

T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CTP MALZEMESİNİN YAPISAL  
STRÜKTÜRLERDE KULLANILMASINA  
YÖNELİK SORUNLAR VE STRÜKTÜREL  
DAVRANIŞININ İRDELENMESİ

Alper Tolga ARIKAN  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MİMARLIK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI  
Yrd. Doç. Dr. V. Atilla ÖVEN

GEBZE  
2004

## ÖZET

Cam elyaf takviyeli plastik kompozitler (CTP), inşaat, otomotiv, gemi inşaat sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. CTP'nin inşaat sektöründeki kullanımları yapısal olmayan veya yardımcı yapısal elemanlarla kısıtlı kalmaktadır. Günümüzde, CTP'nin inşaat sektöründe yapısal kullanımlarına yönelik deneysel ve teorik araştırmalar hız kazanmaktadır. Tezde, CTP kompozitlerin yapısal eleman olarak kullanımının önündeki en büyük engel olan düşük elastisite modülünün iyileştirilmesi yönünde yapı strüktürlerinde kullanılabilecek yeni bir CTP kompozitin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

CTP'nin yapı mühendisliğini ilgilendiren nitelikleri ayrıntılı olarak tartışılmış ve mevcut üretim teknikleri anlatılmıştır. CTP'nin yardımcı malzeme ve kendi başına taşıyıcı eleman olarak kullanıldığı inşaat mühendisliği uygulamalarının literatür çalışması değerlendirilmektedir.

Önerilen çelik tel örgü ile takviye edilmiş CTP taşıyıcı elemanların strüktürel analizi için gerekli olan ve yapısal davranışını iyileştirecek mekanik özellikleri (çekme, eğilme mukavemetleri ve elastisite modülleri), deneysel olarak belirlenmektedir.

Daha sonra, yeni kompozit CTP'nin mekanik özelliklerini kullanarak, bir toplu konut taşıyıcı modülün optimal boyutları, sonlu elemanlar analizi kullanarak belirlenmektedir.

## SUMMARY

Glass fibre reinforced plastics (GRP), are frequently used in automotive and marine structure industries. Their use in building industry is however, restricted to sub-structural and non-structural elements. Recently, experimental and theoretical studies on GRP are becoming increasingly popular.

The main purpose of the thesis is to improve the low modulus of elasticity of GRP composites, which inhibits the use of this material in structural engineering applications. Different mechanical properties of GRP related to the construction industry have been discussed, and existing production processes are described in detail. A literature review on published articles regarding the sub-structural and structural applications of GRP on construction industry is presented. In an attempt to improve GRP's modulus of elasticity, mechanical properties of a novel form of steel mesh reinforced GRP are determined, using tensile and flexure tests on standard ASTM specimens. Finally, using a standard finite element package, the optimal dimensions of a modular GRP residential structural unit, suitable for mass production are proposed.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince, beni anlayıp sabır gösterdiği, bilgisi ve tecrübesiyle yolumu aydınlattığı için değerli hocam Yrd. Doç Dr. V.Atilla ÖVEN'e, deney çalışmaları sırasında sağladıkları olanak ve destekleri için Şişecam Camelyaf A.Ş'ye ve çalışanlarına, başta Geliştirme Müdürü Sn. Fersen KINAYYİĞİT'e, Geliştirme Uzmanları Sn. Dr. Aref JAVAHERIAN, Sn. Sevinç ERDOĞAN'a ve Sn. Mimar Ali ÇAMURDAN'a ve beni ben yapan en değerli varlığım aileme teşekkürü borç bilirim.

Ocak 2004,

A. Tolga ARIKAN.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                     | Sayfa    |
|-----------------------------------------------------|----------|
| ÖZET                                                | iv       |
| SUMMARY                                             | v        |
| TEŞEKKÜR                                            | vi       |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                  | vii      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                     | x        |
| TABLOLAR DİZİNİ                                     | xv       |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                     | <b>1</b> |
| 1.1 Taşıyıcı Sistemlerde CTP Kullanımının Tarihçesi | 1        |
| 1.2 Problem                                         | 2        |
| 1.3 Önem                                            | 4        |
| Amaç ve Sınırlılıklar                               | 5        |
| <b>2. CTP SINIFLARI VE ÜRETİM TEKNİKLERİ</b>        | <b>7</b> |
| 2.1 Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler             | 8        |
| 2.1.1 Bağlayıcılar                                  | 8        |
| 2.1.1.1 Polyester ve Vinil Ester Reçineler          | 11       |
| 2.1.1.2 Epoksi Reçineler                            | 12       |
| 2.1.1.3 Bismaleimide Reçineler (BMI)                | 12       |
| 2.1.1.4 Polymide Reçineler                          | 12       |
| 2.1.1.5 Diğer Termoset Reçineler                    | 12       |
| 2.1.1.6 Termoplastik Reçineler                      | 13       |
| 2.1.2 Elyafar                                       | 14       |
| 2.1.2.1 Cam Elyafarı                                | 15       |
| 2.1.2.2 Karbon Elyafarı                             | 15       |
| 2.1.2.3 Aramid Elyafarı                             | 16       |

|           |                                                                      |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.2.4   | Boron Elyafı                                                         | 16        |
| 2.2       | Cam Elyafı Takviyeli Plastik Kompozitler (CTP)                       | 17        |
| 2.2.1     | Cam Elyaf Türleri                                                    | 18        |
| 2.2.2     | CTP Kalıplama Yöntemleri                                             | 23        |
| 2.2.2.1   | El Yatırması Yöntemi                                                 | 24        |
| 2.2.2.2   | Püskürtme Yöntemi                                                    | 25        |
| 2.2.2.3   | Reçine Enjeksiyonu Yöntemi REY (RTM)                                 | 27        |
| 2.2.2.4   | Soğuk Pres Yöntemi                                                   | 28        |
| 2.2.2.5   | Elyaf Sarma Yöntemi                                                  | 29        |
| 2.2.2.6   | Savurma Döküm Yöntemi                                                | 31        |
| 2.2.2.7   | Profil Çekme Yöntemi                                                 | 32        |
| 2.2.2.8   | Devamlı Levha Üretim Yöntemi                                         | 35        |
| 2.2.2.9   | Hazır Kalıp Bileşimleri (HKB)                                        | 36        |
| 2.3       | Yapı Mühendisliği Kararlarının Alınması                              | 38        |
| <b>3.</b> | <b>LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b>                                         | <b>43</b> |
| 3.1       | CTP'nin Yapısal Eleman Olarak Kullanımı Hakkında Çalışmalar          | 43        |
| 3.2       | CTP'nin Yardımcı Yapısal Eleman Olarak Kullanımı Hakkında Çalışmalar | 50        |
| 3.3       | CTP'nin Bünyesel Özellikleri Hakkında Çalışmalar                     | 54        |
| 3.4       | CTP'nin İnşaat Sektöründe Kullanım Uygulamaları                      | 56        |
| <b>4.</b> | <b>DENEYSEL ÇALIŞMA</b>                                              | <b>63</b> |
| 4.1       | Deney Numuneleri                                                     | 63        |
| 4.2       | Deney Tekniği                                                        | 70        |
| 4.3       | Deney Sonuçları                                                      | 75        |
| 4.4       | Deney Sonuçları Değerlendirmesi                                      | 88        |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. TOPLU KONUT İÇİN ENDÜSTRİYEL TASARIM</b>                            | <b>94</b>  |
| 5.1. Toplu Konut Uygulaması İçin Modül Boyutunun Seçimi                   | 94         |
| 5.2. Mimari Kriterlere Göre Taşıyıcı Sistem Ön Kararlarının Oluşturulması | 100        |
| 5.3. Esnek Mimari Plan Tiplerinin Geliştirilmesi                          | 106        |
| <b>6. TAŞIYICI SİSTEM ANALİZLERİ</b>                                      | <b>109</b> |
| 6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi                                              | 109        |
| 6.2. Modelin Oluşturulması                                                | 112        |
| 6.3. Analiz Bulguları                                                     | 113        |
| 6.4. Sistem Optimizasyonu                                                 | 124        |
| <b>7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR</b>                                       | <b>135</b> |
| 7.1. Genel Değerlendirme                                                  | 135        |
| 7.2. Gelecekteki Çalışmalar                                               | 136        |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                          | <b>137</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                           | <b>141</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| Şekil                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. Cam elyaf tipleri                                                             | 22    |
| 2.2. Cam elyafı tiplerinin kompozitlere sağladıkları takviye yönlenmeleri          | 23    |
| 2.3. Püskürtme yöntemi uygulaması                                                  | 26    |
| 2.4. Reçine enjeksiyonu uygulaması                                                 | 28    |
| 2.5. Soğuk pres uygulaması                                                         | 29    |
| 2.6. Elyaf sarma yöntemi makina ekipmanları                                        | 31    |
| 2.7. Profil çekme yöntemi ile kalıplanan profiller                                 | 32    |
| 2.8. Profil çekme yönteminde kullanılan makina şeması                              | 33    |
| 2.9. Profil çekme yöntemi ile üretilen bazı ürünlerin yapı sektöründe uygulamaları | 34    |
| 2.10. CTP şeffaf levha uygulaması                                                  | 36    |
| 2.11. HKB pestil ve hamurlar                                                       | 37    |
| 2.12. HKB üretim proses ve ekipmanları                                             | 37    |
| 2.13. Betonarme, çelik ve CTP strüktür detayları                                   | 40    |
| 3.1. Sektörlere göre Dünya’da CTP kullanımı                                        | 57    |
| 3.2. CTP banyo üniteleri                                                           | 58    |
| 3.3. Kaset döşeme kalıp uygulaması                                                 | 59    |
| 3.4. CTP köprü tabliyesi ve çatı makası uygulamaları                               | 60    |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5. CTP ve aramid fiber askı elemanlardan yapılmış Aberfeldy yürüyüş köprüsü                               | 61 |
| 3.6. CTP betonarme donatı uygulaması                                                                        | 62 |
| 4.1. Numuneleri takviye etmekte kullanılan paslanmaz çelik hasır örgüler                                    | 65 |
| 4.2. ASTM D638, D790 numune kesiti ve içerdiği Ø0.30mm tel ve 0.60mm gözenek ölçülerindeki boyuna tel adedi | 66 |
| 4.3. Cam elyaf keçe ve malzemelerin tartılarak kalıplamaya hazırlanışı                                      | 67 |
| 4.4. Lamine levha kalıp kesiti                                                                              | 67 |
| 4.5. Numune CTP lamine kompozitlerin laboratuvar ortamında hazırlanışı                                      | 68 |
| 4.6. ASTM D638 çekme ve ASTM D790 eğilme numune boyutları                                                   | 68 |
| 4.7. ASTM D638 Çekme numuneleri                                                                             | 69 |
| 4.8. ASTM D790 Eğilme numuneleri                                                                            | 70 |
| 4.9. Deney düzeneği                                                                                         | 72 |
| 4.10. Eğilme deneyi                                                                                         | 73 |
| 4.11. Eğilme deney şeması                                                                                   | 73 |
| 4.12. Çekme deneyi                                                                                          | 74 |
| 4.13. Çelik takviyesiz eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri                                   | 77 |
| 4.14. %2 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri                                 | 78 |
| 4.15. %2.5 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri                               | 79 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.16. %3.5 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri        | 80  |
| 4.17. %4 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri          | 81  |
| 4.18. Çelik takviyesiz çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri      | 82  |
| 4.19. %2 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri    | 83  |
| 4.20. %2.55 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri | 84  |
| 4.21. %3.5 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri  | 85  |
| 4.22. %4 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri    | 86  |
| 4.23. Eğilme numuneleri kuvvet-deformasyon eğrileri karşılaştırması                  | 90  |
| 4.24. Çekme numuneleri gerilme-birim deformasyon eğrileri karşılaştırması            | 91  |
| 5.1. DİE 2000 genel nüfus sayımına göre hane halkı istatistiki değerlendirmesi       | 96  |
| 5.2. Mimari modül seçiminde değerlendirilen geometrik formlar                        | 97  |
| 5.3. Geometrik formlar ile oluşturulan modüler sistemler                             | 98  |
| 5.4. Mimari planlamada kullanılan altıgen form boyutları ve iç aks sistemi           | 99  |
| 5.5. Altıgen modüllerin eklenerek konutların büyüme olanakları                       | 99  |
| 5.6.a. Döşeme kalıp planı örnek 1                                                    | 101 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6.b. Döşeme kalıp planı örnek 2                                               | 102 |
| 5.6.c. Döşeme kalıp planı örnek 3                                               | 102 |
| 5.7. CTP strüktür kolon-döşeme birleşim detayı                                  | 103 |
| 5.8. CTP strüktür kurulum şeması ve taşıyıcı eleman parçaları                   | 104 |
| 5.9. CTP strüktür sistem detayı                                                 | 105 |
| 5.10. Çok katlı CTP strüktür yapı modeli                                        | 106 |
| 5.11. Altıgen form ile oluşturulabilen bina tipi örnekleri                      | 107 |
| 5.12. CTP strüktür ile inşa edilecek çok katlı konut mimari plan alternatifleri | 108 |
| 6.1. Yüzey elemanlar ile oluşturulan sonlu elemanlar döşeme modeli              | 112 |
| 6.2. Döşeme üst plaka düşey deplasman kontur grafiği (m)                        | 115 |
| 6.3. Döşeme üst plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği               | 116 |
| 6.4. Döşeme üst plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği              | 117 |
| 6.5. Bal peteği rijitleştirici düşey deplasman kontur grafiği                   | 118 |
| 6.6. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği      | 119 |
| 6.7. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği     | 120 |
| 6.8. Döşeme alt plaka düşey deplasman kontur grafiği                            | 121 |
| 6.9. Döşeme alt plaka maksimum normal kuvvet çekme kontur grafiği               | 122 |
| 6.10. Döşeme alt plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği             | 123 |
| 6.11. Döşeme kalıp planı alternatifleri                                         | 124 |
| 6.12. Döşeme üst plaka düşey deplasman kontur grafiği                           | 126 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.13. Döşeme üst plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği           | 127 |
| 6.14. Döşeme üst plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği          | 128 |
| 6.15. Bal peteği rijitleştirici düşey deplasman kontur grafiği               | 129 |
| 6.16. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği  | 130 |
| 6.17. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği | 131 |
| 6.18. Döşeme alt plaka düşey deplasman kontur grafiği                        | 132 |
| 6.19. Döşeme alt plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği           | 133 |
| 6.20. Döşeme alt plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği          | 134 |

## TABLOLAR DİZİNİ

| Tablo                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. Başlıca termoplastikler ve termosetplastikler                                                            | 9     |
| 2.2. Sıklıkla kullanılan bağlayıcı plastiklerin mekanik özellikleri                                           | 10    |
| 2.3. Bağlayıcı birim fiyatları                                                                                | 11    |
| 2.4. Tipik elyafların mekanik özellikleri ve maliyetleri                                                      | 15    |
| 2.5. Cam elyafı takviyeli plastiklerin mekanik özellikleri                                                    | 18    |
| 2.6. Cam elyaf türleri ve özellikleri                                                                         | 19    |
| 2.7. Bazı cam elyaf türleri ve kompozisyonları                                                                | 20    |
| 2.8. Bazı cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri                                                            | 20    |
| 2.9. Takviye miktarı ve kalıplama şekline göre oluşan mekanik özellikler                                      | 24    |
| 2.10. Betonarme, çelik ve CTP malzeme özellikleri                                                             | 39    |
| 2.11. Betonarme, çelik ve CTP strüktür analiz sonuçları                                                       | 41    |
| 4.1. Numunelerin takviyesinde kullanılan çelik hasır çeşitleri                                                | 65    |
| 4.2. ASTM D790 eğilme numuneleri deney sonuçları                                                              | 87    |
| 4.3. ASTM D638 çekme numuneleri deney sonuçları                                                               | 88    |
| 4.4. Deney sonuçları karşılaştırmaları                                                                        | 92    |
| 5.1. DİE 2000 genel nüfus sayımına göre “Hane halkı büyüklüğü ve konutun oda sayısına göre hane halkı sayısı” | 95    |
| 6.1. Sonlu elemanlar doğrusal analiz bulguları                                                                | 114   |
| 6.2. Sonlu elemanlar doğrusal analiz bulguları                                                                | 125   |

# 1. GİRİŞ

## Taşıyıcı Sistemlerde CTP Kullanımının Tarihçesi

Tarihte cam elyafının ilk kez Fenikeliler ve Mısırlılar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. O zamanlarda, elyaflar, cam çubukların ısıtılması sonucunda yumuşatılarak akıtılması ile elde edilmekteydi. Kullanım alanı ise takviye amaçlıydı ve çanak, çömlek, amfora gibi ürünlerin sağlamlaştırılması için kullanılmaktaydı [Watson, 1989].

Günümüzde bilinen cam elyafının geliştirilmesi, 1930'lu yılların sonlarına doğru başarılmıştır. 1940'lı yıllardan bu yana, farklı cam elyafı tipleri plastiklerin takviyesi için kullanılmaktadır. Bu şekilde, plastiklerin çekme, eğilme mukavemetleri ve rijitliği tanımlayan elastisite modülü gibi mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

İkinci Dünya savaşı yıllarında ülkeler yeni sentetik malzemelerin geliştirilmesi ve mevcut plastiklere yeni kullanım alanları bulunması konularına yönelmiştir. Doğal kauçuk, alüminyum, pirinç ve bakır gibi kritik metallerin yerini alabilecek sentetik ikame malzemeleri bulmak ve uçakların hafifletilmesi sonucu manevra yeteneklerini arttırmak amaçlanmaktaydı. Özellikle takviyeli plastikler, savaş endüstrisine, uçak camından, motor parçasına, tıbbi malzemelerden, radar antenine kadar her türlü üründe üstün mekanik özelliklerinin sağladıkları avantajlarla hizmet vermişlerdir.

Dünya Savaşı'ndan sonra plastikler sivil ihtiyaçlara yönelmiştir. Özellikle sulama borularında, tekne gövdelerinde, ambalaj sanayii ve ev içi kullanımlarda plastik önemli bir malzeme olmuştur [Anonim, 1993].

Yakın zamanda, plastik kompozit teknolojisinin gelişimiyle başta havacılık, otomotiv ve denizcilik, olmak üzere pek çok ana sektörde vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Ancak inşaat sektöründe kullanımı göreceli olarak kısıtlı kalmıştır.

CTP'nin bu sektördeki kullanımı sadece dekoratif amaçlı, taşıyıcı olmayan yapı elemanları ile sınırlanmaktadır.

İlk uygulamalar boru, tesisat ve bağlantı elemanlarında gerçekleşmiştir. Daha sonra yüksek mekanik özellikleri ve anti korozyon yapıları sayesinde cephe kaplama panellerinde, depolama tanklarında, prefabrike geçici konut elemanlarında, beton kalıplarında ve şehir mobilyalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

1980'lerden bu yana malzemenin üretim tekniğinde gözlemlenen maliyet düşüşü ile CTP'nin binalarda yapısal yük taşıyan bir malzeme olarak kullanılma fikri mümkün olmuştur. Ancak bu fikir klasik betonarme elemanlarda çeliğin yerini alacak yeni bir yapı malzemesi ya da takviye fibresi olmasından öteye gidememiştir. Bu tür uygulamalarda, betonun ilkel bir yapı elemanı olması nedeniyle, CTP'nin bu malzeme ile birlikte kullanımı üstün niteliklerinin maalesef ön plana çıkamamasına ve yapı endüstrisinde yeterince bilinmemesine yol açmıştır. Böylece kullanımı toprak altı ve nemli ortam yapılarında yüksek korozyon dayanımı sağlayan CTP takviye çubukları ile sınırlı kalmıştır. Ancak son yıllarda, çok sınırlı da olsa, CTP'nin kendi başına bir taşıyıcı yapı malzemesi olarak kullanımı, çatı makası ve köprü tabliye kirişleri olarak uygulamaları rapor edilmektedir [Burgoyne, 1999].

Anlaşılmaktadır ki, CTP'nin inşaat sektöründe kullanımı büyük bir potansiyel gösterse de yapısal eleman olarak kullanımı henüz çok yeni bir konu olup, ciddi araştırma ve deneysel çalışmalara ihtiyaç göstermektedir. [Turvey, 1997]

## **Problem**

Bir yüzyıldan uzun süredir kullanılan çelik ve betonarme strüktürler artık toplumun çoğunluğu tarafından benimsenmiş birer yapı sistemleri haline almışlardır. Ancak, bu sistemlerin zamanla değişen ihtiyaçları tam olarak karşılayamadıkları görülmektedir. Türkiye'de, yaşam standartlarının yükselmesi nüfus artışını hızlandırmıştır. Konut sayısı artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılayamadığı gibi, konut edinme maliyetleri mevcut gelir seviyelerine göre oldukça yüksektir. Bunun yanı sıra geniş toplum kitlelerini etkileyen büyük depremlerin yaşandığı Türkiye'de,

konutlarını yitiren nüfusun kısa sürede kalıcı ve sağlıklı konut edindirilmesi, kısa sürede inşa edilebilen, seri üretime uygun, hafif, kolay inşa edilebilen, ekonomik yapı teknolojilerinin araştırılmasını özendirmektedir.

Yenilik, ‘bir organizasyonda ürün veya hizmet üretiminde bilinçli olarak yeni fikirler ve yöntemler geliştirmek’ olarak tarif edilmektedir [Addis, 2001]. Bu yeni fikrin hayata geçirilmesi ile yeni bir fikrin yaratılması ise ‘buluş’ olarak nitelendirilmektedir. Hayata geçirilmeyen yeni fikirler ve yeni teknolojiler yenilik olarak değerlendirilmezler. Bu kapsamda, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) her iki aşamanın gerçekleşme prosedürünü ortaya koymaktadır.

Türkiye’deki inşaat sektörünün uluslararası platformda rekabet edebilmesi için, Ar-Ge’ye daha fazla yatırım yapılması şarttır. Bununla birlikte, inşaat sektöründe yenilik araştırmalarının önünde bir takım engeller olduğu da saptanmaktadır [Addis, 2001]. Bunlar;

1. **Sektörün çok parçalı olması;** proje tipi üretim yapılan inşaat sektöründe, bir işin başlayışından bitişine kadar çok sayıdaki profesyonelin bir araya gelip ayrılması, kopuk bir iletişim sürecine yol açmaktadır. Birbirinden bağımsız birimlerin yeniliklere bakış açısı farklıdır.
2. **Sektörün tutucu olması;** inşaat sektörünün insan merkezli bir üretim sürecine sahip olması, yeniliklerin kabulünü güçleştirmektedir.
3. **Toplumun beklentileri;** kullanıcı büyük miktarda sermaye yatıracığı ürünün, bildiği ve kanıtlanmış sistemlerin dışında yapılmasını riskli bulmaktadır.
4. **Bürokratik engeller;** yenilik yapmak ve yeni ürünler üretmek veya kullanmak isteyen firmalar, yetersiz yönetmelik ve bürokratik engellerle karşılaşmaktadırlar. Özellikle Bayındırlık Bakanlığı’nın bu konu hakkında önlem alması gerekli görülmektedir.

Bu tartışmadan anlaşılacağı üzere, Türkiye’nin acil konut ihtiyacına cevap verebilecek, yeni taşıyıcı yapı malzemesi olarak değerlendirilebilecek CTP’nin, teknik uygulama problemlerinin araştırılması ve çözüm önerilerinin ortaya konulması gerekmektedir. Bu sayede, ‘sektörün tutuculuğu’ ve ‘toplumun

beklentileri' dahilinde özetlenen güçlük ve önyargıların bertaraf edilmesi, bilimsel araştırma nosyonu dahilinde mümkün olacaktır. Çalışma konusu ile ilgili diğer engeller; bürokratik ve sektörel, diğer uzmanlık alanlarının çözüm geliştirme sorumluluğu altında ele alınmalıdır.

## Önem

Havacılık, gemi inşa ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan ve yüksek mukavemet/ağırlık özellikleri sayesinde, metallere üstünlük sağlayan CTP'nin inşaat sektöründe taşıyıcı eleman malzemesi olarak kendi başına kullanımının araştırılması, Türk yapı sektörü için alternatif bir yapı üretim sistemi yaratabilecektir. Prefabrikasyona imkan tanınması sebebiyle, CTP yapı teknolojisi hızlı, ucuz ve seri konut üretimi için uygun koşulları yaratabilecektir.

CTP'nin nihai dayanımının birim kütleye oranı ( $\sigma_{ult}/\rho$ ) yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum gibi inşaat sektöründe sıkça kullanılan metallere göre 4 kat fazla oluşu, deprem kuvvetlerine karşı daha yüksek direnç elde edilebileceğini işaret etmektedir. Deprem enerjisini absorbe etmede son derece etkili olan elastisite modülü-birim kütle oranı da ( $E/\rho$ ), yapı sektöründe kullanılan diğer metallere göre %20 daha yüksektir [Case et. al., 1988, Table 1.1, Approximate Strength Properties of Some Engineering Materials, p. 20.].

Belki de CTP teknolojisinin sunacağı en büyük faydalardan biri, mimari planlamaya sağlayacağı esneklik olacaktır. Birim kütlesi  $2000\text{kg/m}^3$  civarında olan, betondan %20, çelikten %64 kat daha hafif bir malzemedir. Yapıda ölü yükleri önemli ölçüde azaltacağından, taşıyıcı eleman aks aralıkları arttırılabilecek, buna karşılık kolon boyutları kompakt tutularak, mimari plan esnekliği ve serbestisi mümkün olabilecektir.

## Amaç ve Sınırlılıklar

Tezin amacı, CTP yapı malzemesinin tek başına taşıyıcı sistem elemanı olarak inşaat sektöründe, yapı mühendisliği uygulamalarında, özellikle konut taşıyıcı sistemi olarak kullanım imkanlarını araştırmaktır.

CTP türleri ve üretim teknikleri Bölüm 2’de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Bilinmektedir ki, mekanik özellikleri birbirinden oldukça farklı olan CTP türünün ve üretilme tekniğinin seçimi tamamen maliyetlere bağlı bir mühendislik kararıdır. Havacılık, gemi inşa ve otomotiv sektörünün aksine, inşaat sektörü yüksek maliyetli taşıyıcı yapı malzemelerini tolere edememektedir. Özellikle Türkiye’de ucuz konut üretimi hedeflenecekse, kaba inşaat birim maliyetlerinin betonarme kaba inşaat birim maliyetlerini aşmaması hedeflenmelidir. Bu yüzden, kullanılabilecek CTP türleri nispeten optimum mekanik özelliklere sahip, basit yöntemlerle üretilen sınıflardan seçilmelidir.

CTP türleri yüksek basınç ve çekme dayanımlarını temin edebilseler de, bu tür CTP’lerde elastisite modülü, (betondan yüksek olmasına rağmen) çelikten yaklaşık 3 kat daha az olmaktadır. Bu durumda yapının rijitliğinde önemli azalmalar gözlemlenmekte, yapısal deformasyonlar fazla olmakta ve rüzgar ya da deprem yükleri altında stabilite zafiyetleri artmaktadır.

Bu bilgilerin ışığında, tezin temel amacı maliyeti optimum CTP sınıfının elastisite modülünü geliştirecek ucuz bir yapısal güçlendirmenin önerilmesidir.

Tezin ikincil amacı geliştirilecek yeni kompozit CTP’nin mekanik özelliklerini kullanarak, konut mimari fonksiyonlarını yerine getirebilecek taşıyıcı modülün optimal boyutlarını sonlu elemanlar analizi kullanarak belirlemek, ve bu modülle oluşturulacak konut tipi çeşitlenmesinin tasarımıdır.

Sistemin prefabrike ekonomik toplu konut tipi için hedeflenmesi, diğer mimari fonksiyonlar için kullanımını sınırlamaktadır. Ayrıca, seri üretimin gerektirdiği parçalı imalat ve montajı, birleşim noktalarının tasarımını önemli bir yapı mühendisliği problemine dönüştürmektedir. Bu konu her ne kadar tezin kapsamı

dışında tutulduysa da, birleşim biçimleri hakkında yol gösterici mahiyette bir öneri geliştirilmektedir. Kuşkusuz, bu konu hakkında yeni çalışmalarla eksik olan diğer hususların tamamlanması, gelecekteki çalışmaların belkemiğini oluşturacaktır.

Tezin birinci bölümünde, CTP'nin kısa bir gelişim tarihçesi verilmiş, konunun problemleri, önemi ve tezde çözümü amaçlanan unsurlar sınırlıkları ile birlikte sunulmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde, CTP'nin yapısal bir malzeme olarak inşaat sektörüne yönelik avantaj ve dezavantajları özetlenmekte, farklı mekanik özelliklere sahip CTP sınıfları, yapı mühendisliğini ilgilendiren nitelikleri bakımından tartışılmakta ve mevcut üretim teknikleri anlatılmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde, CTP'nin takviye maddesi olarak kullanıldığı ve kendi başına taşıyıcı eleman olarak tasarlandığı inşaat mühendisliği uygulamalarının dünya literatüründe yayınlanmış makale özet ve bulguları değerlendirilmektedir.

Tezin dördüncü bölümünde, çelik tel örgü ile takviye edilmiş CTP taşıyıcı elemanların strüktürel analizi için gerekli olan ve yapısal davranışını iyileştirecek mekanik özelliklerinin (çekme, eğilme mukavemetleri ve elastisite modülleri), deneysel olarak belirlenmesinde izlenen yöntem ve bulgular sunulmaktadır.

Tezin beşinci bölümünde, toplu konut ihtiyaç programı Türk aile tipine göre belirlenmektedir. Gerekli olan mekan boyutlarına ve modüler yapının en temel biriminin katlarını içerecek biçimde optimal modül alternatifleri geliştirilmekte, tasarlanan farklı mimari plan tipleri sunulmaktadır.

Tezin altıncı bölümünde, önerilen mimari konut modüllerinin farklı kat yükseklikleri için, LUSAS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak, parametrik çalışmalar yürütülmekte, elde edilen analiz bulgularıyla, sistemin optimizasyonu sağlanmaktadır.

Tezin yedinci ve son bölümünde, genel sonuç ve öneriler sunulmakta, gelecekteki çalışma yönlenmesi, tez çalışma bulgularına göre belirlenmektedir.

## 2. CTP SINIFLARI VE ÜRETİM TEKNİKLERİ

Bir kompozit malzeme, birbirleri arasında ayırt edilebilir farklılıkları olan iki ya da daha çok değişik malzemenin birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, kompozitler genellikle mekanik özellikleri için kullanıldığından, bu tanım bağlayıcı bir madde ile desteklenen, ‘takviye’ (lif veya parçacık gibi) ihtiva eden malzemeleri de içermektedir [Reinhart et. al, 1989].

Kompozitlerin, sürekli bağlayıcı kısımlarından daha sert, mukavim ve süreksiz olan parçacık kısımları vardır. Takviye malzemesini bir arada tutan ve homojen bir hacim yaratan, bağlayıcı bir maddeye ihtiyaç duyulmaktadır (%10 veya daha fazla).

Kompozitler takviye edilme şekillerine göre 3 gruba ayrılmaktadırlar:

1. Parçacık takviyeli kompozitler.
2. Elyaf (lif) takviyeli kompozitler.
3. Lamine (levha) kompozitler.

Bir takviye, eğer her doğrultudaki boyutları hemen hemen aynıysa, ‘parçacık’ olarak adlandırılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler, küre, pul, çubuk gibi eşit akslara sahip pek çok diğer şekillerdeki takviyeleri ihtiva etmektedir. Parçacık takviyeli kompozitler ortogonal gerilmeleri karşılayabilmeleri nedeniyle, iki boyutlu gerilme hallerinde ideal malzemeler olarak görülmektedirler. Polimerler gibi, bünyesinde takviye amacı dışında parçacık bulunduran malzemeler de mevcuttur. Bunlar genellikle ‘doldurulmuş’ sistemler olarak bilinirler. Çünkü parçacıklar takviye amaçlı değil, maliyeti düşürmek için kullanılmaktadırlar. Yine de bazı durumlarda doldurucu, bağlayıcı maddeyi az da olsa güçlendirebilmektedir. Örneğin betonun içinde yer alan çakıl ve kum, takviyeden çok dolgu görevi görmektedir. Burada asıl mukavemeti sağlayan çimento harcının kendisidir. Aynı durum yangın yalıtımı, sünme kontrolü, ısıl öz iletkenliği arttırıcılık gibi, mekanik özellikleri iyileştirici amaçların dışında eklenen parçacıklar için de geçerlidir.

Elyaf takviyeli kompozitler, kendi kesit boyutlarından çok daha uzun olan sürekli lifli takviyeleri ihtiva etmektedir. Ancak kompozit, lif boyunca değişken bir mukavemet sergiliyorsa, süreksiz-lifli, veya kısa-lifli olarak değerlendirilmektedir. Sürekli lifli kompozitlerin çoğu, kompozitin bir ucundan bir ucuna ebadı ile mukayese edilerek tanımlanmaktadır. Bütün malzemeler lif boylarınca gerilmeleri karşılayabildiklerinden, tek boyutlu gerilme halleri için daha uygun bir iç yapıyı tanımlamaktadırlar.

Lamine kompozitler, iki yada daha fazla katmandan oluşan farklı mukavemetteki levhasal elemanlarla teşkil edilmektedirler. Hem sürekli hem de süreksiz olabilen katmanların kompozit davranışını etkileyen en önemli unsur, katmanların hiçbirinin üç yönde de sürekli olmamasıdır. Katmanlar arası kayma gerilmelerinin karşılandığı kısım bağlayıcıdır. Bu tür kompozitler membran gerilmelerini karşılayacak biçimde, kendi düzlemi içinde ortogonal yönlerde (iki boyutlu gerilme hali) yük aktarma kapasitelerine sahip malzemelerdir. Ayrıca katmanların basınç ve çekme kapasitelerine göre tek boyutlu gerilmelerde düzlem dışı eğilme için ideal iç yapıları oluşturmaktadırlar [Reinhart et. al, 1989].

## **Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler**

Cam elyaf takviyeli plastik kompozitler (CTP), sürekli ya da süreksiz olan cam lifleri (Kırpılmış demetler, dokuma veya keçe tipi elyaflar) tek doğrultuda yerleştirilerek veya takviye maksatlı parçacıkların yüzey düzlemine paralel her iki doğrultuda serilmesi suretiyle elde edilebilmektedir. Burada bağlayıcı muhtelif polimer esaslı plastiklerin kullanılması ile malzemenin istenilen formda kalıplanması sağlanmaktadır. CTP'nin eldesinde, birbirinden farklı mekanik özellikler sağlayan farklı bağlayıcı polimerler kullanılmaktadır. Alternatif bağlayıcı çeşitleri Bölüm 2.1.1.'de anlatılmaktadır.

### **Bağlayıcılar**

Plastik, birbirine eklenme özelliği gösteren moleküllerin, bir düzen içerisinde sıralanarak eklenmesi ile oluşturulan organik kimyasal bir maddedir. Moleküllerin

sıralanma düzeninde yapılacak bir değişim, ya da doğrudan molekül yapısındaki farklılaştırma ile değişik nitelikte ve özelliklerde, birbirlerinden çok farklı yeni plastikler elde edilebilmektedir [Şişecam, 1996a].

Plastikler genel olarak iki grupta toplanmaktadır:

1. “Termo” plastikler
2. “Termoset” plastikler

Termoplastikler, ısı ile şekil değiştirebilen ve şekil değiştirdiklerinde yapısal değişikliğe uğramayan plastiklerdir. Termosetplastikler ise, bir kez ısı ile şekillendirildikten sonra, tekrar şekillendirilemeyen ve yapısal değişikliğe uğrayan plastiklerdir. Başlıca termoplastikler ve termosetplastikler Tablo 2.1’de verilmektedir [Wright, 2000].

Tablo 2.1. Başlıca termoplastikler ve termosetplastikler [Wright, 2000].

| TERMOPLASTİKLER |                               | TERMOSETPLASTİKLER |                               |
|-----------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| PMMA            | Polimetil metakrilat          |                    | Doymamış polyester reçineler  |
| CA              | Selüloz asetat                |                    | Epoksi reçineler              |
| PTFE            | Politetra fluor etilen        |                    | Bismaleimide reçineler        |
| PA              | Poliamid                      |                    | Polymide reçineler            |
| PE              | Polietilen                    |                    | Alkid reçineler               |
| PP              | Polipropilen                  |                    | Melamin formaldehid reçineler |
| PVC             | Polivinil klorür              |                    | Fenolik reçineler             |
| PC              | Polikarbonat                  |                    | Furan reçineleri              |
| ABS             | Akrilo nitril bütadien stiren |                    |                               |
| PET             | Polietilen teraftalat         |                    |                               |
| PEEK            | Polieter eter keton           |                    |                               |
| PPS             | Polifenilen sülfür            |                    |                               |
| PPA             | Polifenilen oksit             |                    |                               |

Kompozit bağlayıcılarının amacı, yapışma ve yapıştırma karakteristik özellikleri vasıtası ile elyafları bir arada tutmak, yükleri elyaflara ve elyafların arasında aktarmak ve onları çevresel etkilerden korumaktır. CTP’de kullanılan bağlayıcılar genellikle termoset plastikler dahilinde verilen reçineleri ihtiva etmektedir. Dolayısı ile yüksek ısıya maruz kaldıklarında, yapısal değişim gösterirler

ve tekrar kullanımları mümkün olmaz. Buna karşılık yangında kömürleşme göstererek doğal bir ısı yalıtım tabakası oluştururlar. Ayrıca ergime özelliği göstermemeleri nedeniyle termoplastikler gibi akıcılık kazanarak kaçan insanların üzerine damlama ihtimalleri yoktur. Bağlayıcı kompozitlerin zayıf kısmıdır, çünkü reçineler elyafın dayanabileceği gerilmeleri karşılayabilecek mukavemette değildir. Bu yüzden, kompozit yük altında gerilmelere maruz kaldığı zaman, bağlayıcıda mikro-çatlaklar oluşmaktadır ve genellikle kompozitten çok daha düşük yük seviyelerinde kırılabilmektedir. Bununla beraber, takviyeleri uygun yön ve konumda tutarak, çatlamanın yürümesini geciktirirler ve kayma gerilmelerinin neredeyse tamamını karşılarlar. Bundan başka, bağlayıcılar kompozitin dayanabileceği maksimum sıcaklıkları ve çevresel etkilere direncini belirlemektedir [Reinhart et. al, 1989]. Kompozitlerde en çok kullanılan bazı plastiklerin tipik mekanik özellikleri Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Sıklıkla kullanılan bağlayıcı plastiklerin mekanik özellikleri [Şişecam, 1996a].

|                                                                   | Polyester | Fenolik   | Epoksi    | ABS       | Naylon 66 |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Çekme Muk.<br>(N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                         | 40-90     | 35-65     | 28-90     | 18-55     | 80        |
| Kopmada Uzama<br>(%) $\epsilon$                                   | 2         | 1.5-2.0   | 3-6       | 20-100    | 60        |
| Eğilme Muk.<br>(N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                        | 58-158    | 75-115    | 90-145    | 35-70     | 115       |
| Çekme Modülü<br>(N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                       | 2050-4400 | 2750-4800 | 2400      | 28        | -         |
| Eğilme Modülü<br>(N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                      | -         | -         | -         | 895-2750  | 2900      |
| Isıl Genleşme<br>Katsayısı<br>(10 <sup>-6</sup> m/m°C)            | 55-100    | 68        | 45-65     | 60-130    | 80        |
| Çökme Sıcaklığı<br>(°C)                                           | 60-204    | 74-79     | 46-288    | 77-105    | 75        |
| Isı Geçir.<br>(10 <sup>-4</sup> Cal-cm)<br>(s-cm <sup>2</sup> °C) | -         | 3.5       | 4.5       | -         | 5.8       |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                                     | 1.10-1.46 | 1.24-1.32 | 1.11-1.40 | 1.02-1.06 | 1.13-1.15 |

Üretilcek kompozitin bağlayıcı türü karar parametrelerinin başında bağlayıcının mekanik özellikleri gelmektedir. Bunun yanı sıra, oluşturulacak kompozitin maliyetini belirleyen bağlayıcı malzeme fiyatları da önemli bir tercih unsuru olmaktadır. Kompozitlerde sıklıkla kullanılan bağlayıcıların fiyatları Tablo 2.3'te verilmektedir.

Tablo 2.3. Bağlayıcı birim fiyatları [Rotheiser, 2000].

| Bağlayıcı Türü         | Bağlayıcı Fiyatı<br>\$/m <sup>3</sup> | Bağlayıcı Türü       | Bağlayıcı Fiyatı<br>\$/m <sup>3</sup> |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Polipropilen           | 610                                   | Poliüretan (TS)      | 3785                                  |
| Polietilen             | 610                                   | Alkid                | 4150                                  |
| Polivinilklorid        | 795                                   | Polikarbonat         | 4455                                  |
| Polistiren             | 915                                   | Poliüretan (TP)      | 4515                                  |
| ABS                    | 1950                                  | Asetal               | 4515                                  |
| Fenolik                | 2320                                  | Selülozikler         | 4575                                  |
| Polyester (TS)         | 2625                                  | Polikarbonat/ABS     | 4760                                  |
| Melamin                | 2990                                  | Epoksi               | 4940                                  |
| Polifenilen eter       | 3050                                  | Polifonilen sülfid   | 7260                                  |
| Polifenilen oksit      | 3050                                  | Polisulfon           | 12265                                 |
| Üre                    | 3235                                  | Polieterimid         | 15440                                 |
| Polyester (PET)        | 3355                                  | Sıvı kristal polimer | 26485                                 |
| Naylon                 | 3540                                  | Florpolimer          | 29350                                 |
| Stiren maleic anhidrid | 3600                                  | Poliamidimid         | 57910                                 |
| Vinil ester            | 3660                                  | Polieter eter keton  | 104960                                |

### **Polyester ve Vinil Ester Reçineler**

En yaygın olarak kullanılan reçinelerdir. Bu reçineler, kimyasal etkilere dayanıklı boru ve reaktörlerde, tren vagonlarında ve iş aletlerinde, duş kabinlerinde, otomotiv gövde, parça ve kapılarında kullanılmaktadırlar. Genel amaç, kimyasal etkilere karşı yalıtımın ve ısı geçirimsizliğinin sağlanmasıdır [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

## **Epoksi Reçineler**

Epoksi reçineler yüksek mukavemetli CTP kompozitlerde sıkça kullanılan bir reçinedir. Epoksi reçineleri, kürlenmiş ve kürlenmemiş hallerde neme hassas olmalarına rağmen, genellikle polyester reçinelere kıyasla neme ve diğer çevresel etkilere karşı daha üstündürler ve daha iyi mekanik özellikler sergileyebilmektedirler (Bkz. Tablo 2.2). Kürlenmiş epoksilerin çoğunun çekme modülü düşük olsa da, yüksek çekme mukavemeti, işleme kolaylığı ve üstün kompozit mekanik özellikleri ile makul bir maliyet sağlamaktadırlar. Çekme elastisite modülü artırılmış bazı epoksi reçineleri günümüzde geliştirilmektedir [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

## **Bismaleimide Reçineler (BMI)**

Bismaleimide reçineler, epoksi reçineleri gibi, iyi mekanik özellikler, nispeten işlenme kolaylığı ve mükemmel kompozit özellikleri sağlama açısından aranan niteliklere sahiptirler. Epoksi reçinelerine kıyasla ısı dayanımı yüksek olup, 205-220°C'ye kadar güvenle kullanımı mümkündür. Ancak bu tür reçinelerde çekme mukavemetinin düşük, çekme modüllerinin ise nispeten yüksek oluşu ile gevrek kırılma yaptıkları bilinmektedir [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

## **Polymide Reçineler**

Polymide reçinelerin, 260°C'lik sıcaklıklarda kullanımı mümkün olabilmektedir. Diğer reçinelerin aksine, bu tür reçineler kür esnasında gaz açığa çıkaran bir yoğunlaşma reaksiyonu ile işlenmektedir. Çıkan gazlar kompozitin içinde hava boşlukları yaratarak mukavemet kaybına yol açmaktadır. Son küründe açığa gaz çıkarmayan birkaç polymide reçine vardır. Ayrıca, polymide reçinelerin de gevrek malzeme özellikleri gösterdikleri bilinmektedir [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

## **Diğer Termoset Reçineler**

Gelişmiş termoset reçineler üretme çabaları, genellikle ısı ve neme karşı performanslarını ve/veya darbe yüklerine karşı dirençlerini arttırmak üzerine

yoğunlaşmaktadır. Her iki konuda yapı mühendisliği açısından ikincil öneme sahip hususlardır. Kuşkusuz bu malzemenin geliştirilmesinde havacılık, gemi inşa ve otomotiv sektörünün gerekleri yönlendirici olmaktadır. Bahsi geçen sektörlerin ihtiyaçlarını karşılamak üzere bazı spesifik reçineler geliştirilmektedir. Örneğin phenolik reçineler, yüksek ısı direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu reçineler, ısısal stabilitelerine ek olarak, üstün anti-elektriksel özelliklere de sahiptirler. Ne yazık ki, dışarıya yan ürün olarak su veren ve boşluklu bir tabaka oluşturan yoğunlaşma reaksiyonuyla kürlenirler. Bu durum, yapı mühendisliğinde gerekli olan mekanik özelliklerini önemli ölçüde düşürmektedir. Ancak yandıklarında çok az duman ve toksik gaz çıkarmalarıyla yangın güvenliği açısından uygundurlar [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

### **Termoplastik Reçineler**

Yeni nesil yüksek-sıcaklık termoplastik reçine bağlayıcılarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu malzemeler, plastik çanta, plastik boru, ve plastik masa gibi kullanılan eşya termoplastiklerinden (polietilen, polivinilklorid, ve polistylene gibi) çok farklıdır. Eşya termoplastiklerinden daha yüksek sıcaklıklara direnç gösterebilen bu yeni nesil termoplastikler, termoset reçineler kadar üstün malzeme özellikleri, hatta fazlasını sergileyebilmektedirler.

Termoplastik bağlayıcı malzemeler, termoset reçinelerden daha gevrek (brittle) olup, ısı ve neme karşı dayanımları yüksektir. Yüksek süneklikleri sayesinde, ortalama elastik modüllü, yüksek mukavemetli liflerin, kompozitin içinde tüm mukavemet potansiyellerini kullanmalarını sağlayabilen nadir bağlayıcılardandır. Bu malzemeler, polyether etherketone (PEEK), polypheylene sulfide (PPS), polyetherimide (PEI) reçinelerini içermektedir. Orijinal olarak termoplastik gibi şekillendirilen, fakat sonradan kısmi termoset karakter elde edebilmek için tekrar-küre tabi tutulan, polyamideimide (PAI) gibi bağlayıcıları da kapsayabilmektedir [Reinhart et. al, 1989]. Bu plastikler inşaat sektöründe yapısal eleman olarak kullanılan kompozitlerin üretiminde kullanılmadıkları için bu bölümde ayrı ayrı açıklanmamaktadır.

## Elyaf lar

Elyaf lar kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen ve yük taşıma mekanizmasını sağlayan en önemli bileşenidir. Elyaf lar bazı teknik literatürde lif olarak adlandırılmaktadır. Elyaf grubuna ise lif demeti denilmektedir.

Takviye elemanı olarak kullanılan başlıca elyaf türleri aşağıda sıralanmaktadır:

1. Cam Elyaf lar,
2. Karbon Elyaf lar,
3. Aramid Elyaf lar,
4. Organik Elyaf lar,
5. Boron Elyaf lar,
6. Sürekli Silikon Carbide Elyaf lar (SIC).

Göreceli olarak daha ucuz olan cam elyaf ı takviyeli plastikler, genellikle otomotiv endüstrisi, elektrik-elektronik endüstrisi, kimya endüstrisi, gemi inşa endüstrisinde ikame malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Havacılık endüstrisinde ise hafifliğin ve yüksek mekanik dayanımın belirleyici olması nedeniyle, pahalı takviye elyaf ları kullanılmaktadır. En yaygın olanları karbon, aramid ya da boron elyaf larıdır [Reinhart et. al, 1989]. Bazı elyaf çeşitlerinin mekanik özellikleri ve maliyetleri Tablo 2.4'te verilmektedir.

Tablo 2.4. Tipik elyafların mekanik özellikleri ve maliyetleri [Schoenberg, 1989].

| Elyaf Çeşidi         | Çekme Mukavemeti (MPa) | Çekme Modülü (MPa) | Tipik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Yaklaşık Maliyet (\$/kg) |
|----------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Karbon HS            | 3500                   | 160-270            | 1.8                                 | 65                       |
| Karbon IM            | 5300                   | 270-325            | 1.8                                 | -                        |
| Karbon HM            | 3500                   | 325-440            | 1.8                                 | -                        |
| Karbon IHM           | 2000                   | 440+               | 2.0                                 | -                        |
| Aramid LM            | 3600                   | 60                 | 1.45                                | 45                       |
| Aramid HM            | 3100                   | 120                | 1.45                                | -                        |
| Aramid UHM           | 3400                   | 180                | 1.47                                |                          |
| Boron                | 3600                   | 400                | 2.49                                | 700                      |
| Silikon Karbid (SiC) | 3900                   | 400                | 3.00                                | 220                      |
| E Cam                | 2400                   | 69                 | 2.5                                 | 5.5                      |
| S Cam                | 3450                   | 86                 | 2.5                                 | -                        |
| Kuartz Cam           | 3700                   | 69                 | 2.2                                 | -                        |

### 2.1.2.1 Cam Elyafları

Elyaf takviyeli organik bağlayıcı kompozitlerin ilk uygulamaları cam elyaf takviyeli plastiklerdir. Hem sürekli hem de süreksiz cam elyaf takviyeli kompozitler, uçak kontrol panelleri gibi yapısal olmayan kullanımlardan, roket motoru parçaları yüksek basınç kabinleri gibi yüksek yapısal dayanım gerektiren uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede uygulama imkanı bulmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin geçmişte ve günümüzde geniş kullanım alanı bulmasının ana sebepleri düşük maliyeti, kolay elde edilebilirliği, üretim kolaylığı ve yüksek mukavemeti olarak gösterilebilir [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

### 2.1.2.2. Karbon Elyafları

En basit haliyle karbon elyafı yapay ipek malzemenin ısı ile ayrıştırılmasıyla elde edilmektedir. İşlem, ihtiyaç duyulan karbon yapısını oluşturmak için, yüksek kontrollü aşama ve gerilimleri kapsamaktadır. Günümüzde yapay ipek (rayon) yerine, büyük ölçüde polyacrylonitrile (PAN) kullanılmaktadır. PAN ile çok daha

ekonomik elyaflar üretme imkanı vardır, çünkü; karbon kazancı yüksektir; ve son yüksek sıcaklık ‘graphitization’ prosesine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Yüksek performanslı kompozit arayışlarına karbon ve grafit elyafları cevap verebilmektedir. 80’li yıllara kadar üretim tekniklerinin yetersizliği ve zor elde edilmesi dolayısıyla maliyetler oldukça yüksek olmaktaydı. Bu yüzden sadece havacılık gibi çok özel alanlarda veya yüksek gerilme alan parçalarda sınırlı miktarda kullanılabilmekteydi. Günümüzde grafit ve karbon elyaflarının maliyetlerinin düşüşü ile spor malzemesi sektöründe tenis raketi, sırık, snowboard gibi daha güncel kullanımlar için uygulamaları mümkün olabilmektedir. Ancak maliyetler hala inşaat sektörünün tolere edebileceği düzeylere inememiştir. Karbon elyaflarının depremden hasar gören yapıların takviyesinde uygulaması, oldukça yüksek maliyetler karşılığında kısıtlı da olsa yapılabilir.

Düşük maliyetli, yüksek performanslı karbon elyaflar üretmenin yeni bir yöntemi petrol veya kömür esaslı zift kullanımıdır. 830 GPa elastisite modülüne sahip zift esaslı karbon elyaflar ticari olarak mevcutsa da, uygulamalar son derece sınırlıdır. Çünkü hammaddenin kendisi ucuz olmasına rağmen, arıtma ve üretim işlemleri oldukça yüksek maliyetlidir [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

### **2.1.2.3. Aramid Elyafları**

Aramid elyafı termoplastik polimerden üretilen bir lif türüdür. Aramid ismini 1960’ların ilk yıllarında ticari olarak üretilen aromatic polyamide elyaflarından almaktadır. Bu elyafların ticari versiyonları hala üretilmektedir. Ancak, yüksek performanslı olanları para-phenyleneterephthalamide türevleridir. Bu elyaflar 3450 MPa mukavemet ve 132 Gpa elastiklik modülüne kadar ulaşabilirler. En çok bilinen aramid elyaf, yüksek mekanik özellikleri sayesinde ileri kompozitlerde kullanılan Kevlar 49’dur [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

### **2.1.2.4. Boron Elyafları**

Boron elyafları, yüksek mukavemetli düşük maliyetli kompozitlerde kullanılmak üzere 1960’larda geliştirilmiş takviye liflerindendir. Yüksek mukavemet

ve yüksek elastisite modülüne sahip bu lifler, F-15 ve F-14 savaş uçaklarında halen kullanılmaktadır. Karbon liflerinin günümüzde daha ucuz maliyetlerle üretilmesine ve daha iyi mekanik özellikler göstermesine rağmen, değiştirme maliyetinin yüksek olması nedeniyle, boron lifler bu uçaklarda hala tercih edilebilmektedir. Boron-epoksi kompozitler, mükemmel mekanik özellikleri, ısıl performansı iyileştirici katkılarla olan düşük etkileşimi sayesinde, spor ekipmanları endüstrisi ve metal-matrix kompozitlerde (MMC) karbon liflerine tercih edilebilmektedir. MMC imalatında, silikon carbide elyafının boron elyafının yerini almasıyla boron elyafı artık ticari olarak sunulmamaktadır [Reinhart et. al, 1989; Wright, 2000].

