
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SANDVİÇ YAPILARDA GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANLARININ DAYANIMININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

Muhammet Mustafa ABAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammet Mustafa ABAY

12/01/2023

SANDVİÇ YAPILARDA GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANLARININ DAYANIMININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammet Mustafa ABAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Sandviç yapılar sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı havacılık ve uzay sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç yapılarda özellikle yüksek yük akışı olan bağlantı bölgelerinde en çok tercih edilen çözümlerden biri gömülü bağlantı elemanlarıdır. Gömülü bağlantı elemanları sistemi üretim şekli, boyu, dolgu malzeme şekli gibi birçok özelliğe göre sınıflandırılabilmektedir. Sandviç yapıların yaygınlaşmasından itibaren gömülü bağlantı elemanları üzerine çalışmalar yapılmış ve dayanımı tespit edilmeye çalışılmıştır. Analitik yöntemlerin hassas olmaması ve testlerin maliyetli uygulamalar olmasından dolayı sonlu elemanlar metodu kullanılarak gömülü bağlantı elemanı sisteminin dayanımını bulmak cazip bir konsept haline gelmiştir. Literatürdeki gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelleri genellikle sadece modellenen sistemin testleri sonucunda elde edilen veriler ile hazırlanmaktadır. Bu çalışmada düzlem dışı testlerle elde edilerek oluşturulan gömülü bağlantı elemanı modelinin başka gömülü bağlantı elemanı sistemlerinin dayanımlarını ne ölçüde bulabildiği araştırılmıştır. Diğer bir deyişle geometrik parametrelerin gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modeli doğruluğu üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Doğrulama çalışması yapılan ve sonlu elemanlar modeli oluşturulan model ile gömülü bağlantı elemanı çapı, sandviç panel bal peteği yüksekliği, yüzey tabaka kalınlığı, gömülü bağlantı elemanı tipi ve son olarak yükleme yönü değiştirilerek bu durumlardaki testler ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak çap, yüzey tabaka ve gömülü bağlantı elemanı tipi değişkenlerine sahip modellerin analizler ile elde edilen kritik kuvvet değerlerinin testlerde elde edilenlerle oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir (sırasıyla %1, %5, %4). Çekirdek yüksekliğinin arttırıldığı modelde ise %11 gibi bir fark gözlemlenmiştir. Düzlem içi çekme testler için hazırlanan modelin değerleri tutarsız gözükmese de kuvvet/uzama eğrisi beklenilen görüntüyü vermemiştir. Dolayısıyla tutarlı bir sonuç olarak değerlendirilmemiştir.

Bilim Kodu : 91410

Anahtar Kelimeler : Sandviç yapılar, lineer olmayan analiz, sonlu eleman metodu, sandviç yapılarda gömülü bağlantı elemanı

Sayfa Adedi : 121

Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI

INVESTIGATION ON STRENGTH OF INSERT IN SANDWICH STRUCTURES WITH EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

(M. Sc. Thesis)

Muhammet Mustafa ABAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Sandwich structures are widely used in the aerospace industry due to their superior properties. Inserts are one of the most preferred solutions in sandwich structures, especially in connection areas with high load flow. Insert systems can be classified according to many features such as production type, length, potting size. Since the spread of sandwich structures, studies have been carried out on inserts and their strength has been tried to be determined. Finding the strength of insert systems using the finite element method has become an attractive concept because the analytical methods are not sensitive and the tests are costly applications. Insert system finite element models in the literature are generally generated with the data obtained as a result of the tests of the modeled system. In this study, it was investigated to what extent the insert model, which was obtained by out-of-plane tests, could find the strength of insert systems. In other words, the effects of geometric parameters on the accuracy of the insert system finite element model were observed. With the model which the correlation study was carried out, the finite element models were created changing insert diameter, sandwich panel honeycomb height, skin thickness, insert type and finally the loading direction and compared with the tests in these cases. As a result, it was observed that the critical force values obtained by the analyses of the models with the variables of diameter, surface layer and embedded fastener type were quite close to those obtained in the tests (1%, 5%, 4%, respectively). A difference of 11% was observed in the model in which the core height was increased. Although the values of the model prepared for in-plane tensile tests do not seem inconsistent, the force/elongation curve did not give the expected image. Therefore, it was not considered as a consistent result.

Science Code	:	91410
Key Words	:	Sandwich structures, non lineer analysis, finite element method, insert in sandwich structures
Page Number	:	121
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Tamamlamış olduğum tez çalışması süresince bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ve çalışmayı tamamlamam için beni sürekli motive eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma boyunca teknik desteklerini hiç esirgemeyen başmühendisim Abdulkadir ÇEKİÇ'e ve değerli iş arkadaşlarım Hasan AKÇE ile Onur ÇAKMAKÇI'ya teşekkür ederim.

Elde edilen verileri kullanmama izin veren tüm üst yöneticilerime teşekkürlerimi sunuyorum.

Manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Mustafa Tuğberk ÇAKIR, Mustafa Alp EREN, Selin EVSEN ve aile büyüklerim Emine, İbrahim ve Elife DOĞAN'a teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren anne ve babam Adile ve İsa ABAY'a teşekkürlerimi ve hürmetlerimi sunuyorum.

Son olarak teşekkürlerin en büyüğünü her zaman her konuda yanımda olan ve bir an bile desteğini esirgemeyen sevgili eşim Dr. Emine ABAY'a sunuyor ve sonsuz sevgilerimi iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiv

RESİMLERİN LİSTESİ xx

SİMGELER VE KISALTMALAR xxv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

3. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI SİSTEMİ 7

3.1. Sandviç Yapılar 7

3.1.1. Sandviç yapıların tasarım kriterleri 9

3.1.2. Yüzey tabakalar 12

3.1.3. Çekirdek yapılar 12

3.1.4. Yapıştırıcılar 14

3.1.5. Sandviç panellerin hasar modları 15

3.1.6. Sandviç yapılarının kullanım alanları 16

3.2. Birleştirme Metodu 23

3.3. Gömülü Bağlantı Elemanı 25

3.3.1. Gömülü bağlantı elemanı tipleri 25

3.3.2. Gömülü bağlantı elemanı yükleme şekilleri 29

Sayfa

4. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI ANALİTİK MODELLEMELERİ 31

4.1. Ericksen Modeli 31

4.2. Thomsen Modeli 35

4.3. Basit Kesme Hesabı ile Modelleme 41

4.4. Geliştirilmiş Basit Kesme Hesabı ile Modelleme 42

4.5. ECSS Yöntemi 44

4.5.1. Çekirdekteki kesme geriliminden kaynaklanan hasar modu 47

4.5.2. Çekirdekteki çekme ve kesme geriliminden kaynaklı hasar modu 50

4.5.1. Dolgu malzemesindeki çekme ve çekirdekteki kesme gerilimi kaynaklı hasar 51

5. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI SONLU ELEMANLAR MODELİ 53

5.1. Bal Peteği Modellemesi 53

5.1.1. Eleman tipi 54

5.1.2. Eleman boyutu 55

5.1.3. Yapısal kusurların ele alınması 55

5.2. Yüzey Tabaka Modellemesi 56

5.3. Gömülü Bağlantı Elemanı Modellemesi 56

5.4. Sınır Koşulları 56

5.5. Analiz Tipi 57

5.5.1. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslaması 57

5.5.2. Explicit ve implicit analiz kıyaslaması 58

6. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI DENEYSEL YÖNTEMLERİ 59

6.1. Düzleme Dik Çekme Testi 60

6.2. Düzlem İçi Çekme Testi 61

Sayfa

7. MALZEME VE YÖNTEM 63
7.1. Malzeme 64
7.2. Gömülü Bağlantı Elemanı Tasarımı 66
7.3. Numunelerin Üretilmesi 70
7.4. Gerçekleştirilen Testler 72
7.4.1. Bal peteği çekirdek yapı çekme testi 72
7.4.2. Gömülü bağlantı elemanı testleri 74
7.5. Sonlu Elemanlar Modeli 77
7.5.1. Yöntem 77
7.5.2. Eleman boyutu optimizasyon çalışması 79
7.5.3. Dolgu malzemesi şeklinin belirlenmesi 80
7.5.4. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması 83
8. BULGULAR 87
8.1. Bal Peteği Yapı 87
8.1.1. Bal peteği çekme testi sonuçları 87
8.1.2. Sonlu elemanlar modeli 88
8.2. Korelasyon Çalışması 90
8.2.1. Gömülü bağlantı elemanı sistemi düzlem dışı çekme testi sonuçları 90
8.2.2. Sonlu elemanlar modeli 91
8.3. Farklı Geometrik Parametrelere Sahip Gömülü Bağlantı Elemanları 94
8.2.1. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı 94
8.2.2. Bal peteği kalınlığı artırılmış gömülü bağlantı elemanı 99
8.2.3. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı 102
8.2.4. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı 106
8.2.5. Düzlem içi yükleme altındaki gömülü bağlantı elemanı 110

Sayfa

9. SONUÇ VE ÖNERİLER 115

KAYNAKLAR 117

ÖZGEÇMİŞ 121

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Gömülü bağlantı elemanı sistemi ve alt elemanları..... 7

Çizelge 7.1. Çalışma boyunca gömülü bağlantı elemanlara yapılacak olan test ve konfigürasyonların özet tablosu..... 64

Çizelge 7.2. Alüminyum 5056 bal peteği özellikleri..... 65

Çizelge 7.3. Alüminyum 5056 alışım özellikleri 65

Çizelge 7.4. Alüminyum 2024 T81 alışım özellikleri 65

Çizelge 7.5. Alüminyum 7050 T7451 alışım özellikleri 66

Çizelge 8.1. Bal peteği yapıların çekme testi sonuçları 88

Çizelge 8.2. Korelasyon çalışması için seçilmiş gömülü bağlantı elemanı test sonuçları..... 91

Çizelge 8.3. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları..... 95

Çizelge 8.4. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları 100

Çizelge 8.5. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları 103

Çizelge 8.6. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları..... 107

Çizelge 8.7. Düzlem içi testlerin sonuçları 111

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Sandviç panel ve "I" kiriş 8

Şekil 3.2. Çekirdek kalınlığının rijitlik ve dayanıma etkisi 9

Şekil 3.3. Farklı çekirdek malzemelerinin performans kıyaslaması 13

Şekil 3.4. a) bal peteği, b) oluklu, c) tam dolu çekirdekli sandviç yapılar 13

Şekil 3.5. Thomsen'a göre çekirdek türleri 14

Şekil 3.6. Sandviç yapılarının hasar modları 16

Şekil 3.7. Ticari Uçaklarda sandviç panel kullanılan parçalar..... 16

Şekil 3.8. Jet motorunda sandviç panel kullanılan parçalar..... 17

Şekil 3.9. Helikopterlerde sandviç panel kullanılan parçalar 18

Şekil 3.10. Savaş Uçaklarında sandviç panel kullanılan parçalar..... 19

Şekil 3.11. Fırlatıcılarda sandviç panel kullanılan parçalar..... 19

Şekil 3.12. Uydularda sandviç panel kullanılan parçalar..... 20

Şekil 3.13. Gemilerde sandviç panel kullanılan parçalar..... 21

Şekil 3.14. Tren vagonunda sandviç panel kullanılan parçalar 22

Şekil 3.15. Rüzgar türbinlerinde sandviç panel kullanılan parçalar 22

Şekil 3.16. Mekanik birleştirme yöntemi kullanılmış gömülü bağlantı elemanı 23

Şekil 3.17. Gömülü bağlantı elemanı entegrasyon prosesi 24

Şekil 3.18. a) Sandviç yapıda delik açma işlemi, b) dolgu malzemesinin doldurulması..... 25

Şekil 3.19. Sandviç panellerde bağlantı şekilleri 26

Şekil 3.20. Zenkert'e göre gömülü bağlantı elemanı türleri..... 27

Şekil 3.21. Zenkert'e göre gömülü bağlantı elemanlarının dayanım kıyaslanması 27

Şekil 3.22. SHUR-LOK Firmasına göre gömülü bağlantı elemanı tipleri..... 28

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.23. ECSS'e göre gömülü bağlantı elemanı tipleri 28

Şekil 3.24. Farklı özelliklere göre gömülü bağlantı elemanı sınıflandırması 29

Şekil 3.25. Gömülü bağlantı elemanlarına gelen yükleme şekilleri 29

Şekil 3.26. Gömülü bağlantı elemanlarına gelen eğilme ve döndürme yüklerinin düzlem içi ve dışı yüklere dönüştürüldüğü uygulamalar 30

Şekil 4.1. Ericksen modelindeki değişkenler 32

Şekil 4.2. a) Ericksen modeli örnek sonucu, b) T katsayısının seçilebileceği grafik 35

Şekil 4.3. a) Tam dolgu malzemeli, b) kalınlık boyunca gömülü bağlantı elemanı 36

Şekil 4.4. Thomsen modeline göre panel boyunca gömülü bağlantı elemanı için yer değiştirme ve gerilme dağılımı 40

Şekil 4.5. Thomsen modeline göre tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı için yer değiştirme ve gerilme dağılımı 40

Şekil 4.6. Gömülü bağlantı elemanının basit kesme hesabıyla modellenmesi 41

Şekil 4.7. Geliştirilmiş basit kesme hesabıyla modelleme yöntemindeki a) parametreler, b) çapa bağlı gerilim dağılımı 43

Şekil 4.8. Gömülü bağlantı elemanı parametreleri ile k3'ün bulunabildiği grafik 44

Şekil 4.9. Etkin ve gerçek dolgu malzemesi geometrileri 46

Şekil 4.10. ECSS'e göre gömülü bağlantı elemanlarının düzlem dışı çekme kuvveti altında çekirdek yüksekliğine bağlı olarak çeşitlenen kırılım modları 47

Şekil 4.11. Gömülü bağlantı elemanı çevresindeki kesme gerilimi dağılımı 48

Şekil 5.1. Bal peteği yapılarının katı modelleme örnekleri 54

Şekil 5.2. Bal peteği yapılarının kabuk hücre duvarı modelleme örnekleri 55

Şekil 5.3. Gömülü bağlantı elemanı modelindeki test fisktürü ve simetri sınır şartları 57

Şekil 6.1. a) düzlem içi, b) düzleme dik ve c) tork yükleme testleri 60

Şekil 6.2. Örnek a) düzleme dik ve b) düzlem içi çekme testi sonuçları 61

Şekil 7.1. Çalışma yönteminin özeti 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.2. a) Gömülü bağlantı elemanı sisteminin, b) temsili dolgu malzeme ile gömülü bağlantı elemanının, c) panel boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanının ve d) gömülü bağlantı elemanı sisteminin şeffaf CAD görüntüleri 67

Şekil 7.3. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü 68

Şekil 7.4. Bal peteği yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü 68

Şekil 7.5. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi a)üst, b)alt ve c) şeffaf CAD görüntüsü 69

Şekil 7.6. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılan gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü .. 69

Şekil 7.7. Düzlem içi yükleme için hazırlanan gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü 70

Şekil 7.8. Bal peteği yapılarına düzlem dışı çekme test uygulaması 73

Şekil 7.9. Düzlem dışı ve düzlem içi çekme testleri için numune boyutları 74

Şekil 7.10. Kompleks yapıların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması 78

Şekil 7.11. Farklı eleman boyutlarıyla gerçekleştirilen analiz sonuç grafiği 79

Şekil 7.12. Farklı eleman boyutlarıyla oluşturulan bal peteği yapı parçası modelleri 80

Şekil 7.13. Gömülü bağlantı elemanlarının üstten ve yandan x-ray görüntüleri 81

Şekil 7.14. Kesilerek dolgu malzemesi doluluğu incelenen gömülü bağlantı elemanı .. 81

Şekil 7.15. Gömülü bağlantı elemanının bal peteğindeki konumuna bağlı olarak sahip olabileceği farklı dolgu malzemesi şekilleri 82

Şekil 7.16. Dolgu malzemesinin sonlu elemanlar modelindeki şekli 82

Şekil 7.17. Bal peteği çekirdek yapının sonlu elemanlar modeli 83

Şekil 7.18. Korelasyon çalışmasında kullanılan panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanının sonlu elemanlar modeli 84

Şekil 7.19. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanının sonlu elemanlar modeli 85

Şekil 7.20. Çekirdek yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sonlu elamanlar modeli 85

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.21. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modeli . 86

Şekil 7.22. Düzlem içi yükleme için hazırlanan gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modeli 86

Şekil 8.1. Bal peteği çekme testi kuvvet uzama eğrileri 87

Şekil 8.2. Test numunesinin ve sonlu elemanlar modelinin hasar modları 88

Şekil 8.3. Test ve SEM kuvvet/uzama eğrileri 89

Şekil 8.4. Bal peteği yapı için ortalama test ve sonlu elemanlar modeli sonuçları kıyaslaması 89

Şekil 8.5. Kalınlık boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı testleri kuvvet/uzama eğrileri 91

Şekil 8.6. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilmiş kuvvet/uzama eğrileri..... 92

