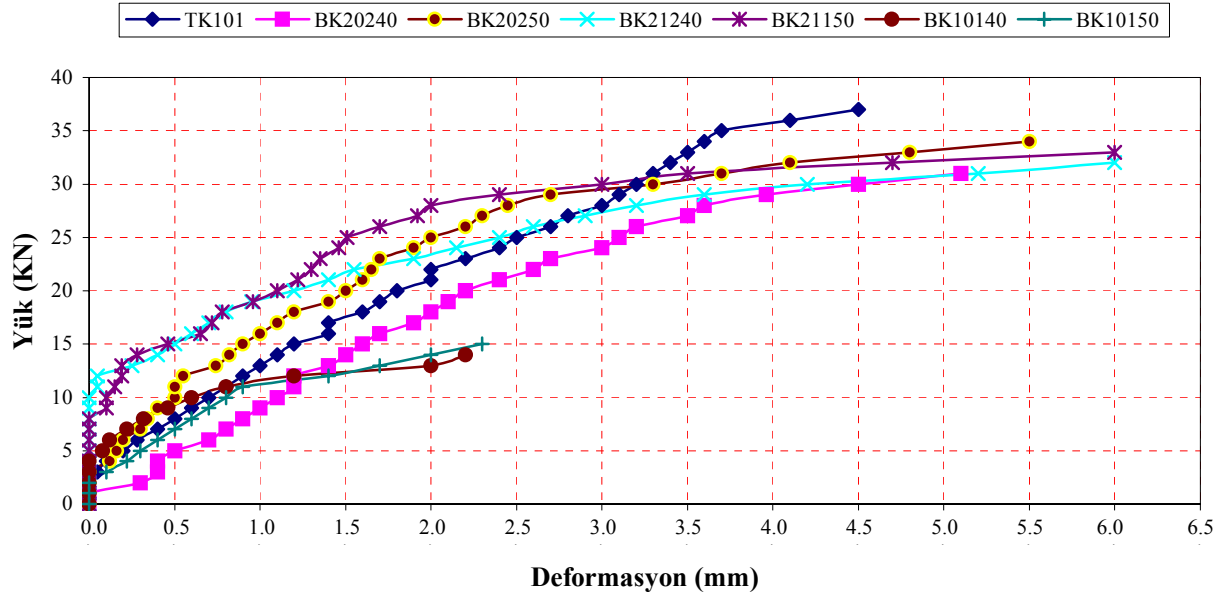


Şekil 6. Paspayı bölgesi ve lama ayrılmasının beraber meydana geldiği ideal göçme oluşum

Esnek epoksi sistemi sayesinde yapışkan tabaka, göçme mekanizmasının son adımına kadar çatlamaz. Bu özelliği, hem beton ile çelik arasında gerilme transferi sağlayarak sistemin göçmesini geciktirir, hem de kompozit sistemin yapısal direncine katkı sağlar. Uygun epoksi sistemi kullanılarak ve önerilen işlem kriterlerine bağlı kalarak yapılan her uygulamada potansiyel göçme davranışı kesinlikle yapışkan tabakadan başlamamaktadır. Göçme mekanizması yüksek oranda paspayı bölgesinin mukavemetine ve

donatı çeliği ile var olan aderans seviyesine bağlıdır. Yapışkan yüzeylerde temizlik yapılması ve pürüzlerin aderansa etkisini tespit etmek için betonarme elemanların yüzeyleri, iki kademeli olarak pürüzlendirilmiş, pürüzlendirilmemiş ve temizlenmemiş durumlarda, epoksi reçinesi ile yapıştırılan 50x50 çelik lamalar ile çekme-koparma deneyi yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur (Tablo 1). Aşırı pürüzlendirmemek şartı ile yüzey hazırlığının (yüzeyi toz, nem ve zayıf parçalardan arındırma işlemi) aderans değerine etkisi, tüm yapıştırma işlemlerinde olduğu gibi, yararlı olduğu tespit edilmiştir.