## **Cam Elyafı Takviyeli Plastik Kompozitler (CTP)**

İnşaat sektörünün kabul edebileceği ve maliyetler açısından rekabet edebilecek kompozitlerden biri, takviye liflerinin düşük maliyeti bakımından, CTP olarak tespit edilmektedir. CTP, cam elyafı ve doymamış polimerden oluşan kompozit bir malzemedir. CTP'nin ana takviyesi camdan elde edildiğinden, doğal çevreden kolay ve ucuz kazanılabilecek bir kompozittir. Tablo 2.5'ten anlaşılabileceği üzere kullanılacak bağlayıcıya göre mekanik özellikler önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu durumda mühendislik seçiminde ilk karar, maliyeti en düşük, göreceli olarak mekanik özellikleri en yüksek cam elyafını ve bağlayıcıyı belirlemektir.

Tablo 2.5. Cam elyafı takviyeli plastiklerin mekanik özellikleri [Şişecam, 1996a].

|                                                             | Cam Elyaf Takviyeli Polyester | Cam Elyaf Takviyeli Fenolik | Cam Elyaf Takviyeli Epoksi | Cam Elyaf Takviyeli ABS | Cam Elyaf Takviyeli Naylon 66 |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Çekme Muk. (N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                      | 206-345                       | 48-125                      | 125-185                    | 75                      | 137                           |
| Kopmada Uzama (%) $\epsilon$                                | 1.2                           | 0.2                         | -                          | 3                       | 2-5                           |
| Eğilme Muk. (N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                     | 275-550                       | 103-412                     | 345-480                    | 96                      | 198                           |
| Çekme Modülü (N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                    | 10300-30900                   | 13050-22660                 | -                          | 96-106                  | -                             |
| Eğilme Modülü (N/mm <sup>2</sup> ), (MPa)                   | 6870-20600                    | 13735-22565                 | 19230-28840                | 5080                    | 6870-9420                     |
| Isıl Genleşme Katsayısı (10 <sup>-6</sup> m/m°C)            | 15-30                         | 8-21                        |                            | 21                      | 29                            |
| Isı Geçir. (10 <sup>-4</sup> Cal-cm) (s-cm <sup>2</sup> °C) | -                             | 8-14                        | -                          | -                       | 11                            |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                               | 1.50-2.10                     | 1.69-2.0                    | 1.84                       | 1.22                    | 1.46-1.49                     |

### Cam Elyaf Türleri

Cam elyaflarının diğer elyaflara kıyasla daha çok kullanım alanı bulabilmesinin bir sebebi de değişik ihtiyaçlara cevap verebilecek çok sayıda çeşitlerinin bulunmasıdır. Kimyasal girdilerin kompozisyonlarına göre farklı cam elyaf türleri üretmek mümkün olmaktadır [Miller, 1989]. Bu çeşitlerin arasında, polyester ve epoksi reçineler ile nispeten yüksek aderans gösteren ve yüksek mekanik mukavemet değerleri veren, bu yüzden de en çok kullanılmakta olan E tipi cam elyafının Türkiye’de de üretimi yapılmaktadır.

Cam elyafı, genellikle alkali düşük “E” camının, 6-15 mikron çaplarında devamlı proses ile ince lifler halinde çekilmiş türüdür [Şişecam, 1996a]. E tipi cam elyafından farklı olarak, özellikleri ve bileşimine göre çeşitlilik gösteren diğer cam elyaf türleri Tablo 2.6’da verilmektedir. Bu cam elyaf türlerinin en çok kullanılanları olan E tipi, S tipi ve C tipi cam elyaflarının hammaddesini oluşturan bileşenler ve mekanik özellikleri Tablo 2.7 ve Tablo 2.8’de sunulmaktadır.

Tablo 2.6. Cam elyaf türleri ve özellikleri [Miller, 1989].

| Cam Tipi      | Özellikleri                           |
|---------------|---------------------------------------|
| A Cam Elyafı  | Yüksek alkali oranı, düşük maliyet.   |
| C Cam Elyafı  | Kimyasal dayanım.                     |
| E Cam Elyafı  | Elektriksel özellikler.               |
| L Cam Elyafı  | Radyasyona karşı kurşun içermektedir. |
| M Cam Elyafı  | Yüksek elastisite modülü.             |
| S Cam Elyafı  | Yüksek çekme dayanımı.                |
| W2 Cam Elyafı | Paneller için yarı şeffaf.            |
| AR Cam Elyafı | Alkali dayanımı.                      |
| R Cam Elyafı  | Yüksek çekme dayanımı.                |

CTP kompozitin takviyesinde kullanılan E tipi cam elyafını elde etmek için, öncelikle istenilen özellikleri cam elyafına kazandıracak hammaddenin fırında yaklaşık 1550°C sıcaklıkta eritilmesi gerekmektedir. Eriyik hammadde, platin radyum alaşımından yapılmış, elektrik enerjisi ile ısıtılarak  $\pm 5^\circ\text{C}$  hassasiyet ile 1250°C sıcaklıkta tutulan ve üzerinde 1-2mm çapında çok sayıda delik bulunan kovanlara doğru akmaya bırakılmaktadır. Kovan deliklerinden serbest akışa bırakılan cam eriyiği, kovan altında bulunan sarma aparatları yardımıyla, “kek” adı verilen silindir üzerine 50-70 m/s gibi yüksek bir hızla çekilerek cam lifi demeti olarak sarılmaktadır. Sarım hızına bağlı olarak, 6-20 $\mu$  çapında değişen cam elyafı elde edilmektedir [Brady et. al, 1979]. Cam elyafı sarılırken, üzerlerine “bağlayıcı” adı verilen ve ileride kompozit içinde reçine ile cam elyafı arasındaki aderansın kuvvetini belirleyen bir malzeme püskürtülerek kaplanmaktadır. Bu bağlayıcının cinsi, kompozit malzeme içinde cam elyafının mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu bağlayıcının içeriği; bir kaydırıcı (Lubricant), bir bağlayıcı (Coupling agent), bir film oluşturucu ve sudan oluşmaktadır. Bu bileşenlerden ‘kaydırıcı’ cam elyafının pamuklanmasını, kırılmasını önlemek ve liflerin aşınma dayanımı arttırmak, ‘bağlayıcı’ cam elyafının reçine ile aderansını sağlamak, ‘film oluşturucu’ ise işleme ve dokuma sırasında demet bütünlüğünü korumak için kullanılmaktadırlar [Şişecam, 1998].

Tablo 2.7. Bazı cam elyaf türleri ve kompozisyonları [Miller, 1989].

| Hammadde                     | Cam elyaf tipine göre hammadde kullanım yüzdesi (%) |        |        |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|--------|--------|
|                              | E tipi                                              | S tipi | C tipi |
| Silikondioksit               | 52-56                                               | 65     | 64-68  |
| Alüminyumdioksit             | 12-16                                               | 25     | 3-5    |
| Borikoksit                   | 5-10                                                |        | 4-6    |
| Sodyumoksit ve Potasyumoksit | 0-2                                                 |        | 7-10   |
| Magnezyumoksit               | 0-5                                                 | 10     | 2-4    |
| Kalsiyumoksit                | 16-25                                               |        | 11-15  |
| Baryumoksit                  |                                                     |        | 0-1    |
| Titanyumoksit                | 0-1.5                                               |        |        |
| Demiroksit                   | 0-0.8                                               |        | 0-0.8  |
| Demir                        | 0-1                                                 |        |        |

Tablo 2.8. Bazı cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri [Watson et. al, 1989].

| Mekanik özellikleri           | E tipi | S tipi | C tipi |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.58   | 2.48   | 2.62   |
| Çekme day. (GPa)              | 3.45   | 4.59   | 3.31   |
| Çekme Modülü (GPa)            | 72.5   | 86     | -      |

Gerek termoset, gerekse termoplastik bağlayıcının takviye edilmesinde, kimyasal birleşmeyi en iyi sağlayabilmek için demet haline getirilmiş sürekli cam elyafı kullanılmalıdır. Süreksiz ve izolasyon amaçlı cam yünü veya cam pamuğu yüksek mukavemetli CTP kompozitleri için uygun değildir [Brady et. al., 1979].

Cam elyafından takviye malzemeleri biçim bakımından da farklılık göstermektedir. Takviye amaçlı cam elyafları biçimlerine göre dört sınıfta ele alınmaktadır [Şişecam, 1998].

1. **Keçe;** 5cm ile 10cm arası boylarda kırılmış veya kırılmamış devamlı cam elyafından yapılmıştır. 300g/m<sup>2</sup> ile 450g/m<sup>2</sup> arasında değişen yoğunluklarda bulunabilmektedir. El yatırması, devamlı levha ve sandviç levha üretim şekilleri için kullanılırlar. Kompozitte bulunması amaçlanan takviye

miktarı, standart ağırlıklı cam elyaf keçelerinin üst üste yatırılması ile elde edilmektedir. Kırpılmış cam elyafları keçe üzerinde rasgele yayıldıkları için çok yönlü bir takviye elde edilmektedir (Bkz. Şekil 2.1(a)).

2. **Fitil;** sürekli cam elyafı demetlerinin bobinler üzerine birbirine paralel ve bükümsüz olarak sarılması ile üretilmektedir. Tek yönlü takviyenin elde edildiği durumda düğümlü fitiller kullanılmaktadır. Bu ilmeklerin amacı profil doğrultusunda elde edilen mukavemete ek olarak yanal yüklere karşı mukavemeti de arttırmaktır. Sürekli cam elyafı demetlerinin bükümlü olarak sarılmasından elde edilen ürün cam elyafı iplik olarak adlandırılmaktadır. İplikler genellikle dokunmuş kumaşların elde edilmesinde kullanılmaktadırlar (Bkz. Şekil 2.1(b),(c)).
3. **Kumaş/dokuma;** devamlı cam elyafından bükümlü/bükümsüz iplik ile dokunarak üretilmektedir. Dokumalar, birim alan ağırlıkları olarak  $300\text{g/cm}^2$ ,  $500\text{g/cm}^2$  ve  $800\text{g/cm}^2$  gibi çeşitli türlerde bulunabilmektedir. Düzlemsel olarak birbirine dik iki yönde takviye elde edilmektedir. Dokumalar kullanılarak, cam elyaf keçelere nispeten daha üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler elde etmek mümkün olmaktadır. Ancak, dokumalar tek başına kullanıldıklarında iki tabaka arasında tam bir bağlantı sağlanamamakta ve tabakalar arasında ayrışma gözlemlenmektedir. Ayrıca, dokumanın kullanıldığı kompozitlerde dış yüzeylere keçe konulmadığı takdirde, kompozitin yüzeyinde dokuma görüntüsü belirlemektedir. Bu sebeplerden dolayı, dokumalar iki keçe tabakası arasında kullanılmaktadırlar. Bu şekilde kompozitin hem mekanik özellikleri artırılmakta, hem de polyester tüketimi azaltılmaktadır. Çünkü, 1kg keçe için 2.5kg polyester kullanılırken, 1kg dokuma için 1.5kg polyester kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 2.1 (d)).
4. **Kırpılmış cam elyafı;** kullanılan bağlayıcıya ve kullanım amacına bağlı olarak 3-6-12 mm uzunluğunda kırpılmış cam elyaftan üretilmektedir. Çoğunlukla dolgu malzemesi ve gerilmelere karşı yüzey takviyesi amacı ile BMC (Hazır kalıplama hamuru) karışımında ve termoplastik takviyesinde kullanılmaktadırlar (Bkz. Şekil 2.1(e)).



a) Cam elyaf keçe



b) Sürekli cam elyaf fitil



c) Sürekli cam elyaf iplik



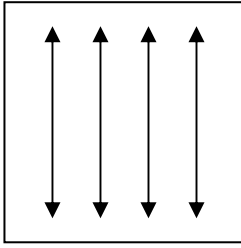
d) Cam elyaf dokuma



e) Cam elyaf kırpılmış demetler

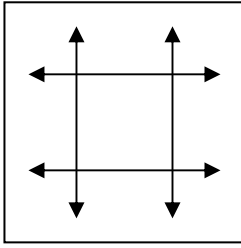
Şekil 2.1. Cam elyaf tipleri.

Kullanılan cam elyafı tipi kompozitin içinde elde edilen takviye yönlerini belirlemektedir (Bkz. Şekil 2.2).



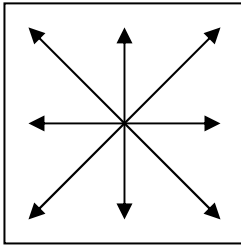
a) Tek yönlü takviye;

Cam elyaf fitiller ve iplikler ile oluşturulmaktadır.



b) İki yönlü takviye;

Cam elyaf dokuma ve kumaşlar ile oluşturulmaktadır.



c) Çok yönlü takviye;

Cam elyaf keçeler, kırılmış demetler ve hazır kalıplama bileşenleri ile oluşturulmaktadır.

Şekil 2.2. Cam elyafı tiplerinin kompozitlere sağladıkları takviye yönlenmeleri.

## CTP Kalıplama Yöntemleri

CTP kalıplamasında kullanılan başlıca metotlar, işçilik maliyetleri, üretim prosesine gerekli ekipman yatırımı ve işçilik kalitesini gözeterek ve amaca göre kararlaştırılmaktadır. CTP kompozitin mekanik mukavemetini etkileyen faktörler, kullanılan takviye ve bağlayıcının cinsine, takviye/bağlayıcı oranına ve takviye yönüne göre değişmektedir (Bkz. Tablo 2.9).

Seçilen kalıplama yöntemi oluşacak kompozitin mekanik özelliklerini de sınırlamaktadır. Örneğin; el yatırması ve püskürtme yöntemi gibi açık kalıplama yöntemleri ile en fazla %30-40 cam elyaf takviye oranı elde edilirken, bu oran profil çekme gibi, sürekli cam elyaf fitilleri kullanılarak profil doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilen kalıplama yönteminde %70-80'e ulaşabilmektedir.

Tablo 2.9. Takviye miktarı ve kalıplama şekline göre oluşan mekanik özellikler.

| Malzeme                                      | Cam Elyaf Takviye Miktarı (%) | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Eğilme Mukavemeti (MPa) | Eğilme Modülü (MPa) |
|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| Polyester (Hazır kalıplama hamuru)           | 10                            | 1.89                          | 21                     | 83                      | 7                   |
|                                              | 15                            | 1.85                          | 27                     | 96                      | 9                   |
|                                              | 30                            | 1.85                          | 41                     | 124                     | 10                  |
| Epoksi (Hazır kalıplama hamuru)              | 30                            | 1.75                          | 100                    | 180                     | 16                  |
|                                              | 65                            | 1.78                          | 140                    | 300                     | 25                  |
| Polyester (Hazır kalıplama bileşimi)         | 25                            | 1.85                          | 68                     | 190                     | 10                  |
| Sıcak Pres Kalıplama (Keçe)                  | 40                            | 1.50                          | 124                    | 240                     | 11                  |
| El Yatırması (Keçe)                          | 30                            | 1.49                          | 103                    | 194                     | 8                   |
| Püskürtme                                    | 28                            | 1.49                          | 103                    | 194                     | 8                   |
| Soğuk Pres (Sürekli keçe)                    | 20                            | 1.44                          | 90                     | 172                     | 7                   |
| Epoksi Reçine (Sürekli E Camı)               | 65                            | 2.00                          | 1000                   | 1400                    | 40                  |
| Cam Dokuma/Keçe (600/450 g/cm <sup>3</sup> ) | 43                            | 1.50                          | 190                    | 390                     | 11                  |

### 2.2.2.1. El Yatırması Yöntemi

Bu yöntem geniş yüzeyli CTP kalıplaması için en ideal metottur. Kalıp ayırıcı (vaks) oluşturulduktan sonra jelkot uygulanır. Jelkot bir polyester reçine türü olup, özellikle yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve yüzeyde cam elyafı görünmesini önlemek amacıyla kalıp yüzeyine ince bir tabaka oluşturacak şekilde sürülerek veya püskürtülerek uygulanmaktadır. Jelkot tabakasının sertleşmesinden sonra, keçe veya dokuma tipi cam elyafı ve poliyester bağlayıcı, fırça veya yün rulo ile uygulanmaktadır. Düşük maliyetli bir kalıplama yöntemi olan el yatırması yöntemi ile en fazla %25-40 oranında cam elyaf takviyesi gerçekleştirilebilmektedir. Emek-yoğun bir üretim metodu olduğu için, üretim kapasitesi, emeğin yoğunluğuna, kalıp sayısına ve karmaşıklığına bağlıdır. Bir kalıptan günde ortalama 2 defa ürün almak mümkündür [Wright, 2000].

El yatırması yönteminde, genellikle düşük maliyetli CTP kalıplar kullanılmaktadır. Kalıplama aşamasının tamamı elle yapıldığından sadece basit el aletlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elyaf ve bağlayıcı karışımını sağlamak amacı ile el fırça ve ruloları kullanılmaktadır. Ayrıca, bağlayıcı malzemenin katılaşmasını hızlandırmak için kullanılan katalist malzemelerin karışımının hazırlanabilmesi için varil veya tank gibi hacimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Katalist malzeme olarak metiletilketon (MEKP) ve %6'lık kobalt kullanılmaktadır. Katalistin reçine içindeki karışım oranı jelleşme süresini belirlemektedir. Bu süre önemlidir, çünkü reçine jelleşmesi gerçekleşmeden kalıplama işleminin tamamlanması gerekmektedir [Şişecam, 1992b].

Kalıplamada kullanılan cam elyaf keçenin kesilmesi kolay olduğu için, basit makaslar kullanılmaktadır, fakat sertleşen CTP'nin kesilmesi zordur, ve kesme taşı ya da elmas uçlu döner bıçaklar kullanmak gerekmektedir.

Bu yöntemde kalıplama aşamasının tamamen elle yapılması sebebiyle ürün bünyesinde hava kabarcıkları oluşması ve kalitenin düşmesi riski bulunmaktadır. Malzeme bünyesinde oluşabilecek bu boşluklar kompozitin mukavemetinin düşmesine sebep olabilmektedir. Bu sebepten dolayı el yatırması yöntemi ile yapısal elemanlar kalıplanmamaktadır [Hull, 2000].

### **2.2.2.2. Püskürtme Yöntemi**

El yatırması metodunun daha seri olarak uygulanmasını sağlayan bir açık kalıplama metodudur. Böylece, iç boşluk ve karışım oranı hataları azaltılmaktadır. Üretim sırasında kalıp üzerine polyester ve cam elyafı özel bir tabanca yardımı ile birlikte püskürtülmektedir. Püskürtme metodunda, sürekli fitil cam elyafı, püskürtme işlemi sırasında 15-50mm uzunluğunda kesilerek kullanılmaktadır. Geniş yüzeylerde seri üretim olanağı sağlamakta ve işçilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Püskürtme yöntemi, ayrıca, malzeme tüketimini ve fireyi de azaltmaktadır.

Kırpılan fitillerin fiyatı, el yatırması yönteminde kullanılan keçelerden yaklaşık %10-15 daha ucuz temin edilebilmektedir ve fire miktarı %5 azalmaktadır. Bu yöntemle, reçine tüketimi yaklaşık %20 azalmaktadır. Bu yöntemin el yatırmasına

göre diğ er önemli bir avantajı, kalıplama süresinin 1/4'e d üşmesidir. Toplam olarak bakıldığında %20-25'lik kazanç söz konusu olmaktadır. Bu yöntemde de el yatırması yöntemi gibi, katalist olarak MEKP/Kobalt kullanılmaktadır.

Püskürtme tabancası, basınçlı hava ile çalışan bir pompa sistemidir. Püskürtme tabancasının tetiğine basıldığında, biri reçineyi, diğeri katalisti hortum vasıtası ile aktaran iki adet pompa, ve fitilleri eşit uzunlukta kırpan makine, eş zamanlı olarak devreye girmektedir. Tabanca ucundan yüksek hızla çıkan bu reçine elyaf karışımı, kalıba belli bir mesafeden püskürtülerek, yapışması sağlanmaktadır. Bu makinelerin 3-6 atm basınçta çalışan tipleri bulunmaktadır. Basınç için 600-1000 lt/dk hava debisi sağlayan bir kompresörün kullanılması gerekmektedir.

Püskürtme metodunda, stiren buharının atılması amacıyla kurulacak bir havalandırma sistemine ve basit bir konstrüksiyon üzerine gerilmiş şeffaf naylonla oluşturulan bir püskürtme odasına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca makine ile kalıp etrafında gezmek yerine, kalıbın üzerine konduğu kendi eksenini etrafında dönebilen bir platform oluşturulması da süreyi önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu yöntemde, el yatırması yönteminde olduğu gibi çoğunlukla CTP kalıplar kullanılmaktadır. Metodun uygulanması ile ilgili bir resim şekil 2.3'te gösterilmektedir [Hull, 2000; şişecam, 1996a].



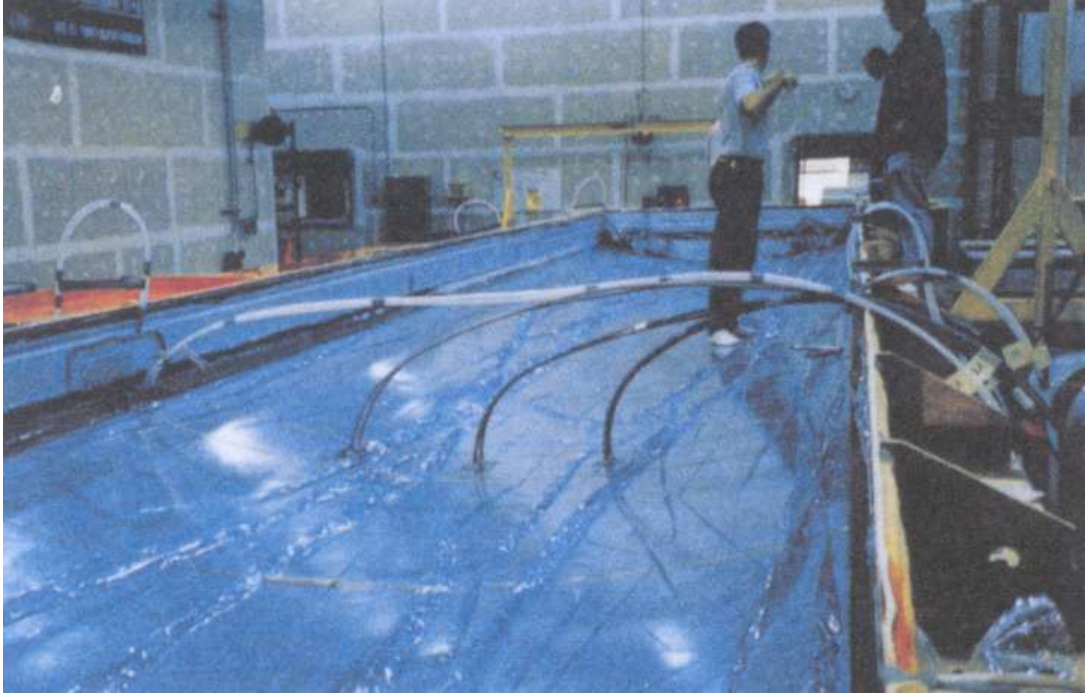
şekil 2.3. Püskürtme yöntemi uygulaması.

### 2.2.2.3. Reçine Enjeksiyonu Yöntemi REY (RTM)

Geniş yüzeylerin kalıplanmasında el yatırması ve püskürtme yöntemlerinin hız ve ürün kalitesi olarak yetersiz kalması sebebiyle reçine enjeksiyonu yöntemi geliştirilmiştir. Bu üretim metodunda, dişi ve erkek olmak üzere iki ayrı kalıp kullanılmak suretiyle, her iki yüzü düzgün ürünler elde edilmektedir. Reçine enjeksiyonu için üretilmiş olan özel keçe cam elyafı, kalıp üzerine yerleştirilmekte, ve kalıplar kapatılmaktadır. Önceden hazırlanmış olan bir kanal vasıtası ile basınç altında bağlayıcı, kalıp içine enjekte edilmektedir. Kalıpların yüksek basınca dayanabilecek ağır bir konstrüksiyon gerektirmemesi, enjeksiyon sırasında hava boşluklarının oluşmaması ve kalıp sızdırmazlığının sağlanabilmesi için düşük basınçlı bir pompa (1-4atm basınç sağlayan) ile reçineyi kalıp içine aktarırken, diğer taraftan da vakum uygulayarak reçinenin kalıp içine yayılmasını sağlanması üretimin kalitesini oldukça arttırmaktadır. Özetle reçine enjeksiyonu metodu, el yatırması ve türevi yöntemlere göre oldukça seri ve ekonomik bir yöntem olmakta, ve işçilik kalitesi çok yüksek ürün elde edilebilmektedir [Hull, 2000; Şişecam, 1997a] .

Parça boyutuna ve kullanılan cam elyafına bağlı olarak, 1.5mm-20mm arasında cidar kalınlığı ve %23-%68 arasında takviye sağlanabilmektedir. Çoğunlukla keçe ya da dokuma tipi cam elyaf takviyesi kullanılan RTM (Resin Transfer Moulding) yönteminde, el yatırması ile hazırlanmış, düşük maliyetli CTP kalıplar tercih edilmektedir. Kalıplama işlemi sırasında, takviye ve reçinenin karışımı kolaylaştırmak ve üretim süresini azaltmak için düşük viskoziteli polyester reçineler kullanılmaktadır. Reçine enjeksiyonu yönteminde, kalıp maliyetlerinin düşük oluşu, ve kullanılan ekipmanın nispeten basit ve ucuz oluşu ilk yatırım maliyetini düşürmektedir [Hull, 2000].

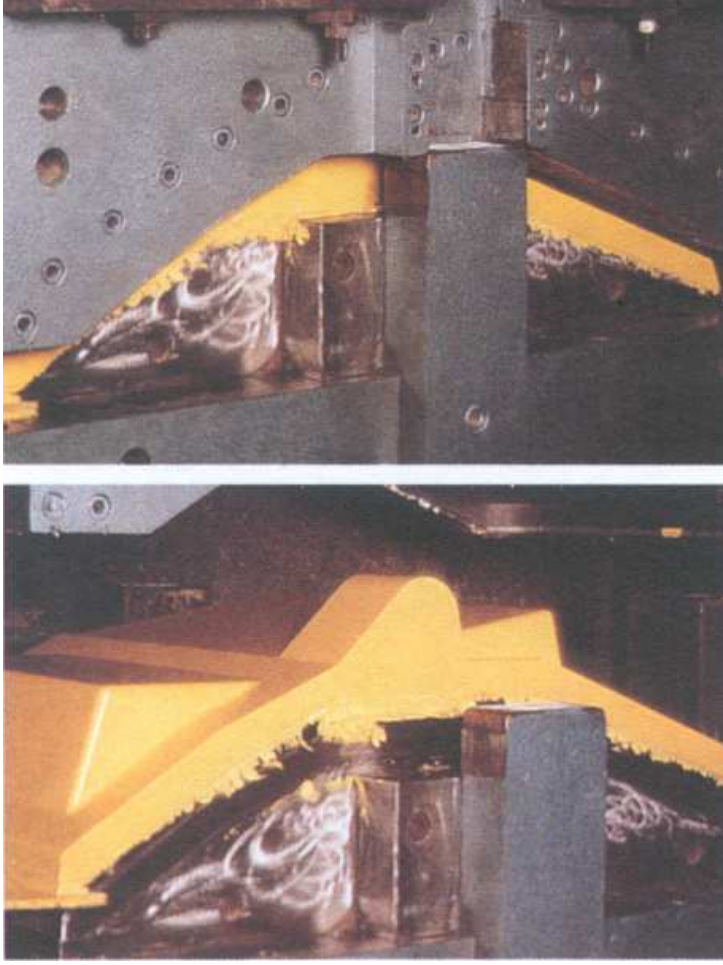
RTM yöntemini tercih eden sektörlerin başında, %58 ile otomotiv sektörü gelmektedir. Bunu %20 ile demiryolu, %7 ile havacılık ve gemi inşa sektörleri takip etmektedir. Bu yöntemle, büyük boyutlu karmaşık parçalar, sandviç konstrüksiyon ürünler, ve farklı bölgelerinde farklı mekanik özellikler ve farklı kalınlıklar istenen parçalar tek seferde kalıplanabilmektedir. İnşaat sektöründe ısı yalıtımlı geniş cephe panelleri ve reklam panoları bu yöntem ile üretilmektedir. Yöntemin uygulanması ile ilgili bir resim Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Reçine enjeksiyonu uygulaması.

#### 2.2.2.4. Soğuk Pres Yöntemi

Seri ve iki yüzü düzgün ürün üretilen bir kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde, dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp kullanılmaktadır. Dişi ve erkek kalıpların arasında, ürün kalınlığı kadar bir boşluk kalması, ve basınç uygulanması esnasında reçinenin kalıp içerisinde yürüyebilmesi için, hava tahliye deliklerinin bulunması gerekmektedir. Soğuk preste kalıbın dışarıdan ısıtılmasına gerek yoktur. İlk kalıplama sırasında meydana gelen egzotermik reaksiyon kalıp içini ısıtarak kalıplama süresinin kısaltmaktadır. Basıncın kalıp yüzeyine eşit ve homojen olarak yayılması için, genellikle ahşap, çelik ya da betondan yapılmış takviyeler gerekmektedir. Bu kalıplama metodu için uygulanan basınç genellikle  $10 \text{ N/cm}^2$  (1atm) civarındadır [Hull, 2000]. Yöntemin uygulanması ile ilgili bir resim Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Soğuk pres uygulaması.

#### 2.2.2.5. Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem genellikle boru ve silindirik tank gibi malzemelerin üretimi için kullanılan kalıplama metodudur. Elyaf sarma yönteminde, takviye olarak sürekli cam elyaf lifler, bağlayıcı olarak da, genellikle polyester veya epoksi reçineleri kullanılmaktadır. Bunların dışında özel amaçlı üretimlerde istenen özelliklere göre silikon, fenolik, düşük yoğunluklu hidrokarbonlar ve polimide reçineler de kullanılabilir.

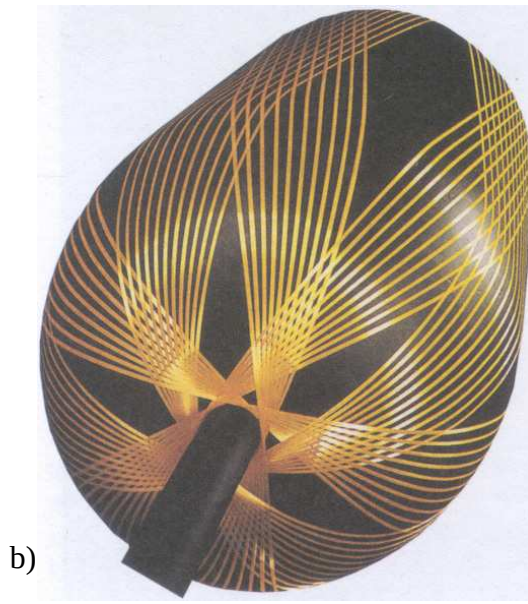
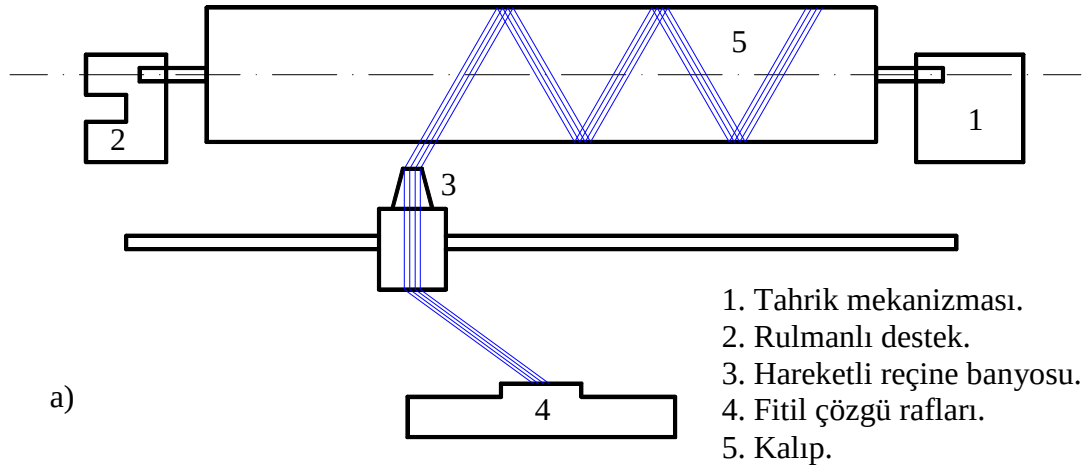
Sürekli cam elyafından fitillerin bağlayıcı malzeme banyosunda ıslatıldıktan sonra, dönen bir kalıp üzerine belirli açılarda sarılması şeklinde uygulanmaktadır. Sarımın, kompozitin maruz kalacağı öngörülen yükleri karşılayabilmesi için, cam elyafının farklı açılarda ve çok katlı olarak örülmesi mümkündür. Sarma makinesi ve

kalıp, bu yöntemin en önemli ekipmanlarıdır. Sarım işleminde, elle kontrol edilebilenden, bilgisayar kontrollü olanlara kadar değişen farklı birçok makine mevcuttur. 9m çapa ve 46m uzunluğa sahip ürünler bu yöntemle kalıplanabilmektedir. Endüstriyel, hızlı üretim, yüksek mukavemet ve mükemmel kalite kontrolü elde edilebilmektedir. Ürünlerde %60-75 oranında cam elyaf takviyesi sağlanabilmektedir. El ile kumanda edilen makineler, bilgisayar destekli otomatik kontrollü makinelere oranla çok daha ucuz olmakta ve 12m uzunlukta, 30cm-4m çapında parçaların kalıplanmasına kolaylıkla olanak tanımaktadır.

Elyaf sarma yönteminde kalıplarda genellikle metal malzeme kullanılsa da, termoset kompozit, kalıplanmış termoplastik, şişirilebilir plastik veya lastik ve özel uygulamalarda tercih edilen çözünebilir tuzlardan oluşan kalıplar da kullanılmaktadır. Ancak, çözünebilir kalıplar bir defaya mahsus kullanılabilmektedir. Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar, elyaf sarma işleminde oluşacak gerilimlere kalıbın dayanıklı olması, sertleşmiş ürünün kalıptan çıkarılması sırasında kalıbın ürün yüzeyine zarar vermeyecek şekilde imal edilebilmesidir.

Kalıplanan ürün, kalıpla birlikte sertleşmeye bırakıldığından, küçülebilir kalıp kullanımı önem kazanmaktadır. Çapı küçülebilir kalıpların başında şişme kalıplar gelmektedir. Kalıp kendi ekseninde dönen bir şaft vasıtası ile döndürme mekanizmasına bağlıdır ve kendi ekseninde dönen kalıba, reçine ile ıslatılmış elyaflar istenilen açı ile sarılarak üretim gerçekleştirilmektedir.

İkinci bir yöntem, önceden bağlayıcı emdirilmiş ve yarı sertleştirilmiş cam elyafının (Prepreg) kalıp üzerine sarılmasıdır. İlk yöntem “prepreg” kullanımına göre depolama ve maliyet açısından daha avantajlı olsa da “prepreg” sisteminde cam elyafının reçine ile homojen karışımı elde edilebilmekte ve elyafın kalıp yüzeyinde kayması engellenmektedir. Bu yöntemde de kalıptan çıkan parçaların boyutlandırılması ve kenar kesimleri için kullanılan elmas uçlu döner bıçaklar, aşırı toz yaratmakta, ve bu tozun tahliyesi için havalandırma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [Şişecam, 1996b]. Elyaf sarma yönteminde kullanılan ekipmanın şematik gösterimi ve kalıp üzerine bir uygulama Şekil 2.6’da sunulmaktadır.



Şekil 2.6. Elyaf sarma yöntemi makine ekipmanları. a) Elyaf sarma makine şeması, b) Elyaf sarma kalıp örneği.

#### 2.2.2.6. Savurma Döküm Yöntemi

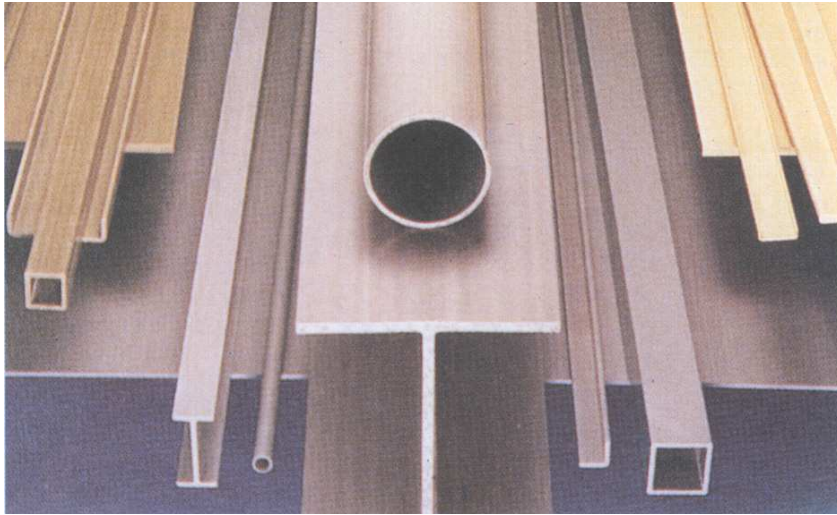
Bu yöntem de boru, tank ve direk gibi silindirik ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. Elyaf sarma yönteminden farkı, cam elyafının sürekli olmaması ve parçacık şeklinde bağlayıcı ile birlikte püskürtülmesidir. Kalıbın santrifüj ile döndürülmesi ile meydana gelen merkez kaç kuvveti, kompozitin kalıp yüzeyine her iki yüze homojen olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Başlıca kullanım alanı, 5m'ye kadar çaplı boruların kalıplanmasıdır. Polyester, vinil ester veya epoksi bağlayıcılar kullanılarak üretim yapılabilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen ürünün

mukavemetini arttırmak için kum dolgulu polyester ile ayrı bir tabaka uygulanabilmektedir. Bu yöntem uygulanarak üretilen borularda hava kabarcığı bulunmamakta ve her iki yüzü düzgün ürün elde edilebilmektedir. Kalıbın dönüş hızı kalıp çapına bağlıdır. Yaklaşık 2m çapında bir ürün için dakikada 180 devir yeterli olmaktadır. Kalıbın döndürülmesi, ürünün sertleşmesine kadar devam etmektedir.

### 2.2.2.7. Profil Çekme Yöntemi

Sürekli fitil cam elyafın bağlayıcı malzeme banyosundan geçirildikten sonra, istenilen profilde 120-150°C'ye ısıtılmış bir kalıp içinden çekilmesi yöntemidir. Elyaf takviyesi yönünde çok dayanıklı ve cam elyaf oranı %50-80 civarında profil ürünler elde edilebilmektedir. Üretilen profiller, yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra, çok kolay işlenebilmekte, hem mekanik olarak hem de yapıştırılarak birleştirilebilmektedir [Şişecam, 1996c].

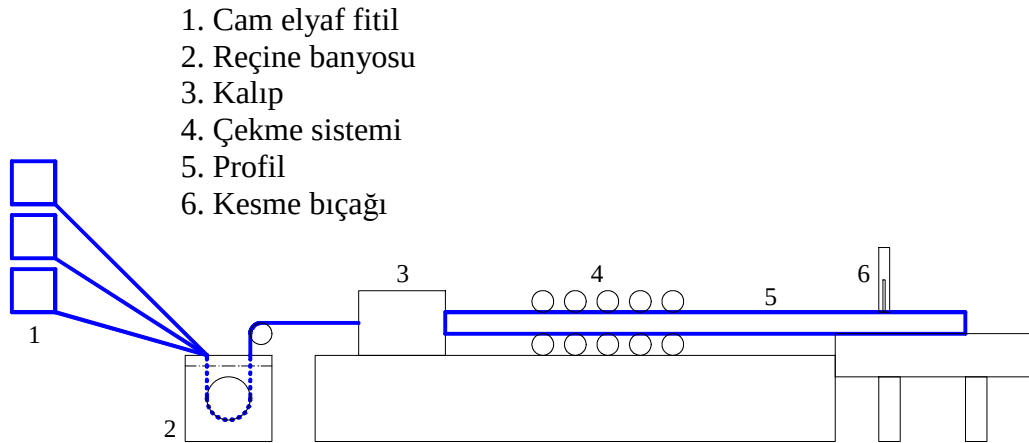
Profil çekme yöntemi ile, köşebent, I, T ve U kirişlerin yanı sıra her kesitte içi boş ve dolu kesitler seri olarak üretilebilmektedir (Bkz. Şekil 2.7). Profilin kalıptan çekilme hızı, kullanılan reçinenin sertleşme süresi, profil şekli, boyutu ve cidar kalınlığı gibi faktörlere bağlı olarak dakikada 0.1m - 6m arasında değişmektedir. Düzgün yüzeyli ve kendinden boyalı üretim yapılabilmesi sayesinde ayrıca yüzey düzeltme ve boyama işlemi gerekmemektedir [Şişecam, 1996c].



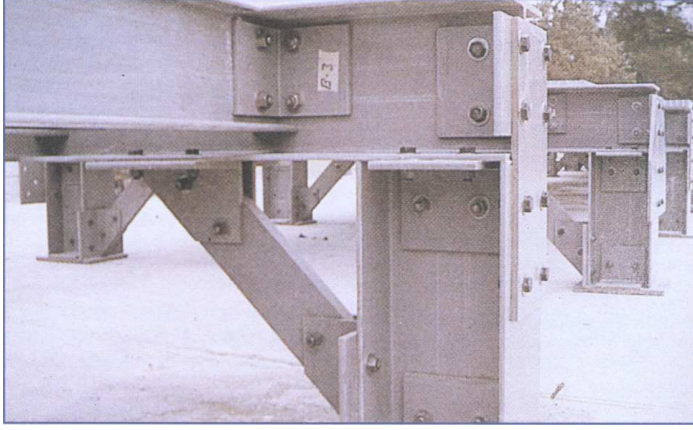
Şekil 2.7. Profil çekme yöntemi ile kalıplanan profiller.

Profil çekme yönteminde kullanılan kalıplar genellikle 25 mikron kalınlığında krom kaplanmış yüksek karbonlu çelikten üretilmektedir. Kalıp uzunluğu, genellikle 90-110cm arasında değişmekte, küçük kesit alanlı basit profiller için 60cm, büyük kesitli karmaşık profiller için ise 150cm uzunlukta tercih edilmektedir. Profil çekme yönteminde en önemli parametre, sıcaklık dağılımının kalıp boyunca homojen olmasıdır; zira oluşabilecek sıcaklık farklılıkları, profilde deformasyona yol açabilmektedir [Hull, 2000].

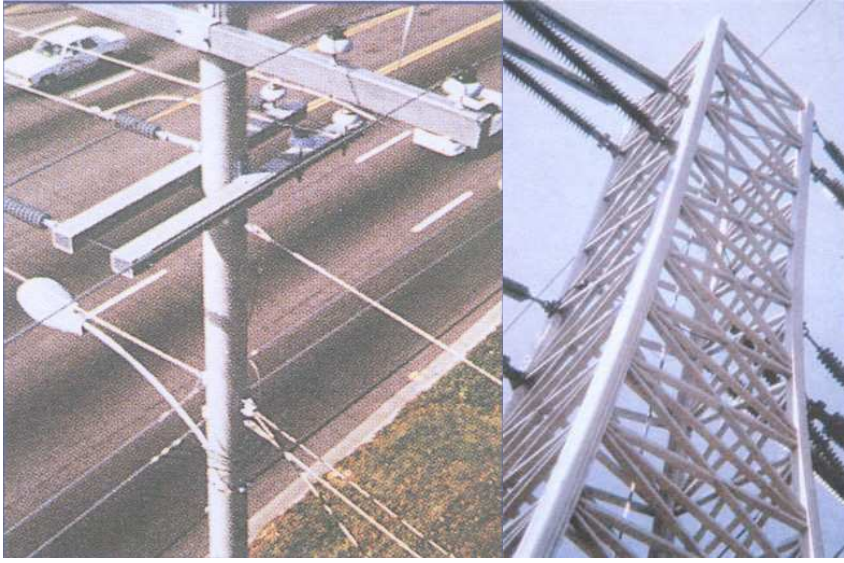
Bu yöntemde sıklıkla kullanılan bağlayıcılar, izoftalik polyester bağlayıcılardır. Ayrıca, ortohtalik, teraftalik polyester, vinilester, epoksi ve termoplastik bağlayıcıların kullanımı da mümkündür. Bağlayıcılarda, iyi ıslanmayı sağlayabilecek düşük viskozite veya seyreltilebilme özelliği aranmaktadır. Bağlayıcılarda yangın dayanımı, dolgu maddesi olarak alüminyum hidroksit kullanılması ile iyileştirilmektedir. Şekil 2.8’de profil çekme yönteminde proses akışı ve gerekli ekipman şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemle üretilen, yapı sektöründe kullanılan bazı taşıyıcı eleman uygulamaları Şekil 2.9’da örneklendirilmektedir.



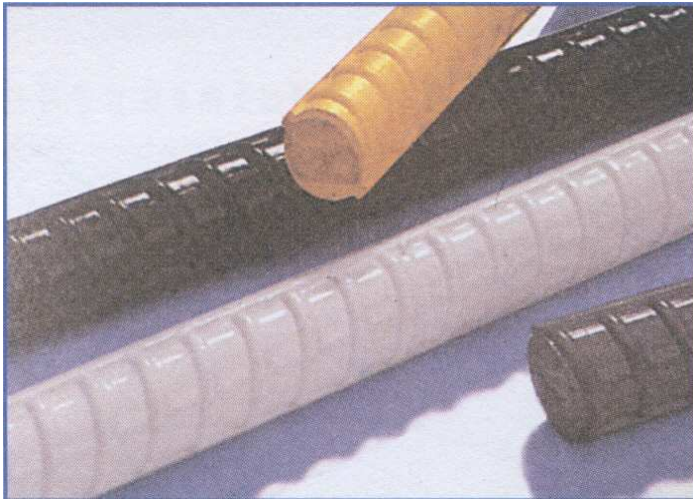
Şekil 2.8. Profil çekme yönteminde kullanılan makine şeması.



a) Köprü ayağı ve kirişler.



b) Yüksek gerilim hat direkleri.



c) Betonarme donatı çubukları.

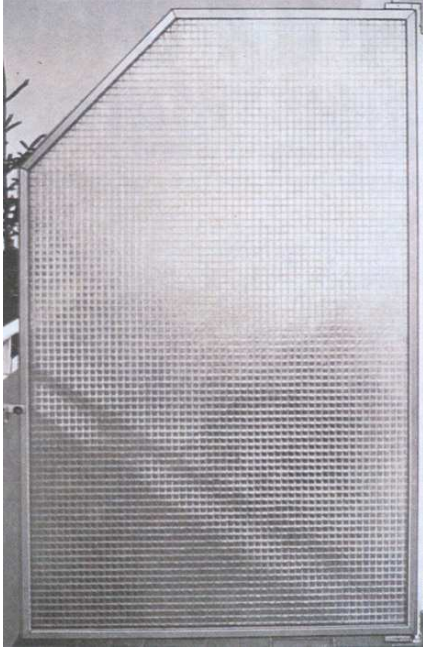
Şekil 2.9. Profil çekme yöntemi ile üretilen bazı ürünlerin yapı sektöründe uygulamaları.

### 2.2.2.8. Devamlı Levha Üretim Yöntemi

Bu yöntem sadece iki yüzü düzgün oluklu ya da oluksuz şeffaf ya da opak levha üretimi için kullanılmaktadır. Takviye, bağlayıcı ve katalist malzeme karışımı iki film tabakası arasına sıkıştırılarak bağlanmaktadır. Daha sonra fırınlanarak, istenilen form elde edilmektedir. Ayırıcı film olarak, polyester veya selofan kullanılmaktadır.

Bağlayıcı, ayırıcı film tabakası üzerine düzgün bir kalınlık oluşturacak şekilde yayılmakta ve üzerine cam elyaf takviyesi olarak keçe veya kırılmış demetler yayılmaktadır. Katmanlar rulolar arasından geçirilerek oluşabilecek hava kabarcıkları engellenmekte ve sabit bir levha kalınlığı elde edilmektedir. Daha sonra kompozit kalıplardan ısıtılarak geçirilmek suretiyle istenilen profil şekli verilmektedir. Bu yöntemle dakikada 12m'lik üretim hızı elde edilebilmektedir.

Işık geçirgen levha üretimi için cam takviyesinin toz bağlayıcılı keçe olarak veya kırılmış demet olarak kullanılması ve polyester reçine ile eş değerde bir ışık kırılma indisine sahip olması gerekmektedir. Cam takviyesi olarak, özel hallerde dokunmuş cam elyafı da kullanılabilir. Bu tür uygulamalarda cam elyafı dokumasının önce polyester banyosundan geçirilip, bağlayıcı fazlasının sıyrılmasından sonra ayırıcı film tabakaları arasında sıkıştırılması tavsiye edilmektedir. Hava koşulları ile temas edecek levhaların takviye oranının %30'dan yüksek olması gerekmektedir. Bu yöntemle üretilen yarı geçirgen bir levha Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. CTP şeffaf levha uygulaması.

#### 2.2.2.9. Hazır Kalıp Bileşimleri (HKB)

Ürün boyutu ve et kalınlığına göre, 3-6 dakikalık bir kalıplama süresi sağlayan çok hızlı ve seri bir kalıplama metodudur. HKB, bünyesinde cam elyafı, bağlayıcı, katkı ve dolgu malzemeleri içeren, hamur şeklinde, kalıplanmaya hazır bir kompozit malzemedir. HKB, 150-170 °C sıcaklıkta, 50-120atm basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmektedir. Genellikle pestil ve hamur olmak üzere, iki şekilde mevcuttur (Bkz. Şekil 2.11). Pestil şeklinde HKB’lerde 25-50mm uzunlukta, hamur şeklinde HKB’lerde 3-12mm uzunlukta kırılmış cam elyaf takviye malzemesi kullanılmaktadır. HKB’lerde, pestil şeklinde olanlarda %20-60, hamur şeklinde olanlarda %15-25 oranında takviye sağlanabilmektedir. Bunlara ek olarak, iki yönlü takviyesi olan, elyaf sarma yöntemi ile hazırlanmış, %80 oranına kadar takviye ihtiva edebilen HKB’lerde üretilmektedir. HKB’lerde bağlayıcı olarak, yüksek reaksiyon veren ve kimyasal olarak viskozitesi yüksek, izoftalik veya ortohtalik polyeester reçineler kullanılmaktadır [Wright, 2000].

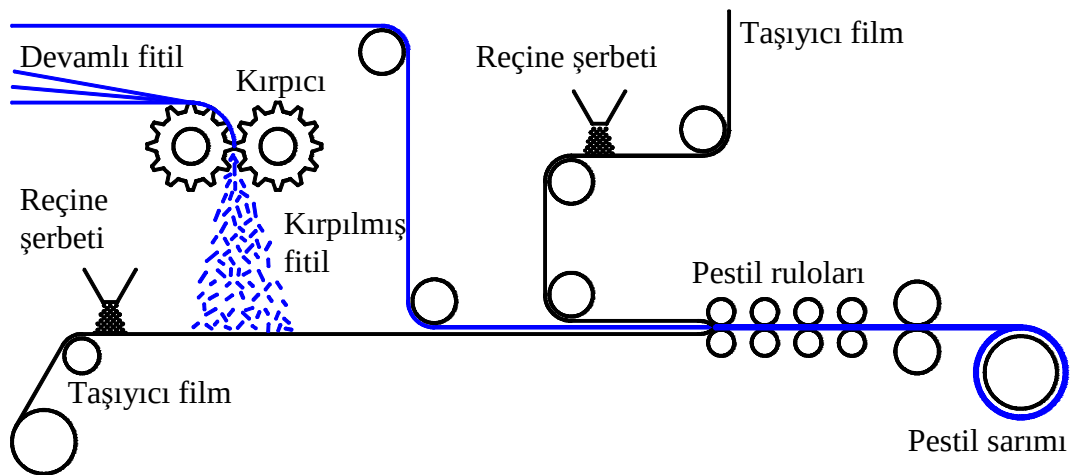
Polyester bağlayıcı türleri sertleşme sırasında dolgusuz olarak %5-9 arasında değişen hacimsel çekme özelliği göstermektedir. Bu çekme oranı yüksek dolgu

maddesi içeren HKB’lerde %0.05’e kadar düşebilmekte ve yüzey düzgünlüğü aranan uygulamalarda tercih edilebilmektedirler.

HKB’lerde, ortam sıcaklığında aktif olmayan katalizörler kullanılmaktadır. Ekipman olarak 120-170°C sıcaklıkta çalışan sıcak pres kalıplama makineleri kullanılmaktadır. İstendiği taktirde HKB’ler enjeksiyon yöntemi için de kullanılabilir. Üretim prosesi ve üretim düzeneği şematik olarak Şekil 2.12’de gösterilmektedir [Şişecam, 1997b].