Şekil 8.7. Test ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması 92

Şekil 8.8. Gömülü bağlantı elemanı modeli hasar modu 93

Şekil 8.9. Gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı 93

Şekil 8.10. Gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelinde çekirdekteki gerilim dağılımı 94

Şekil 8.11. Sonlu elemanlar modelindeki bal peteği yapının davranışı..... 94

Şekil 8.12. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının kuvvet/uzama eğrileri 95

Şekil 8.13. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi için sonlu elemanlar modeli ve düzlem dışı çekme testi sonucu elde edilmiş kuvvet/uzama grafiği..... 96

Şekil 8.14. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanının test ve analiz sonuçları..... 97

Şekil 8.15. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanının hasar modu 97

Şekil 8.16. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı 98

Şekil 8.17. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı kuvvet/uzama eğrileri..... 99

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.18. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı için analiz ve test sonucu elde edilmiş kuvvet/uzama grafiği 100

Şekil 8.19. Bal peteği kalınlığı arttırılmış sonlu elemanlar modeli analiz ve test sonuçlarının kıyaslaması 101

Şekil 8.20. Bal peteği yapının kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı..... 101

Şekil 8.21. Bal peteği kalınlığı arttırılmış modelin hasar modu 102

Şekil 8.22. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanların kuvvet/uzama eğrileri..... 103

Şekil 8.23. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş kuvvet uzama eğrileri 104

Şekil 8.24. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanının analiz ve test sonuçlarının kıyaslanması 104

Şekil 8.25. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modelinin hasar modu 105

Şekil 8.26. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı .. 105

Şekil 8.27. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanların kuvvet/uzama eğrileri..... 106

Şekil 8.28. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş kuvvet uzama eğrileri 108

Şekil 8.29. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının analiz ve test sonuçlarının kıyaslanması 108

Şekil 8.30. Sonlu elemanlar modeli hasar modu..... 109

Şekil 8.31. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı..... 110

Şekil 8.32. Düzlem içi testleri gerçekleştirilen gömülü bağlantı elemanlarının kuvvet/uzama eğrileri..... 111

Şekil 8.33. Düzlem içi yük altındaki gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri 112

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.34. Düzlem içi çekme yüklemesi altındaki gömülü bağlantı elemanı için test ve sonlu elemanlar ile elde edilen verilerin kıyaslaması 113

Şekil 8.35. Sonlu elemanlar modeli düzlem içi yük altındaki hasar modu 113

Şekil 8.36. Düzlem içi testi altında gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı..... 114

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 7.1. Üretimi tamamlanan sandviç panel 71

Resim 7.2. Dolgu malzemesi dolum işlemi öncesi gömülü bağlantı elemanı kuponları..... 71

Resim 7.3. Dolgu malzemesinin hazırlanması ve hava tabancasında kullanılmak üzere kartuş dolumun yapılması 71

Resim 7.4. Gömülü bağlantı elemanı kuponuna dolum işleminin yapılışı 72

Resim 7.5. a) dolum işlemi yapmak için kullanılan hava tabancası, b) dolum işlemi gerçekleştirilen kupon görüntüsü 72

Resim 7.6. Bal peteği çekirdek malzemesine uygulanacak düzlem dışı çekme testi için hazırlanan numuneler 73

Resim 7.7. Düzlem dışı çekme testi için panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri 75

Resim 7.8. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri..... 75

Resim 7.9. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak bal peteği yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri..... 75

Resim 7.10. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri 76

Resim 7.11. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri..... 76

Resim 7.12. Düzlem içi çekme testi uygulanacak panel kalınlığı boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri..... 76

Resim 7.13. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi çekme testlerinin gerçekleştirilmesi 77

Resim 8.1. Testleri gerçekleştirilmiş bal peteği yapılar..... 87

Resim 8.2. Testleri gerçekleştirilmiş kalınlık boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı numuneleri 90

Resim 8.3. Testleri gerçekleştirilmiş çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanları numuneleri 95

Resim **Sayfa**

Resim 8.4. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı test numunesinin kopmuş görüntüsü 98

Resim 8.5. Testleri gerçekleştirilmiş bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı numuneleri..... 99

Resim 8.6. Testleri gerçekleştirilmiş yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı numuneleri 102

Resim 8.7. Testleri gerçekleştirilmiş kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı numuneleri 106

Resim 8.8. Test sonucu görülen hasar modu 109

Resim 8.9. Düzlem içi testleri gerçekleştirilen gömülü bağlantı elemanı..... 110

Resim 8.10. Test numunesinin hasar modu 114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
a	Test fikstürü çapı
A	Alan
b	Gömülü bağlantı elemanı çapı
c	Çekirdek malzeme yüksekliği
E	Elastik modül
P	Uygulanan yük

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
SEM	Sonlu Elemanlar Modeli

1. GİRİŞ

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı oldukça artmış durumdadır. Kompozit malzemeler, birden farklı malzemenin üstün özeliklerini bir arada kullanmak üzere makro seviyede bir arada kullanıldıkları yapılara verilen isimdir. Farklı malzemelerin üstün özelliklerinden faydalanabilen bu tarz yapılar ağırlık, dayanım gibi konularda bir adım önde olmaktadır. Sandviç sistemleri ise katmanlı kompozit malzemelerin bir alt grubu olarak tanımlanabilir. Sandviç sistemler iyi mekanik özelliklere sahip olduğu için başta havacılık, uzay ve otomotiv olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Yaygın kullanımların yanında bağlantı konusunda sahip oldukları zorluklar birçok çalışmalara konu olmuş durumdadır. Farklı bağlantı tipleri mümkün olsa da gömülü bağlantı elemanları sahip oldukları birçok avantajla oldukça yaygı bir kullanıma sahiptir. Gömülü bağlantı elemanları sandviç yapıların birbirine bağlanmasını sağlayan bir bağlantı parçasıdır. Sandviç yapılarla; çerçeveler, profiller, köşeli parantezler ve donanım braketleri gibi diğer yapısal parçalar arasındaki bağlantı için gömülü bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Sistem çıkarılabilir ve sabit bir yapısal elemandan oluşur. Çıkarılabilir parça, vida veya somun benzeri bir parçaya uygun başka bir dişli elemandır. Gömülü bağlantı elemanı çekirdeğe (genellikle bal peteği) genellikle iki fazlı epoksi reçine olan dolgu malzemesi ile bir araya getirilir [1]. Gömülü bağlantı elemanlarının yükleme yönleri düzlem içi, düzleme dik, eğilme ve burulma olarak sıralanabilir. Güvenlik marjının tespiti için gömülü bağlantı elemanlarının dayanımının tespit edilmesi çok önemli bir konumda yer almaktadır.

Gömülü bağlantı elemanları birden farklı alt sistemden oluşan kompleks yapılar olduğu için dayanım tespiti oldukça zor yapılardır. Özellikle lineer olmayan bölgedeki davranışlarının analitik olarak tespiti oldukça zordur. Sandviç yapılarda yaygın olarak kullanılan gömülü bağlantı elemanlarının dayanımını bulurken test masrafından kaçınmak için sonlu elemanlar metodu kullanmak oldukça iyi bir çözüm gibi gözükse de, modelin korelasyonu oldukça zor bir iştir. Bir gömülü bağlantı elemanı sistemi için korelasyon gerçekleştirilse bile bu modelin daha sonraki test ihtiyacı olan farklı konfigürasyonlarda kullanılabilirliği tartışma konusudur.

Bu çalışmanın amacı bir gömülü bağlantı elemanı ile korelasyonu sağlanmış sonlu elemanlar modelinin geometrik farklılıkları olan başka gömülü bağlantı elemanları için ne kadar doğru sonuç verdiğini araştırmaktır. Literatürde birçok Bir gömülü bağlantı elemanı testi ile korelasyonu sağlanan model oluşturma çalışması mevcuttur. Fakat her biri ilgili gömülü bağlantı elemanından elde edilen veriler ile oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu tarz hazırlanan bir sonlu elemanlar modelinin farklı geometrik özelliklere sahip gömülü bağlantı elemanları için ne kadar tutarlı olduğu öngörülememektedir. Bu çalışmada literatürden farklı olan korelasyonu sağlanan modelin diğer gömülü bağlantı elemanları için ne kadar tutarlı olduğu araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geçmişten günümüze kadar sandviç panellerdeki gömülü bağlantı elemanlarının dayanımlarının belirlenmesi ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda daha çok düzlem dışı çekme testi üzerine odaklanılmıştır.

Kim ve Lee [2] karbon fiber kompozit yüzey tabaka ile alüminyum bal peteği yapısındaki kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarının dinamik ve statik düzlem dışı çekme testlerini uygulamışlardır. Silindir, I kiriş ve dambıl şekillerine sahip gömülü bağlantı elemanlarının dayanıma olan etkisini testler ile belirlemişlerdir. Dambıl şeklindeki gömülü bağlantı elemanının en yüksek dayanım değerlerini elde ettiği görülmüştür.

Song ve diğerleri [3] bal peteğinin yüksekliğinin ve yoğunluğunun, yüzey tabaka kalınlığının, gömülü bağlantı elemanı ile yüzey tabaka arasındaki açıklığın ve yükleme yönünün gömülü bağlantı elemanının dayanımına olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Testleri gerçekleştirilen numunelerde aramid bal peteği ve karbon fiber yüzey tabakanın kullanıldığı sandviç yapılar kullanılmıştır. Sonuçlar, düzlem dışı çekme testi için hasar yükünün en çok çekirdek yoğunluğundan etkilendiğini göstermiştir. Çekirdek yoğunluğunu çekirdek yüksekliği ve yüzey kalınlığı takip etmektedir. Düzlem içi çekme yani kesme yüküne karşı dayanımın ise en çok yüzey kalınlığından etkilendiği görülmüştür. Hasar yükü olarak kuvvet-şekil değiştirme grafiğindeki ilk düşüşün gerçekleştiği kuvvet değeri kabul edilmiştir.

Bunyawaninichakul ve diğerleri [4] Aramid ve karbon fiber sandviç yapıdaki gömülü bağlantı elemanının lineer olmayan sonlu elemanlar modelini oluşturmak amacıyla düzlem dışı çekme testleri yapmışlardır. Özellikle düşük yüklerde lineer olmama sebebinin bal peteği yapısının burkulması olduğunu iddia etmişlerdir ve bu sebeple 3 nokta eğme testi yapmışlardır. Buradan elde ettikleri veriler ile hazırlanan model düzlem dışı çekme testi ile iyi bir korelasyon göstermiştir. Bunyawaninichakul ve diğerleri [5], benzer ama daha kapsamlı bir çalışma yapmışlardır ve lineer olmayan model oluştururken lineer olmayan etki olarak sadece bal peteği hücre duvarı burkulmasını değil aynı zamanda dolgu malzemesinin ve yüzey tabakasının etkisini de dahil etmişlerdir. Bu etkileri gözlemlemek

için lokal testler yapmışlardır ve bu testler sonucu elde ettikleri veriler ile bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Test ve oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile oldukça güzel bir korelasyon elde edilmiştir. Bunyawaninichakul ve diğerleri [6], bu çalışmanın aynısını tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanları için tekrarlamış ve test ile iyi bir korelasyona sahip sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır.

Raghu ve diğerleri [7] dolgu çapının ve bal peteği hücre duvar kalınlığının gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme dayanımına olan etkisini araştırmışlar ve oldukça kritik olduğu sonucuna varmışlardır. Dolgu malzemesinin derinliğinin etkisi için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerde çekirdek malzeme olarak aramid bal peteği ve gömülü bağlantı elemanı olarak kısmi dolgulu gömülü bağlantı elemanı kullanılmıştır. Aynı çalışma çekirdek malzemesi köpük olan numuneler için de gerçekleştirilmiştir ve bal peteği yapısına göre daha az etkilendiği gözlemlenmiştir.

Nguyen ve diğerleri [8] Karbon fiber yüzey ve köpük bazlı bir çekirdek malzemeden oluşan sandviç yapı kullanılarak gömülü bağlantı elemanlı ve sadece vidalı numunelerin düzlem dışı çekme yükü altındaki dayanımlarını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Sandviç yapılardaki bağlayıcıların hasar modlarının birçok farklı hasar modlarının kombinasyonu olduğunu göstermişlerdir. Sonlu elemanlar modellerinde iki farklı metot kullanmışlar ve ilerleyen kırılma analizinin ön tasarımda kullanışlı olduğu ve hasar bölgesi metodunun yükleme eğrisinin ilk pikini iyi bir şekilde bulduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Heimbs ve Pein [9] sandviç panellerde kullanılan üç farklı köşe bağlantı şeklini ve iki farklı gömülü bağlantı elemanı tipini test etmiş ve sonlu elemanlar modeli oluşturarak kıyaslamışlardır. Aramid bal peteği ve cam elyaf kullanılan numunelerde köşe bağlantısı için kesme ve eğme testleri, gömülü bağlantı elemanı için düzlem dışı çekme ve düzlem içi çekme testleri uygulanmıştır. Uygulanan test prosedürü ECSS'te verilenden biraz farklılık göstermektedir. Gömülü bağlantı elemanlarına yapılan testlerde iki farklı yükleme hızı kullanılmıştır. Kullanılan iki tip gömülü bağlantı elemanının benzer dayanıma sahip olduğu bulunmuştur. Dolgu yarıçapının ve gömülü bağlantı elemanının dolgu malzemesi içindeki konumunun aynı zamanda yükleme hızının sonuçları oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Basitleştirilmiş bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve iyi bir korelasyon yakalanmıştır.

Bianchi ve diğerleri [10] alüminyum yüzey tabakalar ve bal beteği ile oluşturulmuş sandviç panele iki farklı birleştirme yöntemi (sıcak yapıştırma ve soğuk yapıştırma) ile entegre edilen gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme testleri gerçekleştirilmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Test sonuçları ile hem sonlu elemanlar modeli hem analitik hesaplama sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak soğuk yapıştırma işlemi uygulanmış gömülü bağlantı elemanları daha çok dayanım göstermiştir. İki gömülü bağlantı eleman tipi için de ilk hasar modu bal peteği hücre duvarındaki kesme burkulmasıdır. Aslında beklenen sıcak yapıştırma işlemi uygulanmış olanın yük kapasitesinin daha yüksek olmasıdır. Çalışmada da açıklandığı üzere; bunun sebebi sıcak yapıştırmada kullanılan köpük yapıştırıcının rijitliğinin soğuk yapıştırma işleminde kullanılan dolgu malzemesine göre düşük olmasıdır.

Roy ve diğerleri [11] karbon fiber yüzey ve Nomex aramid bal peteği sandviç yapısına gömülü bağlantı elemanı sistemine bal peteğinin lokal burkulma yükünü bulma ve bir nomex balpeteği modeli tanımlama amacıyla yüzey dışı testler yapıp FEM modeli oluşturularak doğrulamışlardır. Bağlayıcının düzlem dışı çekme testi dışında aynı sandviç yapıya yatay konumda çekme testi de yapılmıştır ve bu iki test verilerinden faydalanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bal peteği hücre duvarındaki lokal burkulmanın, yük/deplasman grafiğindeki ilk eğim değişikliğinin başladığı bölge civarında olduğu iddia edilmiştir.

Seemann ve Krause [12] bal peteği yapısının sonlu elemanlar modeli üzerinde çalışmışlardır. Basma ve iki yönlü kesme kuvvetleri ile bal peteğini test etmişler ve sonlu elemanlar modeli ile korelasyonunu sağlamışlardır. Bu model ile daha sonra gömülü bağlantı elemanlarının sanal testleri üzerine çalışma yapmışlardır[13]. Bu çalışmada üç farklı kalınlıkta sandviç yapıdaki aynı gömülü bağlantı elemanlarının testlerini yapıp sanal test ortamı oluşturmaya çalışmışlardır. İyi seviye korelasyon sağlamışlardır fakat çekirdek yüksekliği arttıkça yüzey tabaka ile çekirdeğin tüm sistemin dayanımındaki etkisinin artmasını modellerine yansıtamamışlardır.

Bozhevolnaya ve Lyckegaard [14] yeni bir çekirdek gömülü bağlantı elemanı tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Tavsiye ettikleri gömülü bağlantı elemanları üzerinde testler yapmışlar ve dizayn parametrelerini çalışırken sonlu elemanlar modeli kullanmışlardır.

Ge Qi ve diğerleri [15] gömülü bağlantı elemanı kompozit piramit kafes çekirdekli sandviç yapılardaki kullanımı araştırmışlardır. Sonlu elemanlar modeli kullanılarak belirsizlikler ve hassasiyetler araştırılmıştır. Çalışma sırasında makine öğrenmesi kullanılmıştır. Hasar ihtimali gözlemlenmiş ve düzleme dik yönde kararlılık gösterdiği bulunmuştur. Yüzey tabaka kalınlığının rijitlik üzerinde ve yapıştırma yüzeyinin özelliklerinin dayanım üzerinde önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir.

3. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI SİSTEMİ

Gömülü bağlantı elemanı sistemi sandviç panellerin bağlantılarında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Gömülü bağlantı sistemlerinin alt elemanları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Gömülü bağlantı elemanı içeren bir sistem temel olarak üç alt gruptan oluşmaktadır. Bunlar; vida ve vidanın geçeceği dişli parça olan gömülü eleman, gömülü bağlantı elemanının içine yerleştirildiği sandviç yapı ve gömülü bağlantı elemanı ile sandviç panelin bir arada durmasını sağlayan bir tür yapıştırıcı veya bağlayıcıdır.

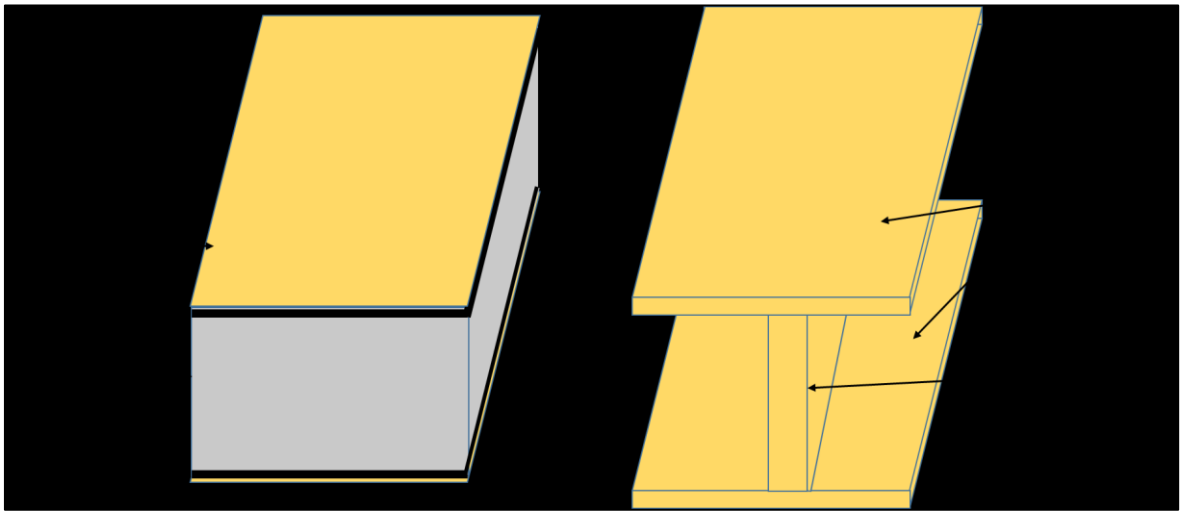
Çizelge 3.1. Gömülü bağlantı elemanı sistemi ve alt elemanları [1]

Gömülü Bağlantı Elemanı Sistem	Gömülü Bağlantı Elemanı	Dıştan (Vida) Dişli Eleman
		Somun Dişli Eleman
	Bağlama Metodu	Mekanik bağlama veya vidalama
		Reçine ile bağlama: Sandviçle birlikte üretilerek veya var olan sandviç içerisine entegre edilerek (dolgu malzemesi veya eş değer bir metotla)
	Sandviç Yapı	Yüzey Levhası
		Yapıştırıcı
		Çekirdek

3.1. Sandviç Yapılar

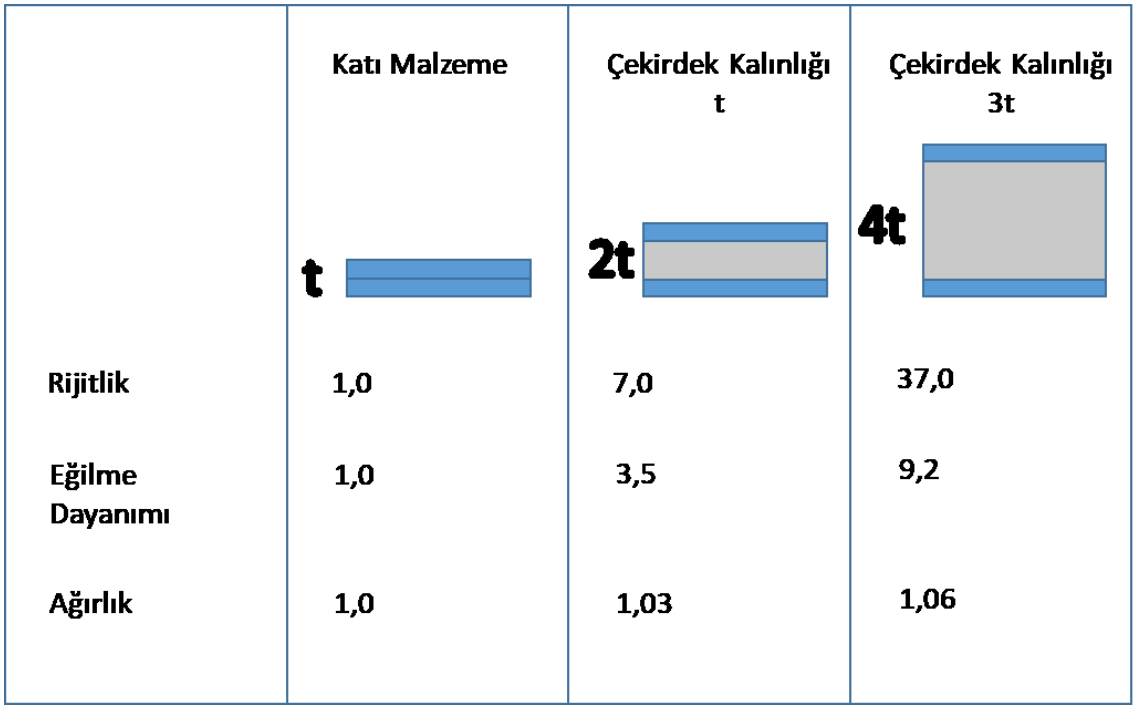
Sandviç yapılar genellikle iki ince yüzey arasına daha kalın ama yüzey malzemelere göre daha hafif çekirdek bir malzeme yerleştirilerek oluşturulur. Yüzey malzeme ve çekirdek malzeme olarak birçok farklı malzeme kullanılabilmektedir. Yüzey malzeme çekirdek malzemeye göre genellikle çok daha ince ve dayanımı daha yüksektir. Buna karşı çekirdek malzeme çok daha hafiftir. Sandviç yapılarının mekaniği I kirişe çok benzemektedir (Şekil 3.1). Flanşlar eğilme ve düzlem içi yüklemelerin (basma ve çekme) çoğunu taşırken, profil gövde kısmı kesme yüklemelerine dayanır, konsantre olan normal yönlü yükleri dağıtır ve yapının rijitliğini arttırır. Sandviç yapıların diğer bir bileşeni ise yapıştırıcıdır. Yüzeyler ile

çekirdek malzemeyi bir araya getirir ve ikisinin bir parçaymış gibi davranmasına imkan sağlamasının yanı sıra yüksek eğilme ve dönme rijitliği sağlar [16].



Şekil 3.1. Sandviç panel ve "I" kiriş

Sandviç yapıların en büyük avantajları hafiflik ve yüksek rijitliktir. Dayanımı çekirdeğe göre yüksek olan yüzey tabakalar çok daha hafif olan çekirdek yapıyla bir araya getirildiği zaman aynı rijitlik değerine sahip malzemelere göre oldukça hafif bir yapı oluşturur. Rijitlik ve eğilme dayanımının artmasının sebebi ise yüzeylerin çekirdek malzeme ile birbirinden ayrılmasıdır. Şekil 3.2'de; yüzey tabakaları aynı kalınlığa sahip katı bir malzemeye göre sandviç yapıların % 3 ağırlık artışıyla 7 kat rijit ve 3,5 kat eğilme dayanımına sahip, aynı zamanda % 6 ağırlık artışıyla 37 kat rijit ve 9,2 kat eğilme dayanımına sahip bir yapının elde edildiği görülmektedir [17].



Şekil 3.2. Çekirdek kalınlığının rijitlik ve dayanıma etkisi [17]

Bu avantajların yanında sandviç yapıların bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; klasik yapılara göre lokal ve global bölgelerde burkulmaya karşı yüksek riskli olması, çentik dayanımının düşük olması, bazı spesifik malzemeler hariç ateşe karşı dayanımının düşük olması, mekanik özelliklerinin yöne bağlı olması ve üretim için alt yapı gerektirdiği için maliyetli olabilmesidir.

Sandviç yapılar yaygın olarak havacılık ve uzay alanlarında kullanılır. Uydu yapısalında panellerde, uçaklarda helikopter gövdelerinde, bazı özel jetlerde ve ticari uçaklarda ise kabin içi veya iniş takımı kapıları gibi ikincil yapılarda kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra otomotiv sanayinde, gemilerde ve güncel çalışmalarda roket tanklarında kullanılmaktadır.

3.1.1. Sandviç yapıların tasarım kriterleri

Bal peteği sandviç yapıları sınırsız malzeme ve uygulama çeşitliliğine sahiptir. Çekirdek ve yüzey malzemelerinin çok geniş kombinasyonlarının seçilebilmesi bu yapıları çok yönlü yapmaktadır. Çekirdek, yüzey ve yapıştırıcı seçiminde bazı kriterler kullanılabilir.

Yapısal değerlendirme

Dayanım

Bal peteği ve bazı yüzey malzemelerinin mekanik özellikleri yöne bağlıdır. Bu yüzden en iyi performansı almak için doğru bir oryantasyon seçilmelidir. Aynı şekilde sandviç panele uygulanan yüklemeye göre malzeme seçimi yapılmalıdır.

Rijitlik

Sandviç yapılar düşük ağırlıkla rijitliği maksimize etmek için kullanılır. Çoğu çekirdek malzemeler düşük kesme modülüne sahip oldukları için eğilme ve kesme sehimi göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapıştırıcı performansı

Yapıştırıcı, yüzeyler ile çekirdeği birbirine rijit bir şekilde bağlar ve bir yüzeyden diğer yüzeye yükün aktarılmasını sağlar. Kullanıma uygun yapıştırıcılar; yüksek elastik modül ve yüksek dayanım değerleri olan malzemeler içeren sıvı macun ya da film formda olabilmektedir. Genel kural olarak, düşük soyulma dayanımı olan veya kırılgan yapıştırıcılar hafif sandviç yapılar ile kullanıma uygun olmamaktadır. Bunun en büyük sebebi sandviç yapılar saklanırken, taşınırken ya da entegrasyonu gerçekleştirilirken darbeye maruz kalabilmesidir.

Ekonomik değerlendirme

Kullanılan malzemelerin çeşitliğinden kaynaklı ekonomik olarak da geniş bir imkan sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, hafif olmalarından kaynaklı olarak operasyon sırasında maliyet etkin çözümler sunabilmektedir.

Çevresel değerlendirme

Sıcaklık

Her malzeme sistemi gibi, sıcaklık koşulları sandviç sistemleri için de önemli bir rol oynar. Malzemeler temel olarak oda sıcaklığına uygun üretilir ama -55 dereceden 170 dereceye kadar belirli seviyede bir performans vermesi beklenir.

Tutuşabilirlik

Malzemeler bu özellik özelinde genellikle yanmayan malzemeler, kendiliğinden sönenler ve tutuşabilir malzemeler olarak üç gruba ayrılır. Malzeme seçimi yapılırken, operasyon ortamına göre bu konu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Isı transferi

Sandviç panel üzerinden ısı transferi konveksiyon, taşıma ve radyasyon prensiplerine bağlıdır. Metalik çekirdek ve metalik yüzey ısı akışını maksimize eder. Bu yüzden uyduların ısı transferi gerçekleştirdiği panellerde bu tarz uygulamalar tercih edilir.

Nem/Rutubet

Bazı çekirdek ve yüzey malzemeler neme ve rutubete karşı yüksek direnç sağlar. Sandviç yapının kullanılacağı ve kullanıma kadar tutulacağı çevre koşulları dikkate alınmalıdır.

Yapışkan solüsyonları ve gaz giderme

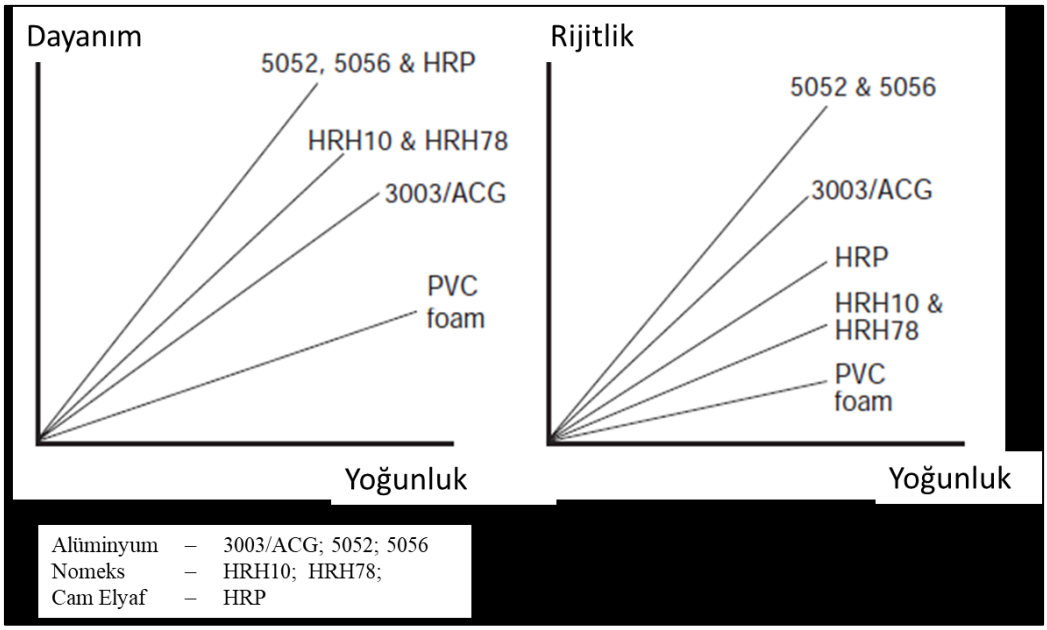
Bazı yapıştırıcılar kürlenme sırasında gaz ya da solüsyon buharı çıkarır. Bunlar metalik olmayan çekirdeklerdeki reçine sistemleri veya metalik çekirdeklerdeki yapıştırıcılar ile etkileşime girerler. Bu esnada malzemelerin mekanik özelliklerinin düşmemesinden emin olmak gerekir.

3.1.2. Yüzey tabakalar

Bir sandviç yapıdaki yüzey levhalarının birincil işlevi, gerekli eğilme ve düzlem içi kesme rijitliğini sağlamak ve düzlem içi kesme yüklemesinin yanı sıra kenar ve eğilme yüklerini taşımaktır [18]. Yüzey malzemesi olarak çok çeşitli kullanımlar mevcuttur. Yaygın kullanılan malzemelere örnek olarak; alüminyum, çelik/paslanmaz çelik, karbon-cam-aramid /epoksi kompozitler ve kontrplak sayılabilir. Fakat havacılık ve uzay alanlarında malzeme sertifikasyon sınırlamaları yüzünden en yaygın kullanılan malzemeler alüminyum alaşımlar, karbon, cam ve kevlar fiber bazlı laminantlardır [19]. Panellerde genellikle iki taraftaki yüzey malzemesinin de aynı olması tercih edilir. Yüzey malzemelerinin farklı olması gerektiği durumlarda ise iki yüzey malzemesinin farklı ısıl genleşme katsayısına sahip olmasından dolayı panelde bir bozukluğun oluşmaması için ekstra bir özen gösterilmesi gerekmektedir [20].

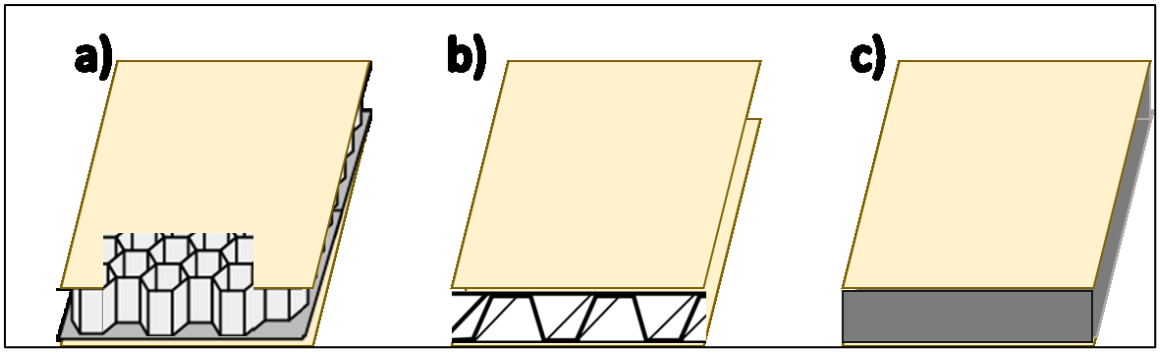
3.1.3. Çekirdek yapılar

Sandviç yapılarda çekirdeğin görevi, panele dik gelen yüklere ve kesme yüklerine karşı dayanmak ve yüzeylerin hareket etmemesini sağlamaktır. Çekirdek görevini yerine getiremezse yüzeyler iki farklı parça gibi davranır ve sandviç yapı etkisini kaybeder [21]. Buna ek olarak çekirdek yapı lokal burkulmaya engel olacak kadar rijit olmalıdır [18][21]. Aluminyum, Nomex(aramid), Korex, Kevlar, cam fiber, Karbon ve PVC köpük en yaygın kullanılan çekirdek malzemeleridir ve yoğunluğa bağlı dayanım ve rijitlik kıyaslamaları Şekil 3.3’te verilmiştir.