Çelik lama yüzey özelliklerinin etkisi ise, yüzeyine epoksi boyası ile astar uygulanan çelik lamalarda kopma şekillerinin tümü pas payı kısmının kopması şeklinde oluşmuştur. Deneylerde kullanılan beton kalitesi BS25 olarak tespit edildiğinden, yapışkan bağın paspayı bölgesinden daha yüksek taşıma gücüne sahip olması aderans seviyesinin yeterli olduğuna işaret etmektedir. Pürüzlendirmenin aderansa etkisi; bu tür yapıştırma şeklinde mekanik yapışma teorisi geçerli olmamıştır. Bunun nedeni epoksi reçinesinin pürüzlü yüzeyin her noktasını tam olarak ıslatamamasıdır. Bu sonucun dayanakları, çekme-koparma testinden elde edilen gözlemler ve düz yüzeyden elde edilen aderans değerlerinin karşılaştırılmasıdır. Dolayısı ile işlem yapılacak yüzeylerde sadece el aletleri ile yüzey temizliği yapmanın yeterli olduğu çekme-koparma testi sonuçları ile ortaya konmaktadır. Bu çalışmada elde edilen veriler; doğru şekilde uygulanan bağlama-yapıştırma işlemine dayalı güçlendirme sisteminin, normal şartlarda güvenilir ve dengeli sonuç sağlaması, taşıyıcılık bütünlüğünü kontrol altında tutabilmesi, diğer bir deyişle, aynı malzemelerle aynı mukavemet ve boyuttaki betonarme elemanları, aynı işlem dizisi uygulanan bu teknik ile aynı performans ve sonuç elde edilebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum aynı zamanda her yükleme seviyesinde basit mühendislik kuralları için veri oluşturabilir. Dolayısı ile bu yöntem, işlem kriterlerine bağlı kalındığında, betonarme taşıyıcı sistem güçlendirme ve birleştirme uygulamaları için basit malzeme, işlem ve ekipmanlar ile uygulanabilen yeterli, etkili ve ekonomik bir seçenek olarak kabul edilebilir.



Şekil 7. Deney modellerinin taşıma güçlerinin karşılaştırılması

## Teşekkür

Çalışmanın deneysel kısmında kullanılan malzemeler İzomas A.Ş. tarafından temin edilmiştir.

## Kaynaklar

Adhikary, B. B., Mutsuyoshi H. ve Sano M., (2000). Shear Strengthening of Reinforced Beams Using Steel Plates Bonded on Beam Web: Experiments and analysis, *Construction and Building Materials*, **14**, 237-244.

Adin, M. A., Yankelevsky, D. Z. ve Farhey, D. L., (1993). Cyclic Behaviour of Epoxy - Repaired Reinforced Concrete Beam - Column Joints, *ACI Structural Journal*, 170-179.

El-hawary, M. ve Abdel-Fattah H., (2000). Temperature Effect on the Mechanical Behaviour of Resin Concrete, *Construction and Building Materials*, **14**, 317-323.

Fukuyama, K., Higashibata, Y. ve Miyauchi, Y., (2000). Studies on Repair and Strengthening Methods of Damaged Reinforced Concrete Columns, *Cement & Concrete Composites*, **22**, 81-88.

Özgen, K., (1990). Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Sistem Hasarları, Onarım ve Güçlendirme, *Yapı Dergisi*, İstanbul, **116**, 50-54.

Plecnic, J. M., Gaul, R. W., Pham, M., Cousins, T. ve Howard, J., (1986). Epoxy Penetration, *Concrete International, Design & Construction*, **8**, 2, 46-50.

Swamy, R. N., Jones R. ve Bloxham J. W., (1987). Structural Behaviour of Reinforced Concrete

Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates, *Structural Engineer London, Part A*, **65A**, 2, 59-8.

Swamy, R. N., Jones R. ve Charif, A., (1989). The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams, *The Structural Engineer*, **67**, 3/7, 45-49.

Van Gemert, D. A., (1982). Repairing of Concrete Structures by Externally Bonded Steel Plates”, *Plastics in Material and Structural Engineering*, Richard A. Bares, Ed. Elsevier Scientific Publishing, New York, 519-526.

Mouton, Y., (1999). Some Thoughts About Gluing and its Applications in Construction, *Second International RILEM Symposium on Adhesion Between Polymers and Concrete*, Part 1, 3-9

TS EN 12188 (1999). Beton Yapılar – Koruma ve Tamir İçin Mamul ve Sistemler – Deney Metotları – Yapıda Kullanılan Yapıştırma Maddelerinin Özelliklerinin, Çeliğin Çeliğe Yapıştırılması Metoduyla Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Ziraba, Y. N. ve Baluch M. H., (1995). Computational Model for Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates, *Finite Elements in Analysis and Design*, **20**, 253-271.