Şekil 2.11. HKB pestil ve hamurlar.



Şekil 2.12. HKB üretim prosesi ve ekipmanları.

### 2.3. Yapı Mühendisliği Kararlarının Alınması

Kompozit malzemeler ve özellikle de CTP hakkında anlatılan genel bilgilerin ışığında, inşaat sektöründe yapısal bir malzeme seçimi söz konusu ise, dayanım/maliyet oranı yüksek, üretim metodu seri üretime uygun ve işçilik kalitesi kolaylıkla kontrol edilebilen kombinasyonlar üzerinde yoğunlaşılmalıdır. Bu kriterlere bakıldığında, CTP'nin diğer elyaf türleri ile üretilen kompozitlere oranla dayanım/maliyet oranının daha yüksek olabildiği anlaşılmaktadır. Tezde CTP türleri içinde dayanım/maliyet oranına bakılarak hareket edilmektedir. Her ne kadar epoksi reçinesini bağlayıcı olarak kullanan CTP'ler mekanik özellikleri açısından daha avantajlı gibi gözükse de, maliyet açısından inşaat sektörünün tolerans sınırlarını aştığı birim fiyatların kıyaslanmasından görülebilmektedir (Bkz. Tablo 2.3). Bu yüzden, ucuz ve iyi dayanımlar temin edebilen polyester bağlayıcılarla üretilen CTP, tezin ana odağını oluşturmaktadır. Takviye malzemesi olarak ise, dayanım/maliyet kriterini yapısal eleman üretimi için en iyi yerine getiren E tipi cam elyaf takviye seçilmektedir (Bkz. Tablo 2.4). Her ne kadar imkansızlıklar nedeniyle, deneysel çalışmada sürekli E tipi cam takviye yerine, keçe tipi takviye kullanıldıysa da, gerçek üretimde sürekli E tipinin kullanılması öngörülmektedir.

Kuşkusuz diğer bir önemli kriter, amaca uygun üretim prosesinin seçimidir. Burada ana hedefler seri üretime uygunluk (seri toplu konut üretimi hedeflenmektedir) ve yüksek dayanım elde edebilmek için, yüksek takviye oranıdır (%70-80). Bu seçimde belki de en önemli parametre, üretimde kalite kontrolünün kolay ve güvenilir olması, yani eleman dayanımlarında farklılaşmaların belli tolerans limitleri dahilinde tutulabilmesidir. Ayrıca, üretim bandının mümkün mertebe az ön yatırım gerektirir olması ve makine parkının az hacim işgal etmesi, diğer göz önünde bulundurulması gereken kriterleri oluşturmaktadır. Bütün bu kriterlere en iyi yanıt veren yöntem, üretilecek ürünün de profil olacağı hatırlanırsa, profil çekme yöntemi olduğu görülmektedir.

Elastisite modülünün taşıyıcı sistem davranışına etkilerini belirlemek amacıyla Lusas v13.5 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, doğrusal statik analiz, aynı

boyutlara sahip bir standart modüle, betonarme, çelik ve CTP (E tipi cam elyaf takviyeli polyester bağlayıcı CTP kompozit) malzeme ile ayrı ayrı uygulanmıştır.

Sistemin kolon aks açıklıkları 3m olarak planlanmış ve 3m yüksekliğinde 2 kattan oluştuğu kabul edilmiştir. Analizi yapılan sistemlerin detayları Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Taşıyıcı eleman boyutları, sistemlerin rijitlikleri üzerinde elastisite modülünün etkilerini karşılaştırabilmek amacıyla yaklaşık aynı atalet momentlerini sağlayacak şekilde planlanmıştır. Betonarme sisteme ait kolonlar 15x15cm ebatlarında dolu kare kesitli, kirişleri ise 10x15cm ebatlarında dolu kesitli dikdörtgen kesitli olarak hesaplanmıştır. Çelik sistem kolonları için IP20 (20x20cm) geniş başlıklı I profil, kirişleri için ise NPI20 (9x20) I profil seçilmiştir. CTP sistemin kolonlarında 20x20cm ebatlarında 1cm cidar kalınlığında kare kesitli profiller, kirişlerinde ise 10x15cm ebatlarında yine 1cm cidar kalınlığında dikdörtgen kesitli profiller kullanılmıştır. Döşeme olarak üç sistem için de 10cm kalınlığında betonarme plak kullanılmıştır.

Analizlerde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 2.10'da verilmektedir.

Tablo 2.10. Betonarme, çelik ve CTP malzeme özellikleri.

| Malzeme Özellikleri           | Betonarme | Çelik | CTP  |
|-------------------------------|-----------|-------|------|
| Elastisite Modülü (GPa)       | 27.72     | 209   | 35   |
| Poisson Oranı                 | 0.20      | 0.30  | 0.27 |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | 2508      | 7800  | 2100 |

Kolon ve kirişler için çizgi, döşemeler için ise yüzey elemanlar kullanılarak taşıyıcı sistemler modellenmiştir. Her bir eleman 4 eşit sonlu elemana bölünmüştür. Analizlerde kuvvet için Newton 'N', kütle için kilogram 'kg' ve uzunluk için metre 'm' kullanılmıştır.

Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerlerini belirleyen Türk Standardı TS498'e göre konutların bina statik hesaplarında [TSE, 1997] kullanılması öngörülen  $2\text{kN/m}^2$  hareketli yük olarak alınmıştır. Buna ek olarak, birim  $\text{m}^2$ 'ye etki edeceği öngörülen şap, yapıştırıcı ve kaplama yükleri  $1.5\text{kN/m}^2$  ölü yük olarak hesaplanmıştır. Statik hesaplarda kullanılacak yüklerin hesaplandığı ' $1.4D+1.6L$ ' ( $D$ =ölü yük,  $L$ =hareketli yük) bağıntısı ile toplam servis yükü  $5\text{kN/m}^2$  bulunmuş ve her sistem için döşemelere düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmiştir. Yapılan doğrusal statik analiz sonuçları Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11. Betonarme, çelik ve CTP strüktür analiz sonuçları.

|                                                            | Betonarme | Çelik     | CTP      |
|------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|
| Maksimum Düşey Kısılma 'Kolon' (m)                         | 0,000158  | 0,0000586 | 0,000318 |
| Maksimum Yatay Deplasman 'Kolon' (m)                       | 0,000482  | 0,0001714 | 0,000370 |
| Normal Yükler Altında Temellerde Oluşan Kuvvet 'Fx' (N)    | 27900     | 27700     | 23800    |
| Normal Yükler Altında Temellerde Oluşan Moment 'Mmax' (Nm) | 886       | 1180      | 900      |

Görüldüğü üzere, elastik sınırlar dahilinde, kolonlarda oluşan en büyük düşey kısılma CTP ile oluşturulan strüktürde görülmektedir. Her ne kadar akma dayanımı yüksek bir malzeme olması itibariyle, sistemde göçme oluşmasa da, büyük düşey deformasyonlar yaptığı anlaşılmaktadır. Diğer değerlere bakıldığında üç sistemin de yaklaşık aynı sonuçları verdiği gözlemlenmektedir. Bu durumda malzemenin elastisite modülünü iyileştirecek, basit ve ucuz bir tel örgü hasır takviyenin gerekli iyileştirmeyi sağlayabileceği hipotezi yapılmaktadır. Bu konu ile ilgili deneysel program Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmektedir.

Başarı sağlanması durumunda, CTP aşağıda verilen avantajları, yeni bir yapısal eleman olarak inşaat sektörüne kazandırılabilir.

1. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı.
2. Sınırsız kalıplama boyutları.
3. Kolay, ucuz ve çeşitlilik arz eden üretim tekniği.
4. Düşük maliyetle yeni prototip üretimi.
5. Seri üretime imkan tanınması.
6. Anti korozyon olması.
7. Kimyasal maddelere, hava koşullarına ve UV ışınlarına yüksek dayanım.
8. Kendinden renklendirilme ve ince yapı işi gerektirmemesi.
9. Hafiflik, kolay taşınma ve kolay uygulanma olanağı.
10. Kolay işlenebilir olması.
11. Uzun kullanım ömrü, düşük bakım maliyetleri ve yerinde tamir edilebilme.
12. Yüksek ses ve ısı yalıtımı, hijyen ve estetik.
13. Elektriksel yalıtkan olmaları ve manyetik alan oluşturmamaları.
14. Depremde yüksek enerji absorbe etme ve bırakma yeteneği.

Bütün bu üstün niteliklere rağmen, tüm kompozitlerde olduğu gibi, CTP’de de zamanla mukavemette bir azalma görülmektedir. Bu nedenle, tasarım yapılırken uygun bir emniyet faktörü öngörülmelidir. Büyük bir dezavantaj gibi gözüken bu nitelik sebebiyle, çekme dayanımının başlangıç değerinin  $2/3$ ’üne çok kısa bir zamanda ve  $1/2$ ’sine 50 yıl gibi bir sürede düşmesi beklenmelidir. CTP kullanımı ile ilgili diğer önemli bir dezavantaj, CTP ürünlerde kullanılan bağlayıcıların genellikle petrol türevlerinden üretilmeleri ve fiyatlarının ham petrol fiyatlarına bağlı olmasıdır. Son olarak ta, yangın dayanımlarının artırılabilmesi için bir takım önlemlerin alınması gerekliliği mutlaka değerlendirilmelidir.

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapısal CTP kompozitler hakkında bilimsel çalışmalar CTP'nin mekanik özelliklerini deneysel ve teorik olarak belirleme üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak son yıllarda mühendislikte yapısal eleman olarak kullanımı da araştırılmaya başlanmıştır. Literatür araştırmasında karşılaşılan çalışmaları üç ana gruba ayırmak mümkündür.

1. CTP'nin yapısal eleman olarak kullanımı hakkında çalışmalar
2. CTP'nin yardımcı yapısal eleman olarak kullanımı hakkında çalışmalar
3. CTP'nin bünyesel özellikleri hakkında çalışmalar

İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğunda, deneysel olarak elde edilen mekanik veriler ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aynı malzeme ve geometrik özelliklere sahip numune modellerine uygulanan analiz sonuçlarının karşılaştırması yoluna gidildiği gözlemlenmektedir. Bu tez kapsamında da benzer şekilde deneysel olarak elde edilen veriler oluşturulan strüktürün sonlu elemanlar analizi çalışmasına veri teşkil etmektedir. Literatür araştırması sonucunda elde edilen bulgulardan da bu teorik çalışma safhasında yararlanılmaktadır.

#### **CTP'nin Yapısal Eleman Olarak Kullanımı Hakkında Çalışmalar**

Bilimsel çalışmaların bu grubunda elyaf takviyeli plastik kompozitlerin tekil yapısal eleman olarak kullanıldıkları durumlarda, genellikle boyuna yükleme ve eğilme altında sergiledikleri davranışları ve mekanik özellikleri araştırılmaktadır. Ayrıca farklı elyaf ve reçine türleri ile üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmakta ve geliştirmenin yolları aranmaktadır. Çalışmalarda, yapısal eleman olarak kullanımı henüz çok yeni olan elyaf takviyeli kompozitler hakkında bir tasarım ve hesap yöntemi standardı olmadığından, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından elde edilen veriler doğrultusunda malzemenin

mekanik özelliklerini ve davranış karakteristiklerini önceden belirlemeye yarayacak hesap yöntemleri geliştirilmesine de çalışılmaktadır.

Turvey, [1997], profil çekme yöntemi ile üretilmekte olan I ve geniş başlıklı I CTP profillerin, yapı mühendisliği hesaplarında kullanılan kabuller yüzünden, taşıma kapasitelerinin altında kullanıldığını göstermektedir. Kiriş olarak kullanılan elemanların kolon birleşimleri, mevcut CTP tasarım kılavuzlarında gösterilen yöntemlerde basit mesnetli olarak kabul edildiği belirtilmektedir. Yazar, yapısal uygulamalarda kolon-kiriş birleşimlerinin, kirişlerin gövde ve başlığından ya da sadece başlığından bulonlanarak bağlandığını ve yarı-rijit bir bağlantının oluştuğunu belirtmektedir. Araştırmada tek açıklıklı bir kiriş, kesme dayanımı temel alınarak, orta noktasından tekil ya da düzgün yayılı yükle yüklenerek analizleri gerçekleştirilmiştir. CTP malzemenin elastisite modülü 17.24GPa kupon testlerinden belirlenmektedir. Sonuçlar, söz konusu standart CTP profillerin mekanik testleriyle karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, geniş başlıklı I profil kirişlerin orta nokta deformasyonunda, gövde ve başlık kısmından bulonlanması durumunda, %22-31, sadece gövdeden bulonlanması durumunda ise, %7-9 oranında bir azalma olacağı tespit edilmektedir. Aynı şekilde, I profil kirişlerin orta nokta deformasyonunda, benzer mesnetleme koşullarına göre sırasıyla, %34-42 ve %12-15 oranında azalmalar elde edilmektedir. Geniş başlıklı I profil kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde bahsi geçen mesnet koşulları için %28-45 ve %7-10; I profil kirişler için ise, %51-72 ve %14-18 oranında artışlar belirlenmektedir. Aynı yük seviyesi için yarı-rijit kolon kiriş birleşimlerinin, basit mesnetlenmiş kirişlere göre geniş başlıklı I kirişlerde %24, I kirişlerde de %38-39 oranında mukavemet artışı gösterdiği belirlenmektedir. Ayrıca, bu oranların düzgün yayılı yüklemelerde, orta noktadan tekil yüklemelere göre daha yüksek olduğu iddia edilmektedir.

Smith et. al., [1998], küçük ölçekli çerçeve testleriyle yapısal I ve kutu kesitli CTP profillerin kolon-kiriş birleşim davranışlarını incelemişlerdir. Kesitler için ölçülen dönel moment değerleri karşılaştırmış ve kolon-kiriş birleşimlerinin açıl dönmesinin ölçümünde yeni bir yöntem önermişlerdir. Kullanılan I ve dikdörtgen kesitli profiller, sürekli cam elyafı ve polyester bağlayıcı ile üretilmiş olup, her iki kesit için aynı kesit alanı ve boyutları sağlanacak biçimde seçilmişlerdir. Birleşim elemanları olarak yine profil çekme yöntemi ile üretilmiş CTP L profiller ve levhalar

bulonlanarak kullanılmıştır. I kesitli profillerin birleşiminde, kirişin üst, alt ve yan yüzeylerinde L kesitli profiller kullanılmıştır. Kutu kesitli kirişler, üst ve alt yüzeylerde kullanılan L profillere ek olarak, yan yüzeylerinden levhalarla kolonlara birleştirilmişlerdir. Hidrolik pistonla kirişe uygulanan yükler her iki kesit tipi için üst L birleşim parçalarında kırılmalara yol açmaktadır. Ayrıca kutu profillerin yan bağlantı levhaları üzerinde, bulon delikleri kenarlarında çatlaklar meydana geldiği rapor edilmektedir. Deney bulguları nispeten daha basit bir birleşme detayına sahip olmasına karşın, kutu kesitli kirişlerin, I kesitli kirişlere oranla, %25 daha rijit olduğu ve %280 daha mukavim olduğu belirtilmektedir. I kesitli CTP profillerin yapısal olarak kullanım popülaritesinin sebebinin, I profillerin çelik yapılarda daha fazla kullanıla gelmesi ve alışlagelmiş bir örnek oluşturması olduğu belirtilmektedir. Ancak profil çekme yöntemi ile üretilen I ve kutu kesitli CTP profiller arasında üretim kolaylığı ve ekonomiklik açında bir fark bulunmadığı, üstelik, deney sonuçlarına göre kutu kesitli profillerin mukavemet açısından çok daha avantajlı olabildikleri vurgulanmaktadır.

Turvey and Cooper, [2000], bina tasarımında önemli bir parametre olan kolon temel birleşim noktalarında oluşan momentleri ve mesnet davranış karakteristiklerini, profil çekme yöntemi ile üretilmiş standart geniş başlıklı CTP I profilleri ve bulonlu temel birleşimler kullanarak, bir dizi mekanik test ile incelemektedir. Kolonun her iki aks doğrultusunda kırılmaya kadar yükleme yapılmış ve kolon temel birleşim yerinde oluşan dönmeler ve momentler ölçülmüştür. Rijit temel birleşimleri, düşük elastisite modülü nedeniyle oluşan aşırı yatay deplasmanları azaltabilmek bakımından tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan CTP profiller, %40 cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerdir. Kolonlar 102mm ve 203mm kesit yüksekliğindeki geniş başlıklı I profillerden seçilmekte, bulonlu temel bağlantı elemanları ise aynı yöntemle üretilmiş CTP 'L' profillerden oluşturulmaktadır. Bağlantılarda 2mm çapındaki deliklere, 10-12mm çapında çelik bulonlar yerleştirilmektedir. Deneyde kolonlara, temelden 1-0.5m mesafeden, yaklaşık 50kN kapasiteli hidrolik kollarla yatay yükler etki ettirilmiştir. Yatay ve düşey deplasmanlar, elemanların üzerine yerleştirilen potansiyometreler aracılığıyla ölçülmektedir. Kolonun bağlı olduğu 12.7mm kalınlığındaki temel vazifesi gören levhada oluşan dönme momentleri ise, kolon yanaklarına ve başlıklara yerleştirilen elektronik inklinometreler sayesinde ölçülmektedir. Yazarlar testler neticesinde moment-dönme eğrilerini

oluşturmaktadırlar. Kırılmaların mesnetlerdeki L bağlantı elemanlarında olduğu gözlemlenmekte ve bu parçaların dönme rijitliğini arttırmada çok önemli oldukları belirtilmektedir.

Hashem et. al., [2000], yaptıkları çalışmada kolon olarak kullanılan kutu ve üniversal kesitli yapısal CTP profillerin basınç altındaki mukavemet ve deformasyon karakterlerini deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Kullanılan CTP profiller, profil çekme yöntemiyle, sürekli cam elyaf takviyeli polyester ve vinil ester bağlayıcılı yapısal elemanlar olarak üretilmiştir. Deneyler iki ayrı tip kesit için, 46cm ve 244cm uzunluğundaki toplam 44 adet numuneye uygulanmıştır. Numuneler düşey konumda, sabit ve serbest mesnetleme durumları için, 6.67kN/s sabit artan basınç yüklemesi uygulanarak test edilmiş ve elde edilen değerler doğrultusunda ilk eğim, basınç gerilme-deformasyon ilişkisi, yanal deplasman, burkulma ve basınç sınır değerleri belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci adımı olarak üniversal kesitli kolonlar, MSC/NASTRAN genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yüzey elemanlar ile modellenmiş ve düşey yükler altındaki davranışlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçları doğrulamak için klasik ortotropik levha teorisi kullanılmıştır. Numunelerin tamamına yakını doğrusal gerilme-deformasyon özellikleri göstermiştir. Ortalama elastisite modülü deneysel ve analitik çalışmalarda sırasıyla 31.3GPa ve 30.7GPa bulunmuştur ki, bu da sonlu elemanlar yöntemiyle basınç elastisite modülünün güvenilir bir şekilde elde edilebileceğini göstermiştir. Deneyler esnasında hiçbir numune için burulma deformasyonları gözlenmemiştir, göçmenin yarım sinüs dalgası verecek biçimde lokal burkulmalar içerdiği görülmektedir. Bu durum özellikle üniversal kesit için yaygınlık kazanmaktadır. Kolonların yükleme kapasiteleri için deneysel ve analitik olarak elde edilen değerler arasındaki %36 gibi büyük bir fark olması nedeniyle doğrusal sonlu elemanlar analizinin nihai yüklemenin tespiti için güvenilir sonuç vermeyeceği sonucuna ulaşılmaktadır.

Spagnoli et. al., [2001], cam lif takviyeli silindirik tüp elemanların burkulma davranışını deneysel ve analitik olarak incelemektedir. Kompozitin yüksek mukavemet-kütle oranı yazarlar tarafından en önemli kullanım gerekçesi olarak gösterilmekte ancak ince cidarlı yapısı gereği burkulma davranışının titizlikle incelenmesi gerektiği rapor edilmektedir. Yazarlar E tipi cam lifi ve isopitalik

polyester bağlayıcı ile  $0-0^\circ$ ,  $0-90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  doğrultularda dokunmuş 60 cm boyunda silindirik elemanlar araştırılmaktadır. Bu tür elemanların üretiminde dokumanın bindirme noktalarında ve bağlayıcının kusması sonucunda kalınlık değişimleri gözlemlenmekte, böylece yüklenme öncesi boyuna ve kesitsel geometrik eksentrisme bulunabilmektedir. Geometrik üretim kusurlarının özellikle ince cidarlı tüplerde burkulma davranışını önemli ölçüde değiştirdiği vurgulanmaktadır. Lazer tarama yöntemi ile numunelerin yüzey düzensizliklerinin %15 oranında bir değişim katsayısı verdiği tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ölçülen düzensizliklerin yüzey elemanlarının düğüm noktalarına Fourier yüzey fonksiyonu ile tanımlanarak, ve akabinde doğrusal olmayan geometrik analiz ve doğrusal eigenvalue burkulma analizleri tatbik edilerek kullanılmıştır. Burkulma modları incelendiğinde malzeme kalınlığının azaldığı bölgelerde sinüs dalgası verdiği hem deneysel çalışma sonrası ölçümlerden hem de sonlu eleman analizlerinden belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrileri ve rijitlikler incelendiğinde deneysel ve analitik çalışma bulguları uyumlu bulunmaktadır. Ancak nihai basınç mukavemetleri analitik çalışmalardan bulunan değerlerin yarısı olarak belirlenmekte ve bu durum doğrusal elastik kabul edilen malzeme özelliklerinin gerçekte lamine teorisine CLT (classical laminate theory) uymamasına bağlanmaktadır. Bunun numunelerde kullanılan DF lamine yapısından kaynaklı bir problem olduğu ayrıca rapor edilmektedir. Yazarlar, sonlu elemanlar modellemesinin hem doğrusal olmayan geometrik hem de doğrusal olmayan malzeme algoritması kullanarak yapılmasının uygun olacağını ve geometrik yüzey düzensizliklerinin mutlaka hassas olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca,  $0-0^\circ$ ,  $0-90^\circ$  doğrultuda lif yönlerinin  $\pm 45^\circ$  doğrultuda liflere göre %50 daha az rijit oldukları tespit edilmektedir.

Hulatt et. al., [2002], yapı mühendisliğinde kullanımı hızla artmakta olan plastik kompozitlerin (APC) önemini vurgulamakta ve kullanım ömürleri konusunda deneysel bir çalışma sunmaktadır. Beton elemanlarda, çekmeye çalışan APC'lerin kullanıldığı T hibrid kirişlerin kompozit kısımlarında sıklıkla kullanılan karbon elyaf ve cam elyaf kompozit çeşitlerinin sıcaklık, su, tuzlu su ve UV ışınları karşısında malzeme özellikleri araştırılmıştır. İncelenen kompozitlerde elyaf olarak, sürekli iki yönde yerleştirilmiş karbon lif dokuma, ve cam lif dokuma ile  $\pm 45^\circ$  olarak dokunmuş sürekli cam elyaf kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak da yapısal uygulamalara uygun, düşük sıcaklıkta kurlenen epoksi reçine kullanılmıştır. Kupon numunelerin öncelikle

üç değişik sıcaklıkta (22, 45, 60°C) gerilme-birim deformasyon özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra, su, doymuş tuz çözeltisi ve ultra- viyole (UV) radyasyonu olmak üzere üç değişik ortam etkisine 2000 saat tabi tutulmuşlardır. Zararlı madde penetrasyonunu sağlamak için numuneler nihai yüklerinin %40'ı ile yüklenmişlerdir. Deneylerde ASTM D3039M standardı kullanılmış ve yükleme hızı 2mm/dak olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin boyuna çekme gerilmesi, uygulanan yükün ilk kesit alanına bölünmesi ile, elastisite modülü ise gerilme-deformasyon grafiğinden hesaplanmıştır. Deney ortam sıcaklığı, numunelerde kullanılan bağlayıcının kürlenme sıcaklığına yaklaştığında nihai kopma gerilmelerinde ve elastisite modülünde bir azalma gözlemlenmiştir. 45°C'ye kadar karbon ve iki yönde dokunmuş cam elyaf kompozitlerin özellikleri neredeyse aynı kalmasına rağmen  $\pm 45^\circ$  dokunmuş sürekli cam elyaf kompozitin elastisite modülü ve mukavemetinde büyük düşüşler tespit edilmektedir. Numunelerin su ve tuz çözeltilerine maruz bırakılmaları mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir ters etki yaratmamaktadır. Aynı şekilde 2000 saat boyunca UV ışınlarına maruz kalan numunelerin mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmemektedir. Deneyler yapı mühendisliği uygulamalarında, nihai mukavemete göre daha önemli olan elastisite modülünün genellikle önemli miktarda değişikliğe uğramadığı vurgulanmaktadır.

Song and Du, [2002], cam elyaf takviyeli farklı bağlayıcı ve doğrultuda dokunmuş  $\pm 75^\circ$  polyester,  $0/75^\circ$  epoksi,  $\pm 15^\circ$  polyester,  $\pm 15^\circ$  epoksi- silindirik kompozit profillerin aks doğrultusuna eğimli  $-5^\circ$  ile  $25^\circ$  arası her  $5^\circ$  açısı için-etkiyen basınç yükleri altındaki enerji yutma performanslarını araştırmaktadır. Deneylerde elyaf sarma yöntemi ile üretilmiş, boyları 100mm, iç çapları 55mm ve et kalınlığı 1.6mm-2.2mm olan numuneler 5mm/dak yükleme oranı ile test edilmektedir. Yazarlar eğik basınç altında üç deformasyon evresi bulunduğu rapor edilmektedir. 'Tetikleme evresi' silindirik numunenin köşeden itibaren deformasyonun yatay izdüşüm seviyesine ulaşana kadar olan evreyi tanımlamakta, eksenel basınca göre %50 daha düşük bir rijitlik vermektedir. İkinci aşamada deformasyon sabit yük altında artmakta (sürekli evre), üçüncü evrede ise numune yük taşıma kapasitesini yitirmektedir (devrilme evresi). Yük-deformasyon eğrileri incelendiğinde yükleme açısı arttıkça, enerji yutuculuk kapasitesinde düşüş gözlemlenmektedir.  $\pm 15^\circ$  dokunmuş numuneler yüksek eğimli basınç dayanımı en düşük,  $0/75^\circ$  dokunmuş numuneler ise en yüksek olan koşulları yaratmaktadır. Tüm

numunelerde  $15^\circ$  açığa kadar dayanımın aksel basınç dayanımından fazlaca farklı olmadığı görülmektedir.

Clifford et. al., [2002], DERA KANE 411-C50 vinil ester bağlayıcılı Chonorat E tipi elyaf takviyeli sandviç kompozit ve metalin birlikte kalıplandığı tekne gövdesi omurgasının strüktürel davranışını analitik ve deneysel olarak incelemektedir. Kompozit-metal birleşim arayüzünün mekanik özelliklerinin davranışı etkilediği anlaşılmakta üç ayrı birleşim detayı ile göçme modunun sünekliliği ve bağlantının rijitliği artırılmıştır. Cam takviyeli kompozitin çelikle birleşim uzantısının kesit boşluğunda uzatıldığı ve kesit boşluğunun esnek malzeme ile (balsa ve Divincell® PVC köpük) dolgu yapıldığı alternatifler araştırılmıştır. Çelik-CTP ara yüzünün kayma dayanımı ve taşıyıcı elemanın eğilme davranışı ayrı test programlarıyla belirlenmiştir. 10mm/dk sabit yük uygulanarak 4 nokta delaminasyon testinden elde edilen bulgular ara yüzde bağlayıcının yoğunluğunu artırarak çelik yüzey pürüzlerinin arasına penetre olmasının sağlanmasının aderansı ve dolayısı ile dayanımı arttırdığını göstermektedir. Teorik çalışma bölümünde, öngörülen birleşim detayı sonlu elemanlarda yüzey elemanlar kullanılarak modellenmekte, kesme ve normal gerilme konturları doğrusal elastik malzeme –E:25GPa,  $\nu$ :0.09- analizleriyle belirlenmektedir. Deneysel eğilme testleri esnek malzeme dolgusu Divincell® PVC köpük olan birleşimin oldukça duktıl olduğunu –CTP kompozitin çelik elemanı kavradığı noktada normal gerilme dayanımını aşarak göçmektedir- , ancak çeliğin boşluğa daha fazla penetre olduğu seçeneğin daha yüksek rijitlik sağladığı -kompozit kesitte kayma ve normal gerilmeler son derece düşük, birleşimin dışında çelik akmaktadır- görülmektedir. CTP-çelik ara yüzünün  $250^\circ\text{C}$  sıcaklığa maruz bırakılması mukavemette azalmaya sebep olmaktadır. Bunun sebebi olarak, CTP-çelik birleşim ara yüzünde reçine yoğun bölgenin bulunması ve reçine ile çeliğin farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olması gösterilmektedir.

Keller et. al., [2003], profil çekme yöntemiyle üretilmiş bir CTP köprü tabliye sisteminin, deneysel ve analitik olarak yapısal davranışını incelemektedir. Deneysel çalışmada tam ölçekli 2.9x1.626m boyutlarında Vierendel döşeme tabliyesi test edilmektedir. Çalışma çift yönlü eğilme davranışının tabliye dayanımı üzerindeki etkisini irdelemesi öncelikli olarak amaçlanmaktadır. Numune tabliyelerin oluşturulmasında kullanılan profiller sürekli tip E cam elyafı ve isotopik polyester

reçine ile üretilmişlerdir. Lamine profillerin dış yüzlerinde yüzey gerilmelerini daha iyi karşılamaları açısından  $\pm 45^\circ$  dokunmuş sürekli cam elyaf ile %60 oranında takviye edilmiştir. Tabliye orta noktasından 1000kN kapasiteli hidrolik kriko ile 7.5kN/dak yükleme hızıyla yüklenmiştir. Ayrıca, tabliye kenarı boyunca yerleştirilen LVTD ile mesnet reaksiyonları saptanmıştır. Analitik modellemede tabliye ‘Solid 186’ kodlu hacimsel elemanlardan oluşturulmuştur. Modelde yapısal elemanlar arasındaki yapışma ara yüzeyleri modellenmemiştir. Deneysel ve analitik çalışma sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüş ve bu modelleme yöntemi ile farklı yüzeylere sahip tabliye sistemlerinin düşey deplasman ve gerilme tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Test sonuçları tabliyelerin 400kN’a kadar doğrusal elastik özellikler gösterdiğini, bu noktadan sonra göçmenin olduğu 796kN’a kadar rijitlikte küçük bir değişim olduğunu göstermektedir. Bu değerlerin Eurocode EC1’de aranan köprü tabliye yükleme sınırı kabul edilen 220kN’un üzerinde olduğu tespit edilmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda en doğru sonuca ulaşmak açısından tabliyelerin en az beş birim Vierendel başlığı ile oluşturulması gerekliliği savunulmuştur.

Çalışmalarda elde edilen bulgular yapısal kompozit elemanların birleşim noktalarının sistemin mukavemetinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Birleşim noktalarının zayıflığı sebebi ile taşıma limitlerinin altında kullanılan yapısal kompozit elemanların, birleşim noktalarında alınacak ek önlemler ile daha verimli olarak kullanılabileceği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca malzemenin deformasyon bazlı bir tasarım yaklaşımının, dayanım bazlı tasarımına göre daha önemli olduğu belirtilmektedir. Çalışmalar genellikle analitik çalışma sonuçlarının deneysel sonuçlara yakınlık gösterdiğine işaret etmektedir.

## **CTP’nin Yardımcı Yapısal Eleman Olarak Kullanımı Hakkında Çalışmalar**

CTP kompozitler betonarme ve yığma yapı elemanlarının takviyesinde de kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerin beton elemanlarda çelik donatı yerine takviye çubuğu olarak veya mevcut strüktürün üzerine levha şeklinde sarılarak onarım yada güçlendirme amaçlı kullanımları mevcuttur. Bu gruptaki çalışmalar

farklı takviye yöntemlerinin yapının performansı üzerindeki etkilerini deneysel ve teorik olarak belirlemeyi amaçlamaktadır.

Corradi et. al., [1997] Umbria-Marche depremi sonrasında geleneksel taş ve tuğla örgülü yığma duvarların karbon ve cam lif takviyeli levhalarla iki yüzeyden epoksi ile yapıştırılmak suretiyle güçlendirilmesini gerçek yapılar üzerinde deneysel çalışmalarla belirlemektedir. Her iki kompozitte bağlayıcı olarak epoksi kullanılmakta lif yönleri bir yönde sürekli olarak düzenlenmektedir. Test numuneleri 180x90cm ve 120x120cm duvar panellerine sırasıyla eksenel basınç, çapraz basınç ve sabit basınç-kesme kuvveti altında denenmektedir. Her yük durumu altında numunelerin dayanım mukavemeti ve elastisite ve kayma modülü belirlenmektedir. Kompozit malzemenin karbon yada cam lifli olmasının dayanımda önemli bir artışa yol açmadığı, kompozitin takviye ettiği malzeme ile aderansının yüksek olması gerektiği vurgulanmaktadır. Güçlendirme elemanı olarak kompozitin kullanıldığı numunelerde takviye edilmemiş numunelere oranla elastisite modülünde %200, kayma modülünde %140, mukavemette ise %55-140 arasında bir artış rapor edilmektedir.

Sarıbıyık, [2001], CTP kompozitlerin, deneysel yöntemler ile elde edilen malzeme özelliklerini klasik laminasyon teorisi ile elde edilen mekanik malzeme özellikleriyle karşılaştırmaktadır. Teorik yöntemin güvenilirliği ASTM D3039 test standardı ile yapılmış bir dizi kupon testlerle karşılaştırılmıştır. Profil çekme yöntemi ile üretilmiş standart bir CTP kutu profilin mekanik özellikleri klasik laminasyon teorisi ile tahmin edilmiştir. Mikromekanik formüller yardımıyla takviye ve bağlayıcı malzemelerin takviye oranları doğrultusunda, kompozite kazandırdığı mekanik özellikler değerlendirilmiş, makromekanik formüller ile de bu bileşenlerin oluşturduğu kompozit formun mekanik özellikleri hesaplanmıştır. Teorik yöntem ile elde edilen elastisite modülü 26,7Gpa bulunurken, testlerde elde edilen kompozitin elastisite modülü 27,4Gpa olarak ölçülmektedir. Teorik olarak hesaplanan Poisson oranının da (0,38), test sonuçlarına (0,29) göre farklı değerler alabileceği vurgulanmaktadır.

El-Amoury and Ghobarah [2002], eski deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış dış kolon-kiriş bağlantılarının kesme dayanımının artırılmasında E cam

lif takviyeli levhaların katkısını deneysel olarak belirlemektedir. Sekiz katmanlı  $\pm 45^\circ$  doğrultuda dokunmuş kompozit levhalar kolon-kiriş bağlantısının alt kısmına basınç donatısının aderans boyunun yetersizliğini karşılamak üzere, kolon yan yüzeylerine de beton ufalanmasını engellemek için kılıf içine alınmaktadır. Deney T formdaki birleşimin ucuna tekrarlı yük altında histeretik yük-deformasyon davranışı belirlemiştir. Kompozit levhalar numuneye sabitlenmiş ve iki ayrı detayla çelik köşebent ayrıca ikinci bir güçlendirme elemanı olarak kullanılmıştır. Her iki güçlendirilmiş bağlantı takviye edilmemiş elemana göre %52 daha yüksek kesme dayanımı sergilemektedir. Çelik güçlendirmenin daha fazla olduğu, ve levha sabitlenmesinin daha güçlü olduğu numunenin altı kat daha iyi enerji yuttuğu belirtilmektedir. Her iki çalışmada üstün faydasının görüldüğü bu yeni yapısal malzemenin tam verimli kullanılamadığı ve numunelerin nihai göçme anında dahi malzemenin gerilme limitlerinin oldukça altında kaldığı vurgulanmaktadır. Bu durum malzemenin tek başına kullanımı halinde gerçek potansiyelini hayata geçirebileceğinin ilk göstergesidir.

Mortazavi et. al, [2003], mevcut binaların betonarme elemanlarına uygulanan dışarıdan elyaf sarma ile güçlendirme ve tamir yönteminde, yanal deformasyonlara karşı etkili bir koruma sağlanamadığını ve takviye malzemesinin yük taşıma kapasitesinin altında (%40-50) betonarme elemanın göçtüğünü öne sürmektedir. Bu güçlendirme yöntemi ile ilgili uluslararası bir yönetmelik bulunmamakla birlikte, çalışmanın teorik bölümü için, betonun çelik ile sarılma takviyesini tanımlayan Eurocode 8'den yararlanılmaktadır. Takviye malzemesinin yük taşıma kapasitesindeki kayıplara yol açan mevcut takviye uygulama yöntemlerine alternatif yeni bir yöntem olarak, mevcut taşıyıcı eleman ile, etrafına sarılacak fiber takviye arasına donarken şişen bir çimento şerbeti doldurmayı önermektedir. Yazarlar donarken şişecek olan bu malzemenin, uygulanan elyaf takviyesine bir ön gerilme uygulayacağını, böylece, takviyenin toplam yük taşıma kapasitesine daha yakın düzeylerde kullanımının gerçekleştirilebileceğini öngörmektedirler. Bu doğrultuda, karbon-CFRP, cam elyaf-GFRP ve çelik ile takviye edilmiş silindirik beton kolon modelleri sözü edilen yöntemle kalıplanmış, yapılan mekanik deneylerde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, takviyede ön gerilme olması durumunda, ön-gerilme bulunmayan elemana göre %35, hiç takviye edilmemiş elemana göre de 4 kat mukavemet artışı elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, cam

elyaf takviyelerin yanal deformasyonları yarıya indirdiği ve yük taşıma kapasitesinin de 2 kat arttığı bildirilmektedir.

Abdalla, [2002], yapısal beton elemanlarda çelik donatı yerine kullanımı yaygınlaşan elyaf takviyeli polimer çubukların, düşük elastisite modülü yüzünden büyük eğilme deformasyonları ve eğilme çatlakları sergileyebileceklerini vurgulamaktadır. Çalışmada cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli çubuklarla oluşturulan yedi adet prototip beton kiriş üzerinde yapılan mekanik test sonuçları birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, literatürde mevcut, daha önce yapılmış döşeme tabliyesi deneylerinin sonuçlarıyla da mukayese edilmektedir. Çalışmada temel amaç, elyaf takviyeli polimer çubuklu betonarme elemanlarda eğilme deformasyonlarını en iyi saptayan tasarım yönteminin belirlenmesi olarak gösterilmektedir. Deneylerde kullanılan takviye çubukları çeşitli firmaların patentli olarak üretmekte oldukları, piyasada bulunabilen ürünlerden seçilmiştir. Cam elyaf takviyeli çubuklar, E tipi cam elyaf takviyeli termoset polyester reçine ile üretilmiş, karbon elyaf takviyeli çubuklarda ise bağlayıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 25x50cm kesitindeki kirişler, 230cm aks aralığında basit mesnetlenerek üç nokta eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Kirişin kesit alanına göre takviye oranları, cam elyaf çubuklar için %0.4 ile %1.5, karbon elyaf çubuklar için %0.2 ile %0.4 arasında seçilmiştir. Donatı oranları dengeli durumu sağlayacak biçimde hesaplanmıştır. Deney sonuçlarında karbon elyaf çubukların yüksek elastisite modülleri sayesinde, prototip kirişlerde aynı takviye oranına sahip cam elyaf çubuklara oranla yaklaşık iki kat fazla yük taşıdıkları, ve buna rağmen daha az deformasyona uğradıkları saptanmaktadır. Her iki tip için ilk çekme bölgesi çatlağından sonra bir plato oluşmakta, ardından karbon elyaf numuneler daha yüksek rijitlik sergilemektedir. Bu durum cam takviyeli numunelerin düşük elastisite modülüne (42 GPa Isorod) bağlanmaktadır. Çelik donatılı takviye ve cam takviye döşeme tabliyesinde karşılaştırılmış ve cam takviyelerin düşük elastisite modülü 1/3 kata kadar daha düşük yüklemelere yol açmıştır. Çalışmanın teorik bölümünde, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) ve ISIS Kanada yapı yönetmeliklerinin belirlediği, elyaf takviyeli çubuklarla takviye edilmiş beton kirişlerin deformasyon modellerine ve kabul görmüş yayınlanmış akademik bir yöntemle göre teorik deformasyonlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar göstermiştir ki, akademik yöntem ve ACI-440 yönetmeliğine göre hesaplanan deformasyonlar deney

sonuçlarına uygun bulgular vermemektedir. En yakın sonuçlar ISIS Kanada yaklaşımından bulunanlarla, yazarın önerdiği yeni bir yaklaşımla hesaplanan bulgular olmaktadır.

Çalışmalardan takviye malzemesi ile beton eleman arasındaki aderansın son mukavemet değeri üzerinde büyük ölçüde etkisi olduğunu anlaşılmaktadır. Aderansın düşük olduğu durumlarda takviye amaçlı kompozitin yük taşıma kapasitesinin çok altında, verimsiz bir takviye elde edilmektedir. Bunun yanında elyaf ile güçlendirilen yapısal elemanların kesme dayanımı, elastisite modülü ve yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerinde güçlendirme uygulanmayanlara oranla yüksek artış sağlandığı da rapor edilmektedir.

## **CTP'nin Bünyesel Özellikleri Hakkında Çalışmalar**

Bu konuda CTP malzemesinin darbe dayanımı ve kullanım ömrü üzerine deneysel ve teorik çalışmalar uzun bir geçmişe sahiptir. Deneyler, kupon numuneler laboratuvar ortamında tekrarlı testlere tabi tutularak yapılmakta ve elde bulgulardan yararlanarak bu özelliklerin teorik olarak önceden tahmin metotlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. CTP'nin temel mekanik özellikleri iyi bilinse de, son yıllarda bazı özel konuları irdeleyen birtakım çalışmalara ağırlık verilmektedir.

Philippidis and Vassilopoulos, [2002], yapısal uygulamalarda kullanılmakta olan ince cidarlı kutu kesitli CTP kirişlerin iki boyutlu gerilme ve tekrarlı yüklemeler altındaki davranışını incelemektedir. Yazarlar lif boyuna dik doğrultuda oluşan normal gerilme ve düzlem içi kayma gerilmesi şiddetlerinin küçük olmasına rağmen, tekrarlı yükler altında lif boyunca oluşan normal gerilmelere karşı kompozitin direncini önemli ölçüde azaltabileceğinin altını çizmektedir. Tekrarlı yükler altında malzeme dayanımını belirlemek amacıyla numuneler, dış yüzlere yerleştirilen  $0^\circ$  doğrultuda E tipi sürekli cam elyaf ( $700\text{g/m}^2$ ) ve iç yüze  $\pm 45^\circ$  doğrultuda E tipi cam elyaf dokuma ( $450\text{g/m}^2$  ve  $225\text{g/m}^2$ ) içeren 4 katmanlı kompozit kuponlardır. Polyester bağlayıcı ile oluşturulan lamine kompozit numuneler  $15^\circ$ 'lik açı değişimleri ile  $0-90^\circ$  arası doğrultularda kesilerek hazırlanmışlardır. Statik yükleme deneylerinde  $1\text{mm/dk}$  hızında yükleme kontrolü kullanılarak basınç ve çekme

kuvvetleri altında testler uygulanmıştır. Yorgunluk mukavemeti deneylerinde de sabit genişlikte sinüzoidal dalga formunda yükleme kontrollü periyodik yüklemeler yapılmıştır. Deneyler numunelere  $10^6$  periyoduna veya kopmaya kadar tekrarlı yük etki ettirilmek suretiyle ifa edilmiştir. Gerilme-tekrar sayısı ilişkileri basınç-basınç  $R=10$  ( $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}= R$ ), çekme-basınç  $R=-1$ , çekme-çekme  $R=0.1$  ve  $R=0.5$  oranları için sunulmaktadır.  $R=10$  basınç ve  $R=0.1$  çekme numuneleri değerlendirildiğinde basınç numunelerinin tekrarlı yükler altında daha dirençli oldukları vurgulanmaktadır. Kompozitlerin düşük periyotlarda çekme mukavemetlerinin basınç mukavemetlerine oranla daha yüksek olduğu fakat daha yüksek periyotlarda durumun tersine döndüğü rapor edilmektedir. Açısal değişiklik içeren numune davranışları incelendiğinde dayanım karakterlerinin eksen doğrultusundan saptıkça azaldığı ve anisotropik malzeme özellikleri gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca aksiyel olmayan yükleme durumlarına göre oluşturulan eğriler CTP laminatların izotropik olmayan özelliklerini doğrulamaktadır. Deney bulgularına göre %5 ila %0.25 gibi düşük lif boyuna dik/paralel gerilme oranlarında paralel gerilmelerin tekrarlı yükler altında tekrar sayısını %35 oranında azalttığını deneysel bulguların istatistiksel değerlendirmesine bağlı olarak ispatlamaktadır.

Philippidis and Vassilopoulos, [2002], mevcut kullanım ömrü hesaplama yöntemlerinin sadece eğilme ve merkezkaç kuvvetlerine bağlı normal gerilmeleri hesaba kattığını, kayma ve enine normal gerilmeleri göz ardı ettiğini, vurgulamaktadır. Kendi yaptıkları deneysel çalışmaların bulguların ışığında iki boyutlu gerilme halleri için tekrarlı yükleme sayısını tahmin eden modeli kullanarak CTP rüzgar değirmeni türbin pervanesinde enine doğrultuda 0.074 ve 0.06 oranında kayma ve normal gerilmelerin gelmesi halinde tekrarlı dayanım sayısının %80 azalacağı hesaplanmaktadır. Ayrıca, deney sonuçları kullanılarak, kompozitlerin tekrarlı yük altında dayanım sınırlarını tahmin etmeye yönelik FTFP (failure tensor polynomial in fatigue) teorisinin doğrulanma çalışması yapılmaktadır.  $15^\circ$  kupon numuneleri dışında,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$ 'lik açılarda kesilmiş numunelerde teorisinin güvenli tarafta hesap yaptığı ifade edilmektedir.

Ochola et. al., [2003], mühendislik uygulamalarında mukavemet/ağırlık oranının yüksek olması sayesinde çeliğin yerini alan cam elyaf ve karbon takviyeli kompozitlerin darbe yükleri karşısında dayanıksız olduğunu, ve statik yükleme

hızlarında elde edilen mekanik özelliklerinden farklı özellikler gösterebildiğini iddia etmektedir. Darbe yükleri altında malzeme davranışı Split Hopkinson bar test düzeneği ile araştırılmaktadır. Yöntemde darbe yükü ile iletilen şok dalgasının hızından numune yüzeyi arakesitinde yarattığı birim deformasyon ve gerilme hesaplanmakta, malzeme özellikleri 200 ile 900/s deformasyon hızlarında belirlenmektedir. Kullanılan numuneler Ampreg 20 epoksi bağlayıcılı E cam elyaf takviyeli CTP ve UT-C300/500 karbon takviyeli kompozitlerdir. Her iki kompozitin normal deformasyon hızlarında davranışı doğrusal elastik özellikler göstermektedir. Enerji yutuculuğu yüksek deformasyon hızlarında düşmekte, buna karşılık elastisite modülü ve nihai basınç dayanımında önemli artışlar kaydedilmektedir. Normal deformasyon hızlarında dayanım 495 ve 508MPa olarak belirlenirken, yüksek hızlarda bu değerler 528 ve 672MPa düzeyine yükselmektedir. Elastisite modülü için benzer değerler sırasıyla 4700 ve 6000MPa'dan 19400 ve 23000MPa'ya yükselmektedir. Göçme modu düşük deformasyon hızlarında kayma dayanımı ile kontrol edilirken, yüksek hızlarda delaminasyon ya da fibre burkulması ile göçme oluşmaktadır.

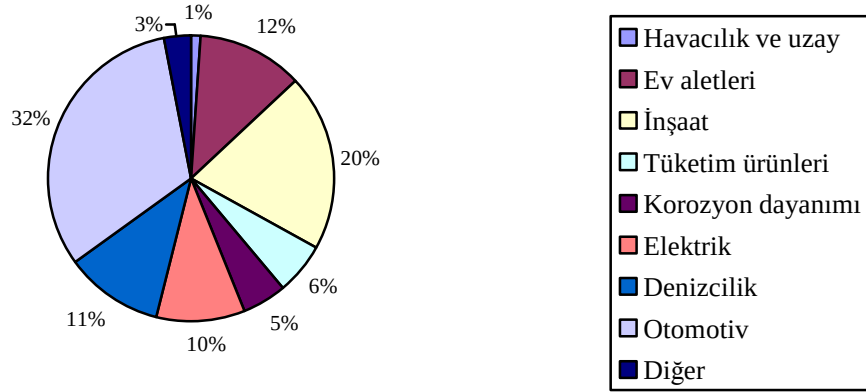
Çalışma sonuçları tekrarlı veya ani yüklemelerin elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere sebep olabileceğini göstermektedir. Mekanik özelliklerin üzerinde etkili olan bir diğer etkenin de takviye elyafının kompozitin içindeki yönlenmesi olduğu dikkat çekmektedir.

## **CTP'nin İnşaat Sektöründe Kullanım Uygulamaları**

Dünya'da yaklaşık olarak 4.7 milyon tonluk bir kullanım potansiyeline sahip olan CTP malzemenin inşaat sektöründe kullanımı, 954.000 tonu aşan bir miktarla toplam kullanımın %20.2'si mertebesinde. Türkiye'de inşaat sektöründe CTP kullanımı ile ilgili bir istatistik bulunmamakla birlikte, bu oranın %50 mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir [Şişecam, 2000].

İnşaat sektöründe kullanılan CTP ürünler, el yatırması gibi basit kalıplama metotlarından, HKB ve profil çekme yöntemi gibi gelişmiş teknoloji gerektiren kalıplama metotlarına kadar birçok kalıplama metodu kullanılarak üretilmektedir.

Cephe kaplama panellerinden, depolama tanklarına, prefabrik konutlardan köprülere, beton kalıplarından, şehir mobilyalarına kadar birçok CTP ürün, inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Dünya’da CTP kullanımının sektörlere göre dağılımı Şekil 3.1’te verilmektedir. Anlaşıldığı üzere inşaat sektöründe %20’lik bir payla, yüksek bir oran gibi gözükse de, kullanımlarının genellikle dekoratif yada yapısal olmayan elemanlarla sınırlı olduğu kabul edilmektedir [Şişecam, 2000].

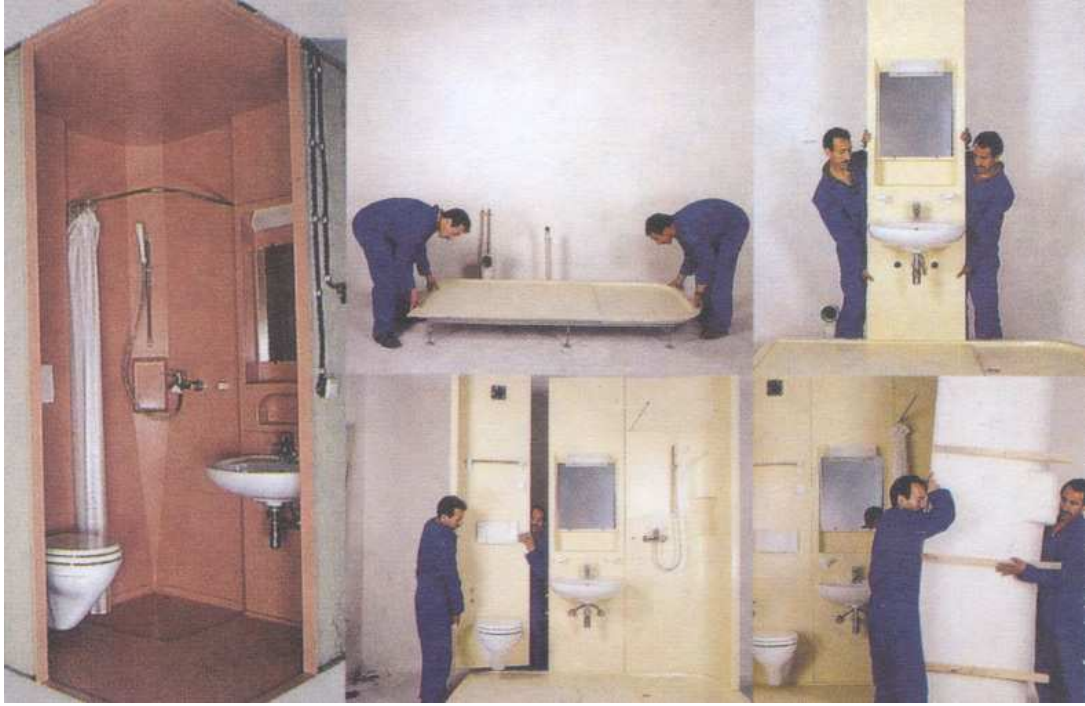


Şekil 3.1. Sektörlere göre Dünya’da CTP kullanımı [Şişecam, 2000].