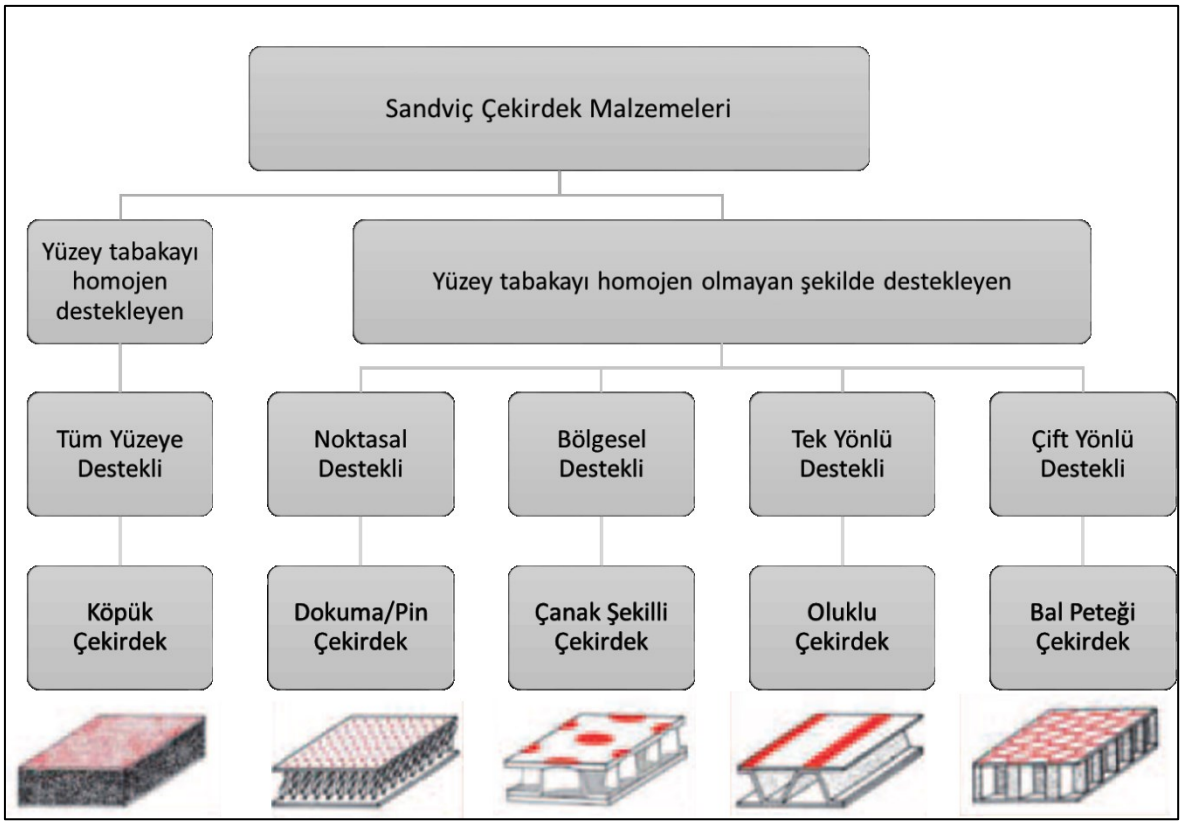
Şekil 3.3. Farklı çekirdek malzemelerinin performans kıyaslaması [17]

Köpük malzemeler dışındaki diğer çekirdek yapılar özellikle biçimlendirilerek delikli geometride kullanılmaktadır. Çekirdek malzemeler geometrilerine bağlı olarak üç alt sınıfa ayrılabilir ve bunlar tam dolu, oluklu ve bal peteği çekirdeklerdir [22] (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. a) bal peteği, b) oluklu, c) tam dolu çekirdekli sandviç yapılar

Gelişen teknolojiyle beraber farklı geometrilerde çekirdekler kullanılmaya başlanmıştır ve Thomsen [23] bu çekirdek yapıları destekleme şekillerine göre homojen ve homojen olmayan olarak ikiye ayırmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi homojen olarak destekleyen çekirdek yapılara köpük ve balsa gibi çekirdekler örnek verilebilir. Homojen olarak desteklemeyen çekirdekler ise bal peteği, oluklu, çanak şekilli ve dokuma çekirdekler olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.5. Thomsen'a göre çekirdek türleri [23]

Bal peteği yapılarında dayanım ve rijitlik (basma ve kesme) yoğunlukla orantılıdır. Büyük hücre boyutu daha düşük maliyetli bir tercihtir fakat yüzey tabaka inceyse çekirdekteki büyük boşluklarda girinti oluşturabileceği için pürüzlü bir yüzey oluşturabilir. Küçük hücre boyutu yüzeyde girinti olmasını engeller ve daha büyük bir yapıştırma alanı sağlar fakat daha pahalı bir tercihtir. Aynı zamanda büyük hücreli bal peteğine göre daha ağır bir çözüm olacaktır. Altıgen bal peteği yapılar en düşük yoğunluğu verir ama üretim olarak dikdörtgen bal peteği yapısı en kolay bal peteği yapıdır.

3.1.4. Yapıştırıcılar

Sandviç yapılarda yapıştırıcıların ya da yapıştırma katmanının rolü yüzey ve çekirdek katmanların çalışabilir şekilde bir arada olmasını sağlamaktır. Yüzey ve çekirdek katmanının arasında bulunan yapıştırıcı, yüzey ve çekirdek arasında kesme kuvvetini transfer edebilmelidir. Aynı zamanda kesme ve çekme streslerine dayanabilmelidir. En basit haliyle; yapıştırıcının, çekirdek yapıdaki kadar kesme stresine dayanabilmelidir [24]. Fenolik gibi bazı yapıştırıcı türleri kürleme sırasında buhar açığa çıkarırlar. Bu buhar

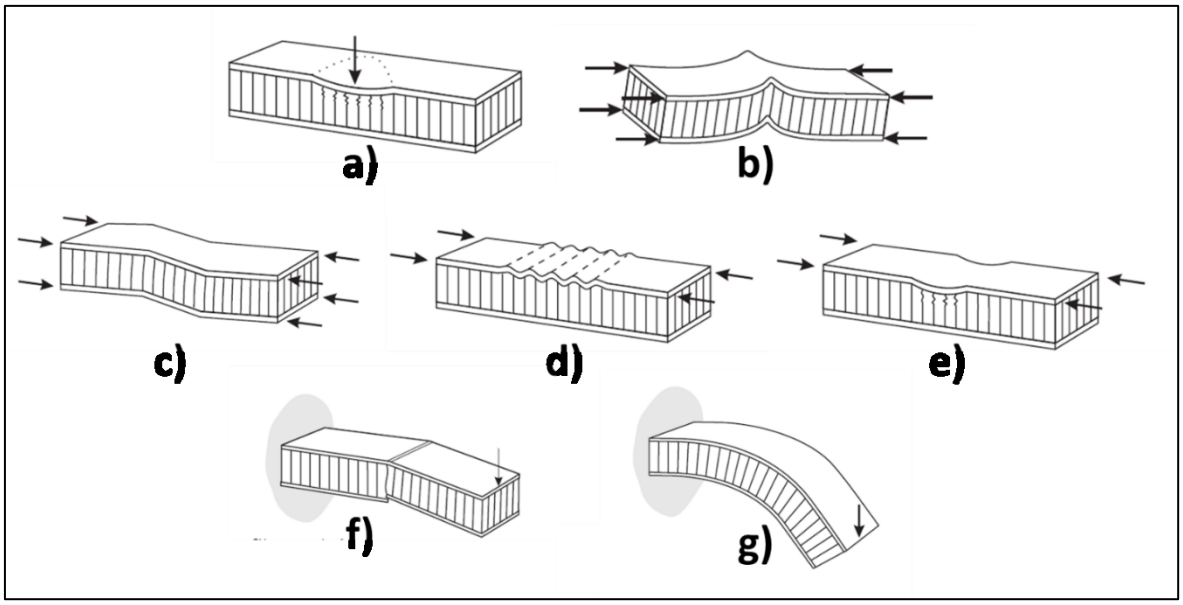
yapıda hapsolursa bazı bölgelerde hatalı ya da hiç yapışmama gibi ve oluşan basıncın çekirdek malzemesine zarar vermesi gibi bazı problemlere yol açabilir. Yaygın olarak kullanılan yapıştırıcılar [18]:

1. Nitril Fenolik
2. Vinil Fenolik
3. Epoksi
4. Üretan
5. Polimid
6. Poliamid

3.1.5. Sandviç panellerin hasar modları

Sandviç yapılar maruz kaldıkları yüklere ve bu yüklerin kombinasyonuna bağlı olarak farklı hasar modları göstermektedir. Sandviç panellerin kırılım modları Şekil 3.6'da sırasıyla görülmektedir;

- Lokal basma: Çekirdek basma dayanımı panel yüzeyine uygulan lokal yüklere karşı koyabilmelidir.
- Panel burkulması: Basma yükünün oluşturacağı burkulmaya dayanabilecek çekirdek kalınlığı ve kesme modülü olmalıdır.
- Kesme kıvrımı: Çekirdek kalınlığının ve kesme modülünün, çekirdeğin basma yükü altında erken hasara uğramasını engelleyecek seviyede olmalıdır.
- Hücreler arası burkulma: Bal peteği yapının hücre boyutu, hücreler arası burkulmayı engelleyecek kadar küçük olmalıdır.
- Yüzey tabakada çökme: Yüzeyin basma modülü ve çekirdeğin basma dayanımı yüzey tabakada çökmeye karşı yeterince yüksek olmalıdır.
- Yüzey basma: Yüzey ve çekirdek malzemeleri, tasarım yükü tarafından oluşturulan çekme, basma ve kesme streslerine dayanabilmelidir. Yüzey ile çekirdeği birbirine bağlayan yapıştırıcı yüzey ve çekirdek arasında oluşan kesme streslerine dayanabilmelidir.
- Aşırı sehim: Sandviç panel yüksek sehime dayanabilmek için yeterli eğilme ve kesme rijitliğine sahip olmalıdır.



Şekil 3.6. Sandviç yapılarının hasar modları [17]

3.1.6. Sandviç yapılarının kullanım alanları

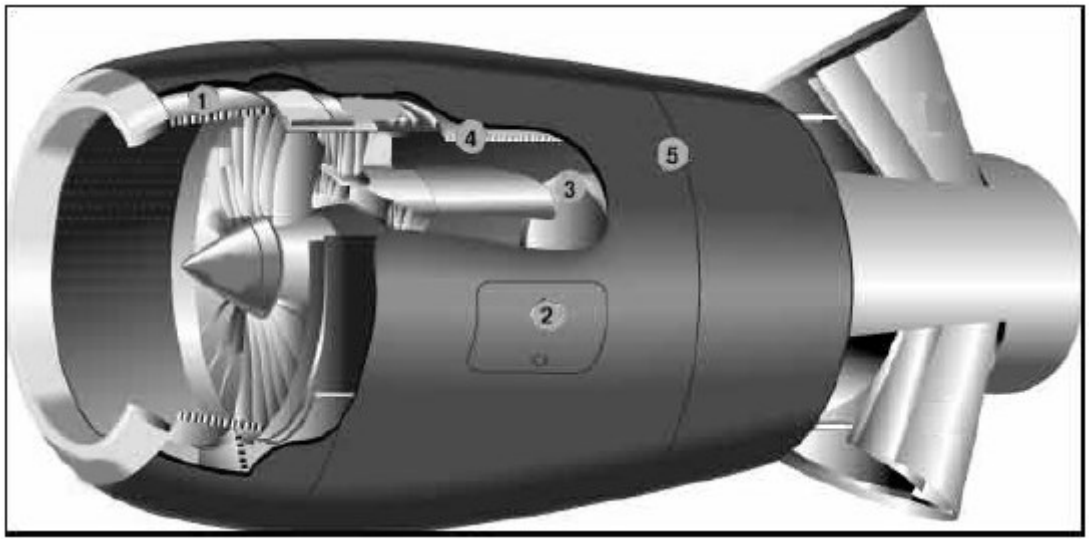
Havacılık ve uzay

Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 ticari hava araçlarındaki sandviç panellerinin kullanıldığı kısımları göstermektedir.



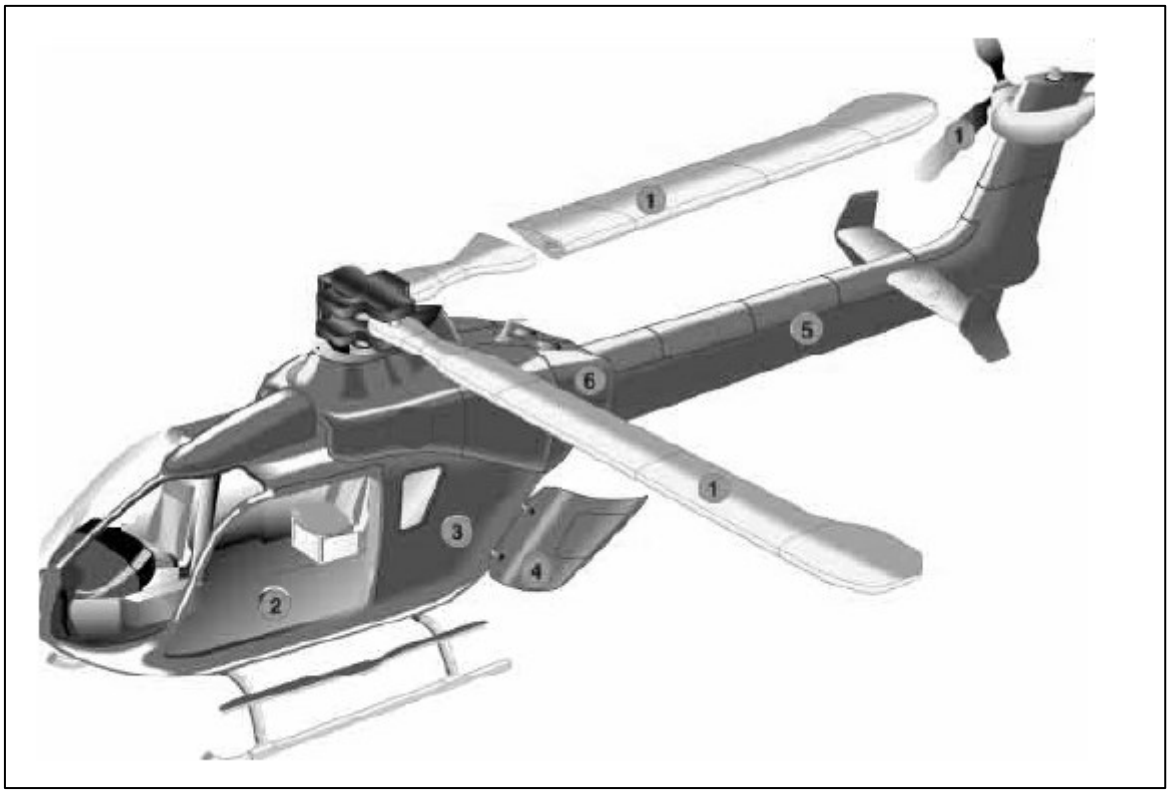
Şekil 3.7. Ticari Uçaklarda sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Radom: Özel cam prepreg ve esnek (Flexcore) bal peteği
2. İniş takımı kapısı ve bağlantı bölgesi: Cam/karbon prepreg ve bal peteği
3. Mutfak, tuvalet ve dolap: Sandviç panel
4. Bölmeler: Sandviç panel
5. Kanat ile gövde arasındaki kaporta: Karbon/cam/aramid prepreg bal peteği.
6. Kanat Montajı: Karbon/cam prepreg aramid bal peteği
7. Uçuş kontrol yüzeyleri: Cam/karbon/aramid prepreg bal peteği
8. Yolcu bölümü zemini: Sandviç panel
9. Motor kaportası ve itki yönlendirici: Karbon/cam prepreg aramid bal peteği
10. Kargo zemini: Sandviç panel
11. Kafa üstü bagaj bölümü: Sandviç panel
12. Hava merdiveni: Sandviç panel
13. Yön dümeni: Karbon/cam prepreg bal peteği çekirdek
14. Yükseliş dümeni: Karbon/cam prepreg bal peteği çekirdek



Şekil 3.8. Jet motorunda sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Akustik kaplama paneli: Karbon/cam prepreg ve alüminyum bal peteği
2. Motor ulaşma kapısı: Woven ve UD karbon/cam prepreg ve bal peteği çekirdek
3. Kompresör kaportası: BMI/epoksi karbon prepreg ve bal peteği çekirdek
4. Baypas kanalı: Epoksi karbon prepreg, metalik olmayan bal peteği
5. Motor kaportası: Karbon/cam prepreg ve bal peteği



Şekil 3.9. Helikopterlerde sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Rotor Bıçakları: Prepreg/karbon/cam ve makine ile işlenmiş aramid bal peteği çekirdek
2. Zemin: Sandviç panel
3. Gövde: Karbon ve cam prepreg ve bal peteği çekirdek
4. Ana ve kargo kapısı: Epoksi karbon/cam prepreg ve bal peteği çekirdek
5. Kuyruk bölümü: Epoksi karbon/cam prepreg ve bal peteği çekirdek
6. Gövde panelleri: Epoksi karbon/cam prepreg, aramid bal peteği çekirdek

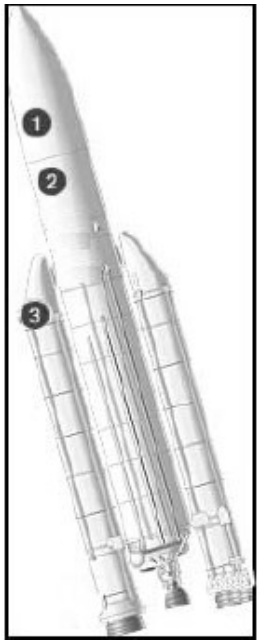
Uzay ve savunma

Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 sandviç panellerinin uzay ve savunma sistemlerindeki kullanım alanlarını göstermektedir.



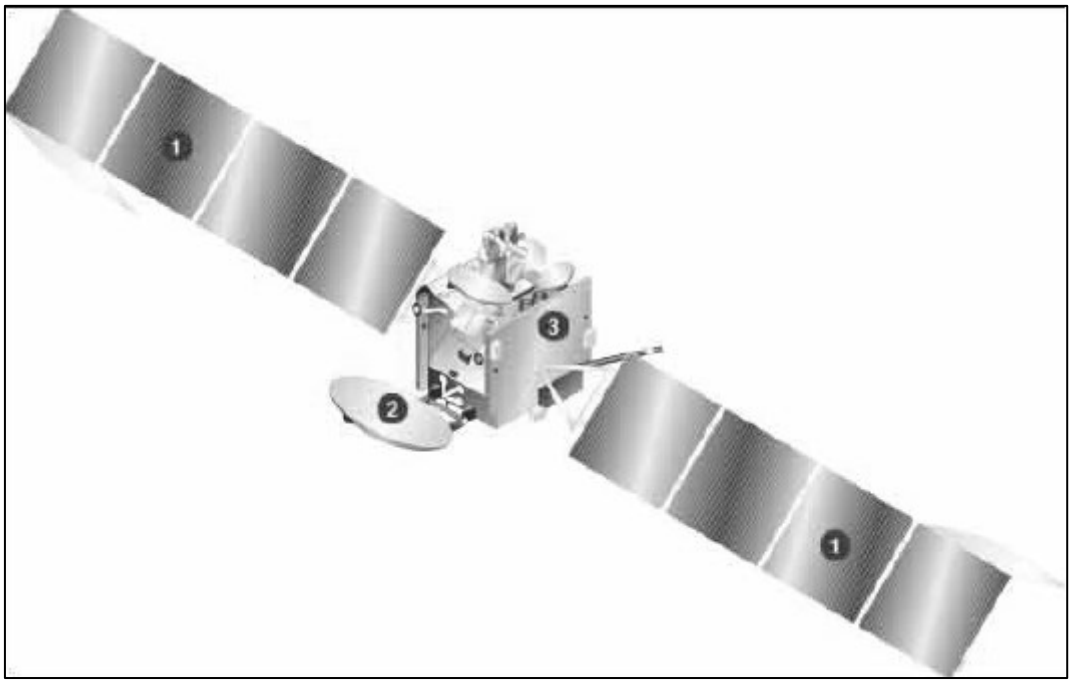
Şekil 3.10. Savaş Uçaklarında sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Gövde panel bölümleri: Karbon prepreg ve metalik olmayan bal peteği sandviç yapı kullanılmaktadır.
2. Uçuş kontrol yüzeyleri: Karbon prepreg ve metalik olmayan bal peteği sandviç yapı kullanılmaktadır.



Şekil 3.11. Fırlatıcılarda sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Kaporta: Karbon prepreg ve alüminyum bal peteği sandviç yapı
2. Dış yük taşıma bölümü: Karbon prepreg ve alüminyum bal peteği sandviç yapı
3. Yardımcı itici kaportaları: Cam ve metalik olmayan bal peteği sandviç yapı



Şekil 3.12. Uydularda sandviç panel kullanılan parçalar [25]

1. Güneş panelleri: Karbon prepreg ve aluminum bal peteği sandviç yapı
2. Reflektör antenler: Aramid prepreg veya karbon prepreg, aramid/alüminyum bal peteği sandviç yapı
3. Uydu yapısı: Karbon prepreg ve alüminyum bal peteği sandviç yapı

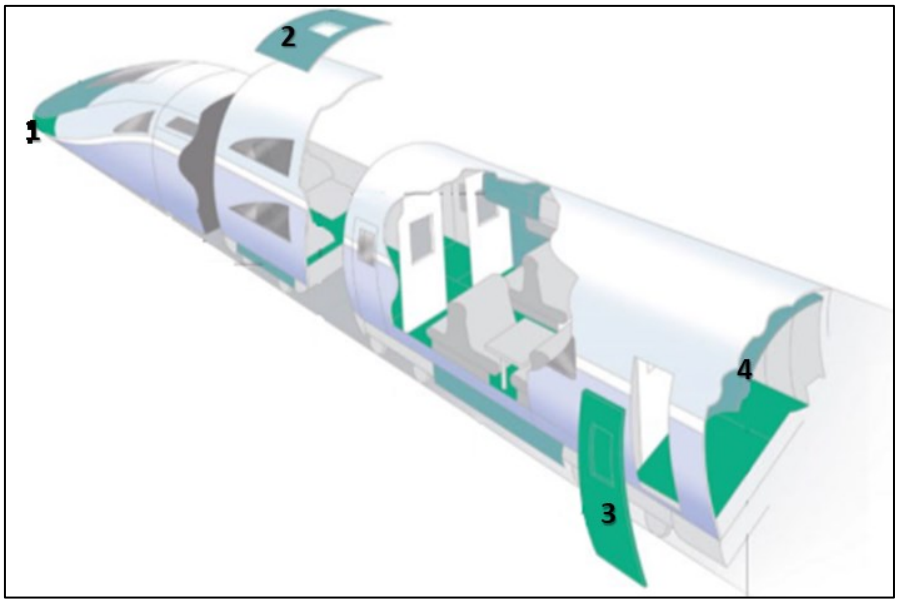
Gemi ve tren

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 sandviç panellerinin gemi ve trenlerde kullanılan kısımlarını göstermektedir.



Şekil 3.13. Gemilerde sandviç panel kullanılan parçalar [26]

1. Direk ve seren: Karbon Cam, Woven/UD. Nomex bal peteği sandviç yapı
2. Omurga ve güverte: Karbon/cam Prepreg Nomex bal peteği sandviç yapı

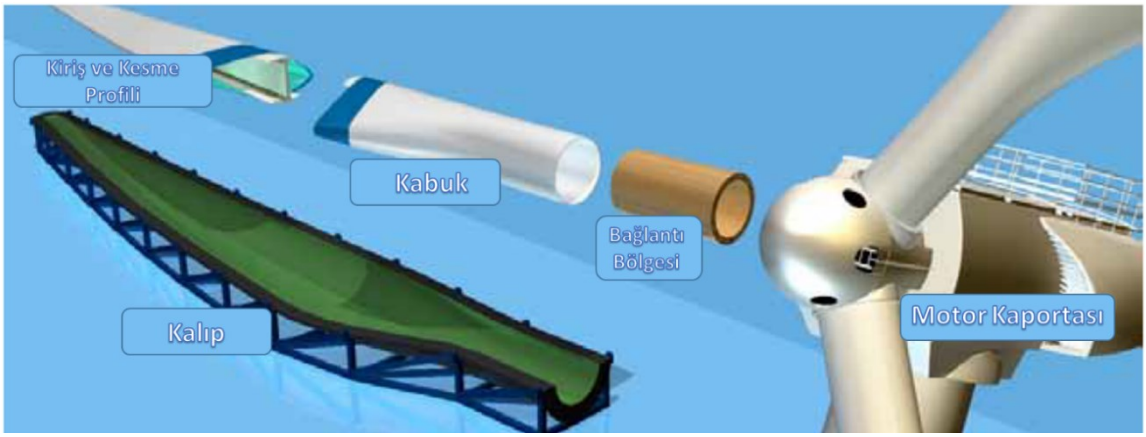


Şekil 3.14. Tren vagonunda sandviç panel kullanılan parçalar [26]

1. Enerji emici, Makinist Koruyucu: Çarpışmaya yönelik metalik bal peteği ve karbon prepreg
2. Tavan paneli: Karbon prepreg ve bal peteği sandviç yapı
3. Dış kapı: Alüminyum veya metalik olmayan bal peteği ile hazırlanmış sandviç yapı
4. Birleşim kemeri: Karbon prepreg ve bal peteği sandviç yapı

Rüzgar türbinleri

Şekil 3.15 sandviç panellerinin rüzgar türbinlerinde kullanılan kısımlarını göstermektedir.

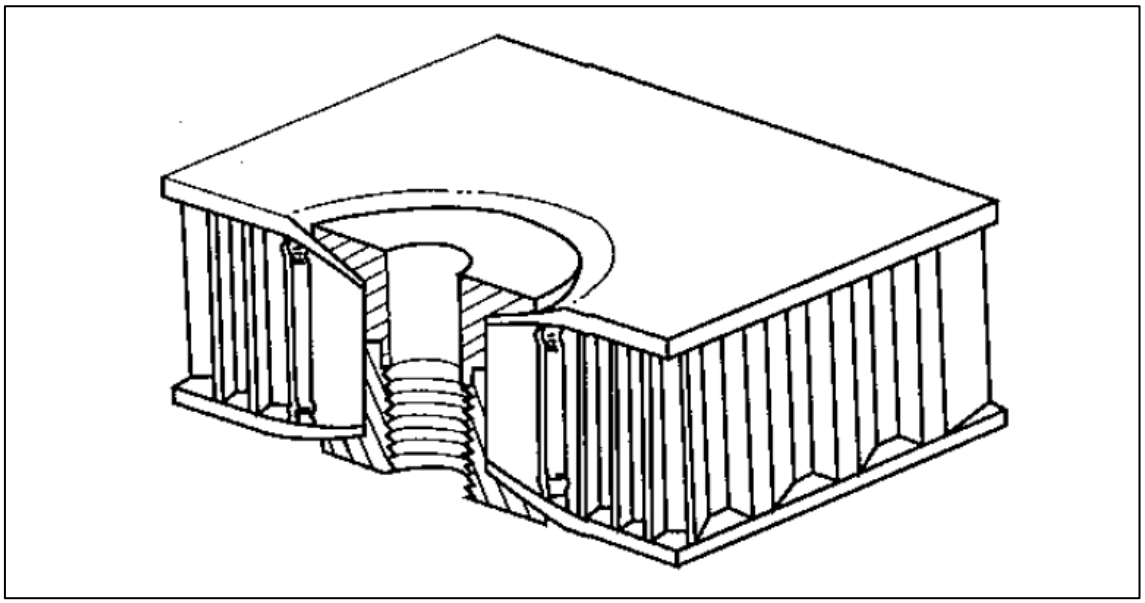


Şekil 3.15. Rüzgar türbinlerinde sandviç panel kullanılan parçalar [26]

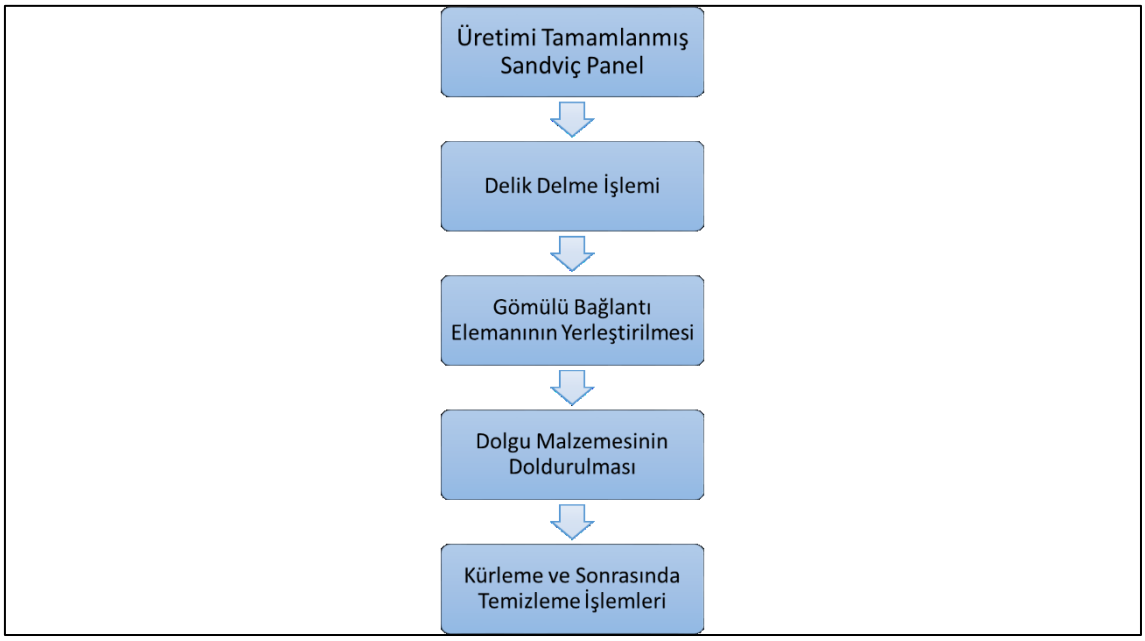
1. Kabuk: katmanlı yüzey, düşük yoğunluklu katı köpük ya da balsa çekirdek
2. Motor kaportası: ıslak reçineli yüzey ile köpük çekirdek malzeme
3. Kalıp: Kompozit yüzey ve alüminyum çekirdek malzeme

3.2. Birleştirme Metodu

Birleştirme metodu sandviç yapıyla gömülü bağlantı elemanını bir arada tutan yapıştırıcı bir dolgu malzeme veya mekanik bir yöntem olabilir. ECSS [1] gömülü bağlantı elemanlarını birleştirme işlemine göre sınıflara ayırmıştır. Şekil 3.16'de mekanik birleştirme yöntemi kullanılan bir gömülü bağlantı elemanı figürü görülmektedir. Dolgu malzemesi olarak genellikle dolgu işlemlerine uygun reçine veya köpük yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Köpük dolgu malzemeleri panel üretimi esnasında entegre edilen gömülü bağlantı elemanları için kullanılırken reçine sistemler daha önce üretilmiş sandviç yapılara entegre edilecek gömülü bağlantı elemanları için kullanılır. Reçine dolgu malzemesi kullanılan gömülü bağlantı elemanları için entegrasyon işlem basamakları Şekil 3.17'de görülmektedir. Üretimi tamamlanmış olan sandviç yapıya delik açılır ve gömülü bağlantı elemanı yerleştirilir. Daha sonra gömülü bağlantı elemanında bulunan küçük deliklerden dolum işlemi gerçekleştirilir. Dolum işlemi tamamlandıktan sonra kürleme ve temizleme işlemleri gerçekleştirilir. Şekil 3.18'deki a figüründe ise sandviç yapıda delik açma işlemi görülmektedir.



Şekil 3.16. Mekanik birleştirme yöntemi kullanılmış gömülü bağlantı elemanı [27]



Şekil 3.17. Gömülü bağlantı elemanı entegrasyon prosesi [1]

Birleştirmede kullanılan yapıştırıcı dolgu malzeme genel olarak 4 farklı şekilde uygulanabilmektedir [1]. Bunlar;

• Döküm,
• Enjeksiyon,
• Köpükle doldurma,
• Macun uygulamasıdır.