Sektörde en çok kullanılan yapısal olmayan CTP kullanımları aşağıda sınıflandırılmaktadır:

**Cephe kaplama panelleri;** CTP malzemenin en yaygın olarak kullanıldığı alanların başında gelmektedir. Cephe kaplama panelleri, tek cidarlı yapılabileceği gibi, çift cidarlı ve arasında ısı izolasyonu sağlayan poliüretan köpük veya cam elyafı şilte gibi malzemeler kullanılarak, izolasyonlu panel olarak da üretilebilmektedir. Kolay temizlenebilme avantajı sayesinde, CTP paneller, ameliyathane ve laboratuvar gibi steril ortamlarda hijyenik bir duvar kaplaması olarak da kullanım alanı bulmaktadır. CTP cephe kaplama panellerinin bir diğer önemli uygulaması, binalar arasında yaya geçişini sağlayan geçitlerin kaplama panelleridir. Şeffaf CTP levhalar çatı ıslıklıklarında camın yerini almış ve kırılmaya karşı dayanıklılıklarıyla güvenli bir kullanım sağlamışlardır. CTP paneller yalnızca estetik amaçlı değil, başta köprüler olmak üzere korozyona açık yapılarda, betonu korozyondan koruma amacı ile de kullanılabilmektedirler [Addis, 2001].

**Prefabrike konutlar;** Isı yalıtımını sandviç konstrüksiyon tekniği ile içinde barındıran birbirinden bağımsız panellerin çeşitli büyüklüklerde büfe, baraka, konut gibi ürünlerin üretimini içermektedir. Özellikle prefabrike yapı sistemine uygunluğu sebebiyle hazır banyo birimlerinin çok yaygın olarak kullanıldığı rapor edilmektedir [Burgoyne, 1999]. Bu tür birimler, özellikle ıslak mekanların seri üretimine imkan sağlamakta, kolay montaj ve hafiflik özelliği ile inşaat hızını büyük oranda arttırmaktadır (Bkz. Şekil 3.2).



Şekil 3.2. CTP banyo üniteleri.

**CTP beton kalıpları;** kaset döşeme, perde ve kolonların kalıplarında kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 3.3). CTP kalıplar, kalıp bağlama ve sökme işlemlerini kolaylaştırmış ve bu kalıplar sayesinde betonun çok düzgün yüzeyli dökülmesi mümkün olabilmektedir. CTP kalıplar el yatırması, püskürtme ve reçine enjeksiyonu yöntemleri ile istenilen boyut ve şekilde seri bir şekilde üretilmektedir [Şişecam, 2000].



Şekil 3.3. Kaset döşeme kalıp uygulaması.

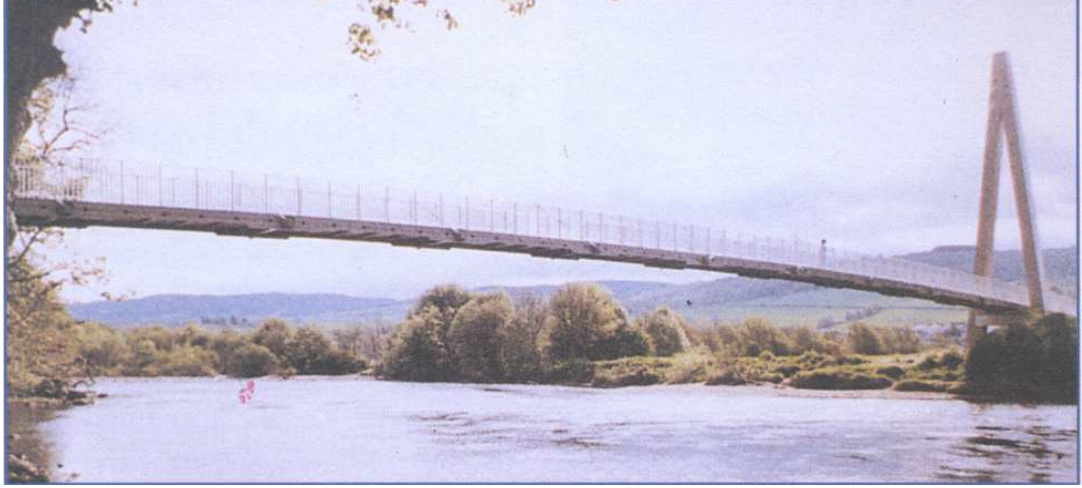
**CTP borular;** endüstriyel inşaatta çok önemli bir yer tutmaktadır. Bunun başlıca nedeni, içme suyu, kimyasal maddeler, kanalizasyon, proses suyu gibi akışkanların taşınmasındaki ihtiyaçların karşılanmasına en uygun koşullarda çözüm getiren üstün nitelikli ve uzun ömürlü bir malzeme olmasıdır. Gerek büyük çaplı (2500mm'ye kadar), gerek küçük çaplı (50mm'ye kadar) borular CTP malzeme kullanılarak yapılmaktadır. Her ne kadar, açık kalıplama metotları ile de CTP boru üretme olanağı bulunsa da, prosesin hızı nedeni ile genellikle 'elyaf sarma' metodu kullanılmakta ve %60-70 oranında cam elyafı takviyesi sağlanabilmektedir. Üretim metodu sayesinde, istenilen iç basınç dayanımına uygun olarak üretilmektedirler. CTP borular diğer ikame borularının tersine, rijit değil esnek olarak tasarlanmaktadır. Bu sayede, kendisini çevreleyen toprak ile homojen bir sistem oluşturup, dış yüklerin etkisini toprağa transfer edebilmektedir. Yapımında kullanılan bağlayıcı türüne (genellikle polyester veya epoksi) bağlı olarak, pek çok kimyasal maddeden etkilenmediğinden, her türlü korozyon ortamında, bataklık ve deniz geçişlerinde ve bir çok kimyasal akışkanın nakli ve prosesinde vazgeçilmez bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Uzun ve verimli hizmet ömürleri (50yıl), düşük bakım giderleri ve bağlantı kolaylığı sayesinde sıklıkla tercih edilmektedirler [Şişecam, 2000].

Son yıllarda CTP profillerle oluşturulan yapısal elemanlar CTP'nin inşaat sektöründe kullanımı bakımından yeni bir alan yaratmaktadır. CTP profillerin, somun civata ile birleştirilmesi veya epoksi türü bir yapıştırıcı ile yapıştırılması ile bağlantı noktaları oluşturulabilmektedir. Özellikle korozyon ortamlara dayanıklı

yürüme yolları, köprüler ve çatı makası konstrüksiyonları denenmiş başlıca uygulamaları oluşturmaktadır [Turvey, 2000]. CTP profiller, profil çekme metodu ile seri olarak üretilmektedir. Köprü taban tabliyeleri sandviç konstrüksiyon metodu ile üretilmekte, böylelikle yüklerin homojen olarak dağılması ve yüksek rijitlik sağlanmaktadır (Bkz. Şekil 3.4).

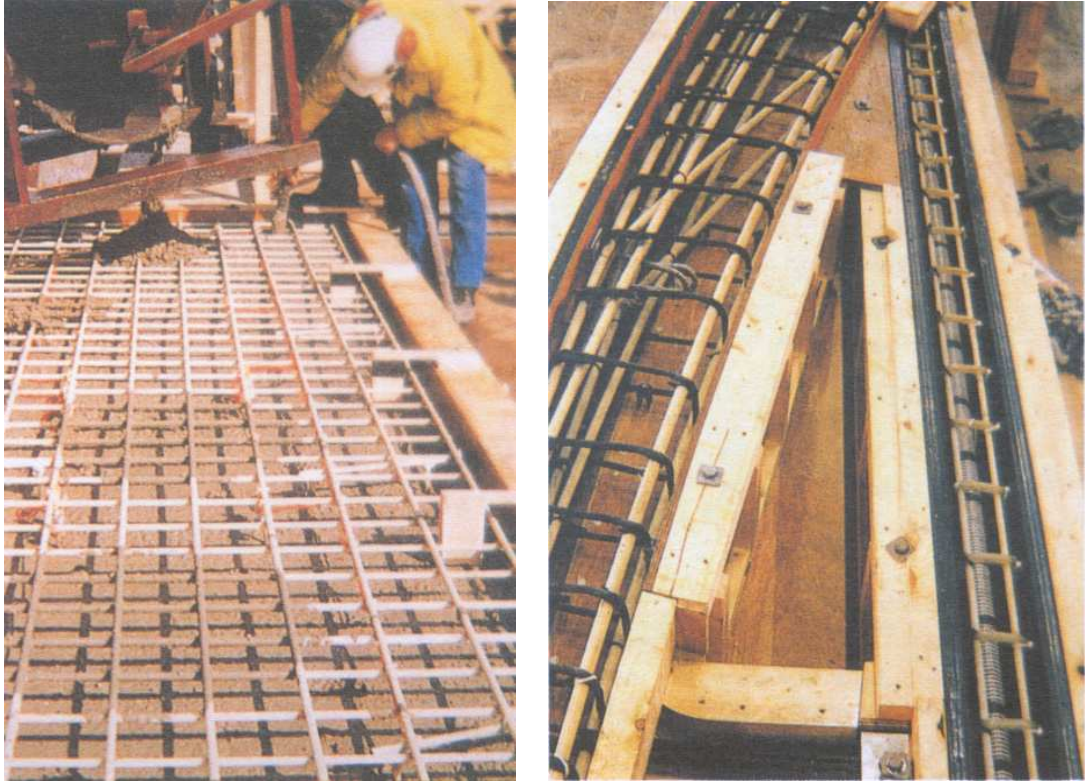


Şekil 3.4. CTP köprü tabliyesi ve çatı makası uygulamaları.



Şekil 3.5. CTP ve aramid fiber askı elemanlardan yapılmış Aberfeldy yürüyüş köprüsü.

Son yıllarda inşaat sektöründe inşaat demiri yada asma köprü kabloları yerine, CTP takviye çubukları kullanılmaya başlanmıştır (Bkz. Şekil 3.5). Betonarme inşaatlarda kullanılan çelik donatının, özellikle yüksek klor konsantrasyonlu bölgelerde korozyona uğraması, zaman içinde önemli bir mukavemet düşüşüne yol açması, CTP takviye çubuklarının kullanımını yaygınlaştırmaktadır. CTP'nin çelikten daha yüksek çekme mukavemeti (655 MPa) ve alkali dayanımı (pH 13,5) özellikleri, tercih edilmelerini artırmaktadır [Akman, 2002; Burgoyne, 1999].



Şekil 3.6. CTP betonarme donatı uygulaması.

Donatı çubukları yerine kullanımları (Bkz. Şekil 3.6), ön ya da art gerilmeli prefabrike kolon ve kiriş imalatında da yaygınlaşmaktadır. Ancak, yüksek maliyetleri sebebi ile uygulanma alanları hala sınırlıdır [Akman, 2002; Burgoyne, 1999].

Ön gerilmeli CTP çubuklar kullanılarak, Norveç'te inşa edilen bir köprü aynı zamanda malzemenin uzun dönem performansını değerlendirmektedir. Bu test sayesinde hafif, manyetik alan oluşturmeyen ve depreme dayanıklı yapıların oluşturulması amaçlanmaktadır.

CTP profillerin inşaat sektöründe kolon, kiriş gibi yapısal elemanlar olarak kullanımı çok yeni olup, henüz araştırma ve deney aşamasındadır (Bkz. Şekil 2.9(a)). Bu tür uygulamalarda CTP'nin, bina taşıyıcı sistemlerinin, hızlı üretim ve montajını sağlamasının yanı sıra, korozyon dayanımını, ömrünü, hafifliğini ve naklini kolaylaştıracağı umulmaktadır [Turvey, 2000].

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan araştırmalar ve çalışmalar göstermektedir ki, CTP kompozitlerin çekme ve basınç mukavemeti değerleri inşaat sektörün kullanılmakta olan diğer yapısal malzemelere kıyasla yüksek, fakat elastisite modülü değerleri göreceli olarak düşüktür [Turvey, 1997]. Bu özellik, CTP kompozitlerin binalarda taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılması durumunda, binanın rijitliğinin kabul edilebilir sınırlar dahilinde olmasını engellemektedir.

Bu aşamada, CTP kompozitlerin yapısal eleman olarak kullanımının önündeki en önemli engel olan düşük elastisite modülünün iyileştirilmesi bakımından, bünyesine çelik tel hasırla takviye yapılmasına karar verilmiştir. Hasır tel kullanımının özünde, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan polyesterin tel hasır gözeneklerinden geçerek malzeme bütünlüğünü iyileştirmesi ve lamine kompozitlere göre daha üstün bir kayma aderansı temin etmesi yatmaktadır. Bir dizi kupon testlerle elastisite modülünde oluşacak artışlar deneysel olarak belirlenmektedir.

### Deney Numuneleri

Mekanik deneyler ASTM test standartları esas alınarak uygulanmaktadır. Türkiye’de cam elyaf üreticisi tek firma olan Şişecam Camelyaf A.Ş., her türlü CTP kalıplama yöntemi için, E tipi cam elyafı takviye tiplerini ve polyester bağlayıcılarını üretmektedir. Test numunelerinin içeriği Camelyaf A.Ş. Ar-Ge laboratuvarlarında hazırlanmış, bu firmanın üretimi olan cam elyaf takviye ve polyester bağlayıcı kullanılmıştır.

Numuneler el yatırması yöntemi ile hazırlanmış ve bu yöntemde kullanıma uygun olarak E tipi cam elyaf keçe takviye ve genel amaçlı bir polyester bağlayıcı kullanılmıştır. Numuneler CTP’nin yapısal bir malzeme olarak kullanımını mümkün kılacak, Bölüm 2.3’te verilen kriterlere uygun olarak imal edilememiştir. Ancak, yine de donatısız ve donatılı mekanik özelliklerine bakılarak, tasarlanan yeni kompozitin getirdiği avantajlar irdelenebilecek ve çalışmada öngörülen CTP türünün donatılı

olması halinde, mekanik özelliklerinde gözlemlenmesi beklenen artışlar tahmin edilebilecektir. Kullanılan cam elyaf keçe, Camelyaf A.Ş. üretimi MAT1 (M)450 kodlu, polyester uyumlu, el yatırması ve devamlı levha üretimi yöntemlerine uygun olan bir takviyedir. Bu takviye düzgün dağılımlı, silan bağlayıcı ile üretilmiş ve  $450\text{g/m}^2$  birim alan ağırlığına sahiptir. Bağlayıcı olarak yine aynı firmanın üretimi olan CE 92 N8 kodlu, genel amaçlı CTP uygulamaları için geliştirilmiş, el yatırması yöntemine uygun, düşük viskoziteli, berrak görünümlü, ortoftalik bir polyester kullanılmıştır. Bu bağlayıcı katı halde min. 85MPa eğilme mukavemetine ve min. 45MPa çekme mukavemetine sahiptir. 40cm x 40cm boyutlarında 10mm temperli cam kalıplar arasına lamine olarak kalıplanan her numune, ağırlıkça %40 oranında sürekli olmayan keçe cam elyaf takviyesi içermektedir.

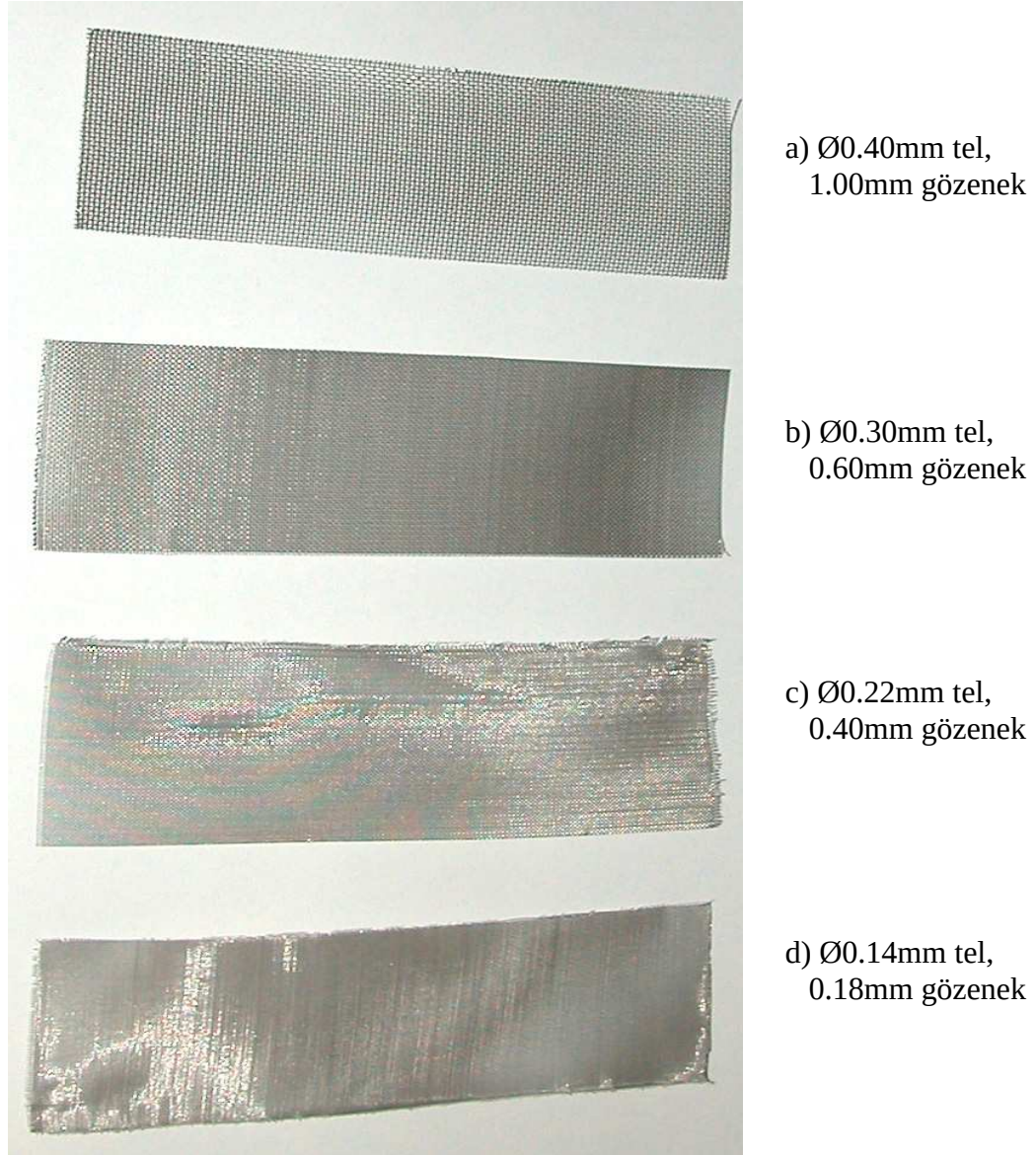
CTP kompozitin elastisite modülünü yükseltecek ve lamine kompozitin bağlayıcısı ile çelik takviyenin aderansını arttıracak şekilde paslanmaz çelik tellerle dokunmuş dört ayrı tip çelik hasır örgü kullanılmaktadır. Numunelerde seçilen çelik hasır örgüler halihazırda üretimi yapılan standart çelik hasır örgüler içerisinde, %2 ile %4 donatı oranı verecek şekilde seçilmektedir. Betonarme inşaat tekniğinde sıklıkla kullanılan bu aralıktaki oranların, mukavemet, ekonomi ve sünek davranış bakımından ideal oranları verdiği bilinmektedir. Standart olarak üretimi olan paslanmaz çelik hasır elemanlardan numunelerin takviyesinde kullanılmak üzere seçilenler Şekil 4.1’de gösterilmekte ve numune kesit alanına göre sağladıkları takviye miktarları (%), Tablo 4.1’de ASTM numune boyutlarına göre verilmektedir.. Çelik takviyesinden sonra mekanik özelliklerin artışını karşılaştırabilmek amacıyla, çelik takviye yapılmadan, sadece %40 oranında cam elyaf takviye kullanılarak bir CTP lamine levha ayrıca kalıplanmıştır.

Takviye yüzdesi hesaplanırken, numune kesitinde yer alan boyuna doğrultuda tel kesit alanları hesaba katılmış, enine doğrultuda geçen tellerin aderans sağlayıcı bir görev yaptığı düşünülerek takviye oranlarında etkileri göz önüne alınmamıştır. Bu durumda Şekil 4.2’de gösterilen ASTM D638 çekme ve ASTM D790 eğilme numune kesitleri için ( $62.4\text{ mm}^2$ ) Ø0.30mm hasır çelik tel takviye kullanıldığında toplam tel kesit alanının  $2.12058\text{mm}^2$  olduğu ve takviyenin %3.5’e tekabül ettiği hesaplanmaktadır.

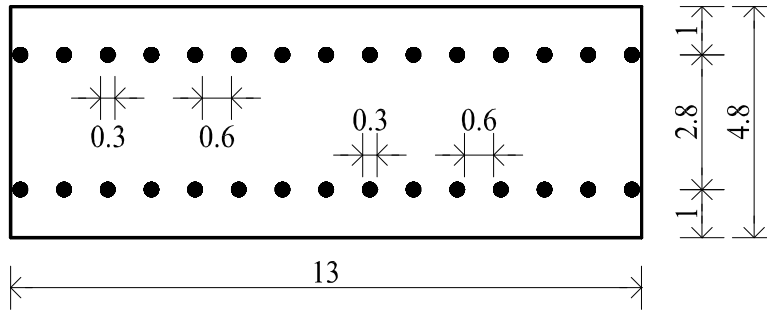
Tablo 4.1. Numunelerin takviyesinde kullanılan çelik hasır çeşitleri.

| No: | Tel Çapı (mm) | Gözenek (mm) | Takviye Oranı (%) |
|-----|---------------|--------------|-------------------|
| 1   | 0.14          | 0.18         | 2                 |
| 2   | 0.22          | 0.40         | 2.5               |
| 3   | 0.30          | 0.60         | 3.5               |
| 4   | 0.40          | 1.00         | 4                 |

Not: Çelik tel örgüler birbirine dik yönlerde aynı tel çapı ve gözenek ölçülerine sahiptirler.



Şekil 4.1. Numuneleri takviye etmekte kullanılan paslanmaz çelik hasır örgüler.



Şekil 4.2. ASTM D638, D790 numune kesiti ve içerdği Ø0.30mm tel ve 0.60mm gözenek ölçülerindeki boyuna tel adedi ( $2 \times 15 = 30$ ad). (Ölçüler mm)

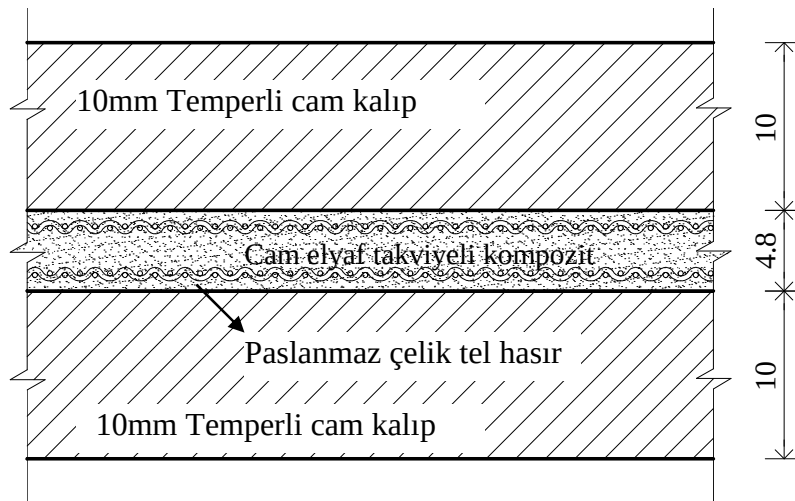
Numune hazırlanırken kalıp olarak kullanılan 40x40cm cam yüzeyler temizlenerek kir ve tozdan arındırılması sağlanmıştır. Temizlenen yüzeylere kalıp ayırıcı görevi gören ‘vaks’ sürülmüştür. Polyester bağlayıcı hassas tartıda net 500gr ölçülmüş ve polyesterin ağırlıkça %40 oranındaki cam elyaf keçe takviye 30x30cm ebatlarında 5adet kesilerek hazırlanmıştır (Bkz. Şekil 4.3). Kalıplama işlemine yeterli olduğu bilinen 10 dakikalık jelleşme süresi için gerekli katalizör miktarı 0.625gr kobalt (%6) ve 5cc metiletilketon (MEK) polyester bağlayıcıya eklenmiştir. İlk cam elyaf keçe kalıba yerleştirildikten sonra bir miktar polyester üzerine dökülmüş ve plastik bir rulo yardımıyla keçenin sıvı haldeki bağlayıcı ile ıslanıp, bağlayıcıyı iyice emmesi sağlanmıştır. Rulonun iyice bastırılarak keçe üzerinde gezdirilmesinin bir faydası da, laminatın içinde oluşabilecek ve mukavemeti olumsuz etkileyebilecek hava kabarcıklarının engellenmesidir. Son keçe kalıba yerleştirilene kadar keçeler üst üste konularak aynı işlem tekrarlanmıştır. Kalıplanan kompozitin mekanik özelliklerini direkt olarak etkileyecek hava kabarcıklarının oluşumunun minimumda tutulması için azami özen gösterilmiştir. Buna rağmen el yatırması yönteminde hava kabarcıkları oluşumunun tamamen engellenmesinin mümkün olmadığı görülmüştür. Polyester tamamen jelleşmeden önce Şekil 4.4’te şematik olarak gösterilen kalıpların arasına dökülmüş ve numune kalınlığının sabit kalmasını sağlayacak çapta metal çubuklar yerleştirilmiştir. Daha sonra üst cam kalıp mengeneli düzeneği sayesinde sıkıştırılmak suretiyle katılaşmaya terkedilmiştir (Bkz. Şekil 4.5). Çelik tel takviyesi uygulanan numunelere, ilk keçeden sonra ve son keçeden önce tel hasır takviye kalıp içine yerleştirilmiş, diğer üç keçe tabakası hasır çelikler arasında kalıplanmıştır. Böylece çelik tel takviyeler arası mesafe tam hassas olmamakla beraber, her numunede yaklaşık aynı kalması temin edilmiştir. Aynı zamanda, çelik hasır

takviyelerin, eğilme testleri esnasında maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin olduğu alt ve üst yüzeylerde bu gerilmeleri karşılaması da sağlanmıştır.

Kalıplanan numunelerin donma süresi yaklaşık 12 saattir. Ertesi gün kalıptan çıkarılan 30x30cm ebadındaki lamine levhalar elmas uçlu döner bıçaklar vasıtası ile Şekil 4.6’da gösterilen ASTM D638 çekme ve ASTM D790 eğilme numune boyutlarına göre istenilen hassasiyette kesilmişlerdir. Lamine levhadan kesilmiş numuneler Şekil 4.7 ve 4.8’de görülmektedir.



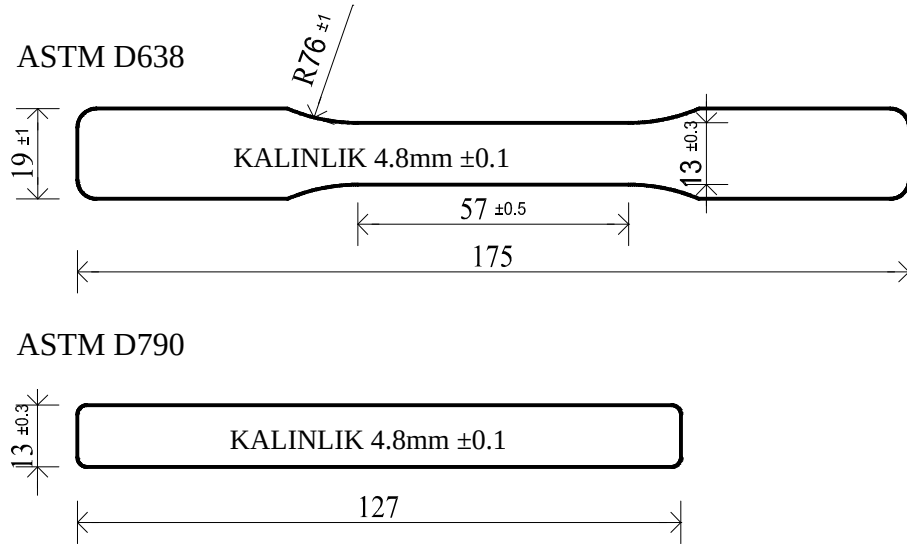
Şekil 4.3. Cam elyaf keçe ve malzemelerin tartılarak kalıplamaya hazırlanışı.



Şekil 4.4. Lamine levha kalıp kesiti.



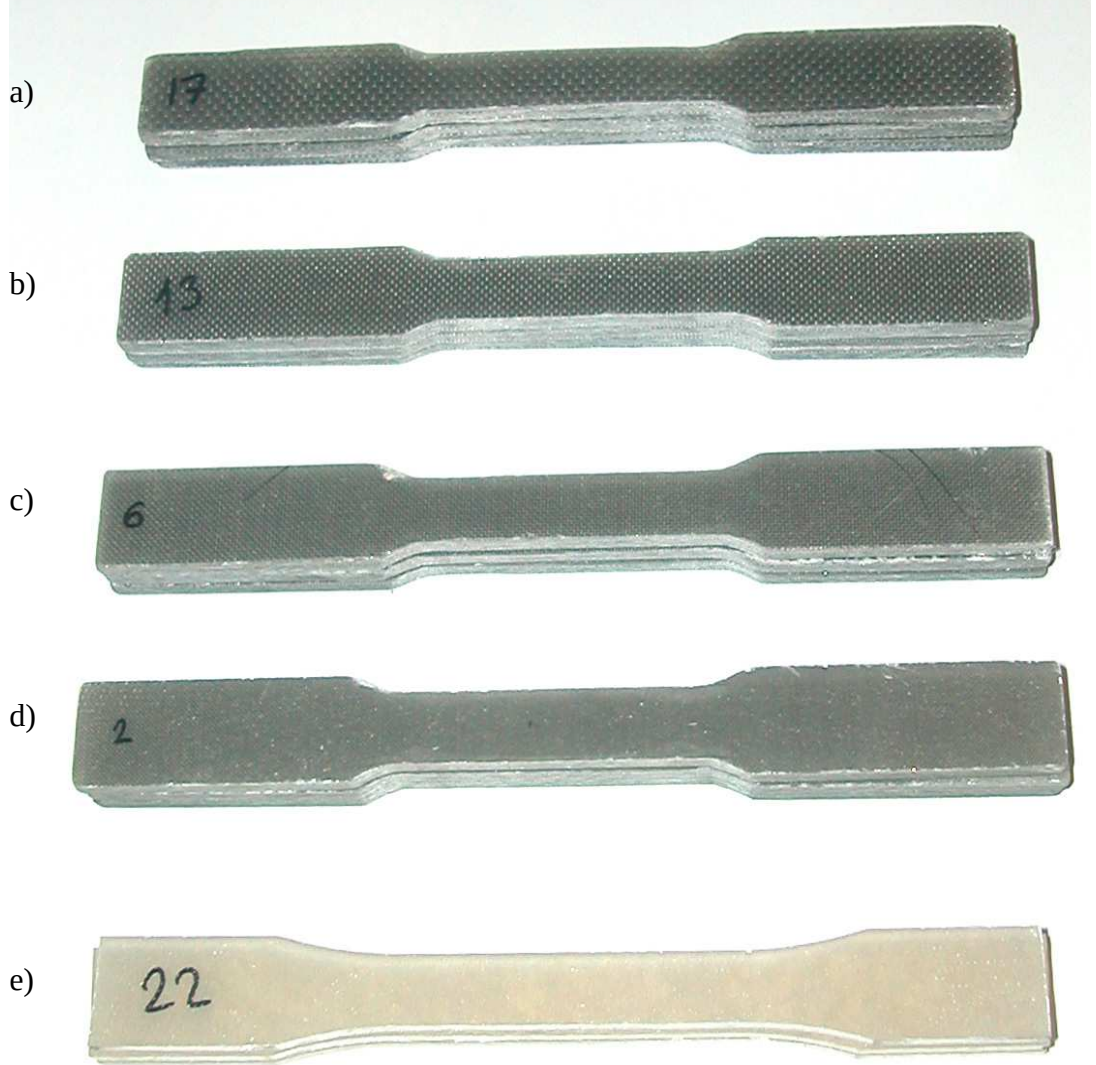
Şekil 4.5. Numune CTP lamine kompozitlerin laboratuvar ortamında hazırlanışı.



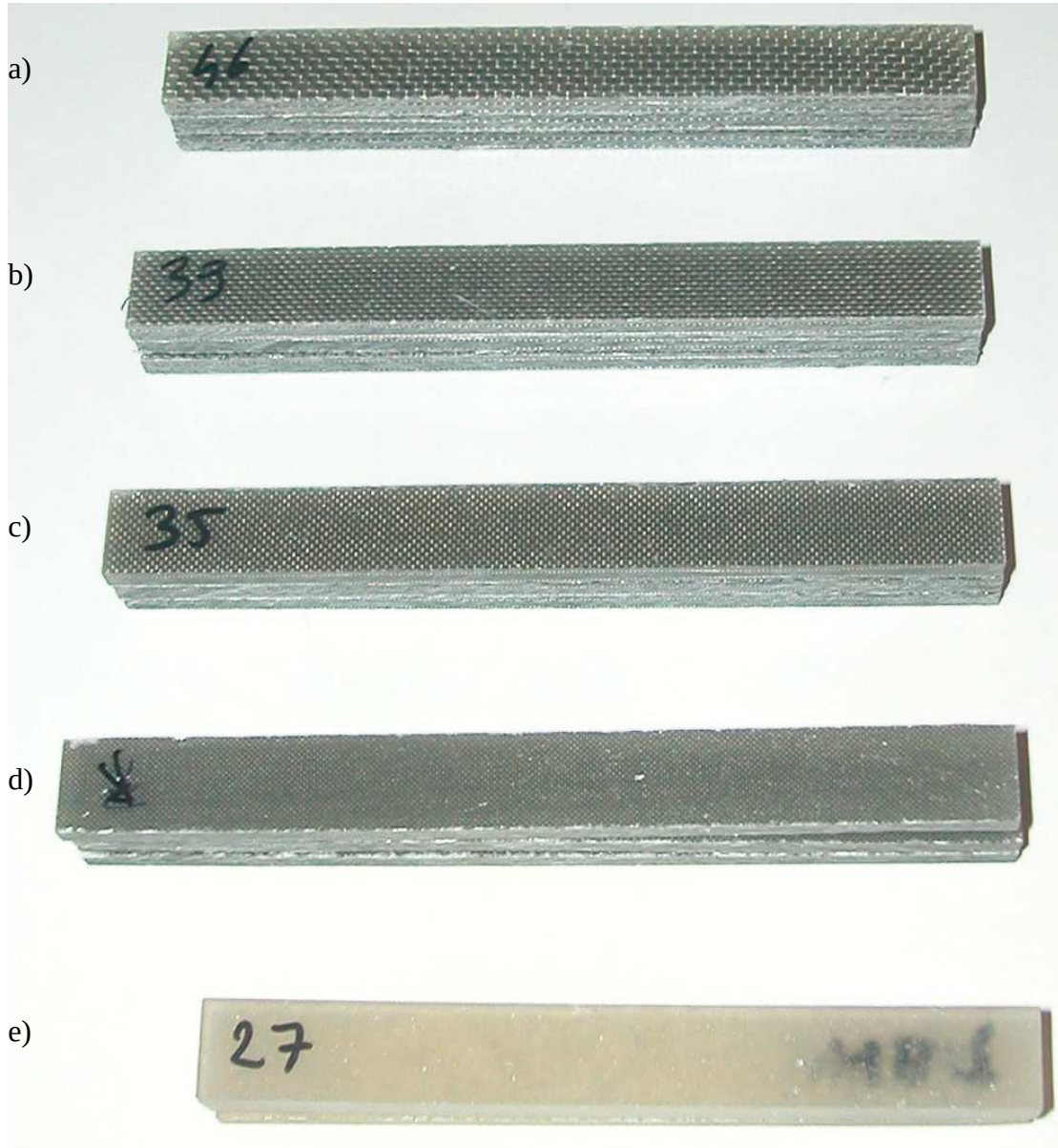
Şekil 4.6. ASTM D638 çekme ve ASTM D790 eğilme numune boyutları (mm).

Çelik takviyeli CTP kompozit numuneler bünyelerindeki çelik sebebi ile elmas uçlu döner bıçakla kesilememiştir. Bu numuneler, 30cmx30cmx4.8cm ebatlarındaki

elik takviyeli lamine CTP levhaların önce elmas uçlu döner marangoz tezgahında, ve daha sonra metal işleme frezesinde kesilmesi ile standart deney numunesi boyutlarına getirilebilmiştir.



şekil 4.7. ASTM D638 ekme numuneleri. a) %4 elik takviyeli, b) %3.5 elik takviyeli, c) %2.5 elik takviyeli, d) %2 elik takviyeli, e) takviyesiz.



Şekil 4.8. ASTM D790 Eğilme numuneleri. a) %4 çelik takviyeli, b) %3.5 çelik takviyeli, c) %2.5 çelik takviyeli, d) %2 çelik takviyeli, e) takviyesiz.

## Deney Tekniği

ASTM standartlarında CTP lamine kompozit numuneler, çekme ve eğilme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Deneyler Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bölümü, Mekanik Test Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde, numunelerin çekme, eğilme mukavemetleri ile çekme, eğilme elastisite modülleri belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Deney düzeneği numunelere 50KN'a kadar çekme ya da basınç kuvvetleri uygulayabilen bir presle, deformasyon ve yüklemeleri simultane olarak kaydeden bir bilgisayardan oluşmaktadır. Deney düzeneği olarak Insitron standart test düzeneği kullanılmıştır (Bkz. Şekil 4.9). Maksimum mukavemetlerin belirlenmesinde numunelere, kopma ve kırılma noktasına kadar, zamana bağlı olarak, sabit artan yükler (200N/s) uygulanmıştır. Bu deneylerde ekstensometreye zarar vermemek kaygısıyla deformasyon ölçülememiştir. Elastisite modüllerinin belirlenmesinde, ekstensometre numunenin her iki yüzeyine yerleştirilmek suretiyle, 0.50mm deformasyon ya da 800N limitine kadar yük-deformasyon ölçümleri yapılmıştır.

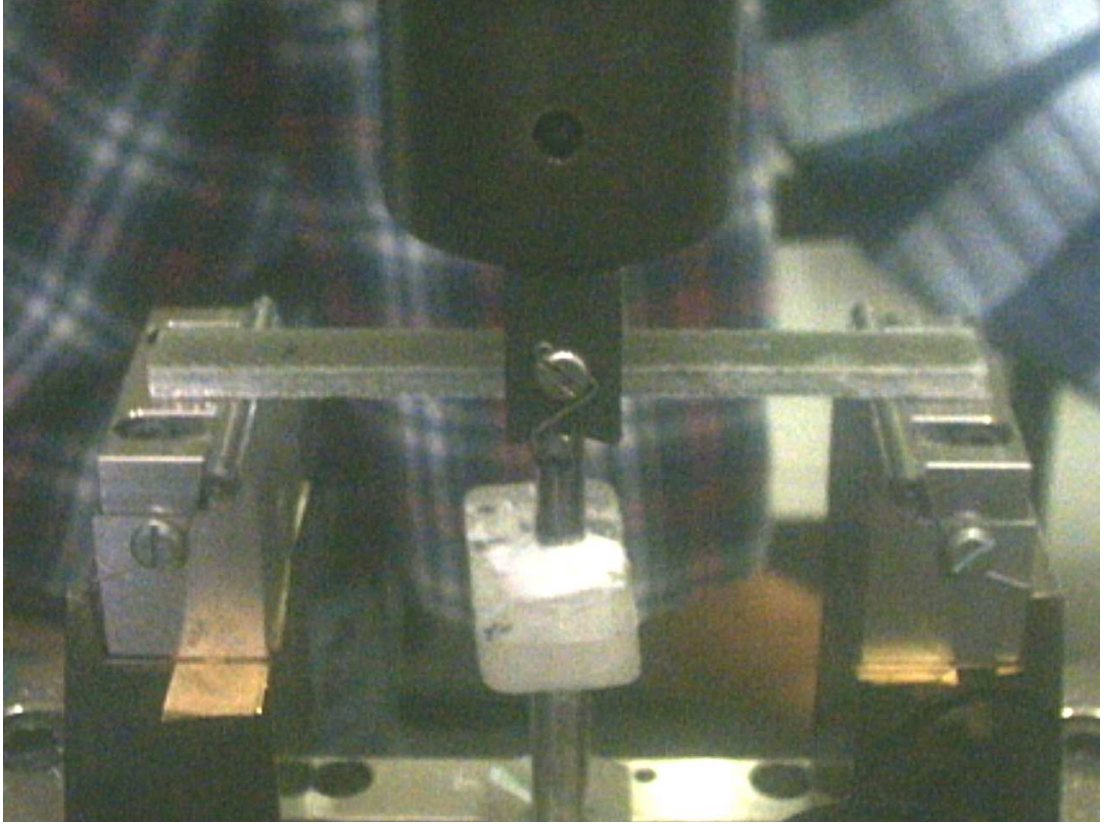
Eğilme deneylerinde ekstensometre 100mm aks aralığında, iki ucundan serbest mesnetlenen numunenin alt orta noktasına yerleştirilmiştir. Yük pres vasıtası ile numunenin üst orta noktasından etki ettirilmiştir (Bkz. Şekil 4.10). Ekstensometrenin konumunu da gösteren eğilme deneyi şematik gösterimi Şekil 4.11'de verilmektedir.

Çekme deneylerinde ise ekstensometre iki ucundan makinenin çekme kollarına bağlanan numunenin orta noktasına sabitlenmiştir. Ekstensometrenin numuneye bağlanan kolları, çekme esnasında kaymasını engelleyecek biçimde düzenlenmiş, tırnak aks aralığı 25.4mm'ye ayarlanmıştır. Yük 800N'a kadar arttırılmış ve oluşan deformasyonlar kaydedilmiştir (Bkz. Şekil 4.12).

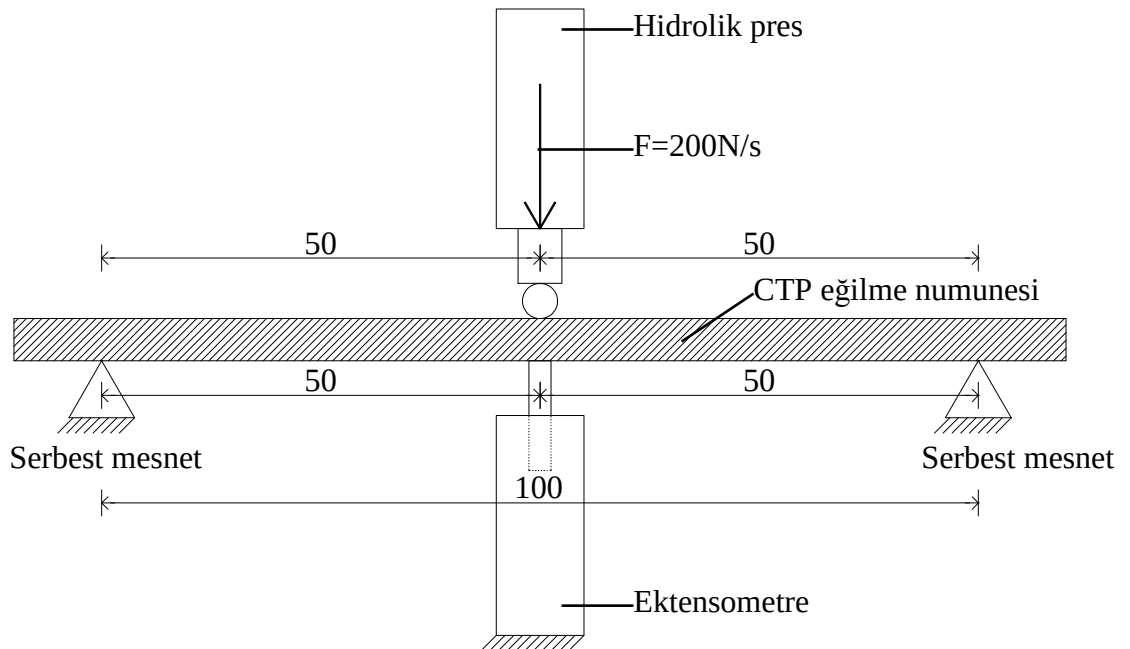
Tüm deneylerde her numunenin boyutları mikrometre yardımıyla 10 değişik yerinden hassas olarak ölçülmüş ve bilgisayara bu ölçümlerin aritmetik ortalaması kaydedilmiştir.



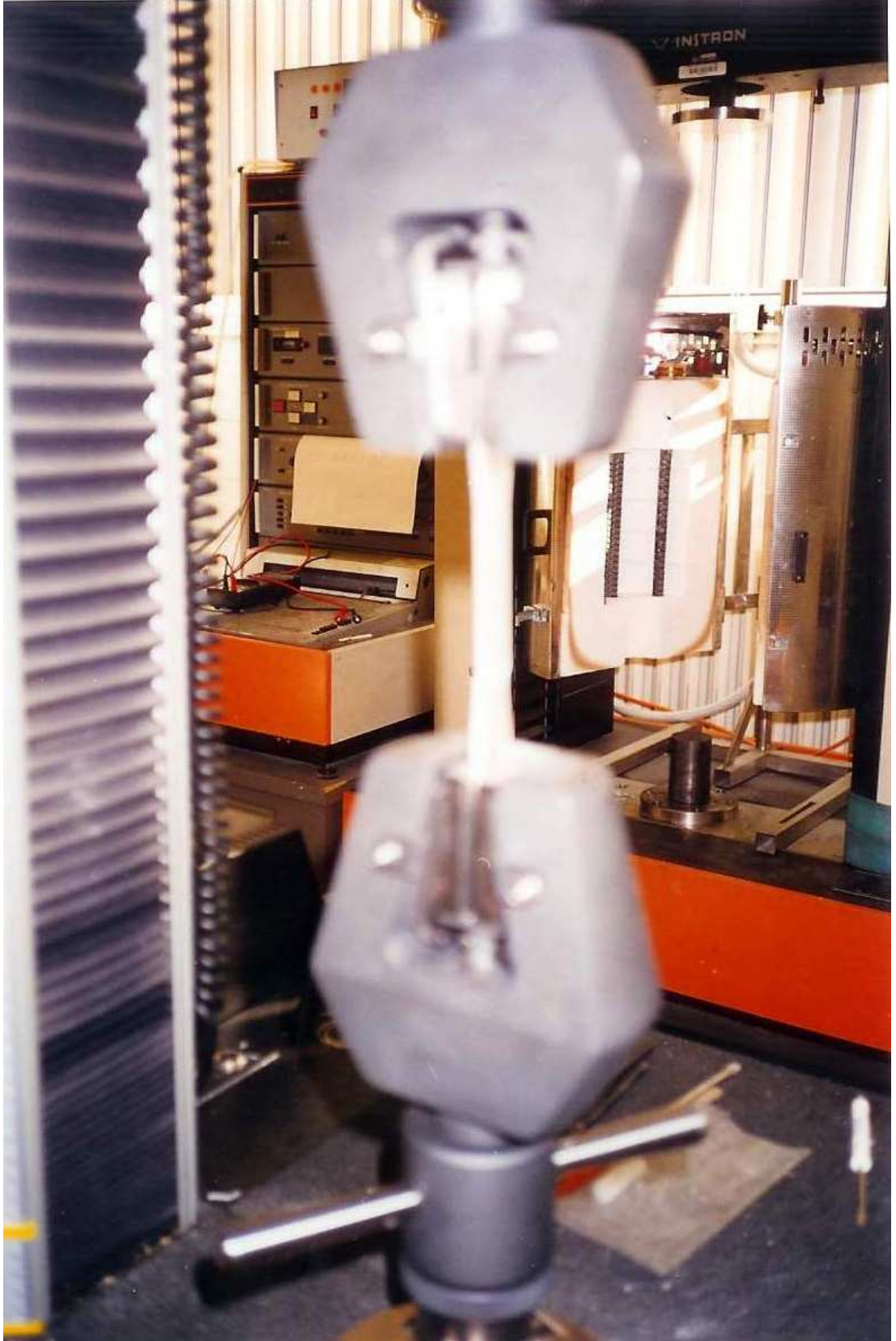
Şekil 4.9. Deney düzeneği.



Şekil 4.10. Eğilme deneyi.



Şekil 4.11. Eğilme deneyi şeması.



Şekil 4.12. Çekme deneyi.

## Deney Sonuçları

Deneylerde 25 adet eğilme, 20 adet çekme numunesi test edilmiştir. Her numunenin iki yüzünden ayrı okumalar alınmak suretiyle elastisite modülünün belirlenmesi için, toplam 90 adet deney sonucu kullanılmıştır. Ekstensometrelerin bilgisayara kaydettiği deformasyon-yük okumaları kullanılarak çekme deneyleri için ‘gerilme-birim deformasyon’, eğilme deneyleri için ‘kuvvet- deformasyon’ eğrileri oluşturulmuş ve bu eğrilerden elastisite modülleri hesaplanmıştır. Kuvvet-deformasyon ve gerilme-birim deformasyon eğrileri sırasıyla eğilme ve çekme numuneleri için Şekil 4.13-4.22’de gösterilmektedir.

Çekme deneylerinde daha önce bahsedildiği üzere hassas ekstensometrenin hasar görmesini engellemek amacıyla, 800N yükleme sınırına kadar deformasyon ölçümleri yapılabilmektedir. Bu yüzden gerilme-deformasyon eğrileri toplam yük kapasitesinin %8’ine tekabül etmektedir. Gerilme hesabında, numunenin başlangıçtaki kesit alanı birim deformasyon hesabında numunenin ölçülen ilk boyu temel alınarak Denklem 4.1 ve 4.2 yardımıyla belirlenmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 4.1$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad 4.2$$

Burada, ‘F’ yük miktarını, ‘A’ başlangıçtaki kesit alanını, ‘ $\Delta L$ ’ deformasyonu, ‘L’ ise, numunenin ilk boyunu temsil etmektedir. ‘ $\sigma$ ’ ve ‘ $\epsilon$ ’ ise, sırasıyla gerilme ve birim deformasyonu vermektedir.

Eğilme deneylerinde, üç nokta deney düzeneği kullanıldığından, deformasyon yüklemenin altında orta kiriş açıklığında ölçülmektedir. Deformasyon ve yük arasındaki elastik deformasyon ilişkisi bilindiğine göre (Bkz. Denklem 4.3) kuvvet-deformasyon eğrisinden elastisite modülü Denklem 4.4 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\Delta = \frac{F L^3}{48 E I} \quad 4.3$$

$$F = \frac{48 E I}{L^3} \cdot \Delta \quad 4.4$$

Burada ‘I’ numunenin kesit alanının ağırlık merkezinden geçen, eğilme düzlemine dik eksene göre atalet momenti, ‘Δ’ ise, yükün uygulama noktası altında ölçülen düşey deformasyondur.

Eğilme deneylerinde yük-deformasyon okumaları orta açıklık çökmesi 0.5mm’ye ulaşıncaya kadar yapılmıştır. Bu deformasyon limiti toplam yük kapasitesinin %5’ine tekabül etmektedir.