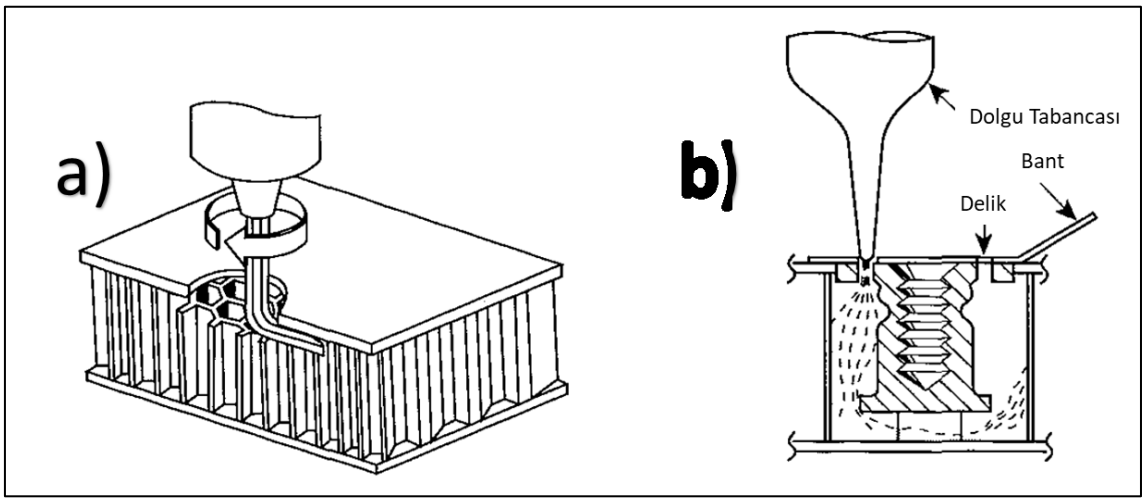
Döküm yöntemi reçine huni aparatı ile uygulanmaktadır. Tam dolum işleminde yüksek dolum kalitesi gösterir ve bu tarz gömülü bağlantı elemanları için uygulanabilir olmasına rağmen elverişli bir metot değildir. Dolum boyunca her gömülü bağlantı elamanı üzerinde bir hazne olmalıdır. Kısmi dolum işlemlerinde kötü kalite göstermektedir ve pek kullanılmaz.

Enjeksiyon yöntemi basınçlı hava tabancası ya da şırınga ile uygulanmaktadır ve hem tam hem kısmi dolum işlemleri için iyi dolum kalitesi göstermektedir. Basınçlı hava tabancası ile yapılan uygulama yüksek miktarda gömülü bağlantı elemanı üretilirken oldukça ekonomiktir. Şırınga ile yapılan dolum işlemi az miktarda gömülü bağlantı elemanı

üretilirken ya da tamir işlemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 3.18'deki b figüründe tabancayla dolgu malzemesinin doldurulma işlemi görülmektedir.

Köpükle doldurma işlemi panel üretilirken uygulanan bir işlemdir ve sadece tam dolum işleminde kullanılır. İyi dolum kalitesi gösterir.

Macun metodu ıspatula kullanılarak yapılır ve kötü dolum kalitesi gösterir. Bal peteği hücrelerini doldurmak gibi standart olmayan işlemler için tavsiye edilir.

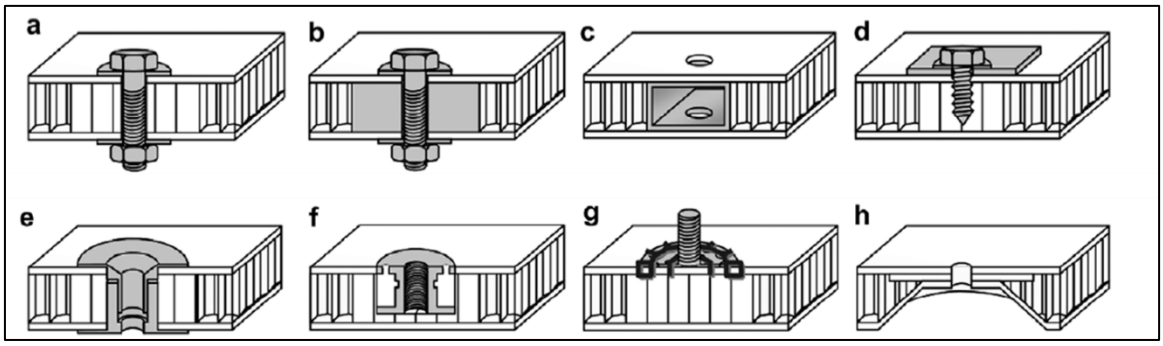


Şekil 3.18. a) Sandviç yapıda delik açma işlemi, b) dolgu malzemesinin doldurulması [27]

3.3 Gömülü Bağlantı Elemanları

3.3.1 Gömülü bağlantı elemanı tipleri

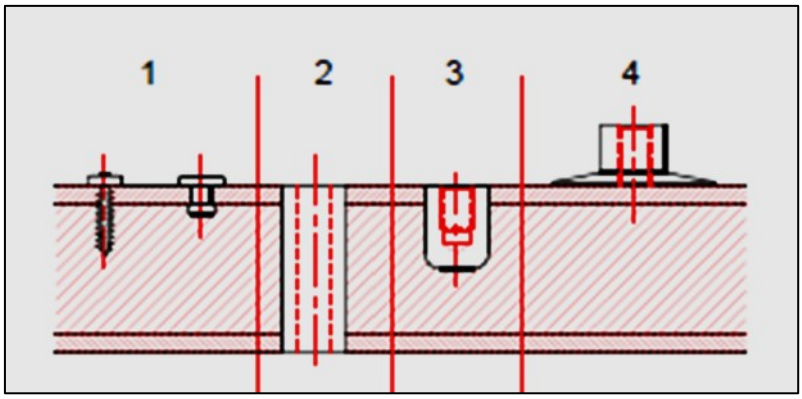
Sandviç yapılar yaygın olarak kullanılmaya başlandıktan sonra, sandviç yapılarla diğer yapısal parçaları ya da ekipmanları bağlarken kullanılacak bağlantı metotları çalışılmaya başlanmıştır. Şekil 3.19'da literatürde geçen sandviç yapılarda kullanılan bağlantı çeşitleri görülmektedir. Şekilde bulunan a, b, c, e ve h tip gömülü bağlantı elemanları panel boyunca delik olup farklı metotlarla sandviç yapıya entegre edilmiştir. f ve d tipi ise panel boyunca delik istenmeyen konumlarda kullanabilen tiplerdir. g tipi Zenkert[28]'in de dediği gibi tam olarak bir gömülü bağlantı elemanı tipi olmasa da sandviç yapının bir yüzeyine yapıştırılarak bağlantı için kullanılan bir tiptir.



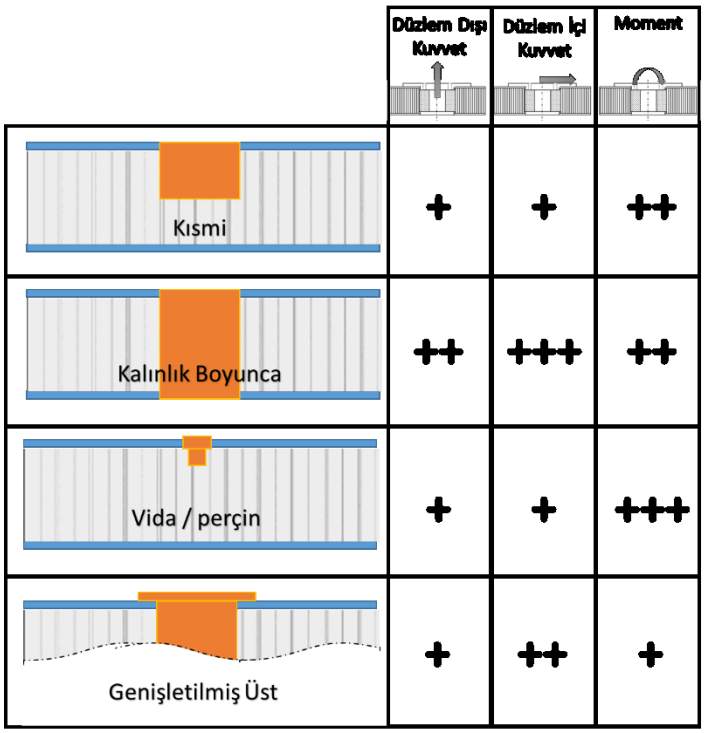
Şekil 3.19. Sandviç panellerde bağlantı şekilleri [10]

Gömülü bağlantı elemanı bağlayıcılarının sandviç panellerdeki kullanım çeşitliliğinden kaynaklı oldukça farklı tipleri mevcuttur. Gömülü bağlantı elemanları için sahip oldukları boy, biçim, üretim şekli ve bağlama metodu gibi özelliklere göre farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır. Zenkert [28] gömülü bağlantı elemanları geometrik şekillerine göre sınıflandırmıştır (Şekil 3.20). Bu kategoriler:

1- Kendinden kılavuz açan vida ya da perçin; düşük düzlem dışı ve düzlem içi dayanım gösteren bu tip yüksek moment dayanımı göstermektedir. Yapısı gereği sadece bir yüzeyi etkilemektedir.
2- Panel kalınlığı boyunca gömülü bağlantı elemanı; yüksek düzlem içi dayanım gösterirken ortalama düzlem dışı ve moment dayanımına sahiptir. Hem iki yüzeye hem de çekirdeğe bağlıdır.
3- Kısmi dolgulu gömülü bağlantı elemanı; görece düşük düzlem içi ve dışı dayanım gösterirken moment dayanımı görece iyidir Üst yüzeyi ve çekirdeği etkiler.
4- Genişletilmiş silindir (üst şapka) bir yüzeye üsten yapıştırılmıştır. Görece iyi düzlem içi dayanımı gösterirken düşük düzlem dışı ve moment dayanımı göstermektedir. Performans kıyaslaması Şekil 3.21'de görülmektedir.

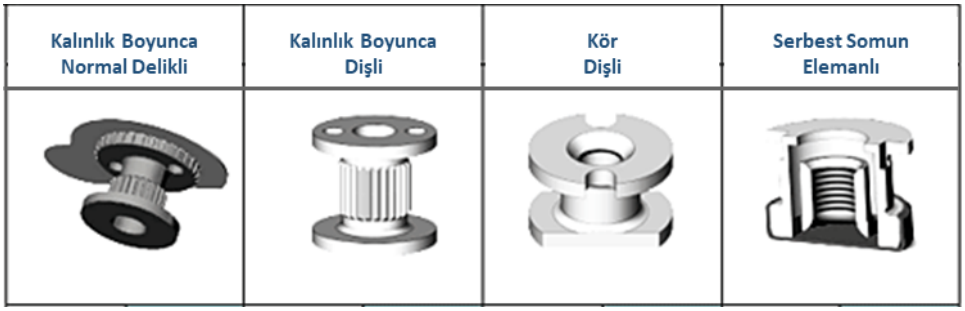


Şekil 3.20 Zenkert'e göre gömülü bağlantı elemanı türleri [28]



Şekil 3.21. Zenkert'e göre gömülü bağlantı elemanlarının dayanım kıyaslanması [28]

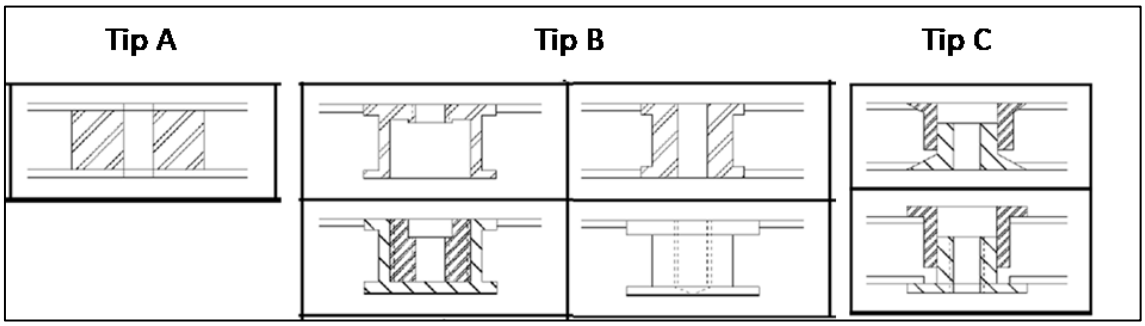
SHUR-LOK şirketinin yayınladığı sandviç yapılar için bağlayıcı tasarım el kitabında [29] gömülü bağlantı elemanı uygulamalarını dört sınıfa ayırmıştır. Bunlar; panel boyunca dişsiz, panel boyunca dişli, kör dişli ve dinamik somunlu gömülü bağlantı elemanlarıdır ve hem mekanik hem yapıştırılan uygulamaları mevcuttur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. SHUR-LOK Firmasına göre gömülü bağlantı elemanı tipleri [30]

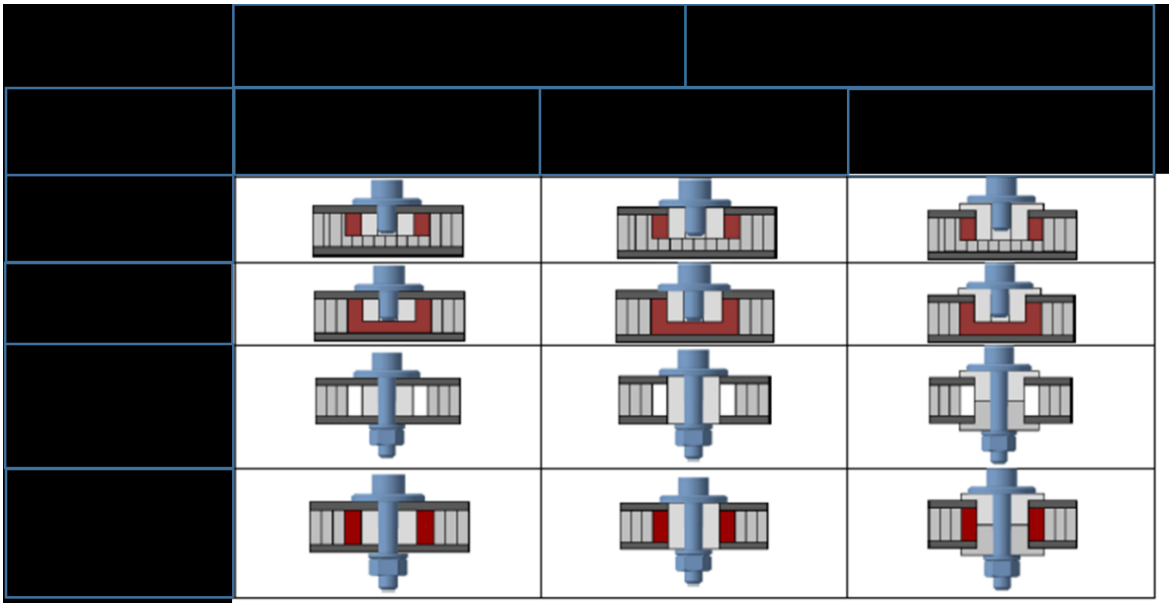
ECSS (European Cooperation for Space Standardization) gömülü bağlantı elemanı el kitabına [1] göre gömülü bağlantı elemanları entegrasyon metoduna göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflama şu şekildedir:

- Tip A: Sandviç üretimi sırasında aynı zamanda yapıştırılan
- Tip B: Var olan sandviçe termoset reçine kullanarak yapıştırılan, örneğin; Standart gömülü bağlantı elemanları için sıradan dolgu malzemesi işlemi ve standart olmaya gömülü bağlantı elemanları için eşdeğer yapıştırma işlemi
- Tip C: Var olan sandviçe mekanik bağlama ya da vidalama ile hazırlanan gömülü bağlantı elemanlarıdır.



Şekil 3.23 ECSS'e göre gömülü bağlantı elemanı tipleri [1]

Wolff [30] yukarda bahsedilen nerdeyse tüm sınıflandırma yöntemlerini Şekil 3.24'te özetlemiştir. Bu özet tabloya göre gömülü bağlantı elemanları ilk önce kısmi dolgulu, tam dolgulu, panel kalınlığı boyunca dolgu malzemeli ve dolgu malzemesi olacak şekilde dörde ayrılmıştır ve daha sonra üretim metodu ve bundan kaynaklı gömülü bağlantı elemanının sandviç yapıya göre boyu göz önüne alınarak örnekler verilmiştir. Üretim metodları sıcak ve soğuk yapıştırma olarak ikiye ayrılmıştır.

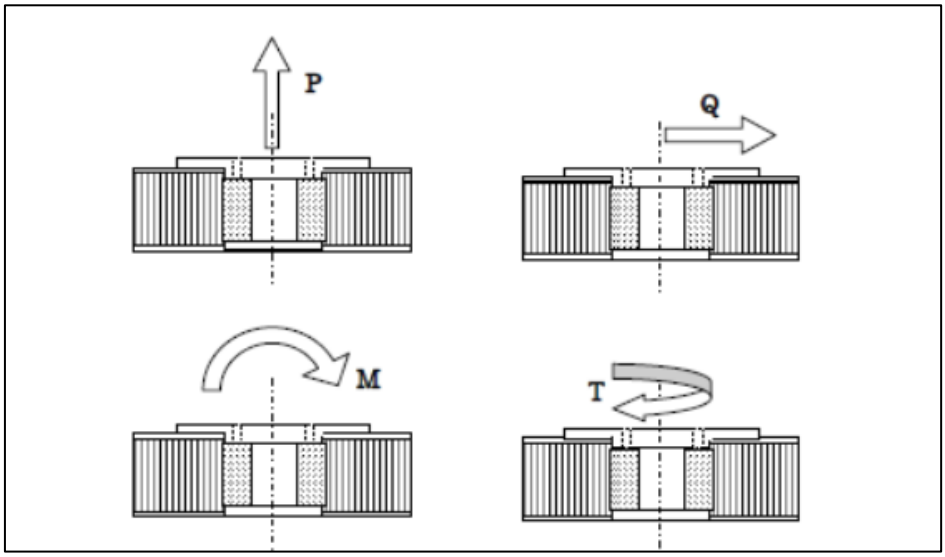


Şekil 3.24. Farklı özelliklere göre gömülü bağlantı elemanı sınıflandırması [31]

3.3.2 Gömülü bağlantı elemanı yükleme şekilleri

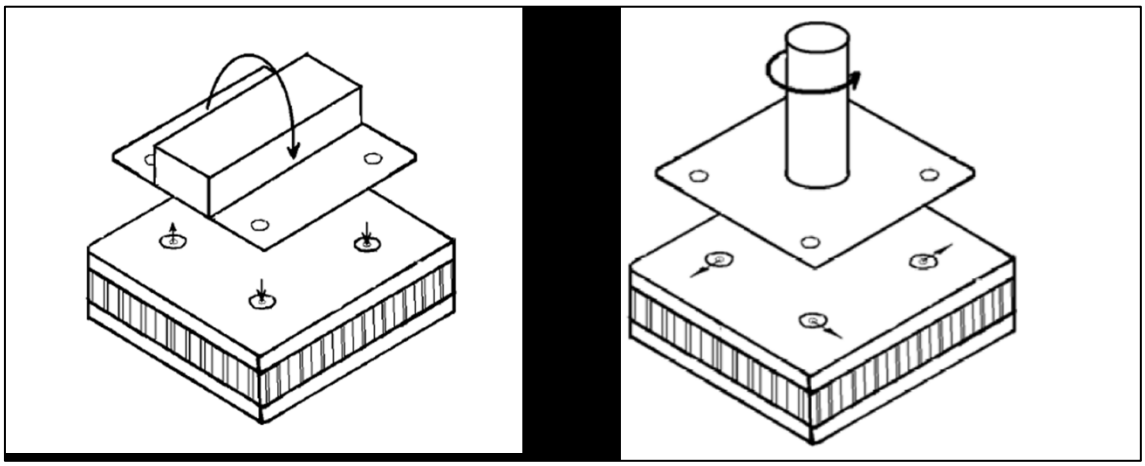
Gömülü bağlantı elemanlarına dört farklı şekilde yük uygulanabilir;

• Çekme (Düzlem dışı)
• Kesme (düzlem içi)
• Moment
• Tork



Şekil 3.25. Gömülü bağlantı elemanlarına gelen yükleme şekilleri [1]

Gömülü bağlantı elemanlarının üzerine tork ve moment yükleri de uygulanabilmesine rağmen farklı uygulamalar ile bu yükler kesme ve çekme yüklerine dönüştürülebilmektedir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 Gömülü bağlantı elemanlarına gelen eğilme ve döndürme yüklerinin düzlem içi ve dışı yüklere dönüştürüldüğü uygulamalar [1]

4. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI ANALİTİK MODELLEMELERİ

Sandviç paneller popüler olduğundan bu yana gömülü bağlantı elemanının dayanımını hesaplamak önemli bir ihtiyaç olmuştur. Bu yüzden gömülü bağlantı elemanı dayanımı hesaplayan ve tahmin eden birçok çalışma yapılmıştır. Gömülü bağlantı elemanlarının dayanımı hem alt elemanlara hem de bu elemanların birbiriyle olan ilişkilerine bağlıdır.

Bu bölümde sandviç panellerdeki gömülü bağlantı elemanlarının dayanımını tahmin etmek için kullanılan en yaygın analitik yöntemler açıklanacaktır. Çoğu durumda ilk hasar gösteren bölge sandviç panel çekirdeği olduğu için metotlar çekirdekteki kesme gerilimi analizi üzerine odaklanmaktadır.

4.1. Ericksen Modeli

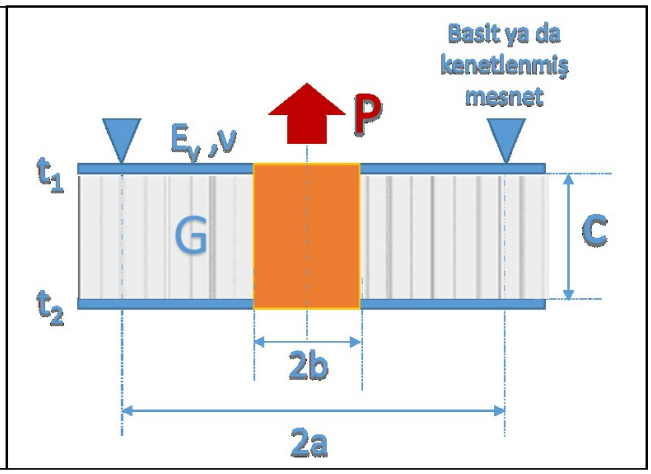
1953 yılında U.S. Forest Üretim Laboratuvarı sandviç yapılardaki gömülü bağlantı elemanı üzerine gelen eğilme gerilimini hesaplama hakkında bir çalışma yayımlamıştır. Ericksen tarafından yazılan çalışma "normal yükleme altındaki dairesel panelin eğilmesi" başlığıyla yayımlanmıştır [32]. Bu çalışma panelin çekirdeğindeki kesme gerilimi dağılımını gösteren ilk analitik formülasyonu tanımlayan ve çekirdekteki hasara dayalı olarak gömülü bağlantı elemanı dayanımının tahminini yapan ilk çalışmadır. Bu yaklaşım aynı zamanda eğilme ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan paneldeki sehimi de hesaplamaktadır. Amaç tasarım için faydalı olabilecek değerlendirmeleri sağlamaktır. Bu çalışmada birçok kabul yapılmıştır:

- Çekirdek ve yüzey malzemesi izotropiktir ve yüzey tabakaların eşit kalınlıkta olduğu kabul edilir.
- Çekirdeğin eğilme etkisi ihmal edilir.
- Çekirdekteki enine kesme gerilimi çekirdeğin kalınlığı boyunca sabittir.
- Yüzey tabakadaki enine kesme gerinimleri ihmal edilir.
- İki yüzey tabakası aynı eğriliğe sahiptir.
- Çekirdeğin kalınlığı burkulma altında aynı kalır.

Bu çalışmada sunulan denklemler homojen dairesel plakanın eğilme teorisini temel almaktadır. Gömülü bağlantı elemanının varlığı denkleme panelin merkezine spesifik sınır

koşulları tanımlayarak dahil edilmiştir. Ericksen modeli panelin merkezinde yer alan b yarıçapına sahip panel boyunca olan gömülü bağlantı elemanı üzerine P kuvvetinin uygulandığını ve a yarıçapında test fikstürünü temsil edecek bir sınır şartı olduğunu varsayar. Bu varsayımlar gömülü bağlantı elemanı düzlem dışı çekme testini yeterli şekilde temsil eder. A yarıçapındaki test fikstürü kenetlenmiş ve basit mesnet olacak şekilde iki farklı sınır şartına sahiptir. Ericksen modelindeki parametreler Şekil 4.1'de görülmektedir.

a: Fikstür yarıçapı
b: Gömülü bağlantı elemanı yarıçapı
P: Uygulanan yük
c: Çekirdek yüksekliği
G: Çekirdeğin kesme modülü
E_y: Yüzey tabakanın Elastik modülü
N: Yüzey tabakanın Poisson oranı
t_1 ve t_2 : Üst ve alt yüzey tabaka kalınlığı



Şekil 4.1. Ericksen modelindeki değişkenler

Ericksen'in çalışmasında elde ettiği son formül için öncesinde panel ataleti gibi bazı parametrelerin hesaplanması gerekmektedir:

$$I_m=\frac{t_1 t_2\left(c+\frac{t_1+t_2}{2}\right)^2}{t_1+t_2} \tag{4.1}$$

$$I_l=\frac{t_1^3+t_2^3}{12} \tag{4.2}$$

$$I=I_m+I_l \tag{4.3}$$

$$E=\frac{E_y}{1-v^2} \tag{4.4}$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{G(t_1+t_2)I}{Ect_1t_2}} \tag{4.5}$$

Burada I_m yüzey tabakaların panel merkez çizgisine göre atalet momenti ve I_l yüzey tabakaların kendi merkezi çizgilerine göre atalet momentidir.

Sonuç olarak Ericksenin ulaştığı formüller:

Kenetlenmiş mesnet sınır şartları için çekirdekteki kesme gerilimi;

$$\tau(r)=\frac{PI_m}{2\pi I\left(c+\frac{f_1+f_2}{2}\right)}\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{r}-\frac{I_1(\alpha r)}{ab}\left[\frac{bK_1(\alpha b)-aK_1(\alpha a)}{I_1(\alpha a)K_1(\alpha b)-I_1(\alpha b)K_1(\alpha a)}\right]-\\ \frac{K_1(\alpha r)}{ab}\left[\frac{aI_1(\alpha a)-bI_1(\alpha b)}{I_1(\alpha a)K_1(\alpha b)-I_1(\alpha b)K_1(\alpha a)}\right]\end{array}\right\} \tag{4.6}$$

Basit mesnet sınır şartları için çekirdekteki kesme gerilimi;

$$\tau(r)=\frac{PI_m}{2\pi I\left(c+\frac{f_1+f_2}{2}\right)}\left(\frac{1}{r}-A+B\right) \tag{4.7}$$

Eşitlikte yer alan A ve B ise;

$$A=\frac{I_1(\alpha r)}{\alpha ab^2}\left[\frac{\alpha b^2\left[K_0(\alpha b)-(1-v)\frac{K_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]+a(1-v)K_1(\alpha a)}{I_1(\alpha a)\left[K_0(\alpha b)-(1-v)\frac{K_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]-K_1(\alpha a)\left[I_0(\alpha b)-(1-v)\frac{I_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]}\right] \tag{4.8}$$

$$B=\frac{K_1(\alpha r)}{\alpha ab^2}\left[\frac{a(1-v)I_1(\alpha a)+\alpha b^2\left[I_0(\alpha b)-(1-v)\frac{I_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]}{I_1(\alpha a)\left[K_0(\alpha b)-(1-v)\frac{K_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]-K_1(\alpha a)\left[I_0(\alpha b)-(1-v)\frac{I_1(\alpha b)}{\alpha b}\right]}\right] \tag{4.9}$$

Burada I ve K sırasıyla birinci ve ikinci derecen modifiye edilmiş Bessel fonksiyonları temsil etmektedir (Eş. 4.10, Eş. 4.11).

$$I_n(x)=\left\{\begin{array}{ll}\left(\frac{x}{2}\right)^n+\frac{1}{(n+1)!}\left(\frac{x}{2}\right)^{n+2} & n=0,\ 1 \quad \text{If } x<1\\ \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}} & n=0,\ 1 \quad \text{If } x>1\end{array}\right\} \tag{4.10}$$

$$K_n(x)=\begin{Bmatrix} -\log\frac{x}{2}-\gamma-\frac{x^2}{4}\left(\log\frac{x}{2}+\gamma-1\right) & n=0 \quad \text{If } x<1 \\ -\frac{1}{x}-\frac{x}{2}\left(\log\frac{x}{2}+\gamma-\frac{1}{2}\right) & n=1 \quad \text{If } x<1 \\ e^{-x}\cos(n\pi)\sqrt{\frac{\pi}{2x}} & n=0,\ 1 \quad \text{If } x>1 \end{Bmatrix} \tag{4.11}$$

Burada ϒ Euler sabitidir ve ϒ=0.57772'dir

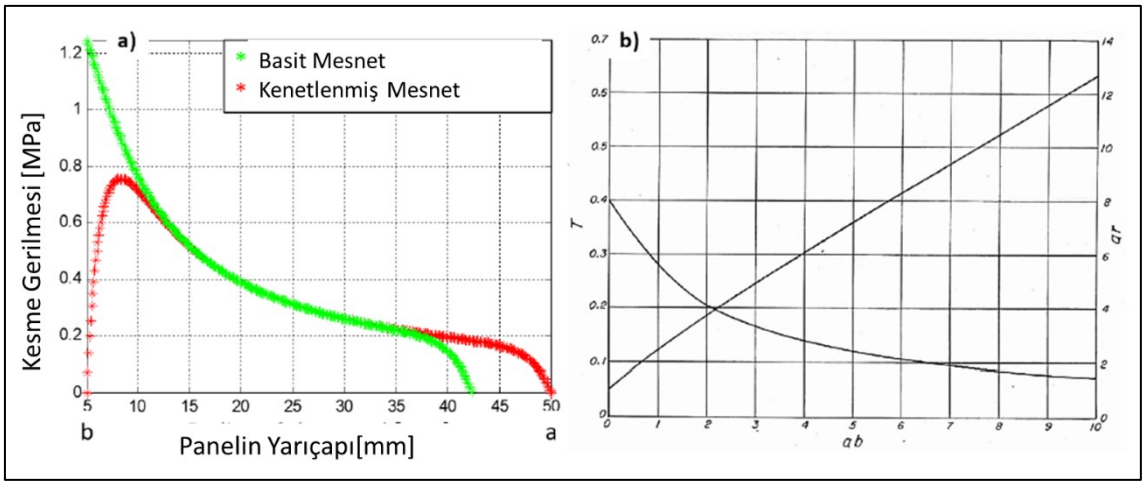
Bu modeldeki en önemli özellik, düzlem dışı çekme kuvveti altında çekirdekteki en büyük kesme geriliminin tahmin edilebilmesinden dolayı çekirdeğin izin verilen kesme gerilimi ile kıyaslanarak ilk tasarımda kullanılabilir olmasıdır.

Bu modelle ilgili önemli bir husus ise kenetlenmiş mesnet için en büyük kesme geriliminin gömülü bağlantı elemanı ile çekirdek ara yüzünde olmamasıdır.Ayrıca önemli olan diğer bir durum ise iki mesnet tipi için en büyük kesme gerilimin farklı yerlerde olmasıdır ve kenetlenmiş mesnet için gömülü bağlantı elemanı ve çekirdek ara yüzündeki kesme gerilimi sıfır bulunmaktadır. Her iki mesnet tipi için de gerilim dağılımı Şekil 4.2.a'da görülmektedir.

Denklemlerde karışıklıklardan dolayı, en büyük kesme kuvveti hesabı yapılırken karmaşaya sebep olan terimlerin birçoğu gömülü bağlantı elemanın şekil parametrelerine bağlı olacak şekilde bir T katsayı olarak gösterilmiştir. Fakat bu sadece kenetlenmiş mesnet için uygulanmıştır (Eş.4.12). T sayısını belirlemek için kullanılan grafik Şekil 4.2.b'de görülmektedir.

$$\tau_{maks}=\frac{PI_m\alpha}{2\pi I\left(c+\frac{t_1+t_2}{2}\right)}T \tag{4.12}$$

Aynı model 1973 yılında aynı laboratuvarda çalışan mühendis Montrey tarafından tekrar ele alınmıştır [33]. Aynı denklemler farklı bir notasyonla daha kolay bir şekilde yazılmıştır.



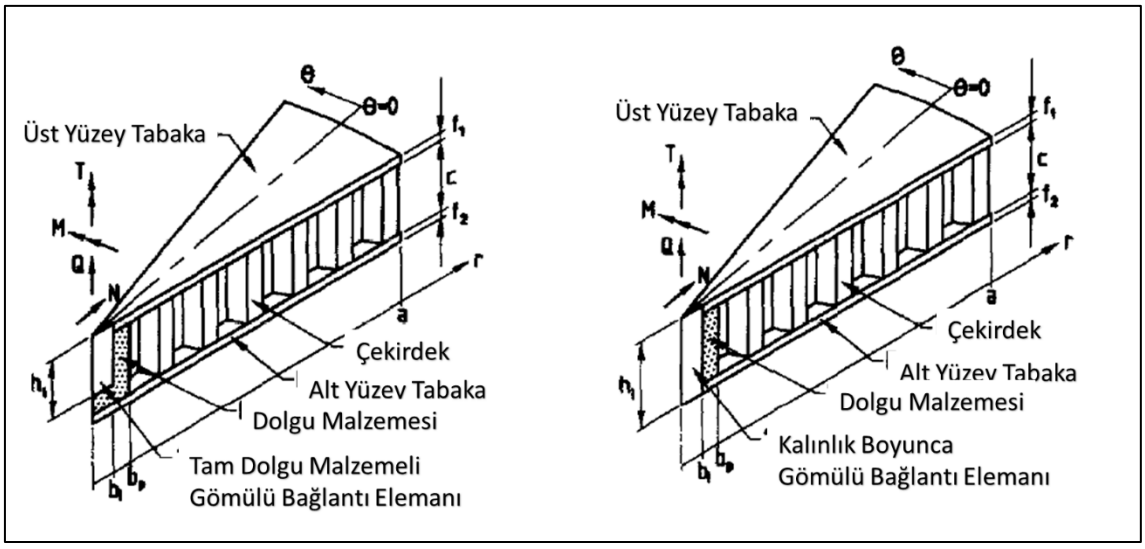
Şekil 4.2. a) Ericksen modelinin örnek sonucu [34], b) T katsayısının gösteren grafik [32]

4.2. Thomsen Modeli

Thomsen 1995'te yayınladığı çalışmasında, Ericksen tarafından kullanılan homojen dairesel sandviç plakaların klasik eğilme teorisinin içermediği bazı etkileri dahil etmiştir. Yük altındaki yüzey tabakasının diğer yüzey tabakaya göre daha çok sehim göstermesi ve yüklenen yüzey tabaka ile çekirdek arasında kesme geriliminin olması gibi farklılıkları dahil ettiği bu yaklaşımını test ile kıyaslamış ve doğrulamıştır [35].