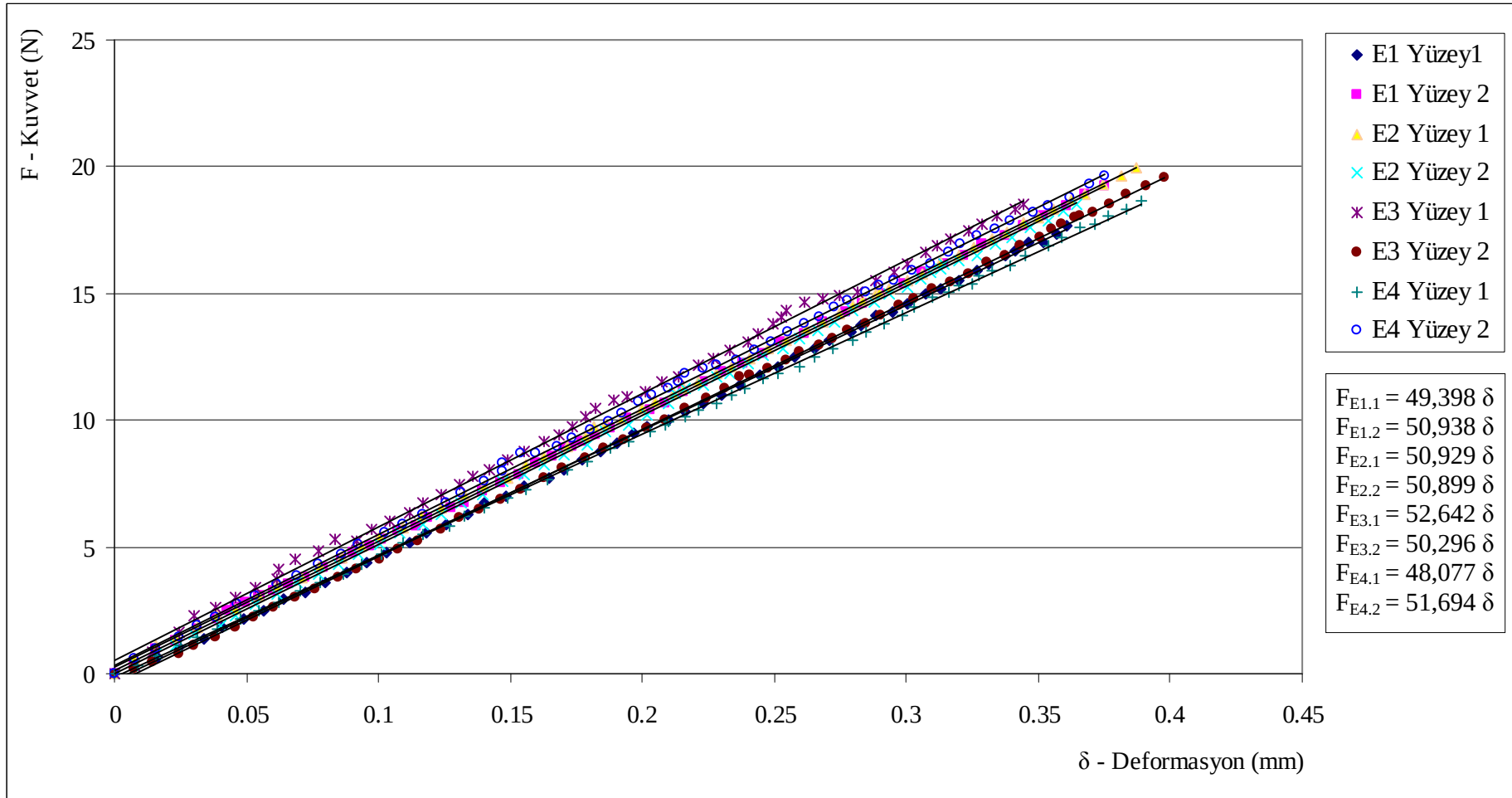
Çekme elastisite modülü, deneysel çekme gerilme-birim deformasyon eğrilerinin eğiminden Denklem 4.5’te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\tan \alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad 4.5$$

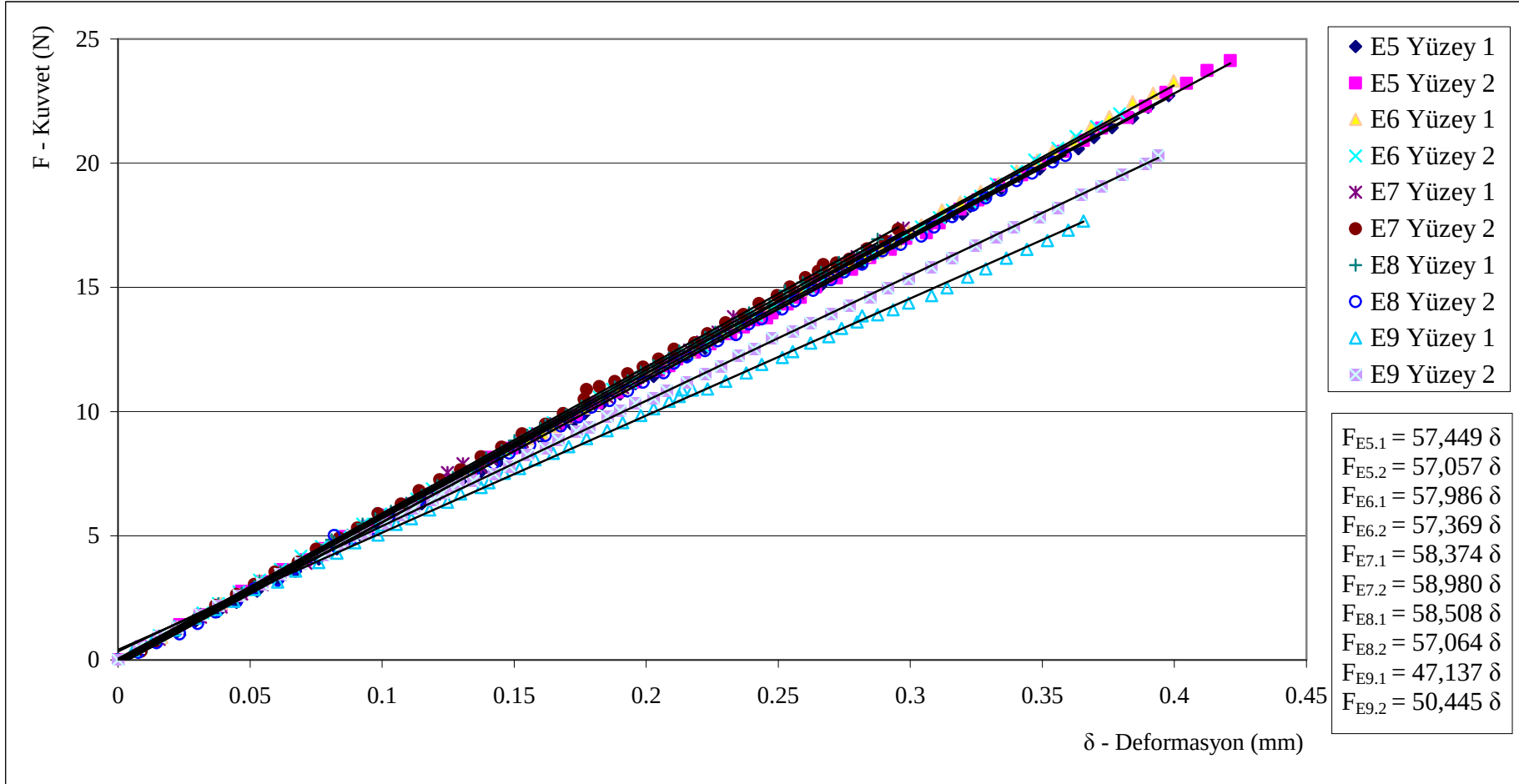
Eğilme elastisite modülü ise, deneysel kuvvet-birim deformasyon eğrilerinin eğimini  $48 E I / L^3$  oranına eşitlemek ve ‘E’ elastisite modülü değişkeni için çözmek suretiyle hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{\tan \alpha L^3}{48 I} \quad 4.6$$

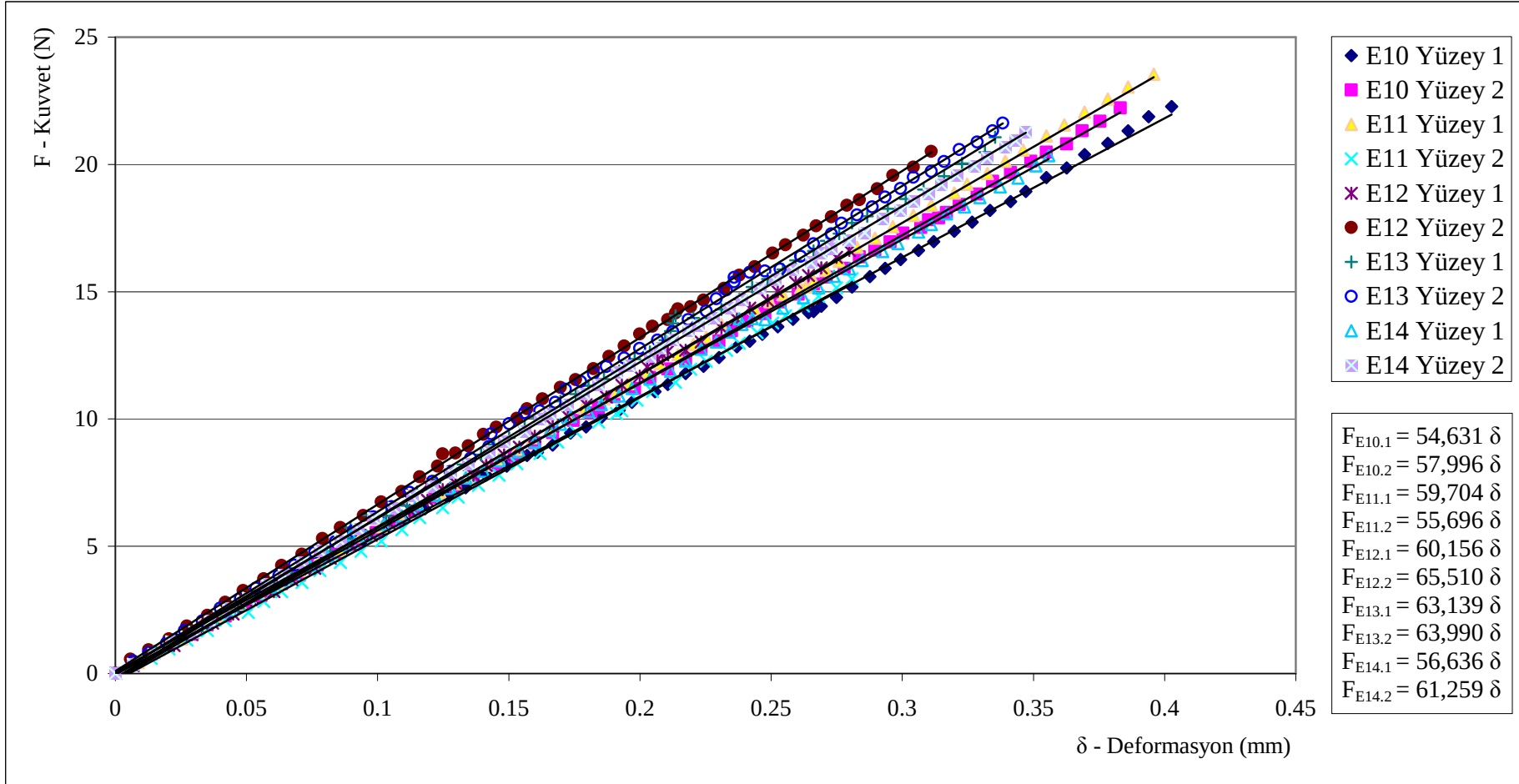
Her iki yükleme şekli için de yük-deformasyon ilişkisinin doğrusal olduğu kabulü yapılmaktadır. Buna göre, yeni kompozitin lineer-elastik malzeme özellikleri göstermesi beklenmektedir. Nitekim, deneysel okumalardan elde edilen regresyon denklemleri doğrusal fonksiyonlar tanımlamaktadır. Şekil 4.13-17 ve 4.18-22 sırasıyla yük-deformasyon ve gerilme-birim deformasyon dağılımlarını göstermektedir. Deneysel çalışmalarla hesaplanan elastisite modülü ve dayanım limitleri de Tablo 4.2 ve 4.3’te özetlenmektedir.



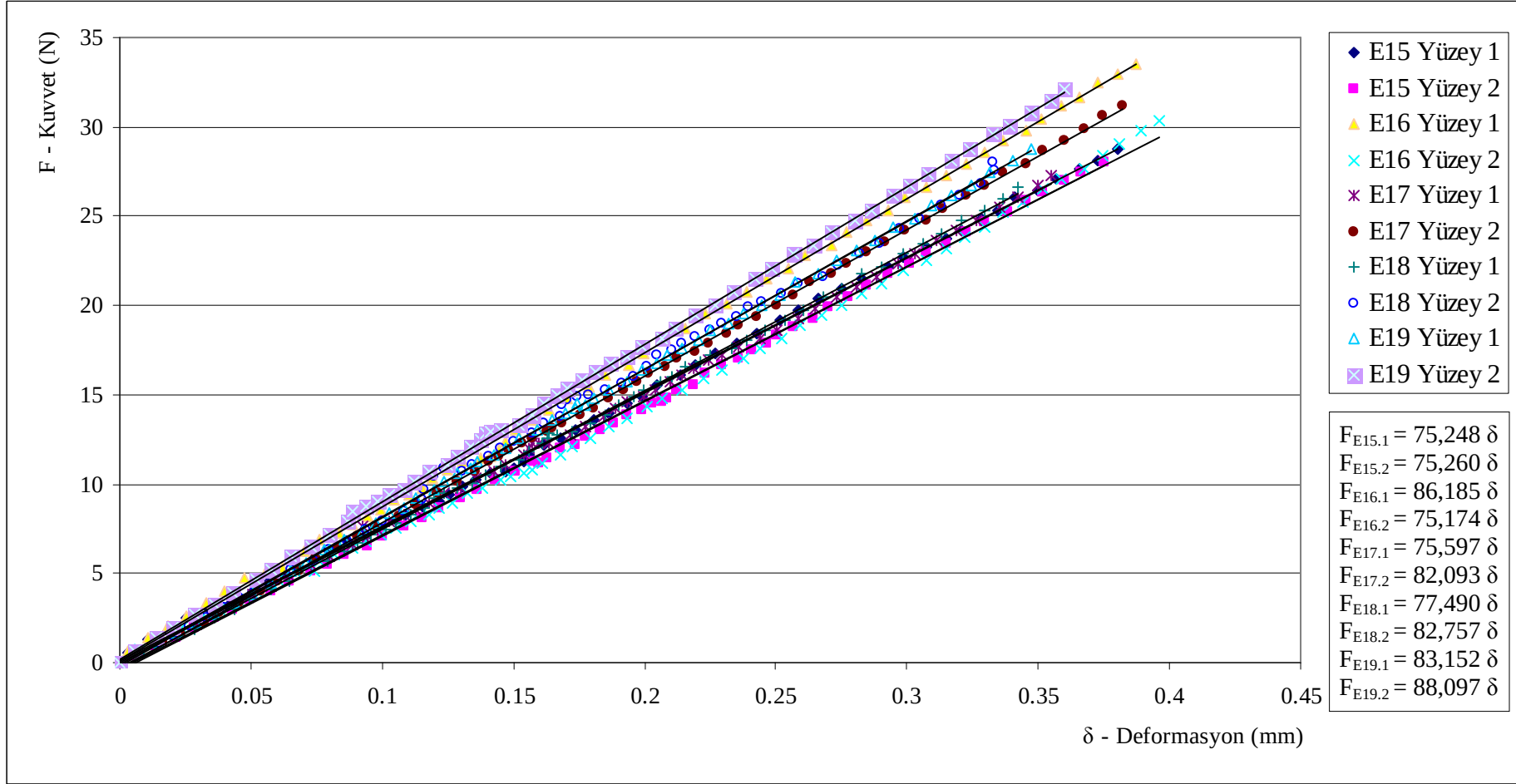
Şekil 4.13. Çelik takviyesiz eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri.



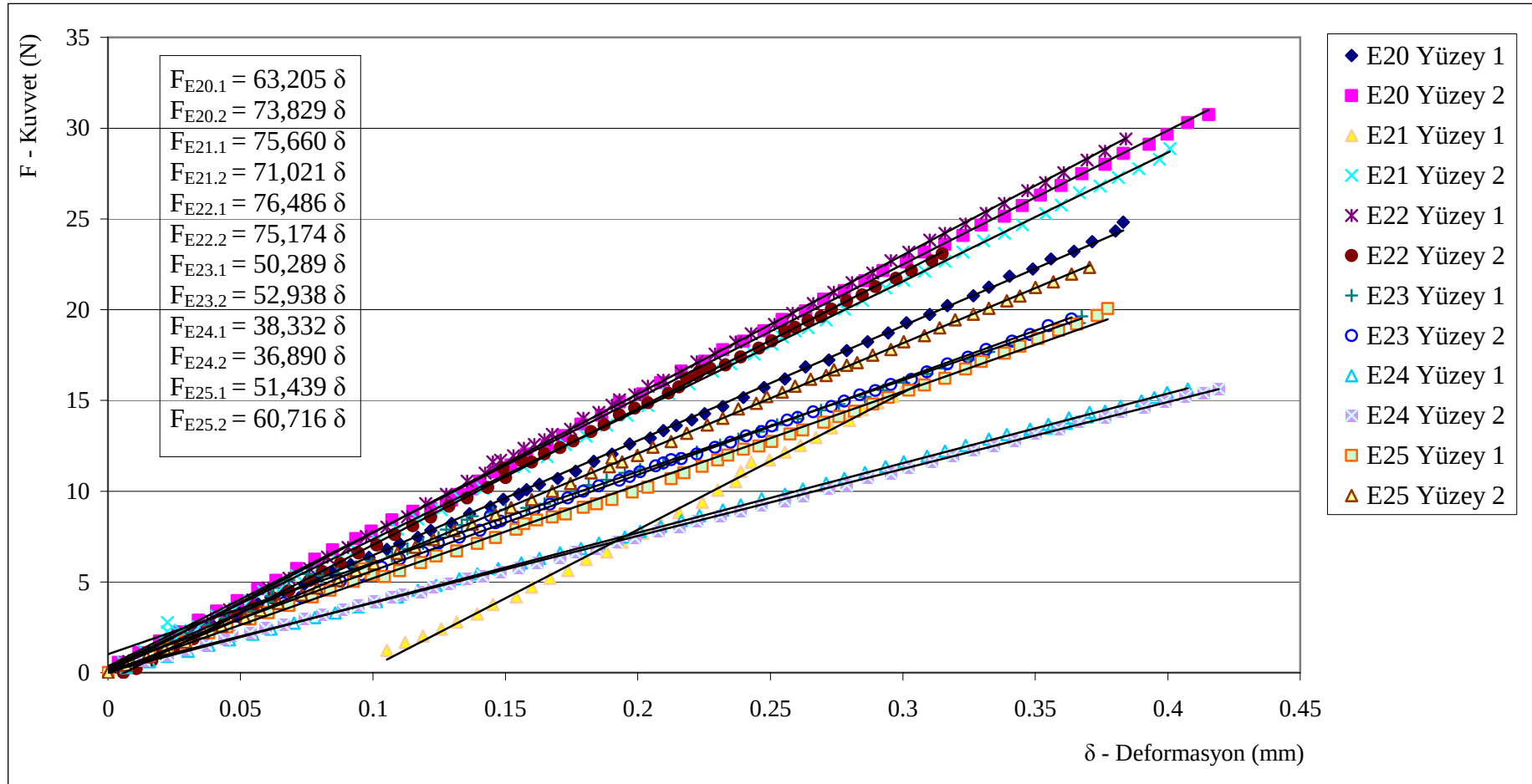
Şekil 4.14. %2 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri.



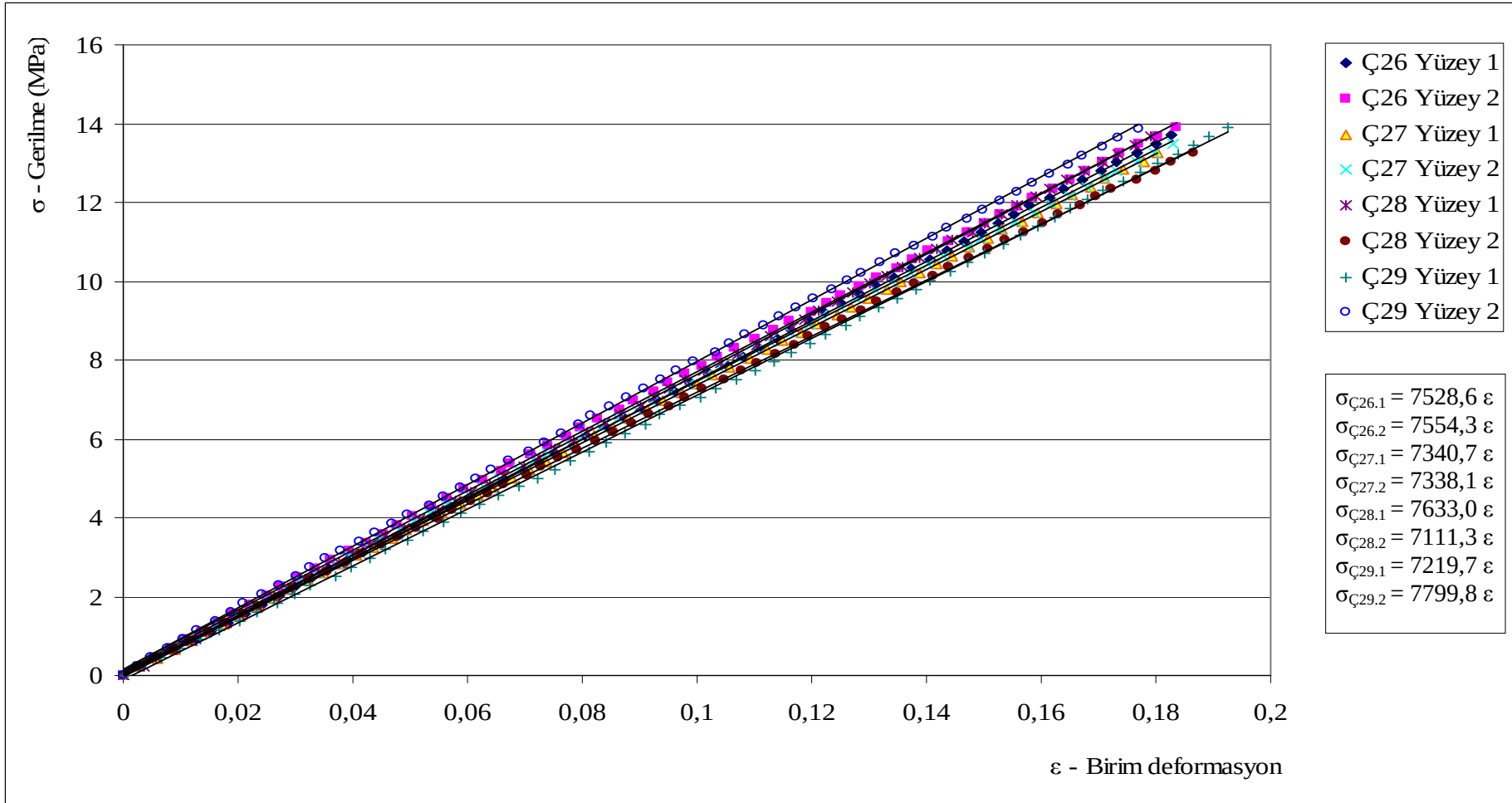
Şekil 4.15. %2.5 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri.



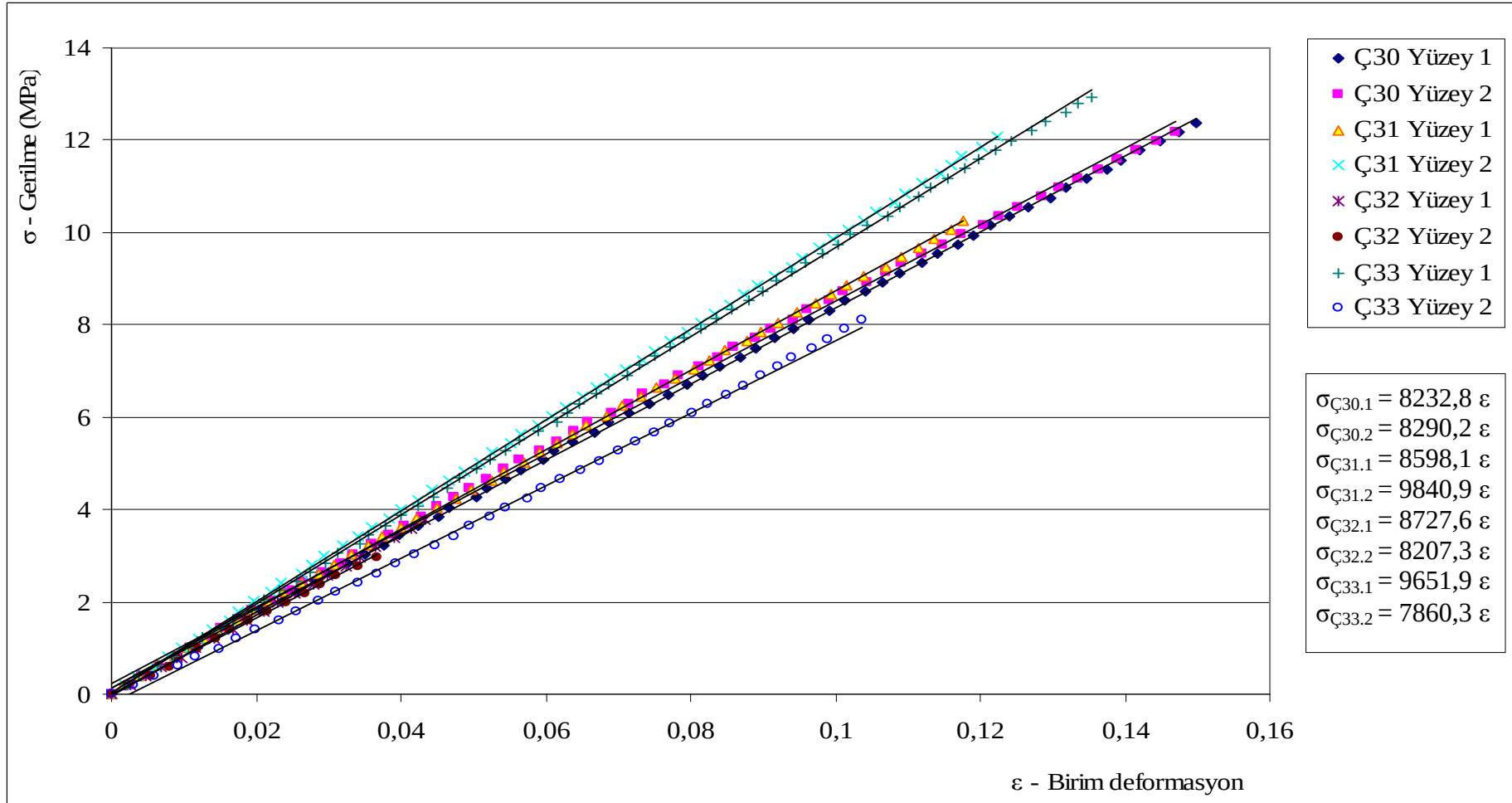
Şekil 4.16. %3.5 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri.



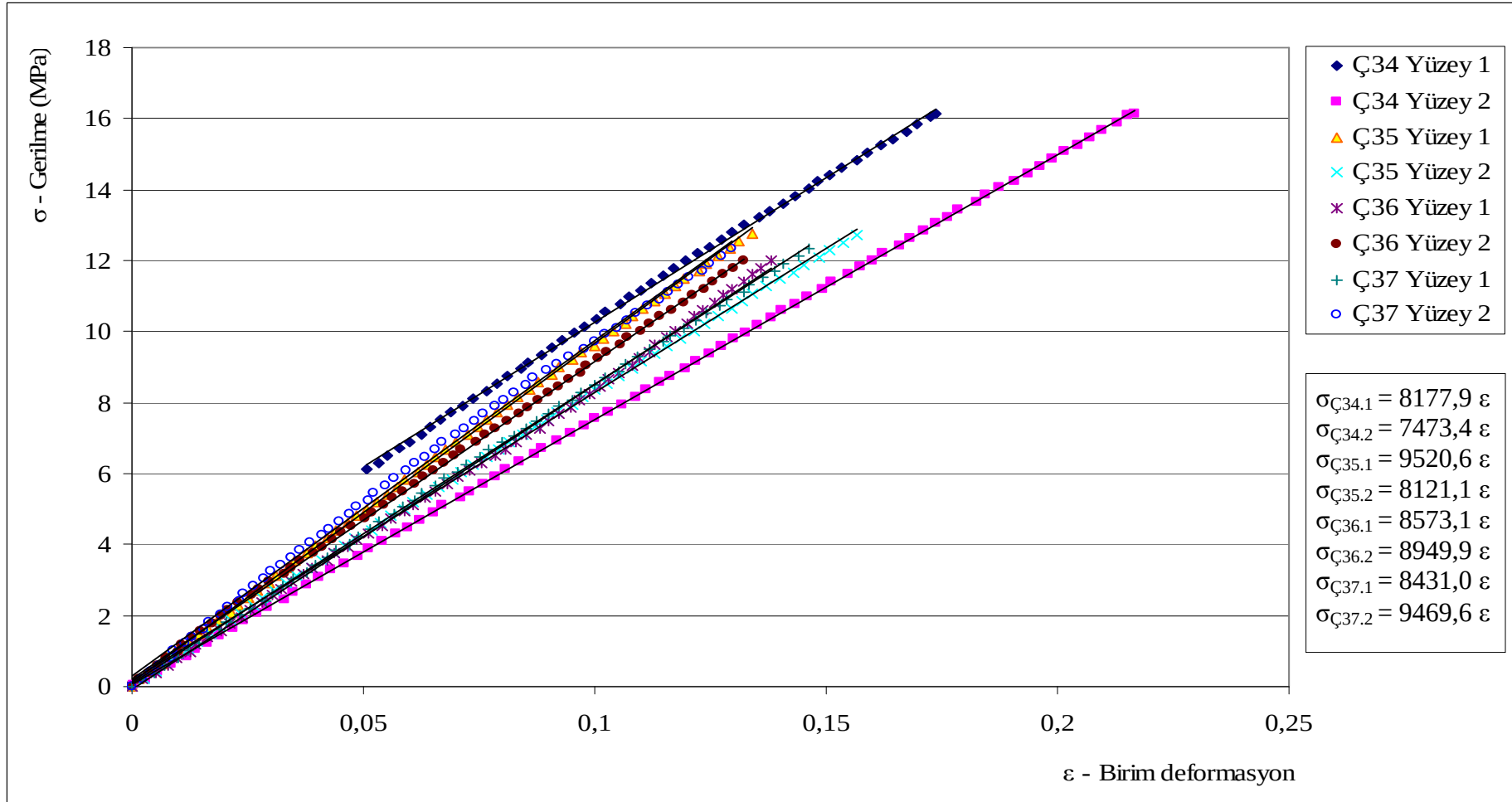
Şekil 4.17. %4 çelik takviyeli eğilme numuneleri için kuvvet-deformasyon eğrileri.



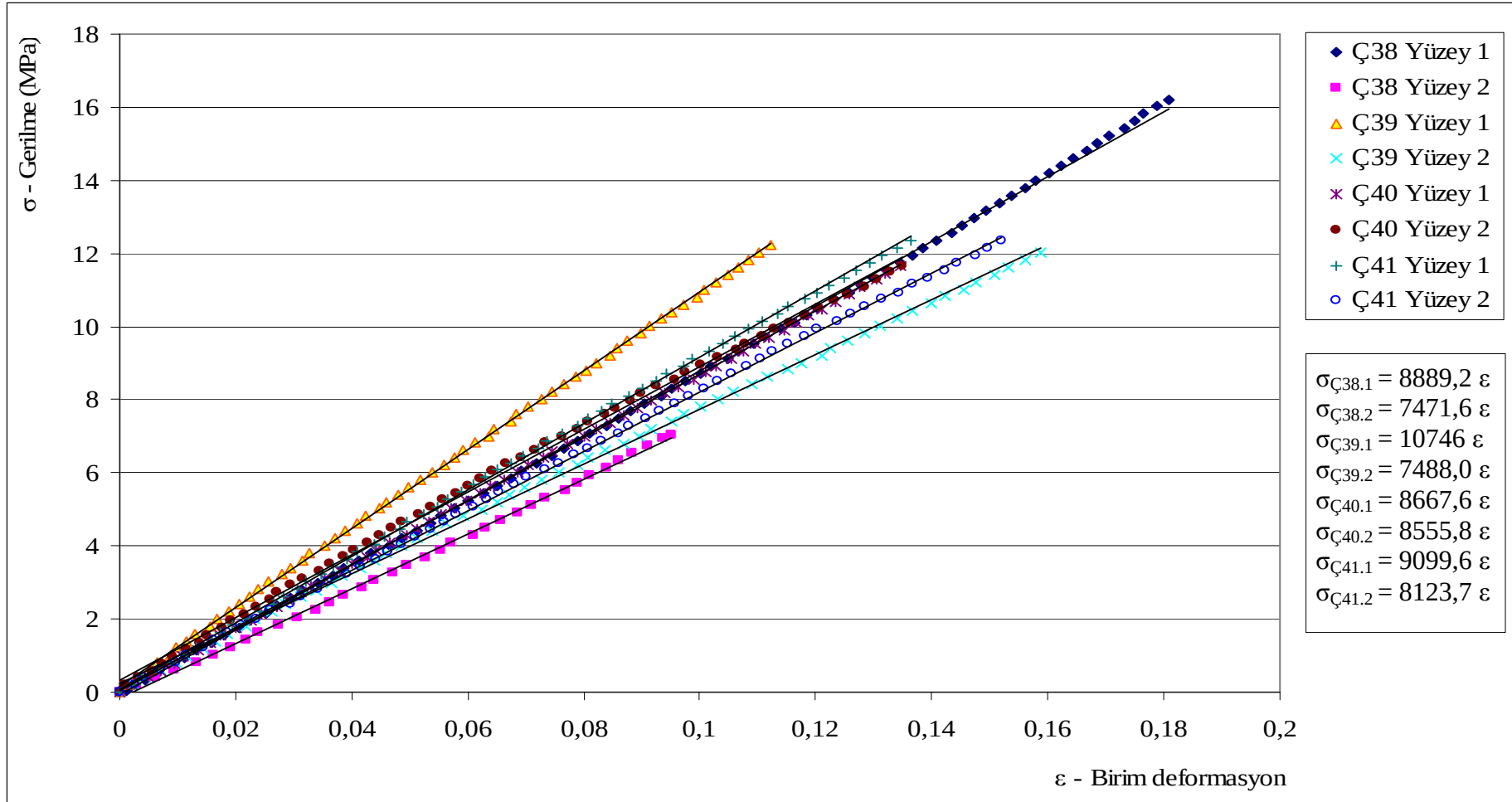
Şekil 4.18. Çelik takviyesiz çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri.



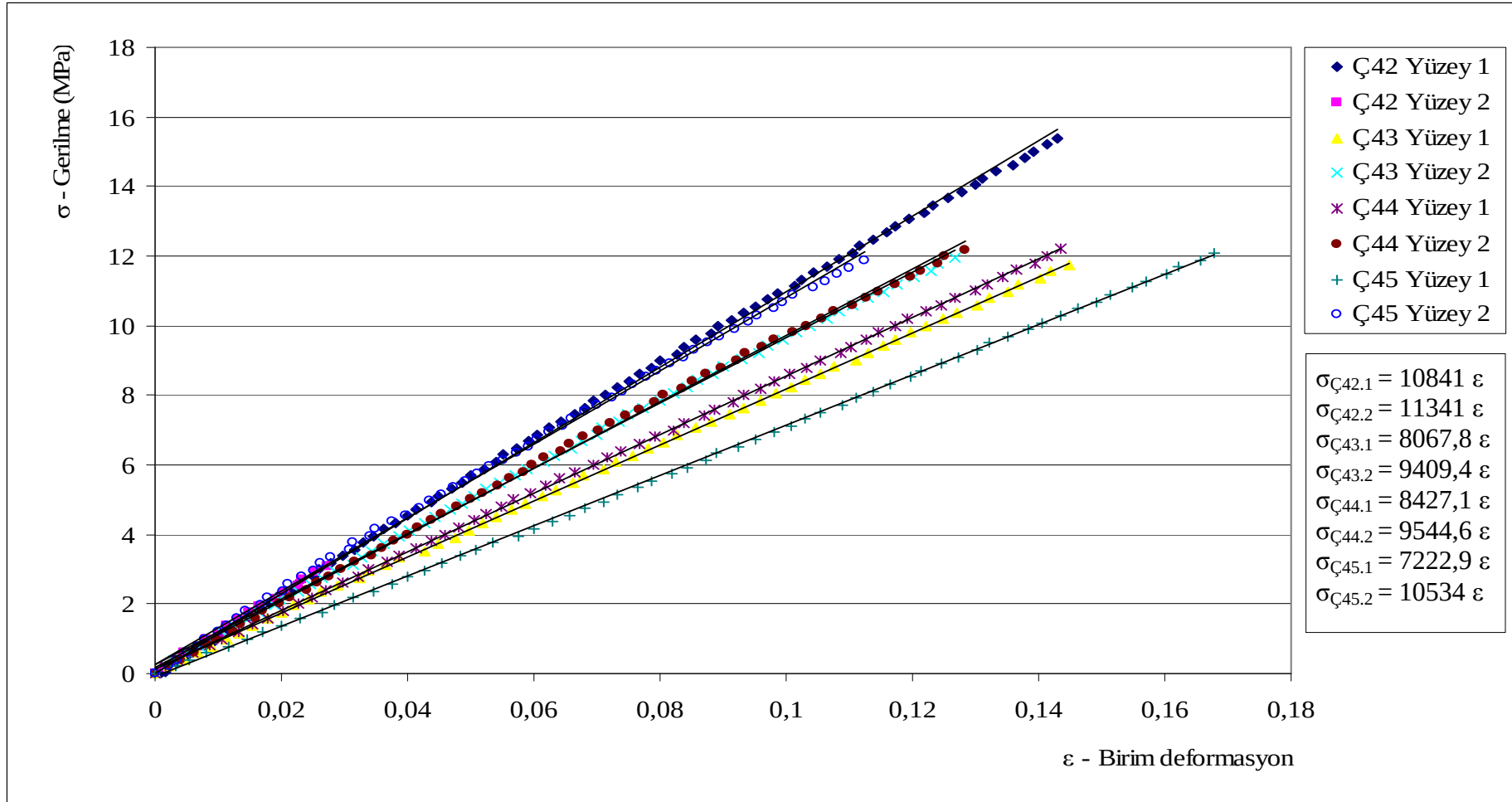
Şekil 4.19. %2 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri.



Şekil 4.20. %2.5 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri.



Şekil 4.21. %3.5 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri.



Şekil 4.22. %4 çelik takviyeli çekme numuneleri için gerilme-birim deformasyon eğrileri.

Tablo 4.2. ASTM D790 eğilme numuneleri deney sonuçları.

| Nu. No | Numune Boyutları (mm)   | Takviye Malzemesi         | Takviye Oranı (%) | Eğilme Modülü $E_{eğilme}$ (MPa)         | Ortalama Eğilme Modülü $E$ (MPa) | Ortalama Eğilme Modülü $E$ (MPa) | Eğilme Dayanımı $\sigma_{max}$ (MPa) |
|--------|-------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| E1     | b=12.35mm<br>h=4.76mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 9271,75<br>Yüzey 2 – 9560,80   | 9416,27                          | 9155,68                          | 196,03                               |
| E2     | b=12.86mm<br>h=4.78mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 9065,26<br>Yüzey 2 – 9059,92   | 9062,60                          |                                  | 140                                  |
| E3     | b=12.75mm<br>h=4.78mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 9451,02<br>Yüzey 2 – 9029,83   | 9240,42                          |                                  |                                      |
| E4     | b=13.07mm<br>h=4.75mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 8580,67<br>Yüzey 2 – 9226,22   | 8903,44                          |                                  |                                      |
| E5     | b=13.54mm<br>h=4.78mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz. | % 2               | Yüzey 1 – 9712,26<br>Yüzey 2 – 9645,99   | 9679,12                          | 9891,52<br>(9594,38)             |                                      |
| E6     | b=13.63mm<br>h=4.74mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz. | % 2               | Yüzey 1 – 9986,94<br>Yüzey 2 – 9880,67   | 9933,80                          |                                  |                                      |
| E7     | b=13.52mm<br>h=4.76mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz. | % 2               | Yüzey 1 – 10008,34<br>Yüzey 2 – 10112,24 | 10060,29                         |                                  |                                      |
| E8     | b=13.54mm<br>h=4.76mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz. | % 2               | Yüzey 1 – 10016,49<br>Yüzey 2 – 9769,28  | 9892,89                          |                                  |                                      |
| E9     | b=13.54mm<br>h=4.75mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz. | % 2               | Yüzey 1 – 8120,87<br>Yüzey 2 – 8690,78   | 8405,82                          |                                  | 203,44                               |
| E10    | b=13.24mm<br>h=4.79mm   | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz. | % 2.5             | Yüzey 1 – 9386,09<br>Yüzey 2 – 9964,22   | 9675,16                          | 10137,02                         |                                      |
| E11    | b=13.23mm<br>h=4.84mm   | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz. | % 2.5             | Yüzey 1 – 9950,56<br>Yüzey 2 – 9282,57   | 9616,56                          |                                  |                                      |
| E12    | b=13.224mm<br>h=4.813mm | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz. | % 2.5             | Yüzey 1 – 10200,20<br>Yüzey 2 – 11108,03 | 10654,11                         |                                  | 230,08                               |
| E13    | b=13.24mm<br>h=4.83mm   | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz. | % 2.5             | Yüzey 1 – 10580,55<br>Yüzey 2 – 10723,16 | 10651,86                         |                                  | 239,35                               |
| E14    | b=13.21mm<br>h=4.80mm   | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz. | % 2.5             | Yüzey 1 – 9691,84<br>Yüzey 2 – 10482,95  | 10087,39                         |                                  |                                      |
| E15    | b=13.17mm<br>h=4.83mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz. | % 3.5             | Yüzey 1 – 12676,75<br>Yüzey 2 – 12678,77 | 12677,76                         | 13537,18                         | 209,32                               |
| E16    | b=13.22mm<br>h=4.82mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz. | % 3.5             | Yüzey 1 – 14554,56<br>Yüzey 2 – 12695,07 | 13624,82                         |                                  | 222,59                               |
| E17    | b=13.22mm<br>h=4.80mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz. | % 3.5             | Yüzey 1 – 12926,75<br>Yüzey 2 – 14037,54 | 13482,15                         |                                  |                                      |
| E18    | b=13.22mm<br>h=4.82mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz. | % 3.5             | Yüzey 1 – 13086,19<br>Yüzey 2 – 13975,66 | 13530,92                         |                                  |                                      |
| E19    | b=13.22mm<br>h=4.83mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz. | % 3.5             | Yüzey 1 – 13955,32<br>Yüzey 2 – 14785,24 | 14370,28                         |                                  |                                      |
| E20    | b=13.12mm<br>h=4.74mm   | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 11308,96<br>Yüzey 2 – 13209,86 | 12559,41                         | 12228,41<br>(11670,10)           |                                      |
| E21    | b=13.20mm<br>h=4.78mm   | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 13120,45<br>Yüzey 2 – 12315,99 | 12718,22                         |                                  |                                      |
| E22    | b=13.19mm<br>h=4.685mm  | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 14097,70<br>Yüzey 2 – 13891,82 | 13994,76                         |                                  | 221,35                               |
| E23    | b=13.176mm<br>h=4.478mm | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 10626,18<br>Yüzey 2 – 11185,92 | 10906,05                         |                                  | 186,24                               |
| E24    | b=13.20mm<br>h=4.313mm  | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 9048,76<br>Yüzey 2 – 8708,36   | 8878,56                          |                                  |                                      |
| E25    | b=13.17mm<br>h=4.555mm  | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 10331,93<br>Yüzey 2 – 12195,29 | 11263,61                         |                                  |                                      |

Tablo 4.3. ASTM D638 çekme numuneleri deney sonuçları.

| Nu. No | Numune Boyutları (mm)   | Takviye Malzemesi         | Takviye Oranı (%) | Çekme Modülü $E_{\text{çekme}}$ (MPa) | Ortalama Çekme Modülü E (MPa) | Ortalama Çekme Modülü E (MPa) | Çekme Dayanımı $\sigma_{\text{max}}$ (MPa) |
|--------|-------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Ç26    | b=12.02mm<br>h=4.66mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 7528,6<br>Yüzey 2 – 7554,3  | 7541,45                       | 7440,69                       | 91,75                                      |
| Ç27    | b=12.02mm<br>h=4.82mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 7340,7<br>Yüzey 2 – 7338,1  | 7339,4                        |                               |                                            |
| Ç28    | b=11.91mm<br>h=4.79mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 7633<br>Yüzey 2 – 7111,3    | 7372,15                       |                               |                                            |
| Ç29    | b=11.92mm<br>h=4.64mm   | Sadece Elyaf              | 0                 | Yüzey 1 – 7219,7<br>Yüzey 2 – 7799,8  | 7509,75                       |                               |                                            |
| Ç30    | b=12.93mm<br>h=4.798mm  | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz  | % 2               | Yüzey 1 – 8232,8<br>Yüzey 2 – 8290,2  | 8261,50                       | 8653,64                       |                                            |
| Ç31    | b=13.03mm<br>h=4.85mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz  | % 2               | Yüzey 1 – 8598,1<br>Yüzey 2 – 9840,9  | 9219,50                       |                               | 132,5                                      |
| Ç32    | b=12.96mm<br>h=4.89mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz  | % 2               | Yüzey 1 – 8727,6<br>Yüzey 2 – 8207,3  | 8467,45                       |                               |                                            |
| Ç33    | b=12.91mm<br>h=4.80mm   | 0.14mm Tel<br>0.18mm Göz  | % 2               | Yüzey 1 – 9651,9<br>Yüzey 2 – 7860,3  | 8666,10                       |                               |                                            |
| Ç34    | b=12.86mm<br>h=4.82mm   | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz  | % 2.5             | Yüzey 1 – 8177,9<br>Yüzey 2 – 7473,4  | 7825,65                       | 8589,58                       |                                            |
| Ç35    | b=12.74mm<br>h=4.738mm  | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz  | % 2.5             | Yüzey 1 – 9520,6<br>Yüzey 2 – 8121,1  | 8820,85                       |                               |                                            |
| Ç36    | b=13.273mm<br>h=4.822mm | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz  | % 2.5             | Yüzey 1 – 8573,1<br>Yüzey 2 – 8949,9  | 8761,50                       |                               | 130,11                                     |
| Ç37    | b=13.034mm<br>h=4.791mm | 0.22mm Tel<br>0.40mm Göz  | % 2.5             | Yüzey 1 – 8431<br>Yüzey 2 – 9469,6    | 8950,30                       |                               | 126,95                                     |
| Ç38    | b=12.92mm<br>h=4.78mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz  | % 3.5             | Yüzey 1 – 8889,2<br>Yüzey 2 – 7471,6  | 8180,40                       | 8632,44                       |                                            |
| Ç39    | b=13.155mm<br>h=4.782mm | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz  | % 3.5             | Yüzey 1 – 10764<br>Yüzey 2 – 7488     | 9126,00                       |                               |                                            |
| Ç40    | b=12.258mm<br>h=4.884mm | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz  | % 3.5             | Yüzey 1 – 8667,6<br>Yüzey 2 – 8555,8  | 8611,70                       |                               | 148,66                                     |
| Ç41    | b=13.05mm<br>h=4.77mm   | 0.30mm Tel<br>0.60mm Göz  | % 3.5             | Yüzey 1 – 9099,6<br>Yüzey 2 – 8123,7  | 8611,65                       |                               | 122,29                                     |
| Ç42    | b=13.01mm<br>h=5.00mm   | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 10841<br>Yüzey 2 – 11341    | 11091,00                      | 9423,48                       |                                            |
| Ç43    | b=12.947mm<br>h=4.967mm | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 8067,8<br>Yüzey 2 – 9409,4  | 8738,60                       |                               |                                            |
| Ç44    | b=12.704mm<br>h=4.963mm | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 8427,1<br>Yüzey 2 – 9544,6  | 8985,85                       |                               | 108,37                                     |
| Ç45    | b=12.933mm<br>h=4.928mm | 0.40mm Tel<br>1.00mm Göz. | % 4               | Yüzey 1 – 7222,9<br>Yüzey 2 – 10534   | 8878,45                       |                               | 125,26                                     |

#### 4.4. Deney Sonuçları Değerlendirmesi

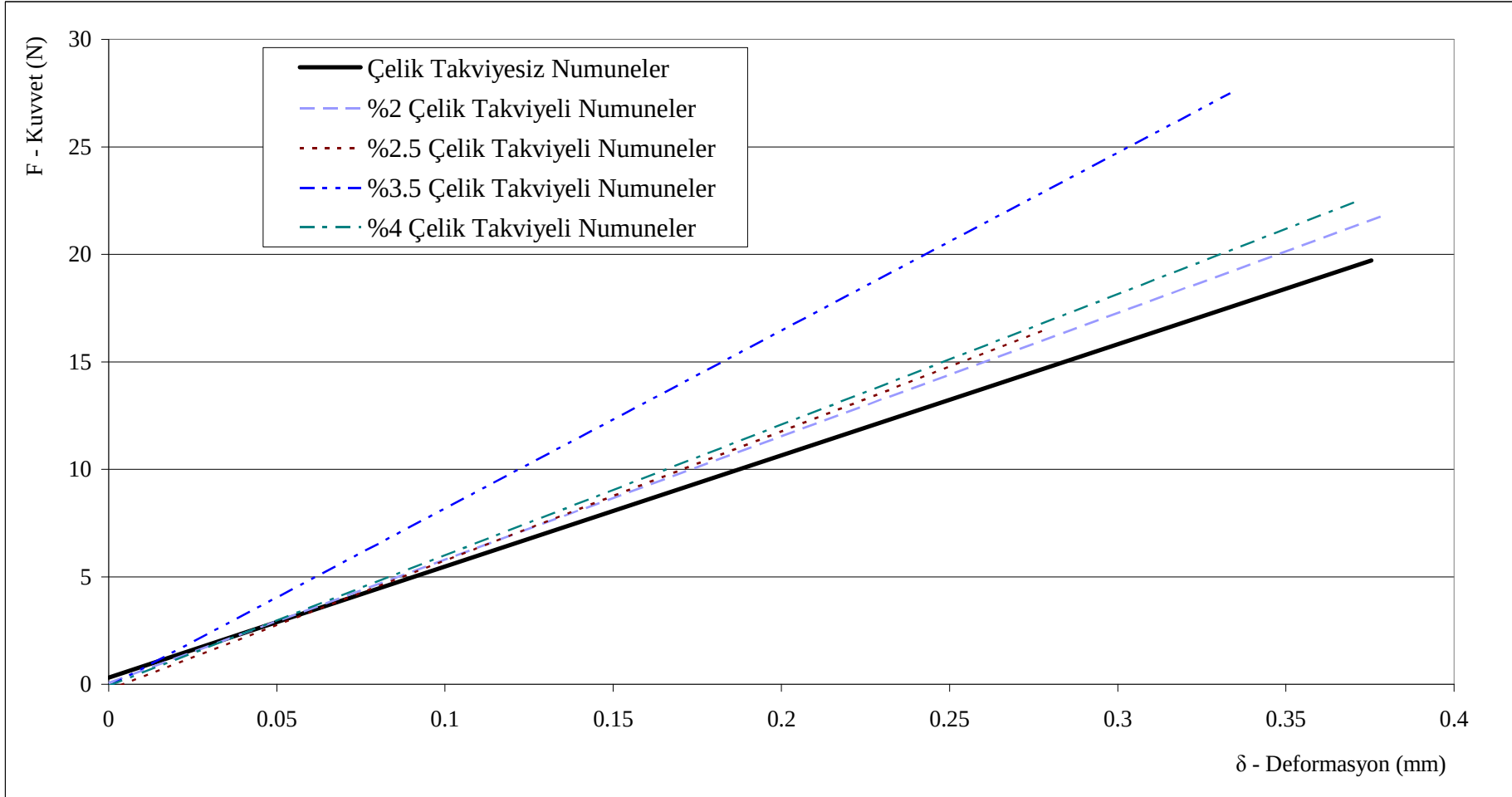
Eğilme ve çekme deney sonuçlarına göre oluşturulmuş sırasıyla kuvvet-deformasyon ve gerilme-birim deformasyon eğrileri göstermiştir ki, çelik takviyesi ile oluşturulan yeni kompozit lineer-elastik malzeme özellikleri taşımaktadır. Takviye oranının %3.5 seviyesine kadar artırılmasıyla, elastisite modülü ve mukavemette her iki tip deney için, ciddi bir artış eğilimi olduğu görülmektedir. %4 takviye oranı için ise, hem çekme hem de eğilme numunelerinde mukavemet artış yüzdesi azalmaktadır. Benzer durum, elastisite modülü için, sadece eğilme numunelerinde gözlemlenmektedir.

Eğilme numuneleri için, %2, 2.5, 3.5 ve 4 seviyelerinde, elastisite modülü sırasıyla %8, 10, 47 ve 33 artış göstermektedir. Aynı yüzdeler mukavemet artışları için, %21, 39, 28 ve 21 seviyelerinde bulunmaktadır.

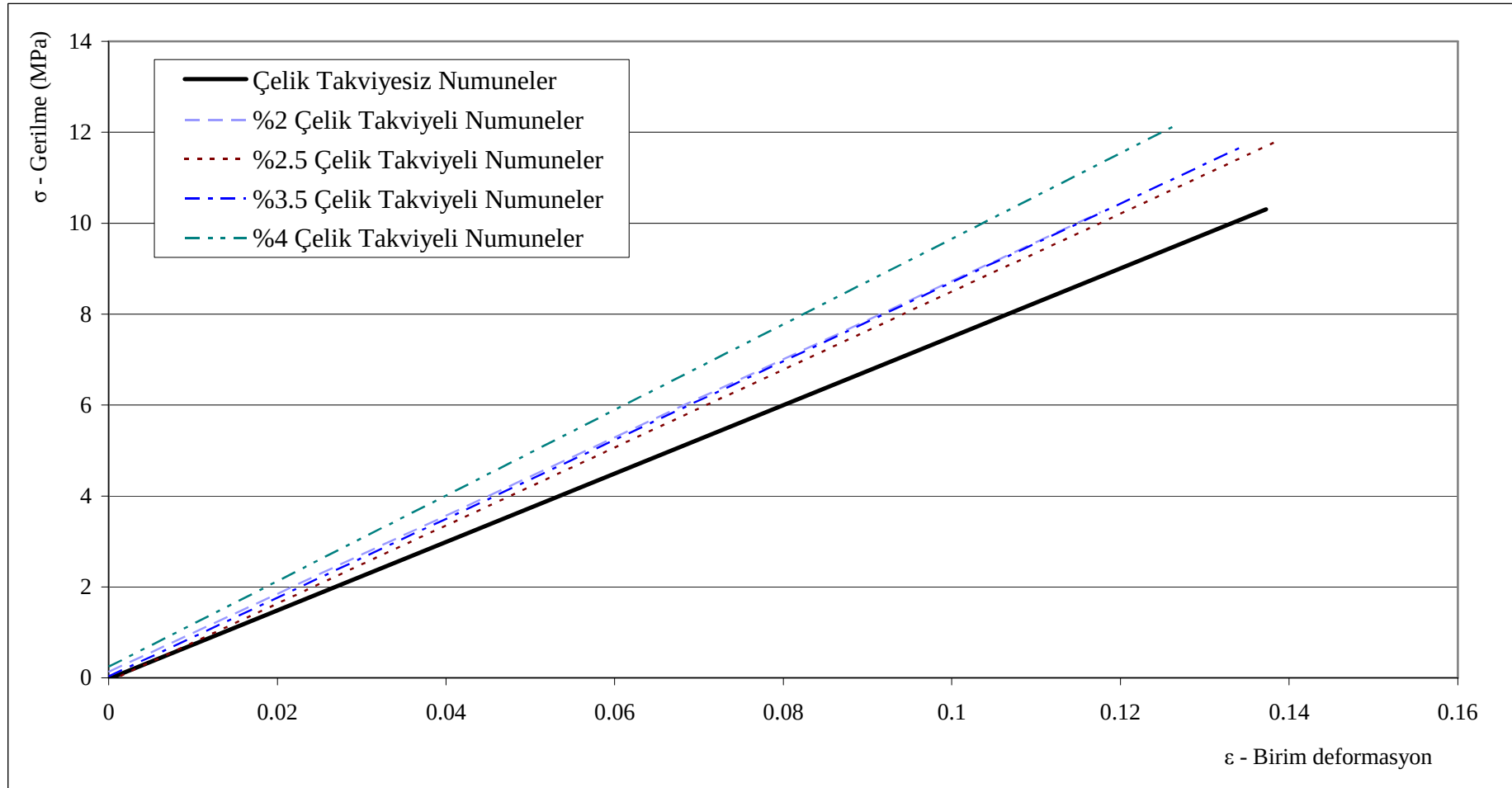
Çekme numuneleri için, %2, 2.5, 3.5 ve 4 takviye kullanıldığında, elastisite modülü artışı sırasıyla %16, 15, 16 ve 26 olarak bulunmaktadır. Çekme numunelerinde eğilme numunelerinden daha az bir artışın gözlenmesi, eğilme numunelerinde donatının maksimum çekme ve basınç bölgelerine yakın yerleştirilmiş olması ile açıklanabilir. Bu testlerde %2-3.5 seviyesi arasında donatı oranının elastisite modülünün artışında bir farklılık göstermediği ve elastik modülünün sabit kaldığı belirlenmektedir. Burada, %4 takviyenin elastisite modülünde ciddi bir artışa yol açtığı gözlemlenmektedir. Çekme mukavemeti değerlendirildiğinde ise en yüksek artışın (%47) %3.5 takviye ile elde edildiği görülmektedir. %2, 2.5 takviye için bu artışlar %44 ve 40 olarak gerçekleşmektedir. %4 takviye ise, eğilme numunelerinde olduğu gibi, çekme numunelerinde de mukavemet artışında bir düşüşe (%27) neden olmaktadır.

Donatı yüzdesinin CTP ile aderansının sağlanamaması ve hava kabarcıklarının oluşması mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Aderansın iyileştirilmesi ise, hasır donatı gözeneklerinin yeterince büyümesi ve bağlayıcının gözenekler arasından geçerek, kayma gerilmelerini kolaylıkla karşılaması ile mümkündür. Gözenek alanı küçüldükçe (%2 ve %2.5 takviye oranlarında), bağlayıcının gözenek içinden penetrasyonu güçleşmekte ve kompozit malzemenin lamine kompozit tipine yakın bir davranış sergilemesi beklenmektedir. Lamine kompozitler ise, katmanlar arasındaki süreksizlik nedeniyle, sadece yüzey sürtünmesi ve yapışma direnci ile kayma gerilmelerini karşılamaktadır. Bu tür malzemelerin daha düşük elastisite modülü ve dayanım sergilemesi de, bu gerekçe dahilinde, açıklanabilmektedir. Donatı oranının fazla artması, gözenek yüzeyini arttırsa da, bu sefer, donatı çapı arttığı için, hava boşluklarının oluşması hızlanmakta ve böylece mukavemet düşmektedir. Kompozit davranışın azalmasına yol açan bu durum aynı zamanda elastisite modülünün de daha fazla artışını engellemektedir.

Takviye miktarlarına göre oluşan kuvvet-deformasyon ve gerilme-birim deformasyon eğrileri karşılaştırmaları Şekil 4.23-24'te verilmektedir.



Şekil 4.23. Eğilme numuneleri kuvvet-deformasyon eğrileri karşılaştırması.



Şekil 4.24. Çekme numuneleri gerilme-birim deformasyon eğrileri karşılaştırması.

Malzeme eğrileri incelendiğinde çelik takviyeli numune eğrileri, takviyesiz eğrilere göre daha fazla saçılma göstermektedir. Böylece elastisite modülünün hesabında da saçılma artmaktadır. Saçılma miktarı standart sapmalara bakılarak değerlendirilmektedir. Standart sapmalar Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Deney sonuçları karşılaştırmaları.

| Numune                                 | Ortalama Elastisite Modülü 'E' (MPa) | Elastisite Modülü Artışı (%) | Eğilme ve Çekme Mukavemeti $\sigma_{max}$ (MPa) | Mukavemet Artışı (%) | Elastisite Modülü Standart Sapması |
|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Çelik Takviyesiz Eğilme Numuneleri     | 9155,68                              | -                            | 168,02                                          | -                    | 300,86                             |
| %2 Çelik Takviyeli Eğilme Numuneleri   | 9891,52                              | 8,03                         | 203,44                                          | 21,08                | 657,32                             |
| %2.5 Çelik Takviyeli Eğilme Numuneleri | 10137,02                             | 10,72                        | 234,72                                          | 39,70                | 592,88                             |
| %3.5 Çelik Takviyeli Eğilme Numuneleri | 13537,18                             | 47,85                        | 215,96                                          | 28,53                | 814,63                             |
| %4 Çelik Takviyeli Eğilme Numuneleri   | 12228,41                             | 33,56                        | 203,80                                          | 21,30                | 1780,84                            |
| Çelik Takviyesiz Çekme Numuneleri      | 7440,69                              | -                            | 91,75                                           | -                    | 228,17                             |
| %2 Çelik Takviyeli Çekme Numuneleri    | 8653,64                              | 16,30                        | 132,5                                           | 44,41                | 743,59                             |
| %2.5 Çelik Takviyeli Çekme Numuneleri  | 8589,58                              | 15,44                        | 128,53                                          | 40,09                | 700,13                             |
| %3.5 Çelik Takviyeli Çekme Numuneleri  | 8632,44                              | 16,02                        | 135,48                                          | 47,66                | 1052,27                            |
| %4 Çelik Takviyeli Çekme Numuneleri    | 9423,48                              | 26,64                        | 116,82                                          | 27,32                | 1444,57                            |

Elastisite modülünün hesabında gözlemlenen standart sapma artışı, takviye yüzdesi ile doğru orantılıdır. Donatı çapının artması ile çevresinde oluşan hava kabarcıkları aynı zamanda numunenin hazırlandığı el yatırması yönteminin de bir sonucudur. Bu bulgular donatı yüzdesinin artışı ile artan standart sapma değerleri ile desteklenmektedir.

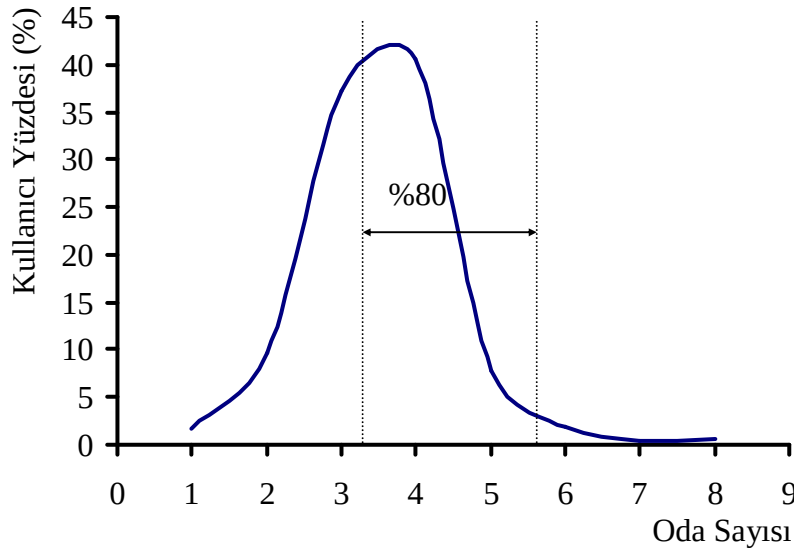
Üretilmesi düşünülen yapısal CTP kompozitlerin üretim yöntemi olarak öngörülen, profil çekme yöntemi ve optimal donatı yüzdesi ile bu sorunun aşılabileceği düşünülmektedir. Bu sebeplerin yanı sıra, numunelerin metal kesme frezelerinde şekillendirilmiş olmasının, numunelerde yüzeysel ve bünyesel bazı hasarlara yol açmış olduğu da unutulmamalıdır. Bu tartışma ve bulgular doğrultusunda %3.5 civarında bir donatı yüzdesinin optimal mekanik özellikler vereceği sonucuna varılmaktadır.

## 5. TOPLU KONUT İÇİN ENDÜSTRİYEL TASARIM

### Toplu Konut Uygulaması İçin Modül Boyutunun Seçimi

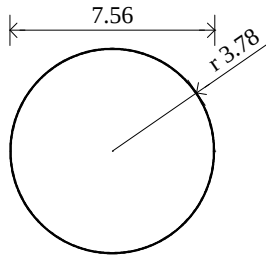
Mimari modülün boyut tasarımında ana kriter olarak Türkiye'deki kullanıcıların genelinin ihtiyacı göz önünde bulundurulmaktadır. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için DİE'nin (Devlet İstatistik Enstitüsü) 2000 yılında yapmış olduğu genel nüfus sayımına göre oluşturduğu "Hane halkı büyüklüğü ve konutun oda sayısına göre hane halkı sayısı" bulgularından yararlanılmaktadır. Elde edilen bulgular Tablo 5.1'de gösterilmektedir. Normal dağılım eğrisine student's t test uygulandığında %80 güven aralığı için 4 veya 5 odalı konutlara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır (Bkz. Şekil 5.1). Bu sonuçlara göre konutların 4 oda (3oda+1salon) ile 5 oda (4oda+1salon) arasında tasarlanması gerekmektedir.

Sistemin, toplu konut uygulamaları haricinde müstakil konut ve zaman içinde genişleme gibi değişik talepleri karşılayabilecek tasarım esnekliğine sahip olması da hedeflenmektedir. Böylece, sistemin doğabilecek ihtiyaçlara göre yan yana eklenerek kolaylıkla büyütülebilmesi ve iç bölücü duvarların mevcut mekanların yenileriyle değiştirilmesine olanak tanıyacak biçimde demonte prefabrik elemanlar olarak tasarlanması hedeflenmektedir. Modüler yapı planlaması ve kolay değiştirilebilir iç bölücü duvar tasarımı, çok katlı toplu konut uygulamalarında da konut sahibine değişen ihtiyaçları doğrultusunda konutunun istediği mekanını büyütme ya da küçültme imkanı tanıyabilecektir.

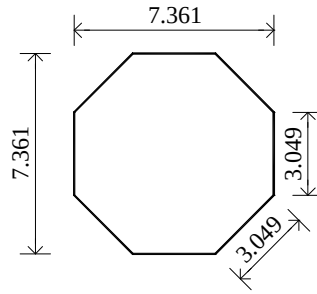


Şekil 5.1. DİE 2000 genel nüfus sayımına göre hane halkı istatistiki değerlendirmesi.

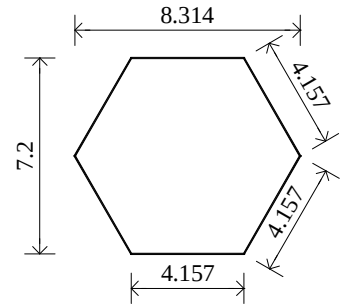
Sistemi oluşturacak modüllerin tasarımı aşamasında çeşitli geometrik biçimler değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmede, oluşturulacak modülün, yan yana eklenerek büyütüldüğünde alan kaybına yola açmayacak olması ve aynı alana sahip formlardan ısı ve malzeme kaybını en aza indirgeyecek dış cepheye sahip olması amaçlanmaktadır. Şekil 5.2’de sunulan formlara bakıldığında dairesel ve sekizgen formdan sonra kapladığı alana göre en küçük dış çevre uzunluğuna altıgen formun sahip olduğu görülmektedir. Dairesel ve sekizgen formlar tek başlarına altıgen forma nispeten daha düşük çevreye sahip olmalarına karşın yan yana eklendiklerinde altıgen formda rastlanmayan alan kayıplarına yol açmakta ve daha fazla toplam dış cephe uzunluğuna sahip olmaktadır (Bkz. Şekil 5.3). Şekil 5.3’te gösterilen  $44.89\text{m}^2$ ’lik alana sahip daire, sekizgen ve altıgenden oluşan 4 ayrı modülün birleştirilmesi ile oluşturulan sistemlerin toplam dış cephe uzunlukları sırasıyla 71.251m, 60.984m ve 58.197m olarak hesaplanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, endüstriyel konut modülü için en avantajlı form olan altıgen geometri çıkış noktası olarak ele alınmaktadır.



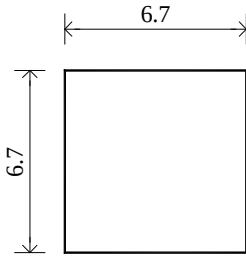
- a) Daire  
Alan =  $44.888\text{m}^2$   
Çevre = 23.75m



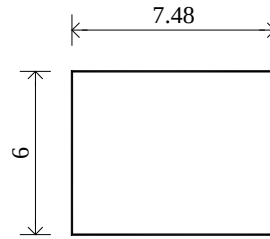
- b) Eşkenar Sekizgen  
Alan =  $44.893\text{m}^2$   
Çevre = 24.39m



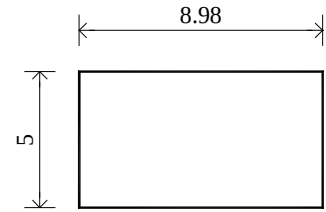
- c) Eşkenar Altıgen  
Alan =  $44.895\text{m}^2$   
Çevre = 24.94m



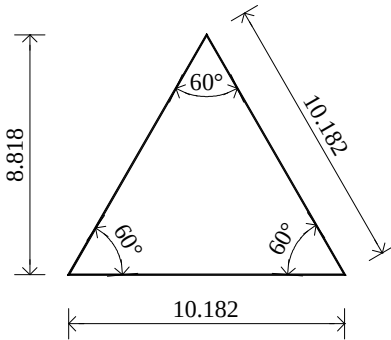
- d) Kare  
Alan =  $44.89\text{m}^2$   
Çevre = 26.80m



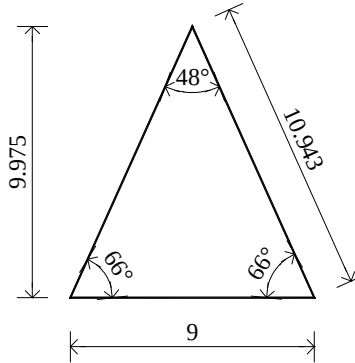
- e) Dikdörtgen  
Alan =  $44.88\text{m}^2$   
Çevre = 26.96m



- f) Dikdörtgen  
Alan =  $44.90\text{m}^2$   
Çevre = 27.96m

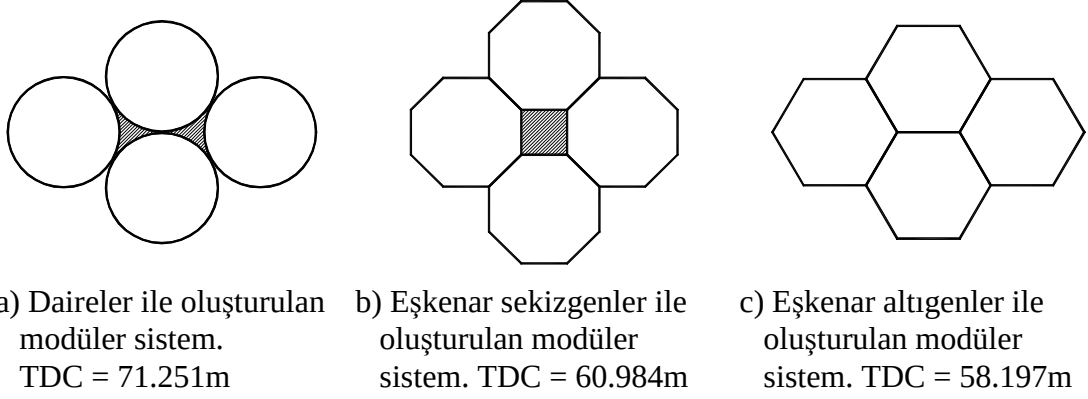


- g) Eşkenar Üçgen  
Alan =  $44.89\text{m}^2$   
Çevre = 30.55m



- e) İkizkenar Üçgen  
Alan =  $44.89\text{m}^2$   
Çevre = 30.89m

Şekil 5.2. Mimari modül seçiminde değerlendirilen geometrik formlar.

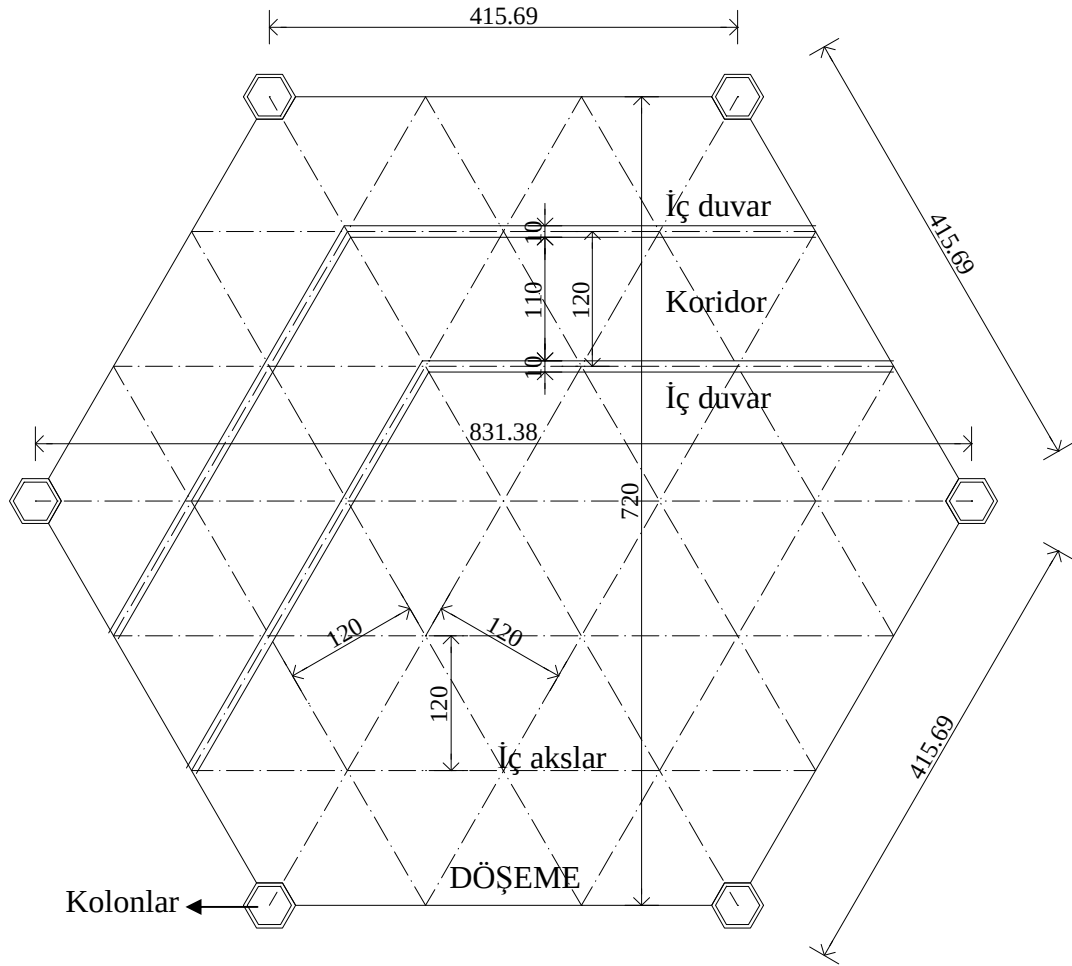


Şekil 5.3. Geometrik formlar ile oluşturulan modüler sistemler (Taraflı bölgeler kayıp alanları, TDC ise toplam dış cephe uzunluğunu temsil etmektedir.).

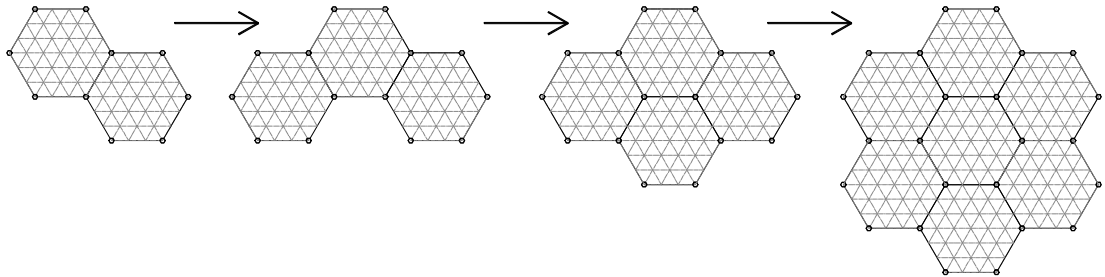
Seçilen altıgen form kendi içerisinde, montaj ve mekan standardı oluşturması açısından, eşit aralıklardaki üçgen aks sistemine bölünmektedir (Bkz. Şekil 5.4). Bu akslar hem demonte iç bölücü duvar akslarını, hem de döşemeyi oluşturacak bal peteği formundaki rijitleştirici levhaların montaj akslarını belirlemektedir. Ayrıca esnek planlamayı kolaylaştıracak sirkülasyon alanlarının her yönde uzamasını sağlayacak ve minimum genişlik olan net 110cm'yi sağlayacak biçimde düzenlenmektedir. Seçilen aks sisteminin diğer bir avantajı dış cepheyi 3 parçaya bölen iç aksların cepheyi kestikleri noktalarda dış cephe panellerinin birleşim fugalarını oluşturması ve mekanın işlevine göre değişik formlarda tasarlanmış standart cephe elemanlarının kullanımını mümkün kılabilmesidir. İç bölücü duvarların da bu aks sistemine göre monte edilmesi benzer avantajları yine beraberinde getirmektedir. Konut içindeki mekanlara göre standart parçalı duvar üniteleri akslara göre monte edilecek ve cephe panelleriyle fugalarda kesişerek, detay ve izolasyon kolaylığı sağlayacak ve seri üretime imkan tanıyacaktır.

Altıgen formun boyutlandırılmasında ve iç aks sisteminin açıklığının belirlenmesinde temel boyut olarak net koridor genişliği olan 110cm hem planlama gereksinimi olarak iki kişinin yan yana geçiş mesafesini, hem de uluslararası modül birimi olan 10cm'nin katlarını vermesi açısından önemlidir. Buradan yola çıkarak 120cm iç aks açıklıklarına ve toplam  $44.89m^2$  brüt alana sahip modül boyutuna ulaşılmaktadır. Bu modül altı köşesinden altıgen CTP kolonlarla taşınmakta ve başta salon olmak üzere tek hacim, yada alan kaybı vermeden ideal boyutta 3 yatak odasını barındıracak mimari plan esnekliğine sahip olmaktadır. Bu modüller iki, üç veya dört

parçadan oluşan sistemler olarak birleştirildiğinde ise Türkiye’de ihtiyaç duyulan ideal büyüyen konut alanları olan brüt 90, 135, 180m<sup>2</sup> elde edilmektedir. Altıgen formun sunduğu tasarım esnekliği sayesinde sistemin büyüme olanakları şematik olarak Şekil 5.5’te ifade edilmektedir.



Şekil 5.4. Mimari planlamada kullanılan altıgen form boyutları ve iç aks sistemi (Ölçüler cm cinsindendir).



Şekil 5.5. Altıgen modüllerin eklenerek konutların büyüme olanakları.

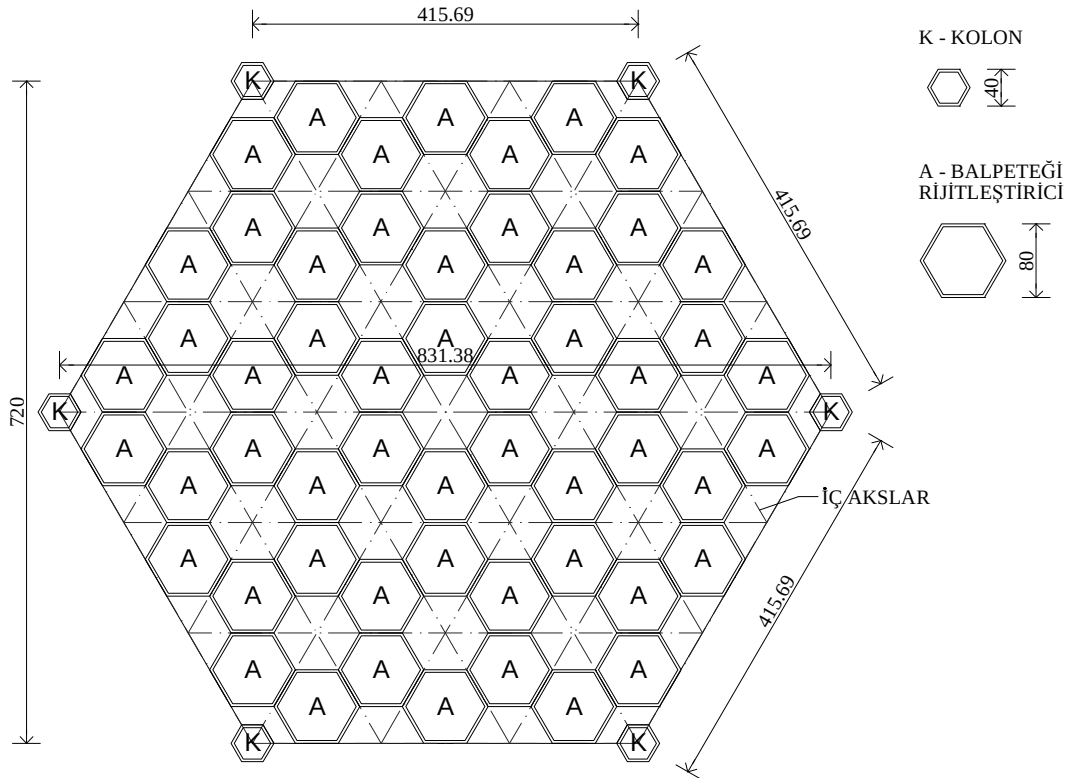
## **Mimari Kriterlere Göre Taşıyıcı Sistem Ön Kararlarının Oluşturulması**

Uygulanması düşünülen sistem, tamamı prefabrik olarak üretilen CTP elemanların bir araya gelerek bütünü oluşturmasıdır. Sistemin sadece kolon ve döşeme gibi ana strüktürü oluşturan elemanlarının değil, aynı zamanda dış cephe, iç bölücü duvar ve ıslak hacimler gibi elemanlarının da prefabrik olarak üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu şekilde, malzeme üretimi esnasında oluşabilecek hataların ortadan kaldırılması ve şantiye işçiliğinin en aza indirilerek uygulama süresinin kısaltılması düşünülmektedir. Ayrıca CTP strüktür, çelik ve beton ile imal edilen diğer prefabrik elemanlara göre oldukça hafif olması nakliye maliyetlerini düşürmekte ve şantiyedeki montaj işçiliğini kolaylaştırmaktadır.

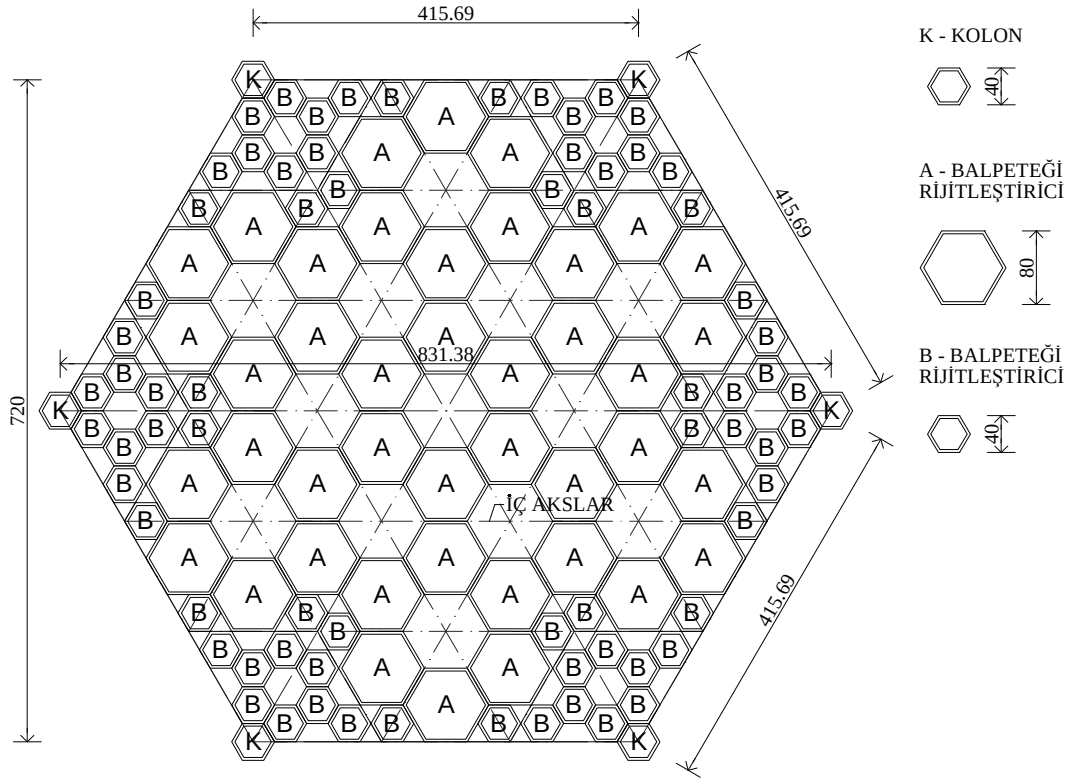
Taşıyıcı sistem döşeme plağı, kolon, kolon-döşeme bağlantı elemanı ve yüksek katlı uygulamalarda cephe gergi kablolarından oluşmaktadır. Taşıyıcı eleman ön boyutları mevcut ince cidarlı kapalı kesitli soğukta şekil verilmiş çelik taşıyıcı sistem boyutları temel alınarak oluşturulmaktadır. Daha sonraki adımda bu elemanların boyutları LUSAS v13.5 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak statik analizleri deneylerden elde edilen mekanik özelliklere bağlı olarak değerlendirilecektir. Sadece kolon ve döşemelerden oluşan, kirişsiz plak döşeme olarak düşünülen sistemde çok katlı uygulamalarda yatay rijitliğin artırılabilmesi için cephede çapraz gergilerin kullanılması daha yüksek katlı uygulamalarda ise rijit perdeli betonarme merdiven ve asansör çekirdeğinin inşası öngörülmektedir.

Tasarlanan döşeme plağı, alt ve üst yüzeyde bulunan 1cm'lik CTP panellerin arasında 0.5cm et kalınlığında, 18cm yükseklikteki altıgen bal peteği CTP rijitleştiriciler ile toplam 20cm yüksekliğindeki sandviç konstrüksiyondan oluşmaktadır. Panellerin arasındaki bal peteği rijitleştiriciler daha önce hazırlanan iç aks sistemine göre yerleştirilerek epoksi ile alt ve üst panellere yapıştırılmaktadır. Bu şekilde döşemedeki gerekli atalet artışı en az malzeme ile elde edilmesinin yanı sıra, oluşan hava boşlukları ile katlar arası ısı ve ses izolasyonu da sağlanmaktadır. Ayrıca aks sistemine oturan bal peteği rijitleştiriciler bölücü duvarların oturduğu akslara tesadüf ettirilmesi ile lokal döşeme deformasyonları da engellenmektedir. Şekil 5.6.a,

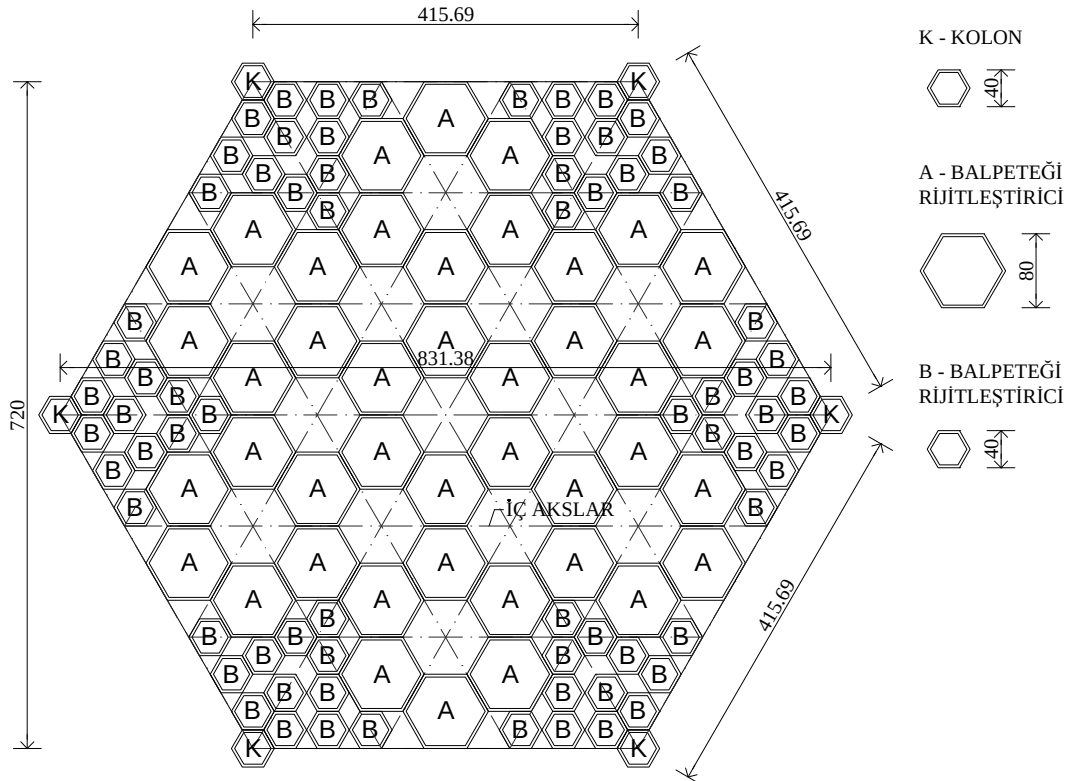
5.6.b ve 5.6c’de tasarlanan 3 değişik döşeme kalıp sistemi görülmektedir. İlk döşemede altıgen ara elemanların tamamı aynı boyutlarda kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarına göre, döşeme-kolon birleşim noktalarında oluşabilecek aşırı gerilmeleri karşılaması için, kolon bağlantı noktalarında bal peteği rijitleştiriciler sıklaştırılarak kullanılma ihtimali değerlendirilmektedir (Bkz. Şekil 5.6.b – 5.6c).



Şekil 5.6.a. Döşeme kalıp planı örnek 1.

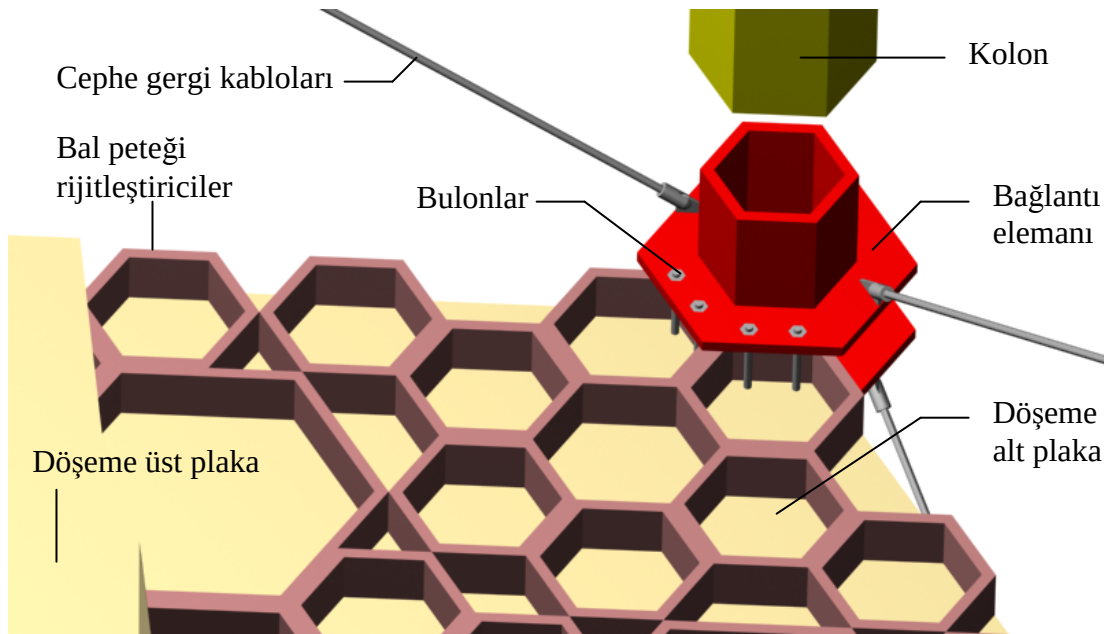


Şekil 5.6.b. Döşeme kalıp planı örnek 2.



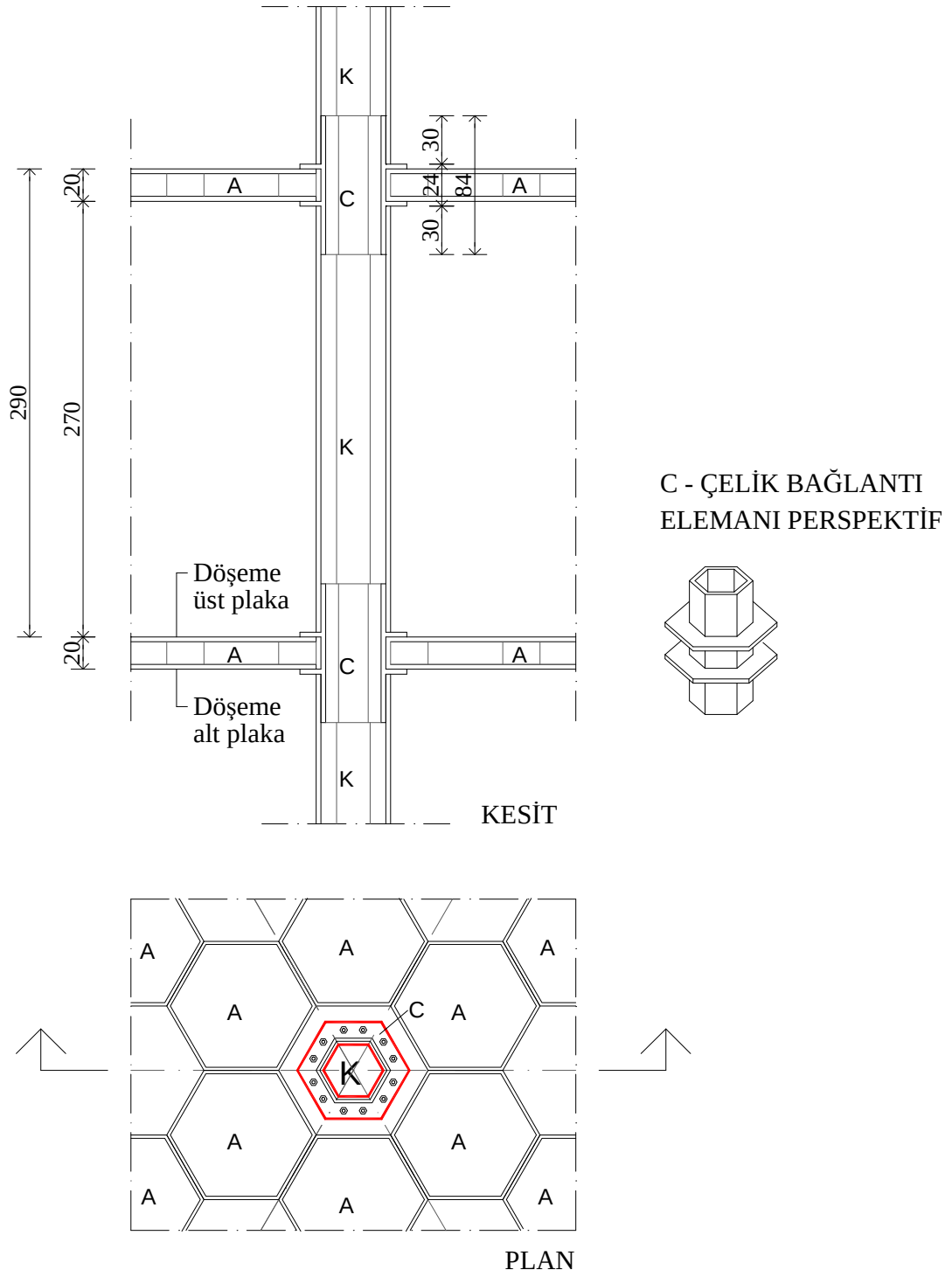
Şekil 5.6.c. Döşeme kalıp planı örnek 3.

Sistemde yatay yükler altında kesme gerilmelerini ve dönme momentlerini en fazla alacak olan kolon-döşeme birleşimlerinde, hem döşeme-kolon arasında hem de kat hizalarında kolonlar arasında birleştirme görevi görecek, bu sistem için tasarlanmış çelik özel bağlantı parçaları kullanılması düşünülmektedir. Bu parçaların düşeyde kolonların iç boşluğu kadar dış ölçülere sahip olması ve alt ve üst kolonun arasına geçerek hızlı ve pratik bir bağlantı şekli sağlaması öngörülmektedir. Bu şekilde birleşim yerlerinde maksimum düzeyde rijitlik sağlayarak temelden çatıya kadar tüm kolon sisteminin bir bütün olarak davranmasını temin etmesi umulmaktadır. Kolon birleşim noktalarının zayıflığını ortadan kaldıracak bu parçalar aynı zamanda etraflarındaki çift katlı altıgen yapraklar ile döşemeleri alt ve üstten kavrayarak bulonlu bağlantıya imkan vermekte ve aynı zamanda kolon-döşeme birleşim işlevini de üstlenmektedirler. Yüksek katlı yapılarda uygulanması düşünülen cephe gergi elemanları da bu parçaların yüzeyine monte edilmekte ve öngerilim verilerek yatay rijitlik daha da iyileştirilebilmektedir. Bağlantının direkt olarak çelik parçaya yapılması ile, kablo kuvvetlerinin CTP’de delaminasyon oluşturması engellenmektedir. Strüktürü oluşturan döşeme, kolon, döşeme-kolon birleşim elemanı ve cephe gergileri şematik olarak Şekil 5.8’de verilmektedir. Kolon-döşeme birleşimini içeren ayrıntılı sistem kesiti Şekil 5.9’da, perspektifi ise Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



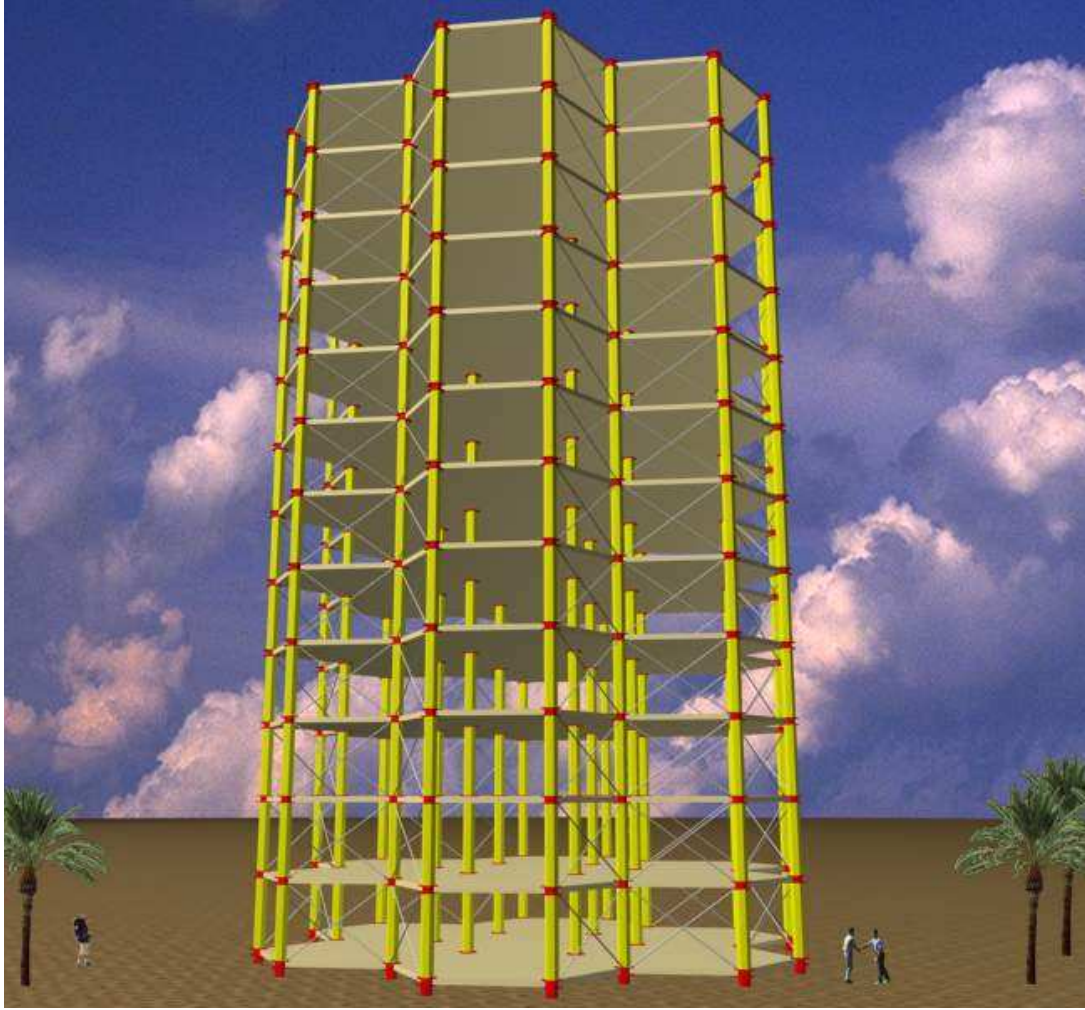
Şekil 5.7. CTP strüktür kolon-döşeme birleşim detayı.





Şekil 5.9. CTP strüktür sistem detayı.

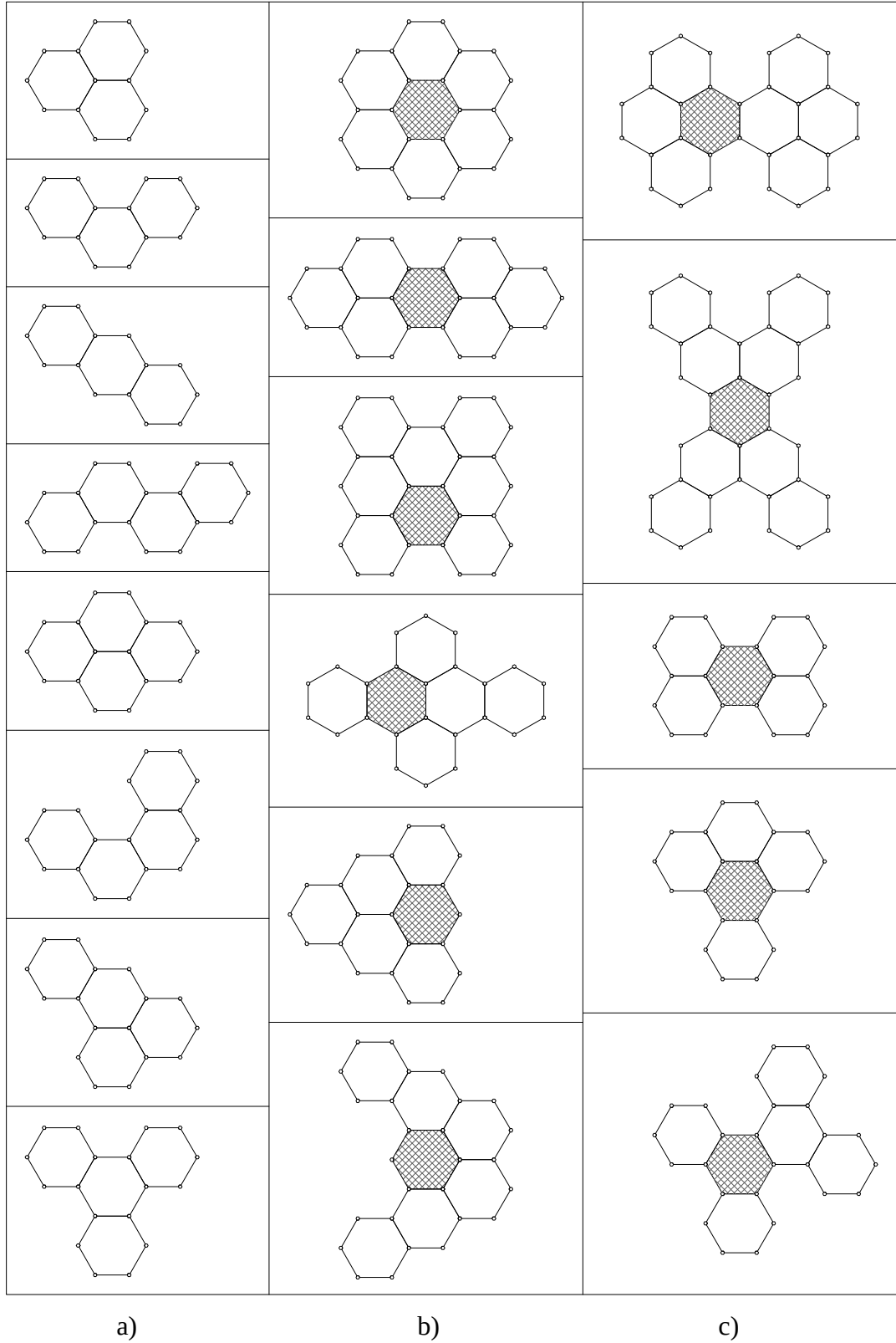
Ana taşıyıcı sistem elemanlarını kullanarak CTP malzeme ile inşa edilecek çok katlı bir yapının 3-boyutlu mimari ifadesi Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Çok katlı CTP strüktür yapı modeli.

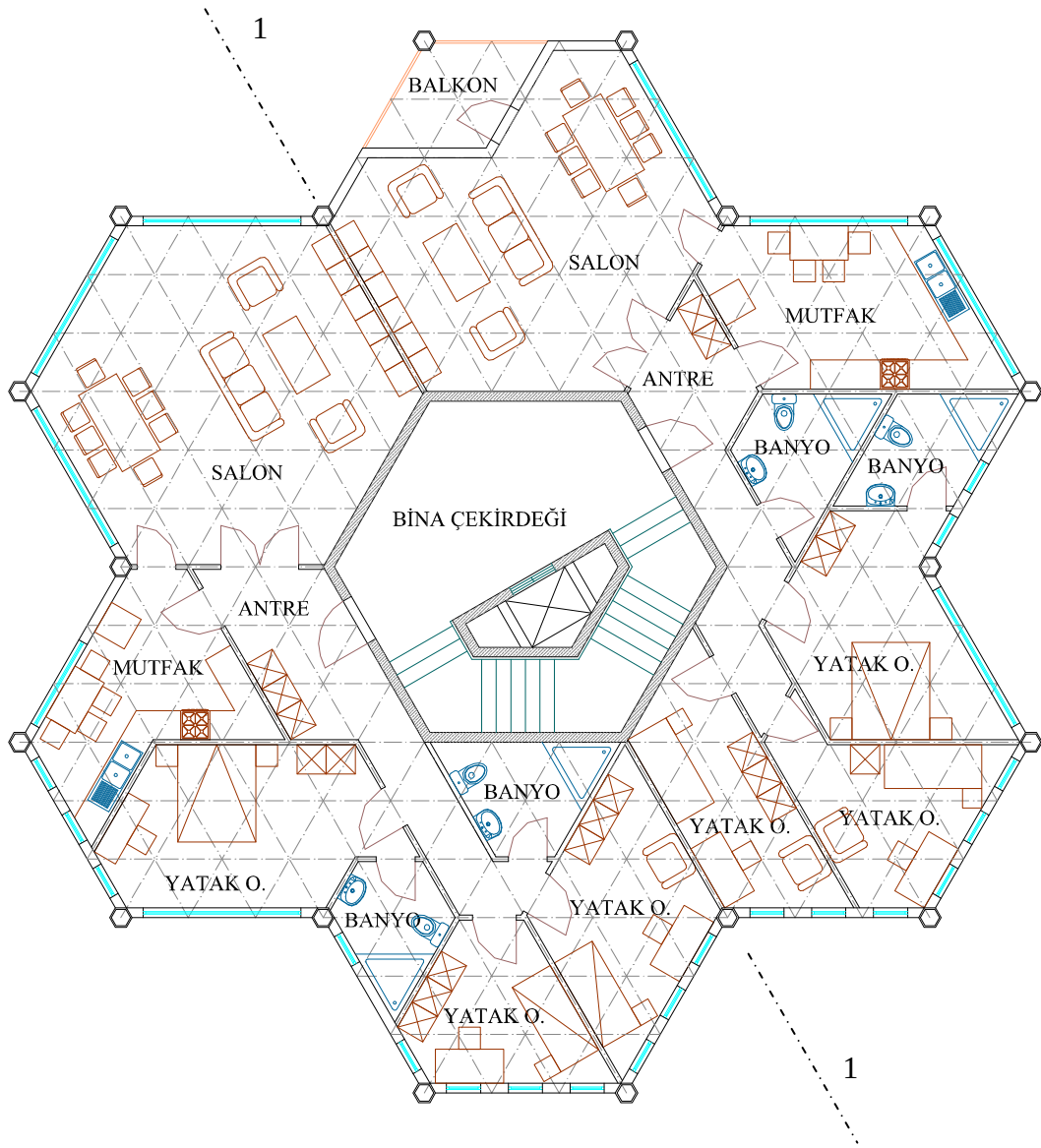
## Esnek Mimari Plan Tiplerinin Geliştirilmesi

Boyut ve strüktürü tasarlanan  $45\text{m}^2$ 'lik eşkenar altıgen modül ile oluşturulabilecek bina formları az katlı (1-3) ve çok katlı (4 ve üzeri) olarak iki kategoride ele alınmaktadır. Az katlı binalarda strüktürün tamamen CTP ile oluşturulması düşünülmektedir. Çok katlı yapılarda kullanılacak cephe gergilerinin yanı sıra düşey sirkülasyonu sağlayan ve binayı temelden çatıya kadar kat eden bina çekirdeğinin betonarme ile inşa edilerek bina yatay rijitliğinin artırılması öngörülmektedir. Altıgen form ile üretilebilecek bina tipi örnekleri bir kısmı Şekil 5.11'de şematik olarak gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, altıgen form tasarımcıya arsa şekli, kullanıcı ihtiyacı ve estetik kaygıları gibi ihtiyaçları karşılayabilecek çok sayıda yapı planlama alternatifi sunmaktadır.



Şekil 5.11. Altıgen form ile oluşturulabilen bina tipi örnekleri. a) Az katlı konut planları, b) Çok katlı konut planları, c) İhtiyaca göre bir kısmı az, bir kısmı da çok katlı kullanılabilecek konut planları. (Taralı modüller betonarme çekirdeği ifade etmektedir)

Tasarlanan CTP strüktür ile oluşturulan tipik bir çok katlı sistem için iki ayrı mimari plan alternatifi Şekil 5.12.'de gösterilmektedir. Konutlar 4 odalı (3 oda+1 salon) olarak tasarlanmıştır. Her katta iki dairenin bulunduğu bu alternatifte daireler 1-1 aksına göre simetrik ve aynı büyüklüğe sahip olmalarına karşın, farklı iç mekan çözümlerine sahiptirler. Ayrıca modüler sistemin gereği olarak mimari planlamanın üçgen aks sistemine göre düzenlendiği ve yapılacak değişikliklerin de benzer bir planlama bakış açısını gerektirdiği vurgulanmaktadır.



Şekil 5.12. CTP strüktür ile inşa edilecek çok katlı konut mimari plan alternatifi.

Tablo 5.1. DİE 2000 genel nüfus sayımına göre “Hane halkı büyüklüğü ve konutun oda sayısına göre hane halkı sayısı”

| Hanehalkı<br>Büyüklüğü | Toplam<br>Hanehalkı<br>Sayısı | Oda Sayısı     |                  |                  |                  |                  |                |               |               |               |
|------------------------|-------------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
|                        |                               | 1              | 2                | 3                | 4                | 5                | 6              | 7             | 8+            | Bilinmeyen    |
| 1                      | 803 120                       | 50 902         | 154 331          | 321 539          | 235 957          | 29 636           | 5 819          | 1 535         | 1 989         | 1 412         |
| 2                      | 2 097 823                     | 39 581         | 255 087          | 849 054          | 803 106          | 114 879          | 22 040         | 5 532         | 6 433         | 2 111         |
| 3                      | 2 578 281                     | 32 431         | 228 122          | 1 032 422        | 1 102 286        | 144 112          | 24 646         | 6 184         | 5 980         | 2 098         |
| 4                      | 3 534 911                     | 38 272         | 290 491          | 1 346 048        | 1 572 067        | 227 457          | 38 828         | 9 617         | 9 092         | 3 039         |
| 5                      | 2 302 818                     | 26 956         | 196 484          | 854 026          | 972 079          | 193 301          | 37 900         | 9 709         | 9 688         | 2 675         |
| 6                      | 1 387 646                     | 18 430         | 121 097          | 482 707          | 564 435          | 142 437          | 36 430         | 9 278         | 10 474        | 2 358         |
| 7                      | 1 023 323                     | 16 745         | 85 452           | 325 706          | 404 013          | 131 261          | 35 245         | 10 132        | 11 254        | 3 515         |
| 8                      | 420 934                       | 6 138          | 40 496           | 139 120          | 155 998          | 52 093           | 15 331         | 4 611         | 6 266         | 881           |
| 9                      | 272 365                       | 4 188          | 26 057           | 86 433           | 97 356           | 36 998           | 11 809         | 3 555         | 5 298         | 671           |
| 10+                    | 648 872                       | 8 439          | 46 113           | 170 815          | 219 112          | 107 567          | 46 169         | 17 305        | 30 697        | 2 655         |
| <b>Toplam</b>          | <b>15 070 093</b>             | <b>242 082</b> | <b>1 443 730</b> | <b>5 607 870</b> | <b>6 126 409</b> | <b>1 179 741</b> | <b>274 217</b> | <b>77 458</b> | <b>97 171</b> | <b>21 415</b> |

## 6. TAŞIYICI SİSTEM ANALİZLERİ

### Sonlu Elemanlar Yöntemi

CTP strüktürün statik yükler altındaki davranışları LUSAS sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmektedir. LUSAS (London University Stress Analysis Systems), Londra Üniversitesi'nde ilk olarak akademik amaçlar için hazırlanmış, zaman içerisinde, genel maksatlara uygun ticari bir standart sonlu elemanlar programı olarak geliştirilmiştir [LUSAS, 2003]. Program, doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizleri yapabilen ve akademik çalışmalara zemin sağlayabilen, hassas bir algoritmaya sahip, gelişmiş bir yazılımdır. Bu nitelikleri sebebiyle tez çalışmasında kullanılması tercih sebebi olmuştur. Çalışmalarda WINDOWS işletim sistemi tabanlı LUSAS 13.5 akademik versiyonu kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda izlenen genel mantık, analizi yapılacak modeli daha küçük alt elemanlara ayırarak çözümü bunlarda yapmak ve bu alt elemanlardan da bütüne giderek modelin tamamının analizini gerçekleştirmektir. Bu sayede, geometrisi düzlemsel olmayan ve kompleks geometrisi olan cisimler için ideal bir çözüm yöntemi oluşturmaktadır. Yazılımın kütüphanesinde farklı serbestlik derecelerine sahip çubuk, yüzey ve 3-boyutlu katı sonlu elemanlar mevcuttur. Bu elemanlar, komşu diğer elemanlarla düğüm noktalarından bağlanmakta ve cisim bir ağ görüntüsü oluşturulmaktadır. Bunun dışında, cismin sınır koşulları, malzeme özellikleri ve dış yükler, her elemana ayrı ayrı atanabilmektedir. LUSAS algoritması doğrusal veya doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özelliklerini göz önüne almaya yönelik olarak, enerji yöntemlerinden 'virtüel iş yöntemi' prensiplerini temel alarak çözümleme yapmaktadır.

LUSAS algoritmasında statik analizlerde virtüel iş teoremi kullanılarak iç ve dış işlerin dengesi Denklem 6.1 ile ifade edilmektedir. Elemana uygulanan dış kuvvetler ' $t$ ', yüzey kuvvetleri, ' $f$ ', cisim kuvvetleri ve ' $F$ ', tekil kuvvetler olarak sınıflanmaktadır. Denklem 6.1'de ' $u$ ' dış kuvvetlerin etkisi ile oluşan yer

değiştirmeleri temsil etmektedir. Dış etkiler sonucunda elemanda oluşan iç gerilmeler ‘ $\sigma$ ’ ve birim deformasyonlar ‘ $\varepsilon$ ’, sistemde denge koşulunu sağlayan iç işi tanımlamaktadır.

$$\int_v \delta \varepsilon^T \sigma dv = \int_v \delta u^T f dv + \int_s \delta u^T t ds + \sum du^T F \quad (6.1)$$

Elemanı oluşturan sonlu elemanların düğüm noktalarında oluşan deformasyonların bilinmesi halinde, sonlu elemanın herhangi bir noktasında meydana gelen deformasyonlar, Denklem 6.2’de verilen ‘ $u$ ’ şekil fonksiyonlarının yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$u = N a \quad (6.2)$$

LUSAS yazılımında düğüm noktası deplasmanlarına bağılı olarak iç işlerin hesabında kullanılan birim deformasyon ‘ $\varepsilon$ ’ Denklem 6.3 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = B a \quad (6.3)$$

Burada ‘ $B$ ’ değişkeni birim uzama-deplasman fonksiyonunu ifade etmektedir.

Eleman içindeki gerilmeler ‘ $\sigma$ ’ birim deformasyonların ‘ $\varepsilon$ ’ bir fonksiyonu olarak malzemenin elastisite modülüne ‘ $E$ ’ bağılı olarak Denklem 6.4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (6.4)$$

Denklem 6.4’te ‘ $\sigma_0$ ’ ve ‘ $\varepsilon_0$ ’, eğer olması halinde, yükleme öncesi mevcut gerilmeleri ve birim uzamaları göstermektedir. Örneğin, bu aşamada termal etkilerden dolayı oluşan gerilme ve birim uzamalar virtüel iş denge denkleminde değerlendirilmektedir.

Denklem 6.2, 6.3 ve 6.4'ün Denklem 6.1'de yerin yerleştirilmesi ile 'n' sonlu eleman için virtüel iş denklemi, Denklem 6.5'te verilen ifade ile tekrar tanımlanmaktadır.

$$\sum^n \delta a^T \int_v B^T E B \, dv \, a = \delta a^T \left[ \sum_v^n \int N^T f \, dv + \sum_s^n \int N_s^T t \, ds - \sum_v^n \int B^T (\sigma_0 - E \varepsilon_0) \, dv + F \right] \quad (6.5)$$

Denklem 6.5'te eşitliğin iki yanındaki ' $\delta a^T$ ' terimleri sadeleşerek, ' $a$ ' düğüm noktası deplasmanları dışında eşitliğin sol ve sağındaki ifadeler sırasıyla ' $K$ ' ve ' $R$ ' değişkenleri ile ifade edildikleri taktirde Denklem 6.6 elde edilmektedir.

$$[K]a = \{R\} \quad (6.6)$$

Burada ' $K$ ', rijitlik matrisini (Denklem 6.7), ' $R$ ' ise kuvvet vektörünü (Denklem 6.8) temsil etmektedir.

$$K = \sum_v^n \int B^T E B \, dv \quad (6.7)$$

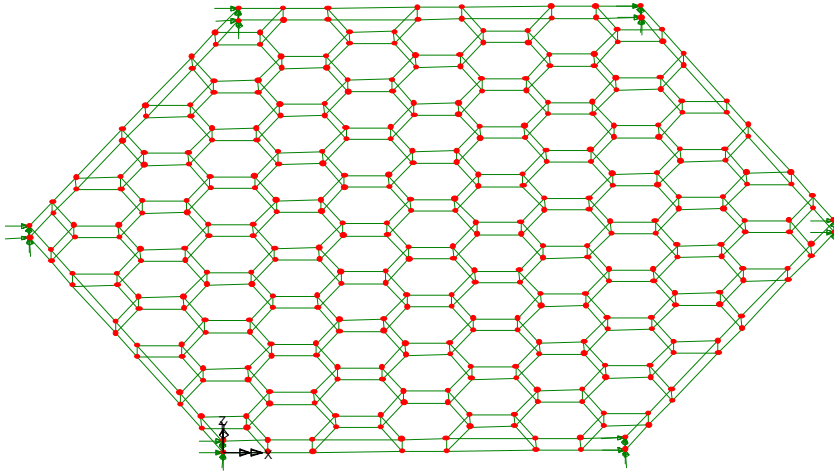
$$R = \sum_v^n \int N^T f \, dv + \sum_s^n \int N_s^T t \, ds - \sum_v^n \int B^T (\sigma_0 - E \varepsilon_0) \, dv + F \quad (6.8)$$

Sayısal çözümleme Denklem 6.6'da yer alan düğüm noktası deplasmanlarının ilk çözüm adımında tahmin edilmesi ve Denklem 6.7 ve 6.8'de verilen rijitlik matrisi ve dış kuvvet vektörünün hesaplanarak yeni düğüm noktası deplasmanlarının elde edilmesini içermektedir. İteratif çözümlemenin neticesinde birbirini takip eden iki iterasyon arasında deplasman vektörü farklarının belli bir tolerans değerinden az olması halinde, çözümleme prosedürü tamamlanmakta ve son elde edilen düğüm noktası deplasmanları sistemin gerçek deplasmanları olarak belirlenmektedir.

## Modelin Oluşturulması

Tezin kapsamında tasarlanan CTP strüktüre ait altıgen döşeme modülü sonlu elemanlar yazılımı olan LUSAS v13.5'te modellenerek düşey yükler altında doğrusal statik analizleri yapılmaktadır. Bu yöntemle konut olarak kullanımı durumunda hem döşeme hem de kiriş fonksiyonu gören döşeme plağında oluşacak deplasman ve gerilmelerin tahmini amaçlanmaktadır. Modelleme ve analizde kullanılmak üzere kuvvet için Newton (N), kütle için kilogram (kg), uzunluk için metre (m) birimleri kullanılmaktadır.

Modelin oluşturulması aşamasında ilk olarak Şekil 5.6.a'da ölçüleri verilen döşeme plağı kullanılmaktadır. Döşemeyi oluşturan tüm elemanlar (Alt, üstplakalar, ve ara rijitleştiriciler) yüzey elemanlar olarak modellenmektedir (Bkz. Şekil 6.1). Rijitleştirici bölüntüleri ile plakalar arasındaki bölüntü koordinasyonunu sağlayacak biçimde yüzey elemanlar koordinat sisteminde x yönünde 4, y yönünde 2 eşit parçaya bölünmektedir. Yüzey elemanların geometrik kalınlıkları, alt ve üst plaka için 1cm, ara plakalar için 0.5cm kabul edilerek analizlere başlanmaktadır. Elemanlara ait bir eksentrisitenin oluşmadığı öngörülmektedir.



Şekil 6.1. Yüzey elemanlar ile oluşturulan sonlu elemanlar döşeme modeli.

Oluşturulan yüzey elemanlara tanımlanan malzeme özellikleri için deney bulgularından ve literatür araştırmasında belirlenen CTP özelliklerinden yararlanılmaktadır. Literatürde (Turvey, 1997; Sarıbıyık, 2001; Abdalla, 2002;

Hashem, 2000; Keller, 2003) E tipi sürekli cam elyaf ve polyester bağlayıcı kullanılarak, profil çekme yöntemi ile üretilmekte olan yapısal CTP profillerin elastisite modülü 17.24GPa ile 42GPa arasında değişmektedir. Bulgulara dayanarak profil çekme yöntemi ile %70 oranında cam elyaf takviyeye sahip CTP profillerin elastisite modülü 35GPa olarak kabul edilmektedir. Yapılan deney sonuçları %3.5 çelik hasır takviyesi ile elastisite modülünde %40'lık artış elde edilebildiğini göstermektedir. Buradan yola çıkılarak 35GPa elastisite modülüne sahip CTP profilin %3.5 çelik hasır takviyesi ile elastisite modülünün %40 oranında artış göstererek 49GPa'a ulaşabileceği varsayımı yapılmaktadır. Rijitleştiricilerle alt ve üst plaka arasındaki bağlantının tam rijit olduğu kabul edilmekte, ara yüzey kontak malzeme modellemesi yapılmamaktadır. Yine aynı literatür çalışmalarda yapısal CTP profiller için Poisson's oranı olarak 0.23 ile 0.3 arasında değişen değerler verilmektedir. Bu çalışmada yeni CTP profiller için ortalama bir değer olan 0.27 Poisson's oranı kabul edilmektedir. Çalışmalarda E tipi sürekli cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin yoğunluğu ortalama olarak  $2100\text{kg/m}^3$  rapor edilmektedir. CTP profile kesit alanı olarak %3.5 oranında çelik hasır takviyesi yapılması hacmen %6.5 oranında çelik takviyesine karşılık gelmektedir. Böylece analiz edilen %3.5 çelik hasır takviyeli CTP kompozitin yoğunluğu  $2470\text{kg/m}^3$  alınmaktadır.

Altıgen döşeme plağının, tasarlanan bağlantı elemanının ideal olarak temin ettiği biçimde, köşe noktalarından tam rijit olarak mesnetlendiği kabul edilmektedir. Ayrıca yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerlerini belirleyen Türk Standardı TS498'e göre konutların bina statik hesaplarında [TSE, 1997] kullanılması öngörülen konutlar için tavsiye edilen  $2\text{kN/m}^2$  yerine, sistemin ileride mağaza veya hastane gibi kullanımlarına da imkan sağlayacak şekilde  $5\text{kN/m}^2$  düzgün yayılı yükü üst döşeme plağından yüklenmesi analizler için uygun bulunmaktadır.

## **Analiz Bulguları**

Modellemesi yapılan altıgen döşemenin doğrusal statik analiz sonuçlarına göre düşey deplasman ve normal kuvvet kontur grafikleri Şekil 6.2-6.10'da sunulmaktadır.

Grafiklerden elde edilen değerler Tablo 6.1’de toplu olarak özetlenmektedir. En olumsuz gerilme değerleri normal kuvvet kontürlerinden elde edilmektedir. Program 0° (x) ve 90° (y) doğrultuları dışında herhangi bir açıda birim genişliğe gelen normal kuvvet kontürlerini verebilmektedir. Ayrıca en büyük basınç normal kuvvetinin ‘NMin’ olduğu açısız doğrultuda ve en büyük çekme normal kuvvetinin ‘NMax’ olduğu açısız doğrultuda kontürleri birim genişliğe denk düşen değerler olarak vermektedir. Buradan faydalanılarak elde edilen en kritik basınç ve çekme gerilmeleri Tablo 6.1’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Sonlu elemanlar doğrusal analiz bulguları.

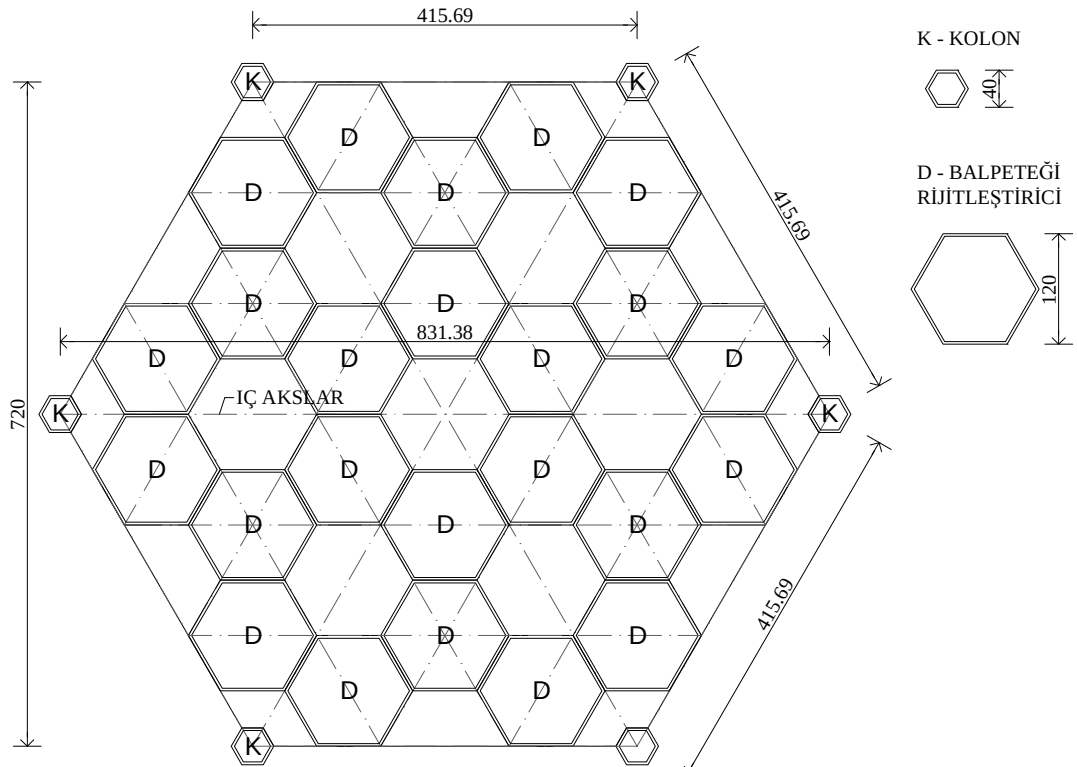
|                                    | Döşeme Üst Plaka | Bal Peteği<br>Rijitleştiriciler | Döşeme Alt Plaka |
|------------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|
| Düşey Deplasman<br>(cm)            | 0.1859           | 0.1813                          | 0.1859           |
| Maksimum Çekme<br>Gerilmesi (MPa)  | 18.04            | 19.98                           | 3.182            |
| Maksimum Basınç<br>Gerilmesi (MPa) | 3.182            | 19.98                           | 18.04            |

Maksimum deplasman sınırı olan  $L/300$  ( $L$ =döşeme açıklığı) değeri analiz edilen döşeme için  $831.38\text{cm}/300 = 2.77\text{cm}$  olarak hesaplanmaktadır. Döşemede oluşan  $0.1859\text{cm}$ ’lik maksimum düşey deplasman bu değer oldukça altında kalarak döşemenin plağının yüksek rijitlikte olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sistemin mesnet noktalarında oluşan  $18.04$  ve  $19.98\text{MPa}$  maksimum çekme ve basınç gerilmeleri, malzemenin literatürden bilinen eğilme dayanım ortalaması olan  $410\text{MPa}$  değerinin çok altında olduğu tespit edilmektedir. Üstelik, yapılan mekanik testlerde ortaya çıkan sonuca göre CTP’ye %3.5 çelik hasır takviyesi yapıldığında eğilme ve çekme gerilmelerinin sırasıyla %28.53 ve %47.66’lık mukavemet artışı göstereceği göz önüne alındığında, çelik hasır takviyeli CTP kompozitin  $525\text{MPa}$  gerilmeye dayanabileceği kabulü varsayılabilir. Bu sonuçlar, tasarım aşamasında kompozitin gerilme sınırlarını aşması halinde kullanılması öngörülen Şekil 5.6.b ve 5.6.c’de gösterilen köşelerde bal peteği rijitleştiricilerin yoğunlaştırıldığı döşeme kalıp sistemlerini kullanmayı gereksiz kılmaktadır. Aksine, bal peteği rijitleştiricilerinin daha gevşek yerleştirilmesi gerektiği açıklık kazanmaktadır.

## 6.4. Sistem Optimizasyonu

Taşıma kapasitesinin oldukça altında gerilme alan döşeme plağının tasarımında revizyon yapılması gereği Kısım 6.3'te anlatılan bulguların sonucunda ortaya çıkmaktadır. Döşeme kalıp planındaki bal peteği rijitleştiricilerin geometrisi büyütülerek bu ara elemanlarda %34 oranında malzeme kazancı sağlanmaktadır (Bkz. Şekil 6.11). Böylece strüktür hafifletilerek sisteme etki eden zati yükler azaltılmakta, nakliye ve montaj işçiliğinden de tasarruf edilerek, inşaat sektöründe önemli rol oynayan ekonomiklik faktörü iyileştirilmektedir. Revize edilen ve Şekil 6.11'de gösterilen döşeme plağı için Kısım 6.3'te ayrıntıları verilen analiz prosedürü tekrar edilmiştir. Analiz bulguları benzer sistematikte Şekil 6.12-6.20'de verilmektedir.

Grafiklerden elde edilen temel bulgular Tablo 6.2'de özetlenmektedir.



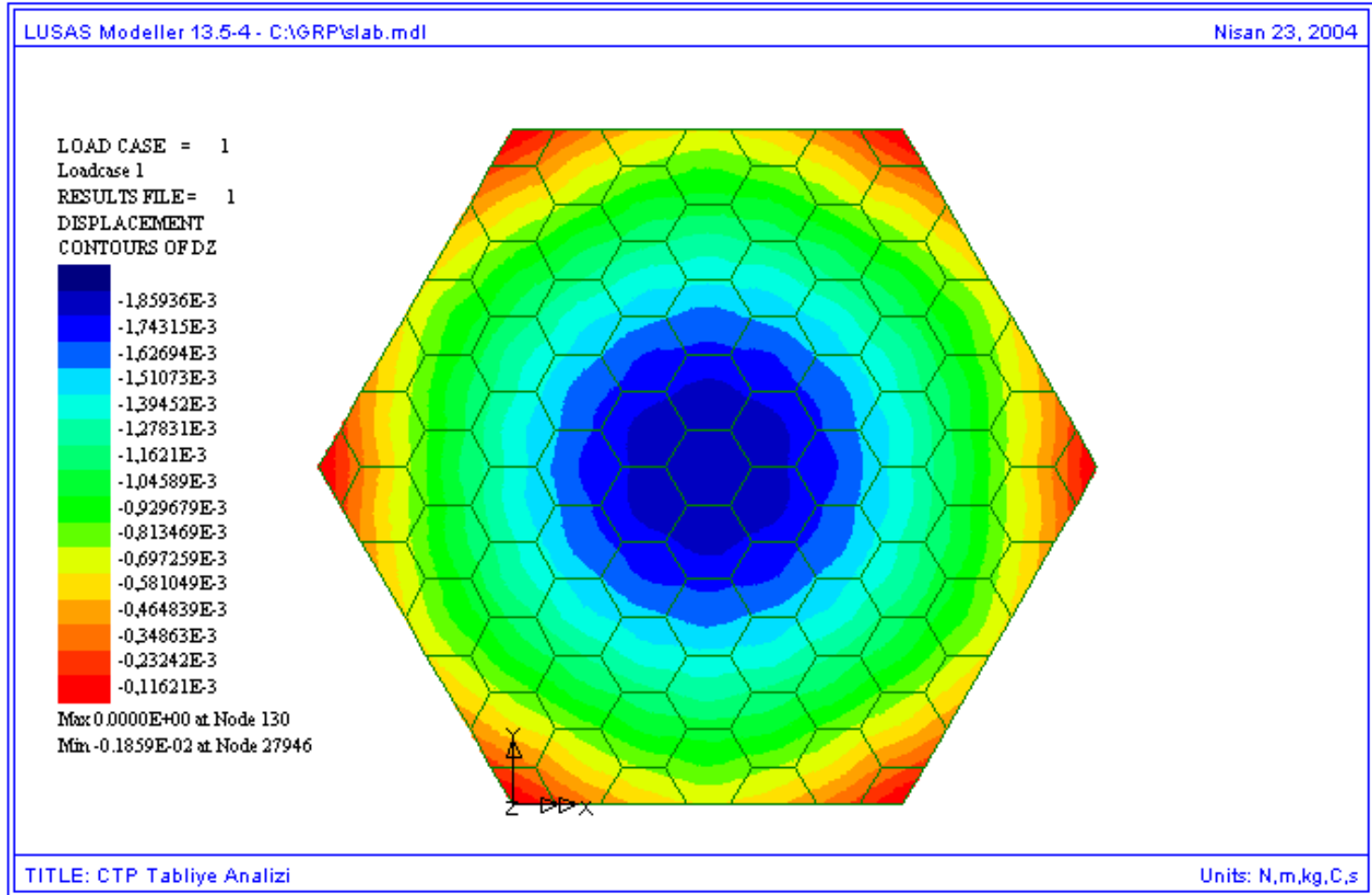
Şekil 6.11. Döşeme kalıp planı alternatif.

Tablo 6.2. Sonlu elemanlar doğrusal analiz bulguları.

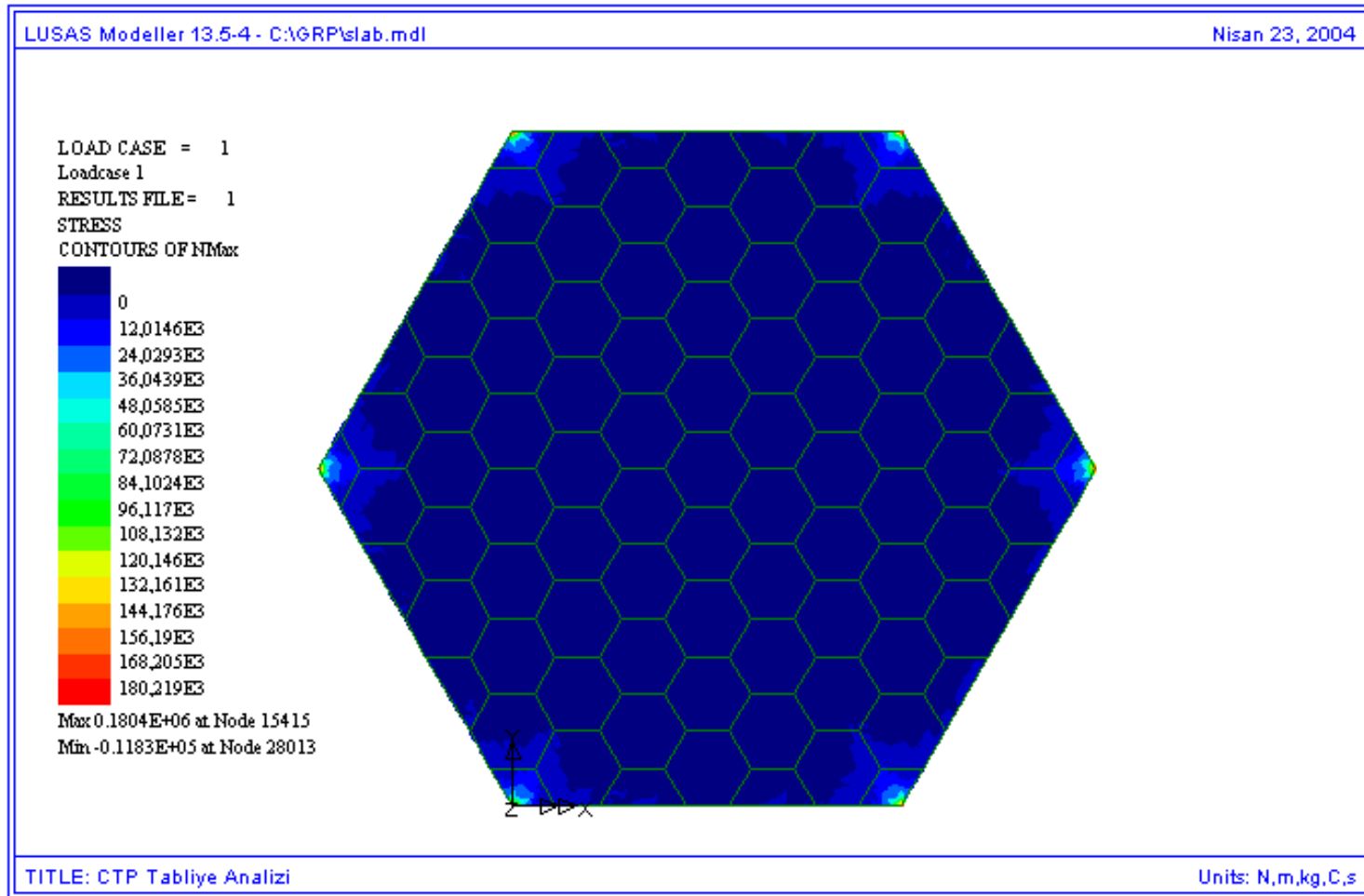
|                                    | Döşeme Üst Plaka | Bal Peteği<br>Rijitleştiriciler | Döşeme Alt Plaka |
|------------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|
| Düşey Deplasman<br>(cm)            | 3.117            | 2.6552                          | 2.729            |
| Maksimum Çekme<br>Gerilmesi (MPa)  | 285              | 93.12                           | 35.91            |
| Maksimum Basınç<br>Gerilmesi (MPa) | 47.70            | 91.47                           | 174.30           |

Revize edilen döşeme plağının düşey deplasmanı 3.117cm ile  $L/300$  değeri olan 2.77cm'i hafifçe aşıyor da Şekil 6.12 incelendiğinde bu deformasyonun bal peteği rijitleştiricilerin orta noktalarında lokal olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu noktalarda alınacak, ek malzeme takviyesi ile bu sınırın altında bir çökme değeri elde edilebilecektir. Döşeme sisteminin gerçek deformasyonu Şekil 6.19'da gösterilen alt plakada oluşan 2.729cm'lik deformasyondur. Bu değer limitin altında, limite yakın bir değer vermesi sistemin deplasmanlar açısından optimize olduğunu göstermektedir. Döşeme plağında hesaplanan gerilme değerleri ise öngörülen nihai eğilme gerilme dayanımının %54'ü düzeyinde kalmaktadır. Literatür araştırması bulgularından [Akman, 2002] 50 yıllık kullanımdan sonra CTP kompozitlerin %50 mukavemet kaybına uğradıkları önüne alındığında, bu değerlerin uzun ömürlü kullanımlarda optimal düzeylerde güvenli tarafta olduklarını doğrulamaktadır.

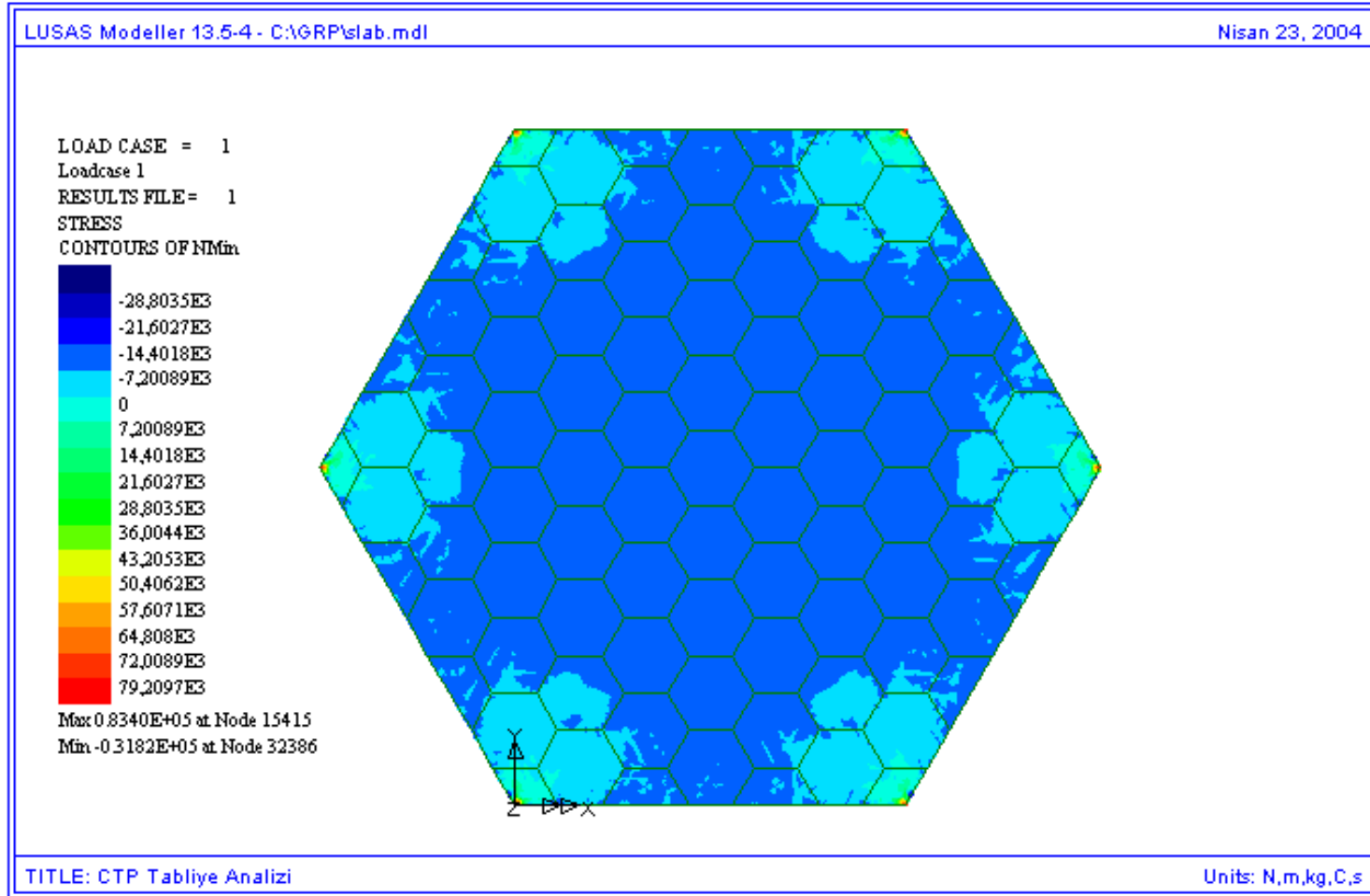
Revize edilen ve ilk öngörülen döşeme plağının strüktürel eleman analizleri değerlendirildiğinde, CTP'nin deformasyon tabanlı bir davranış sergilediğini ve dayanım açısından bir problem bulunmadığını iddia etmek mümkündür. Bu sonuç tezin ana amacı olan malzemenin elastisite modülünün iyileştirilmesi ile ilgili olduğunu açıklıkla ortaya koymaktadır. İnşaat mühendisliği yapılarında bu malzeme özelliğinin daha da artırılması ile, geometrik tasarımının yüksek atalet değerleri verecek biçimde iyileştirilmesine ve iç boşlukları fazla, hafif ve gerilme sınırları malzemenin nihai dayanımına oranla verimli strüktürel yapıların üretimi mümkün olabilecektir.



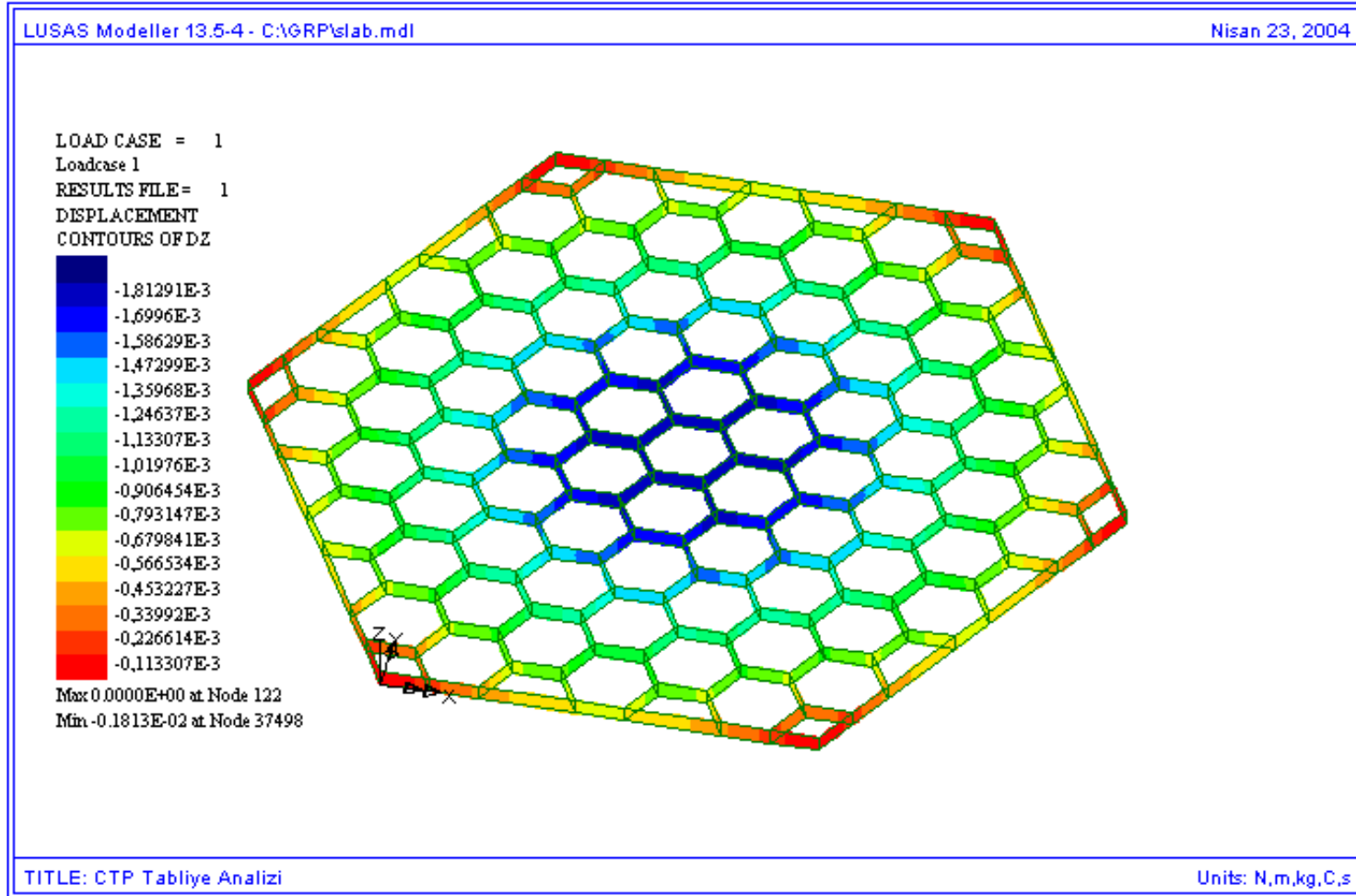
Şekil 6.2. Döşeme üst plaka düşey deplasman kontur grafiği (m).



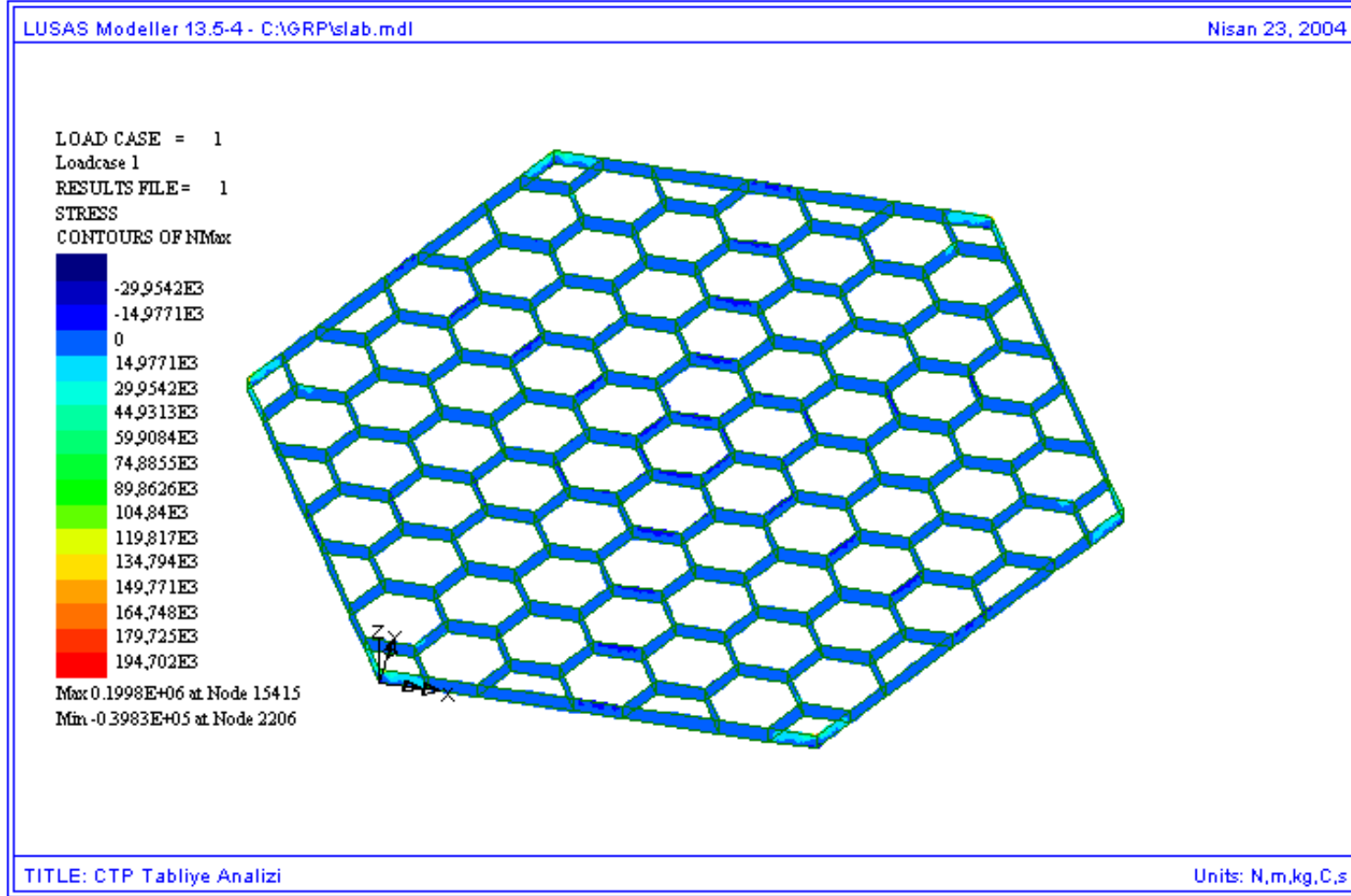
Şekil 6.3. Döşeme üst plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği (N).



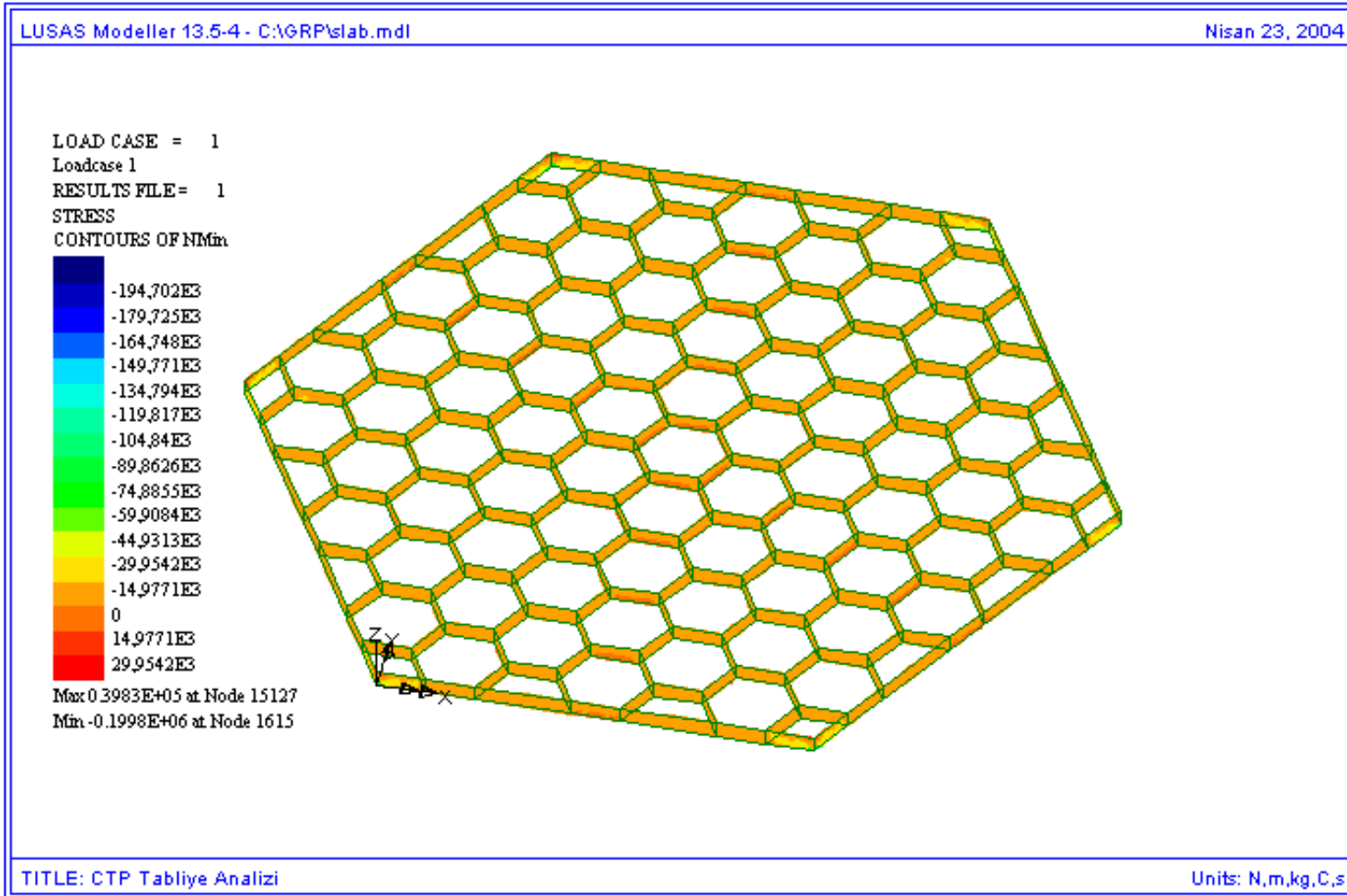
Şekil 6.4. Döşeme üst plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).



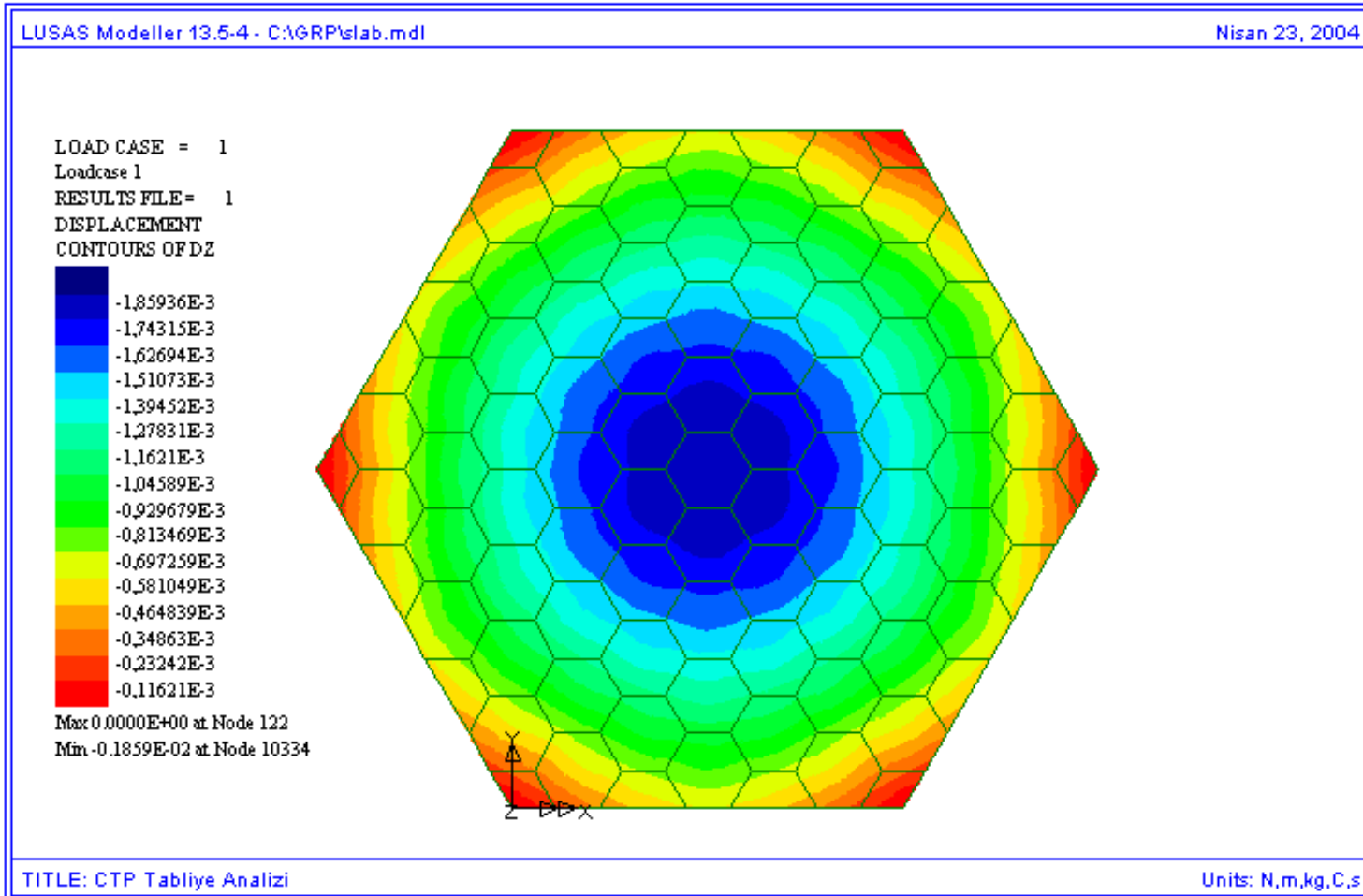
Şekil 6.5. Bal peteği rijitleştirici düşey deplasman kontur grafiği (m).



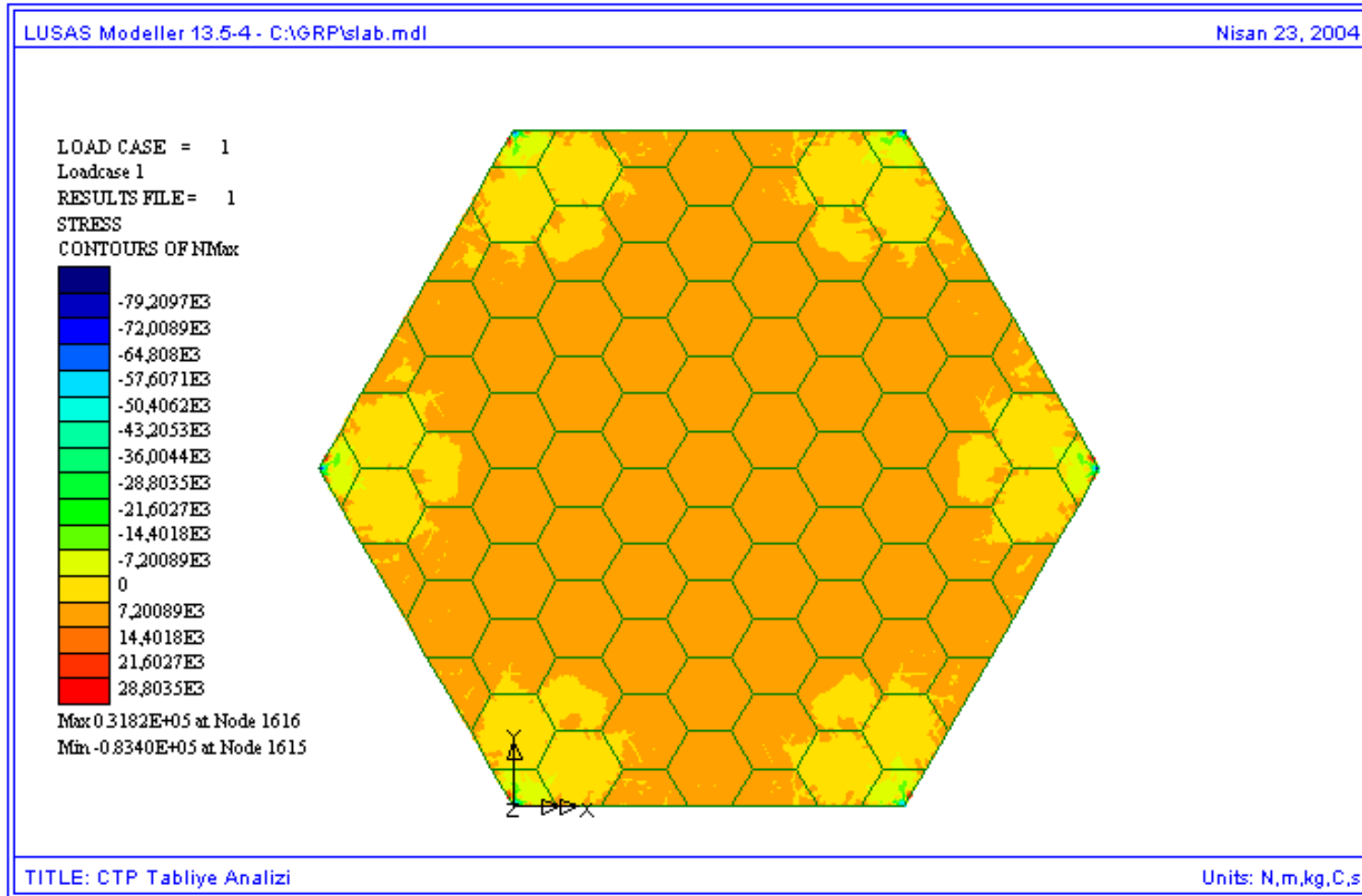
Şekil 6.6. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği (N).



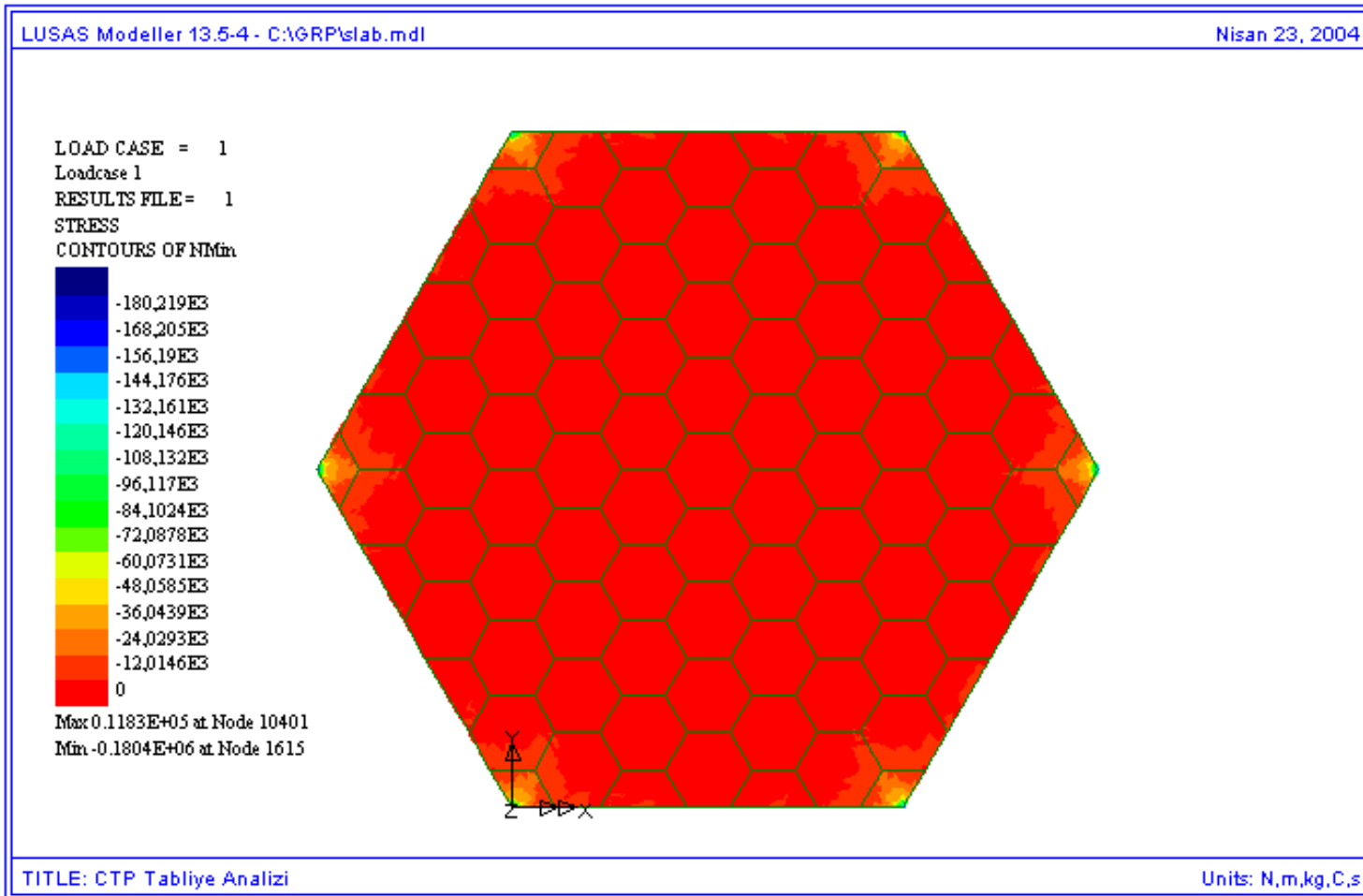
Şekil 6.7. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).



Şekil 6.8. Döşeme alt plaka düşey deplasman kontur grafiği (m).

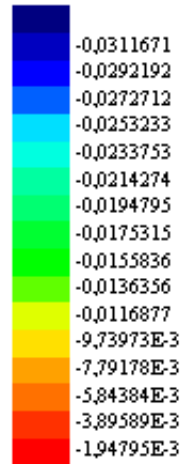


Şekil 6.9. Döşeme alt plaka maksimum normal kuvvet çekme kontur grafiği (N).

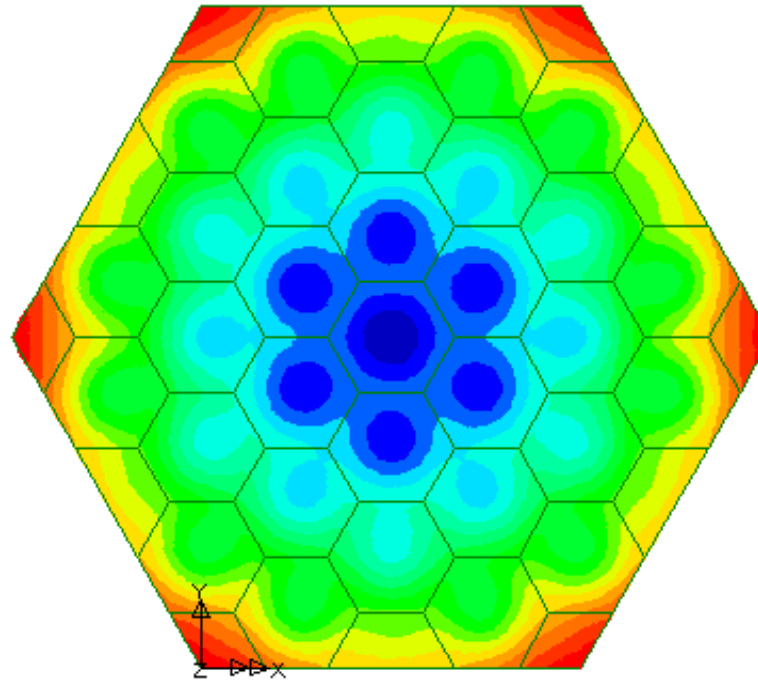


Şekil 6.10. Döşeme alt plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).

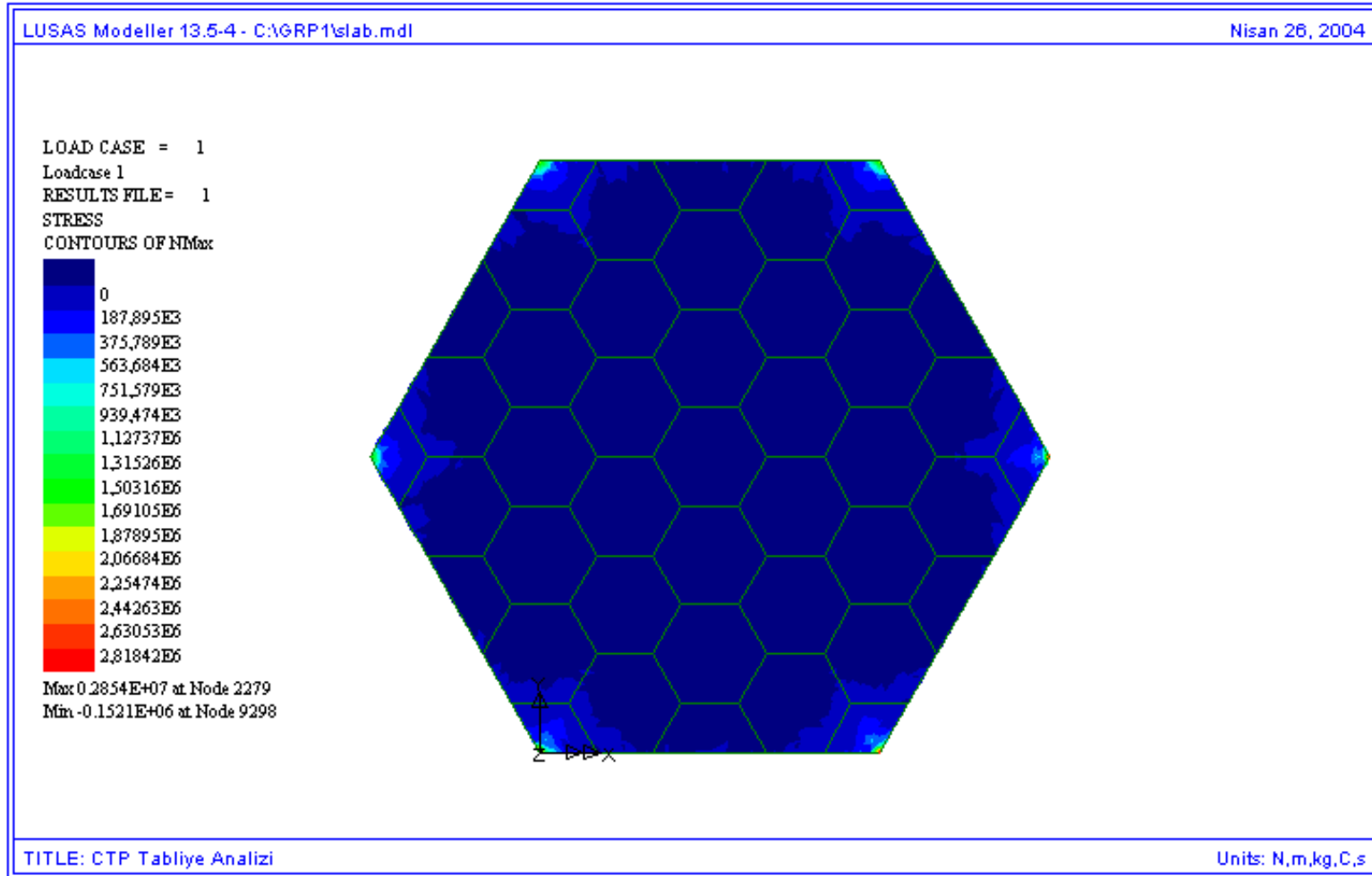
LOAD CASE = 1  
Loadcase 1  
RESULTS FILE= 1  
DISPLACEMENT  
CONTOURS OF DZ



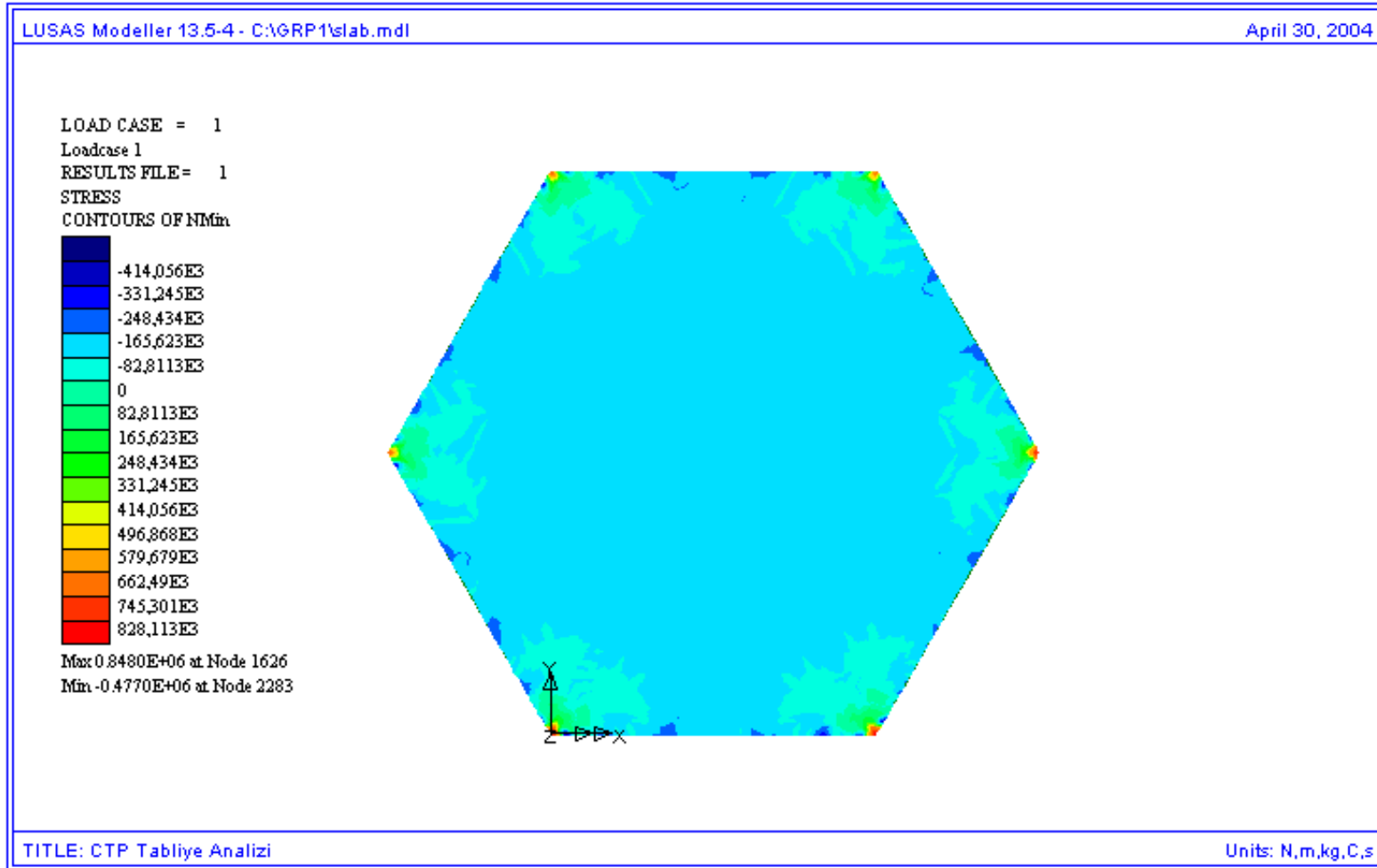
Max: 0.0000E+00 at Node 582  
Min: -0.3117E-01 at Node 9294



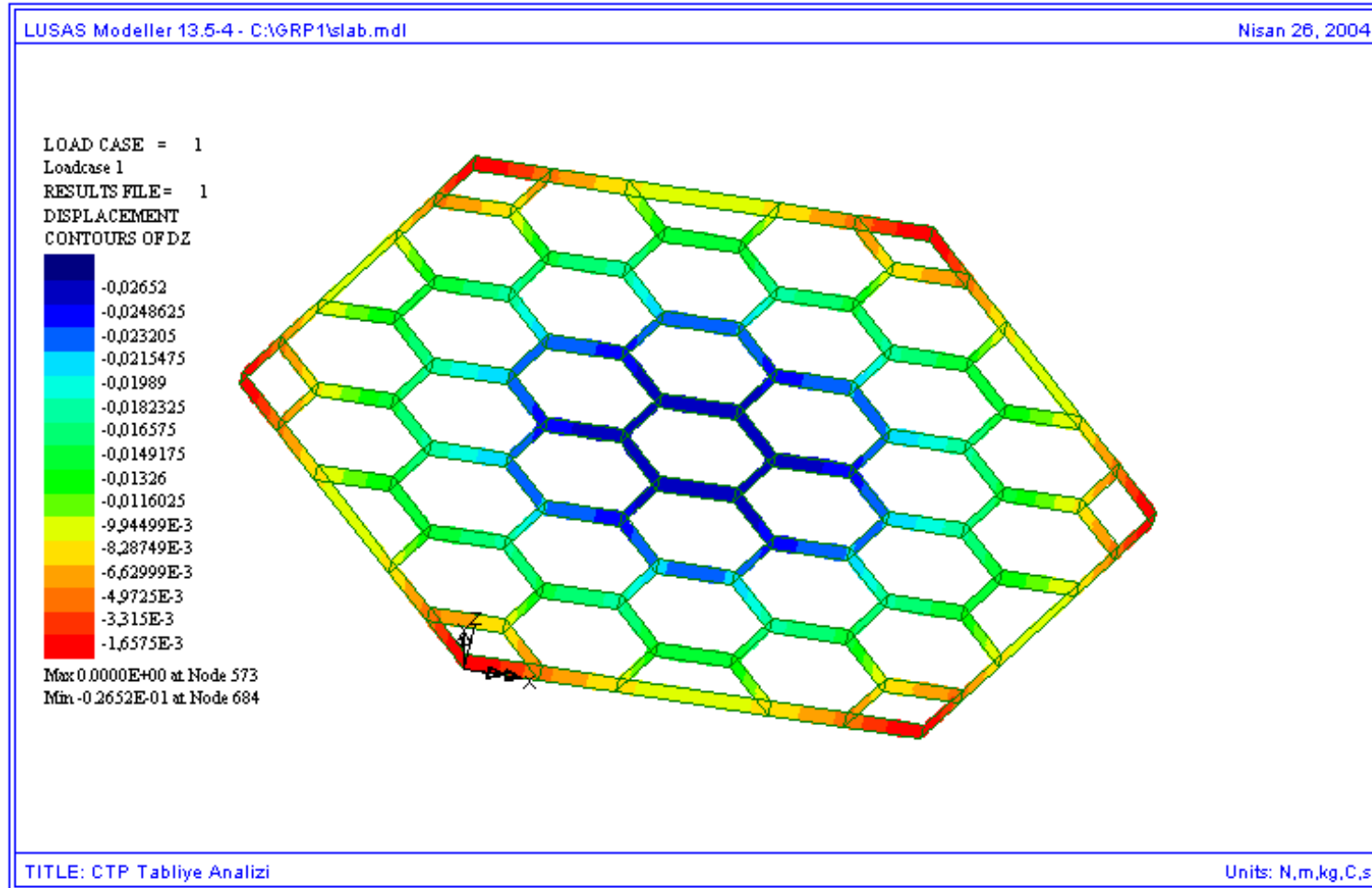
Şekil 6.12. Döşeme üst plaka düşey deplasman kontur grafiği (m).



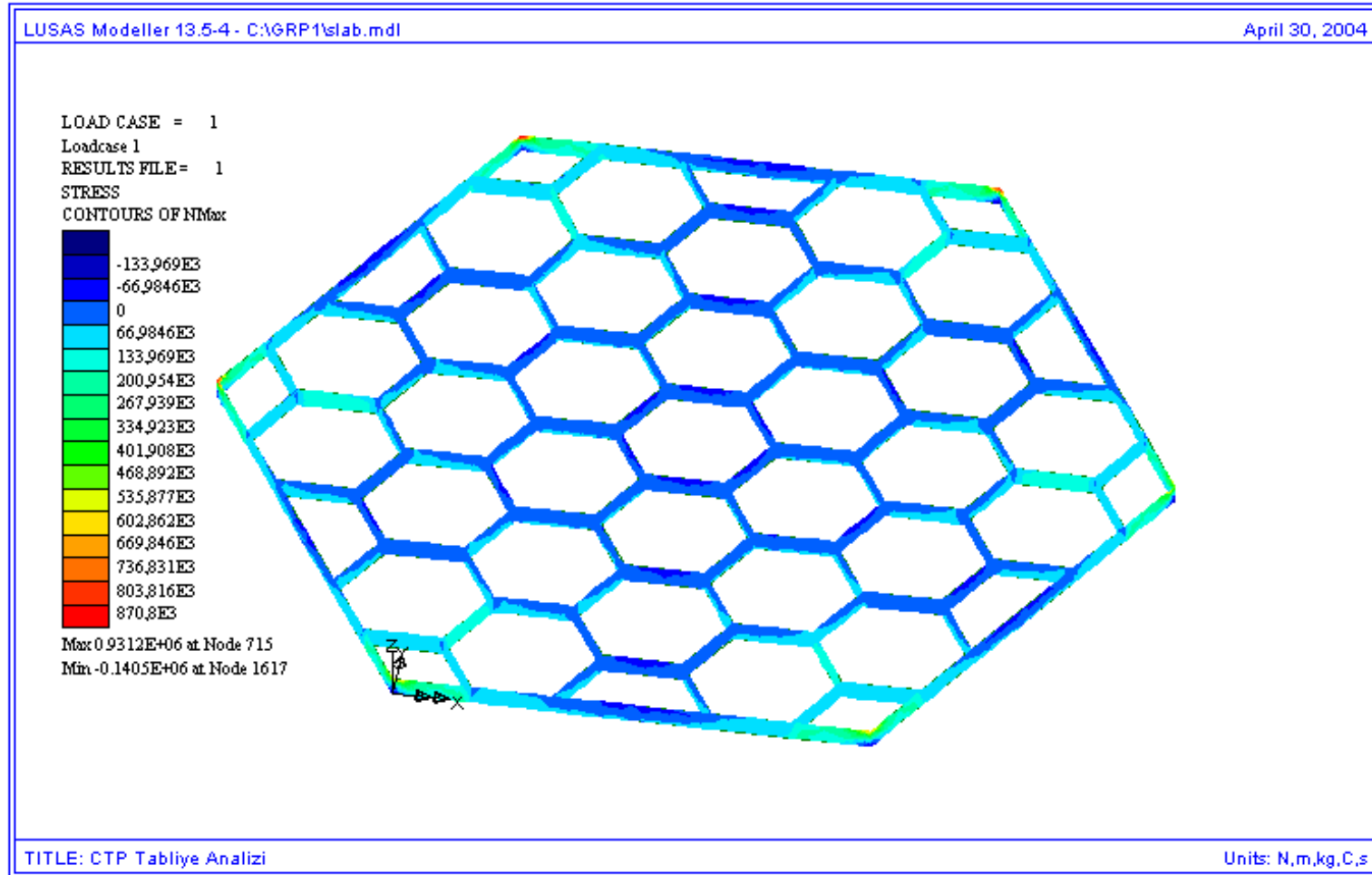
Şekil 6.13. Döşeme üst plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği (N).



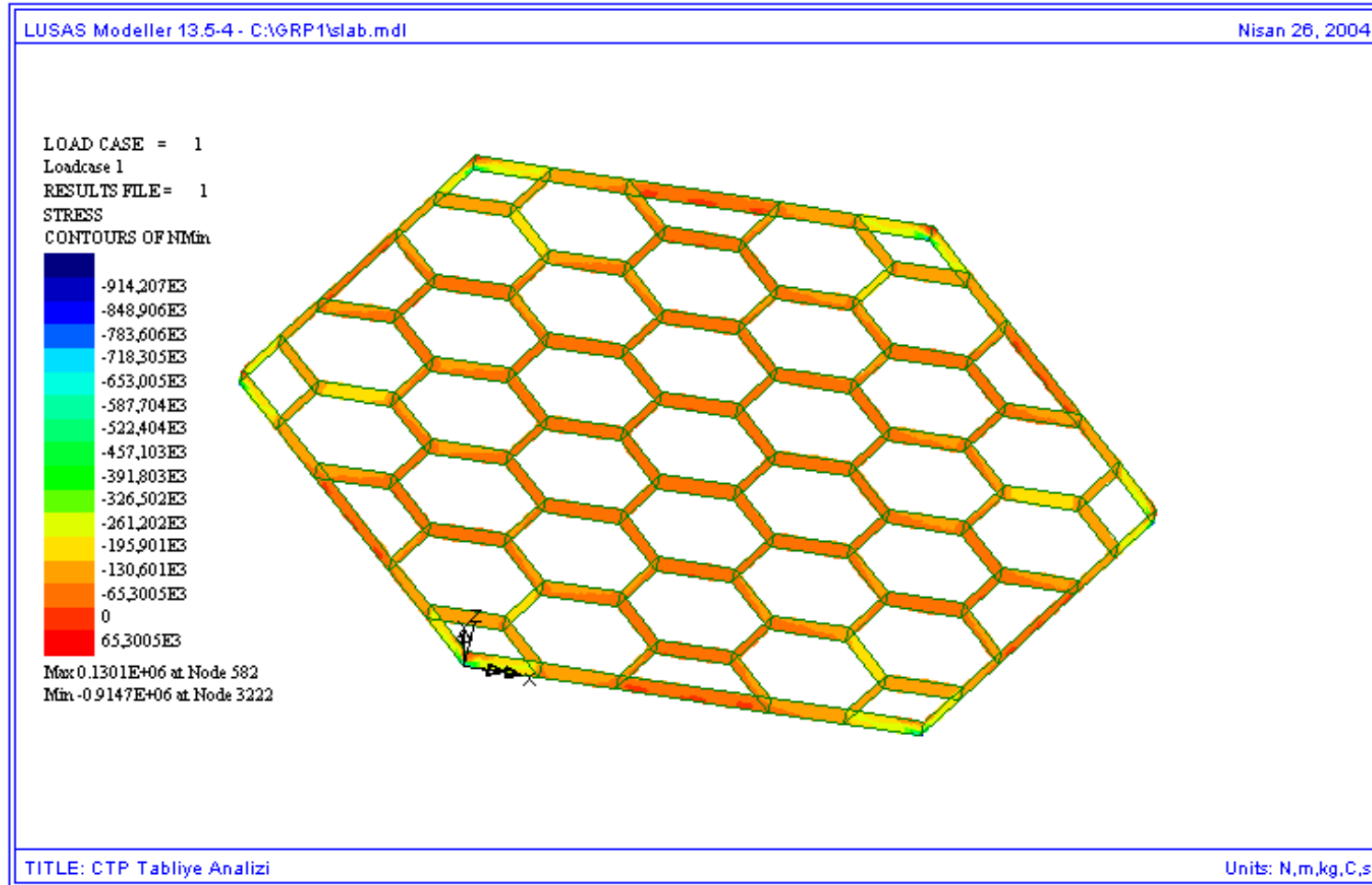
Şekil 6.14. Döşeme üst plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).



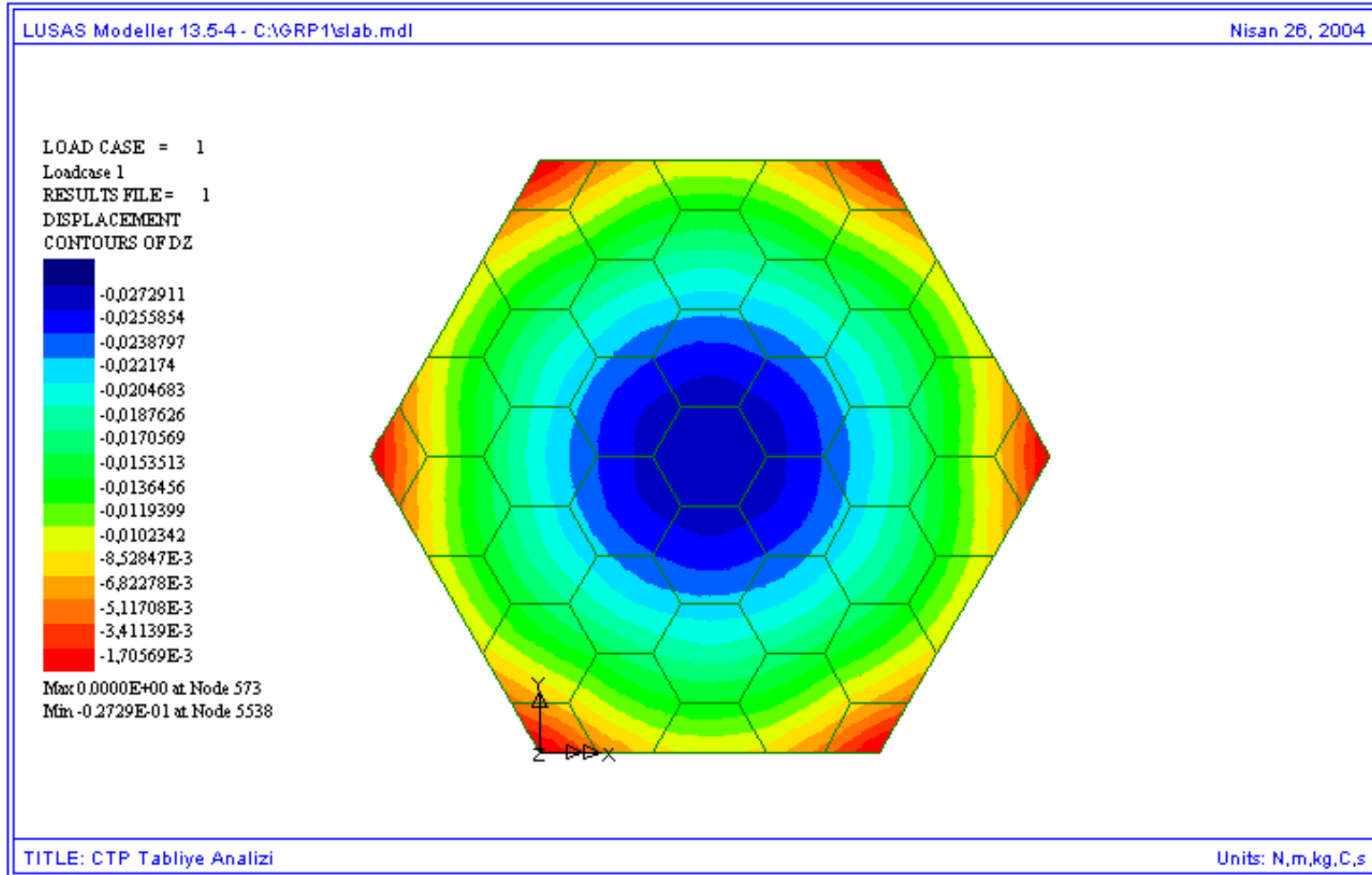
Şekil 6.15. Bal peteği rijitleştirici düşey deplasman kontur grafiği (m).



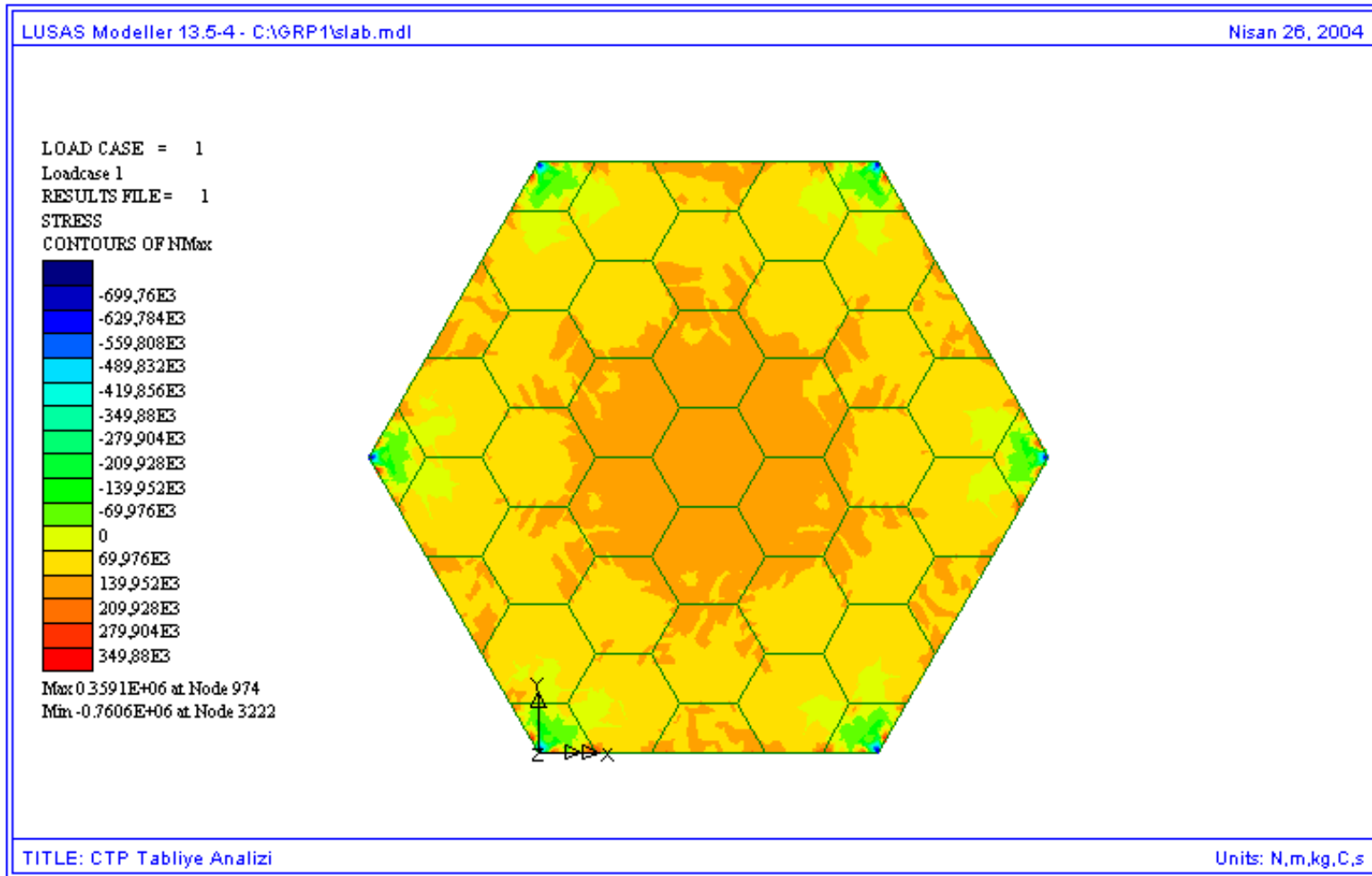
Şekil 6.16. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği (N).



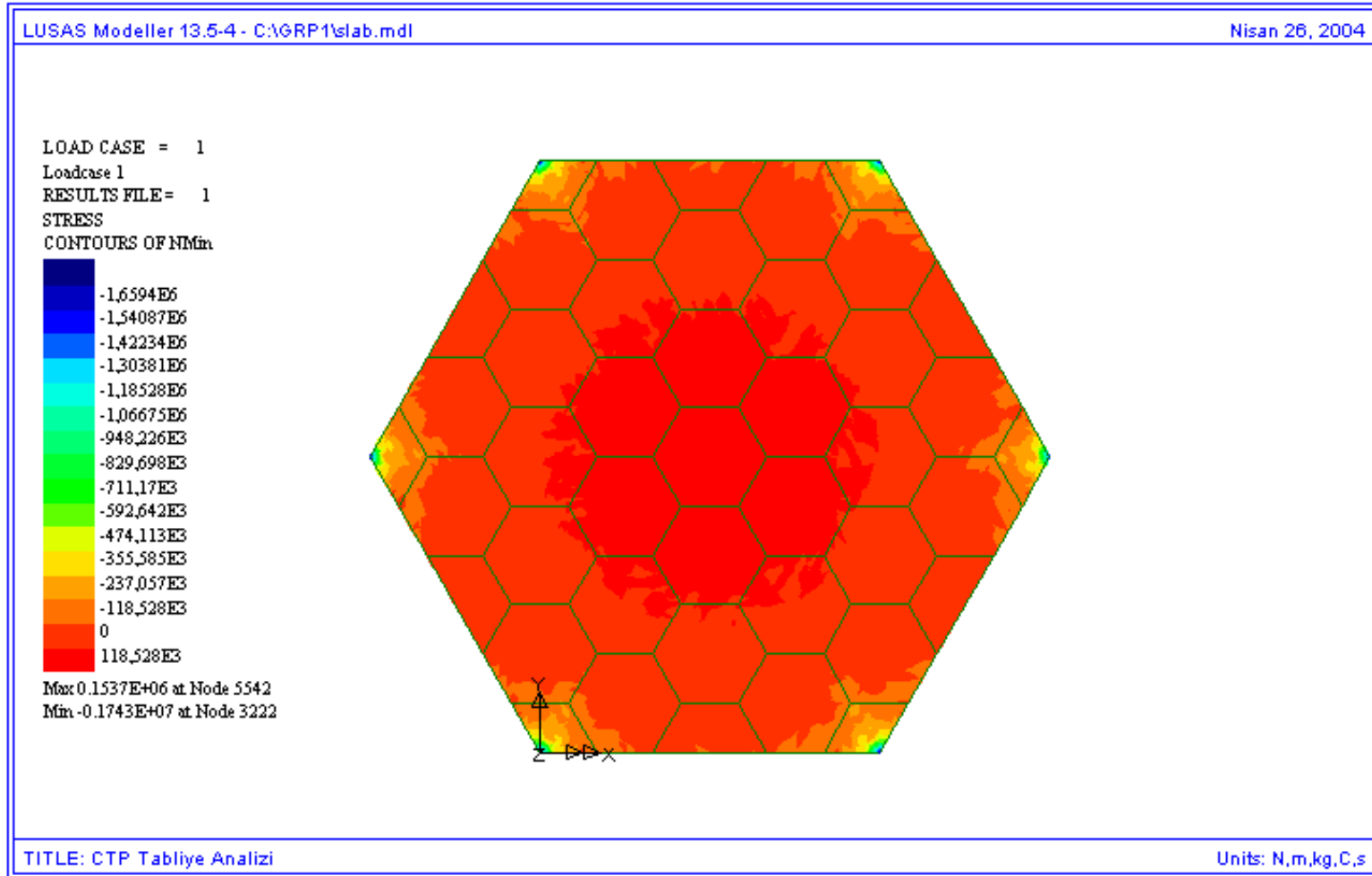
Şekil 6.17. Bal peteği rijitleştirici maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).



Şekil 6.18. Döşeme alt plaka düşey deplasman kontur grafiği (m).



Şekil 6.19. Döşeme alt plaka maksimum normal çekme kuvvet kontur grafiği (N).



Şekil 6.20. Döşeme alt plaka maksimum normal basınç kuvvet kontur grafiği (N).

## 7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

### Genel Değerlendirme

Yüksek mukavemet/ağırlık özellikleri sayesinde yapılarda kullanımı artan CTP kompozitlerin düşük elastisite modülü nedeniyle kullanım alanlarının sınırlamakta olduğu hem tezin bulgularından hem de daha önceki çalışmalardan kesinlik kazanmaktadır. Çelik hasır takviye önerisi getirilen CTP kompozitlerin deneysel bulguları hem elastisite modülü hem de mukavemet değerlerinde önemli artışlar elde edilebileceğini göstermektedir. Deney sonuçlarına göre %3.5 çelik hasır takviye ile CTP kompozitin eğilme elastisite modülünde %47.85 artış elde edilebileceği görülmektedir. Yine aynı takviye oranı için çekme mukavemetinde %47.66 artış elde edilmektedir. Anlaşılacağı gibi deney sonuçları az miktarda çelik takviye ile CTP kompozitin güvenli bir yapısal eleman malzemesi olabileceğini ortaya koymaktadır.

Yapısal elemanların üretiminde en çok kullanılan E tipi sürekli cam elyaf takviye ve polyester reçinenin hem mekanik değerler hem de ekonomiklik açısından en uygun malzemeler olduğu belirlenmektedir. Üretim hızı ve kompozitte en fazla elyaf takviyesinin elde edilebileceği üretim yöntemi olarak ta profil çekme yönteminin amaca uygunluğu ön plana çıkmaktadır. Tasarlanan CTP strüktürün döşeme tabliyesi üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan doğrusal statik analiz değerleri de sistemin konut veya farklı kullanımlar için uygun olduğu ve ufak değişiklikler ile optimum değerlere ulaşılabileceğinin ön bulgularını vermektedir.

Uygulanmakta olan geleneksel çelik ve betonarme sistemlere göre daha üstün tasarım kriterleri olan CTP strüktürün rekabet ettiği bu malzemelerle benzer maliyetlere sahip olacağı tahmin edilmektedir. Ancak, basit detay, az parçalı, genişleyebilir, prefabrike ve kolay inşa edilebilir esnek dış görünüş olanakları ile tezde geliştirilen sistem büyük avantajlar sunmakta ve rekabet gücünü önemli oranda arttırmaktadır. Ayrıca, nem, UV ışınları ve kimyasal malzemeler gibi olumsuz dış etkilere karşı daha dayanıklı olan ve hijyenik bir yaşam ortamı sağlayacak bir malzeme olan CTP'nin uzun kullanım ömrü sayesinde yapı sektöründe kullanımı

yaygın, üstün bir malzeme potansiyeli sağladığı bu tez çalışması ile vurgulanmaktadır. Önerilen strüktür sistemi ile ekonomik konut üretimi mümkün olabilecektir.

## **Gelecekteki Çalışmalar**

Bu çalışma sonunda yapı üretiminde kullanılabileceği yönünde olumlu veriler elde edilen CTP'nin mevcut üretici firmalarla koordineli olarak üretim maliyetlerinin araştırılması gelecekteki çalışmaların ilk adımı olarak görülmektedir. Malzeme maliyetlerinin yanı sıra üretim yöntemi maliyetleri de bu konuda önemli rol oynayacaktır.

Profil çekme yöntemi ile üretilmesi planlanan CTP profillere bu yöntemin mevcut ekipmanları ile çelik hasır takviyesinin yapılamayacağı bilinmektedir. Bu durumda, çelik hasır takviyenin CTP profillere uygulanabileceği bir üretim düzeneğinin geliştirilmesi gerekliliği açıktır. Bu aşamada makine mühendisleri, endüstri ürünleri tasarımcıları ve diğer uzmanlardan oluşan kapsamlı bir ekip çalışması gerekmektedir.

Her ne kadar sonlu elemanlar analiz bulguları olumlu sonuçlar verse de, bu malzeme ile üretilcek elemanların tam yada küçük ölçekli modelleri üzerinde döşeme yükleme testlerinin, kolon basınç testlerinin ve bağlantı elemanının moment-açısız dönme testlerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

1. ABDALLA H.A., Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars, Composite Structures, 56, 63-71, 2002.
2. ADDIS B., A Review of the Opportunities for Delivering Benefits to Customers, Through The Use of New Materials and Composites, CRISP Consultancy Commission 00/28, 4, 1-47, 2001.
3. AKMAN M.S., Betonarme ve Öngerilmeli Betonda Çelik Yerine Liflerle Güçlendirilmiş Plastik Çubuk ve Toron Kullanımı, TCMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi 1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, Kongre Bildirileri 1, 11-27, 2002.
4. ANONİM, Plastics World, 4, 1993.
5. BRADY, G.S. and CLAUSER, .R., Materials Handbook, 12. Edition, 1979.
6. BURGOYNE C.J., Advanced Composites in Civil Engineering in Europe, Structural Engineering International, 4, 1999.
7. CASE J., CHILVER A.H., Materials and Structures, London, 1988.
8. CLIFFORD S.M., MANGER C.I.C. and CLYNE T.W., Characterisation of a Glass-fibre Reinforced Vinylester to Steel Joint for Use between a Naval GRP Superstructure and a Steel Hull, Composite Structures, 57, 59-66, 2002.
9. CORRADI M., BORRI A. and VIGNOLI A., Strengthening Techniques Tested on Masonry Structures Struck by the Umbria-Marche Earthquake of 1997-1998, Construction and Building Materials, 16, 229-239, 2002.
10. DEVLET İSTATİSTİK ENSTİTÜSÜ, 2000 Genel Nüfus Sayımı Sonuçlarına Göre Hanehalkı Büyüklüğü ve Konutun Oda Sayısına Göre Hanehalkı Sayısı, Genel Nüfus Sayımı, DİE, 2000.
11. EL-AMOURY T. and GHOBARAH A., Seismic Rehabilitation of Beam-column Joint Using GFRP Sheets, Engineering Structures, 24, 1397-1407, 2002.
12. HASHEM Z.A. and YUAN R.L., Experimental and Analytical Investigations on Short GFRP Composite Compression Members, Composites, Part B 31, 611-618, 2000.

13. HULATT J., HOLLAWAY L. and THORNE A., Preliminary Investigations on the Environmental Effects on New Heavyweight Fabrics for Use in Civil Engineering, Composites, Part B 33, 407-414, 2002.
14. HULL J.L., Processing of Thermosets, Chapter 6, (Harper C.A., Modern Plastics Handbook, 2000).
15. KELLER T. and SCHOLLMAYER M., Plate Bending Behavior Of A Pultruded GFRP Bridge Deck System, Composite Structures, 2003.
16. LUSAS V.13.5, London University Stress Analysis Systems, FEA Ltd., Forge House, 66 High Street, Kingston upon Thames, Surrey, KT1 1HN, United Kingdom.
17. LUSAS Theory Manual 1, FEA Ltd., Forge House, 66 High Street, Kingston upon Thames, Surrey, KT1 1HN, United Kingdom, Version 13, 2000.
18. MILLER D.M., Glass Fibers, 45-48, (Dostal C.A., COMPOSITES, Engineered Materials Handbook, Vol. 1, 8, 1989).
19. MORTAVAZI A.A., PILAKOUTAS K. and SON K.S., RC Column Strengthening by Lateral Pre-tensioning of FRP, Construction and Building Materials, 17, 491-497, 2003.
20. OCHOLA R.O., MARCUS K., NURICK G.N., FRANZ T., Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites at Varying Strain Rates, Composite Structures, 2003.
21. PHILIPPIDIS T.P. and VASSILOPOULOS A.P., Complex Stress State Effect on Fatigue Life of GRP Laminates Part I Experimental, International Journal of Fatigue, 24, 813-823, 2002.
22. PHILIPPIDIS T.P. and VASSILOPOULOS A.P., Complex Stress State Effect on Fatigue Life of GRP Laminates Part II Theoretical Formulation, International Journal of Fatigue, 24, 825-830, 2002.
23. REINHART T.J. and CLEMENTS L.L., Introduction to Composites, 27-34, (Dostal C.A., COMPOSITES, Engineered Materials Handbook, Vol. 1, 8, 1989).
24. ROTHEISER J.I., Design of Plastic Products, Chapter 8, (Harper C.A., Modern Plastics Handbook, 2000).

25. SARIBIYIK M., Use of Analytical Method for Determination of Material Properties of Pultruded GRP Box Section, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5/1, 85-88, 2001.
26. SCHOENBERG T., Boron and Silicon Carbide Fibers, 57-58, (Dostal C.A., COMPOSITES, Engineered Materials Handbook, Vol. 1, 8, 1989).
27. SCHULLER W., The Design of Building Structures, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
28. SMITH S.J., PARSONS I.D. and HJELMSTAD K.D., An Experimental Study of the Behavior of Connections for Pultruded GFRP I-beams and Rectangular Tubes, Composite Structures, 42, 281-290, 1998.
29. SONG H.W. and DU X.W., Off-axis Crushing of GFRP Tubes, Composites Science and Technology, 62, 2065-2073, 2002.
30. SPAGNOLI, A., ELGHAZOUALI A.Y. and CHRYSSANTHOPOULOS M.K., Numerical Simulation of Glass-reinforced Plastic Cylinders Under Axial Compression, Marine Structures, 14, 353-374, 2001.
31. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 4, 1996a.
32. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 7, 1996b.
33. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 10, 1996c.
34. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 1, 1997a.
35. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 8, 1997b.
36. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 1, 1998.
37. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş., Bülten , 3, 2000.
38. ŞİŞECAM, Camelyaf Sanayi A.Ş. Teknik Yayınlar, Plastikler-Takviye Malzemeleri-CTP, CTP Rehberi 1, 1992a.
39. ŞİŞECAM, El Yatırması Yöntemi ile CTP Kalıplama, CTP Rehberi 2, 1992b.
40. TSE, Türk Standardı, Yapı Elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri, TS498, 1997.
41. TURVEY, G.J., Analysis of Pultruded Glass Reinforced Plastic Beams with Semi-rigid End Connections, Composite Structures, 38(1-4), 3-16, 1997.

42. TURVEY, G.J. and COOPER, C., Semi-rigid Column-base Connections in Pultreded GRP Frame Structures, *Computer & Structures*, 76, 77-88, 2000.
43. WATSON J.C. and RAGHUPATHI N., Glass Fibers, 107-111, (Dostal C.A., COMPOSITES, *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, 8, 1989).
44. WRIGHT R.E., Thermosets, Reinforced Plastics, and Composites, Chapter 2, (Harper C.A., *Modern Plastics Handbook*, 2000).

## ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında İstanbul’da doğdu. 1991 yılında Özel Anakent Lisesi’nden mezun oldu. 1992 yılında başladığı Trakya Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Mimarlık Bölümü’nden 1996 yılında mimar ünvanı alarak mezun oldu. Eylül 1996-Ekim 1997 tarihleri arasında Ersöz İnşaat Ltd. Şti.’nde çeşitli proje ve inşaat görevlerini üstlendi. Kasım 1997-Mart 1999 tarihleri arasında askerlik görevini tamamladı. Mart 1999-Mart 2001 tarihleri arasında Tago Mimarlık’da çeşitli mimari projelerde çalıştı. Mart 2002-Aralık 2002 tarihleri arasında CE-Sİ Cephe Sistemleri ve Aralık 2002-Ekim 2003 tarihleri arasında ZOOM Mimari TPU firmalarında mimar olarak görev yaptı. Şubat 2001 tarihinde G.Y.T.E. Mimarlık Fakültesi Mimarlık Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. Halen mimarlık çalışmalarına serbest olarak devam etmektedir.