1998'de Thomsen ve Rits aynı yaklaşımı kalınlık boyunca olan gömülü bağlantı elemanı bulunan sandviç yapılardaki yüzey tabaka, çekirdek ve dolgu malzemesi üzerindeki gerilimleri bulurken kullanmıştır [36]. Yine Thomsen tarafından aynı çalışma tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanları için tekrarlanmıştır [37]. Thomsen'in çalışmasındaki tam dolgu malzemeli, kalınlık boyunca ve diğer değişkenler Şekil 4.3'te görülmektedir. Bu çalışmada bazı varsayımlar yapılmıştır:

- Yüzey plakaları elastik olarak modellenmiştir ve enine kesme deformasyonu hesaba katılmıştır. Yüzey tabaka malzemesi homojen, izotropik ve elastik olarak lineerdir.
- Dolgu malzemesi ve çekirdek malzeme sadece kalınlık boyunca katılığa sahiptir. Yani kalınlık boyunca gerilim değişkenlik göstermez.
- Sandviç plaka simetrik olmayabilir.
- Üst ve alt yüzey tabakalar farklı sehimler gösterebilirler.



Şekil 4.3. a) Tam dolgu malzemeli, b) kalınlık boyunca gömülü bağlantı elemanı [36]

Uygulanan yükün düzlem dışı, düzlem içi, tork ya da moment olmasına bağlı olarak sisteme farklı sınır şartı tanımlanmaktadır. Panel kalınlığı boyunca olan gömülü bağlantı elemanı için sınır şartları:

- $R=b_i$ olduğu zaman; gömülü bağlantı elemanı rijit olarak kabul edilir ve arayüzdeki deformasyonda bir süreklilik vardır. Yani gömülü bağlantı elemanı çekirdek ve yüzey tabakaya mükemmel şekilde yapıştırılmıştır.
- $R=b_p$ olduğu zaman; temel değişkenlerin sürekliliği dolgu malzemesi- bal peteği arayüzü boyunca devamlılık gösterir.
- R=a olduğu zaman; yüzey tabaka ve bal peteği çekirdeğin orta yüzeyleri basit mesnet olduğu kabul edilir.

Tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı için sınır şartları:

- $R=b_0$ olduğu zaman; alt yüzey ve çekirdek malzeme için serbest kenar sınır şartı uygulanır. Ayrıca gömülü bağlantı elemanının üst yüzeyine yayılı yük uygulanır.
- $R=b_i$ olduğu zaman; temel değişkenlerden ikisi hariç diğer hepsinde süreklilik mevcuttur.
- $R=b_p$ olduğu zaman; temel değişkenlerin sürekliliği dolgu malzemesi ve bal peteği ara yüzü boyunca görülür.
- R=a olduğu zaman; yüzey tabakanın ve çekirdeğin orta yüzeylerinde basit mesnet sınır şartı olduğu kabul edilir.

Gerilim ve kinematik denklemleri çekirdek ve her iki yüzey için oluşturulmuştur ve belirlenen sınır şartına göre çözülür. Temel değişkenler olarak isimlendirilen 24 değişken için 24 tane yarıçapa bağlı olan diferansiyel denklemler kullanılmaktadır. Bu 24 denklem ile çekirdek ve yüzeylerdeki gerilim ve sehim bulunabilmektedir (Eş. 4.14- Eş. 4.37). Bu 24 temel değişken;

$$\{y(r,\theta)\}=\begin{Bmatrix} u^1_{Or},u^1_{O\theta},w^1,\beta^1_r,\beta^1_\theta,N^1_r,N^1_{r\theta},M^1_r,M^1_{r\theta},Q^1_r,\tau_{rz},q_r, \\ \tau_{\theta z},q_\theta,u^2_{Or},u^2_{O\theta},w^2,\beta^2_r,\beta^2_\theta,N^2_r,N^2_{r\theta},M^2_r,M^2_{r\theta},Q^2_r \end{Bmatrix} \tag{4.13}$$

$u^i_{Or},u^i_{O\theta},w^i$ üç yöndeki yer değiştirmeyi, β^i_r,β^i_θ yüzey tabaka rotasyonunu, $N^i_r,N^i_{r\theta}$düzlem içi yüzey tabaka bileşke gerilimi, $M^i_r,M^i_{r\theta}$ yüzey tabakadaki momenti ve Q^i_r yüzey tabakadaki enine kesme bileşke gerilimini temsil eder(i=1 üst yüzey tabaka, i=2 alt yüzey tabaka).

Üst yüzey tabakası için denklemler;

$$u^1_{Or,r}=-\frac{v_1}{r}u^1_{Or}-\frac{v_1}{r}u^1_{O\theta,\theta}+\frac{N^1_r}{A_1} \tag{4.14}$$

$$u^1_{O\theta,r}=-\frac{1}{r}u^1_{Or,\theta}+\frac{1}{r}u^1_{O\theta}+\frac{N^1_{r\theta}}{A_1(1-v_1)} \tag{4.15}$$

$$w^1_{,r}=-\beta^1_r \tag{4.16}$$

$$\beta^1_{r,r}=-\frac{v_1}{r}\beta^1_r-\frac{v_1}{r}\beta^1_{\theta,\theta}+\frac{M^1_r}{D_1} \tag{4.17}$$

$$\beta^1_{\theta,r}=\frac{M^1_{r\theta}}{D_1(1-v_1)} \tag{4.18}$$

$$N^1_{r,r}=\frac{A_1(1-v_1^2)}{r^2}u^1_{Or}+\frac{A_1(1-v_1^2)}{r^2}u^1_{O\theta,\theta}-\frac{(1-v_1)}{r}N^1_r-\frac{1}{r}N^1_{r\theta,\theta}+\tau_{zr} \tag{4.19}$$

$$N^1_{r\theta,r}=-\frac{A_1(1-v_1^2)}{r^2}u^1_{Or,\theta}-\frac{A_1(1-v_1^2)}{r^2}u^1_{O\theta,\theta\theta}-\frac{v_1}{r}N^1_{r,\theta}-\frac{2}{r}N^1_{\theta r}+\tau_{z\theta} \tag{4.20}$$

$$M^1_{r,r}=\frac{D_1(1-v_1^2)}{r^2}\beta^1_r+\frac{D_1(1-v_1^2)}{r^2}\beta^1_{\theta,\theta}-\frac{(1-v_1)}{r}M^1_r-\frac{1}{r},M^1_{\theta r,\theta}+Q^1_r-\frac{f_1}{2}\tau_{zr} \quad (4.21)$$

$$M^1_{r\theta,r}=-\frac{D_1(1-v_1)v_1}{r^2}\beta^1_{r,\theta}-\frac{D_1(1-v_1)v_1}{r^2}\beta^1_{\theta,\theta\theta}+\frac{(1-v_1)}{r}M^1_{r,\theta}-\frac{2}{r}M^1_{\theta r}-\frac{f_1}{2}\tau_{z\theta} \quad (4.22)$$

$$Q^1_{r,r}=\frac{E_c}{c}w^1-\frac{D_1(1-v_1)}{r^3}\beta^1_{r,\theta\theta}-\frac{D_1(1-v_1)}{r^3}\beta^1_{\theta,\theta\theta\theta}-\frac{1}{r^2}M^1_{r,\theta\theta}-\frac{1}{r}Q^1_r-\frac{c}{2r}\tau_{rz}-\frac{c}{2}q_r-\frac{c}{2r}\tau_{\theta z,\theta}-\frac{E_c}{c}w^2 \quad (4.23)$$

Çekirdek için denklemler;

$$\tau_{rz,r}=q_r \quad (4.24)$$

$$q_{r,r}=-\frac{12E_c}{c^3}u^1_{Or}+\frac{6E_c(f_1+c)}{c^3}\beta^1_r+\left\{\frac{1}{r^2}+\frac{12E_c}{c^2G_c}\right\}\tau_{rz}-\frac{1}{r}q_r+\frac{1}{r^2}\tau_{\theta z,\theta}-\frac{1}{r^2}q_{\theta,\theta}$$
$$+\frac{12E_c}{c^3}u^2_{Or}+\frac{6E_c(f_2+c)}{c^3}\beta^2_r \quad (4.25)$$

$$\tau_{\theta z,r}=q_\theta \quad (4.26)$$

$$q_{r,r}=-\frac{G_c(3-v_1)}{cr^2}u^1_{Or,\theta}+\frac{2G_c}{cr^2}u^1_{O\theta}-\frac{G_c(1-v_1)}{cr^2}u^1_{O\theta,\theta\theta}-\frac{G_c(2-v_1)}{crA_1(1-v_1)}N^1_{r,\theta}+\frac{G_c}{crA_1(1-v_1)}N^1_{r\theta}+\frac{1}{r}q_{r,\theta}$$
$$+\frac{G_c}{c}\left\{\frac{1}{A_1(1-v_1)}+\frac{1}{A_1(1-v_2)}\right\}\tau_{z\theta}-\frac{1}{r}q_\theta+\frac{G_c(3-v_2)}{cr^2}u^2_{Or,\theta}-\frac{2G_c}{cr^2}u^2_{O\theta}+\frac{G_c(1-v_2)}{cr^2}u^2_{O\theta,\theta\theta}$$
$$+\frac{G_c(2-v_2)}{crA_2(1-v_2)}N^2_{r,\theta}-\frac{G_c}{crA_2(1-v_2)}N^2_{r\theta} \quad (4.27)$$

Alt yüzey tabaka için denklemler;

$$u^2_{Or,r}=-\frac{v_2}{r}u^1_{Or}-\frac{v_2}{r}u^2_{O\theta,\theta}+\frac{N^2_r}{A_2} \quad (4.28)$$

$$u^1_{O\theta,r}=-\frac{1}{r}u^2_{Or,\theta}+\frac{1}{r}u^2_{O\theta}+\frac{N^2_{r\theta}}{A_2(1-v_2)} \quad (4.29)$$

$$w^2_{,r}=-\beta^2_r \tag{4.30}$$

$$\beta^2_{r,r}=-\frac{v_2}{r}\beta^2_r-\frac{v_2}{r}\beta^2_{\theta,\theta}+\frac{M^2_r}{D_2} \tag{4.31}$$

$$\beta^2_{\theta,r}=\frac{M^2_{r\theta}}{D_2(1-v_2)} \tag{4.32}$$

$$N^2_{r,r}=-\tau_{zr}+\frac{A_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}u^2_{0r}+\frac{A_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}u^2_{0\theta,\theta}-\frac{(1-v_2)}{2}N^2_r-\frac{1}{r}N^2_{r\theta,\theta} \tag{4.33}$$

$$N^2_{r\theta,r}=-\tau_{z\theta}-\frac{A_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}u^2_{0r,\theta}-\frac{A_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}u^2_{0\theta,\theta\theta}-\frac{v_2}{r}N^2_{r,\theta}-\frac{2}{r}N^2_{\theta r} \tag{4.34}$$

$$M^2_{r,r}=-\frac{f_2}{2}\tau_{zr}-\frac{D_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}\beta^2_r+\frac{D_2\left(1-v_2^2\right)}{r^2}\beta^2_{\theta,\theta}$$
$$-\frac{(1-v_2)}{r}M^2_r-\frac{1}{r}M^2_{\theta r,\theta}+Q^2_r\# \tag{4.35}$$

$$M^2_{r\theta,r}=-\frac{f_2}{2}\tau_{z\theta}-\frac{D_2(1-v_2)v_2}{r^2}\beta^2_{r,\theta}-\frac{D_2(1-v_2)v_2}{r^2}\beta^2_{\theta,\theta\theta}$$
$$+\frac{(1-v_2)}{r}M^2_{r,\theta}-\frac{2}{r}M^2_{\theta r}\# \tag{4.36}$$

$$Q^2_{r,r}=-\frac{E_c}{c}w^1-\frac{c}{2r}\tau_{rz}-\frac{c}{2}q_r-\frac{c}{2r}\tau_{\theta z,\theta}+\frac{E_c}{c}w^2-\frac{D_2(1-v_2)}{r^3}\beta^2_{r,\theta\theta}$$
$$-\frac{D_2(1-v_2)}{r^3}\beta^2_{\theta,\theta\theta\theta}-\frac{1}{r^2}M^2_r-\frac{1}{r}Q^2_r\# \tag{4.37}$$

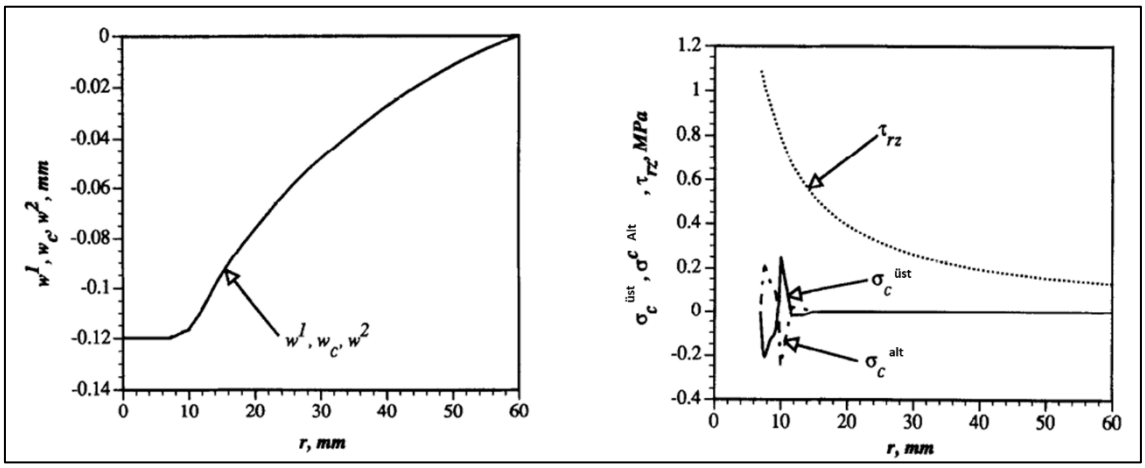
Yukarıdaki denklemlerde v_i (i=1,2) yüzey malzemesinin Poisson oranını ve A_i, D_i (i=1,2) ise yüzey tabakasının uzama ve eğilme rijitliğini ifade eder ve şu şekilde hesaplanır;

$$A_i=\frac{E_i f_i}{\left(1-v_i^2\right)} \tag{4.38}$$

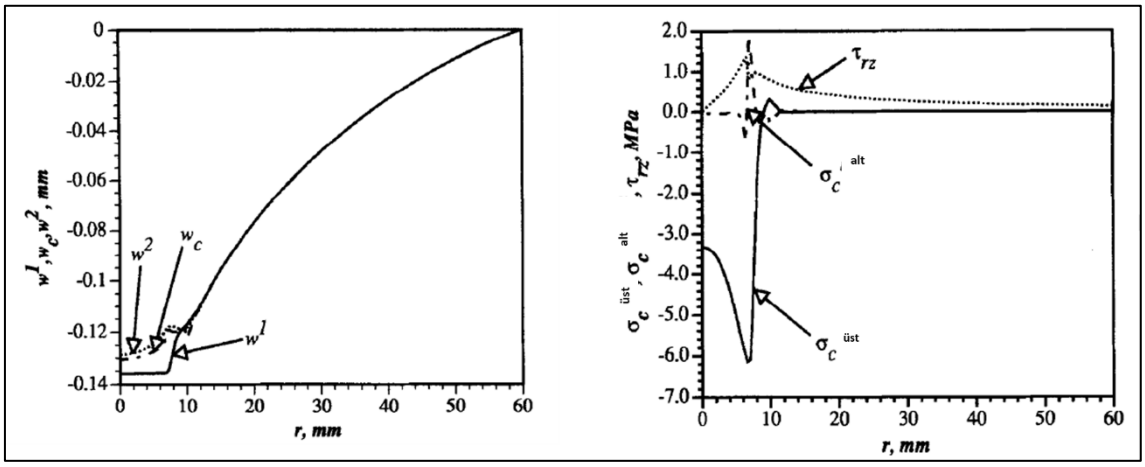
$$D_i=\frac{E_i {f_i}^3}{12\left(1-v_i^2\right)} \tag{4.39}$$

Bu yaklaşım kalınlık boyunca olan gömülü bağlantı elemanları ve tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarının gerilim dağılımını göstermek için kullanılmıştır [37].

Sonuçlar çalışmada verilen örnek bir gömülü bağlantı elemanı-sandviç yapının gömülü bağlantı elemanı yarıçapına bağlı olarak çekirdekteki gerilim ve yer değiştirmesini göstermektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Thomsen modeline göre panel boyunca gömülü bağlantı elemanı için yer değiştirme ve gerilme dağılımı [36]



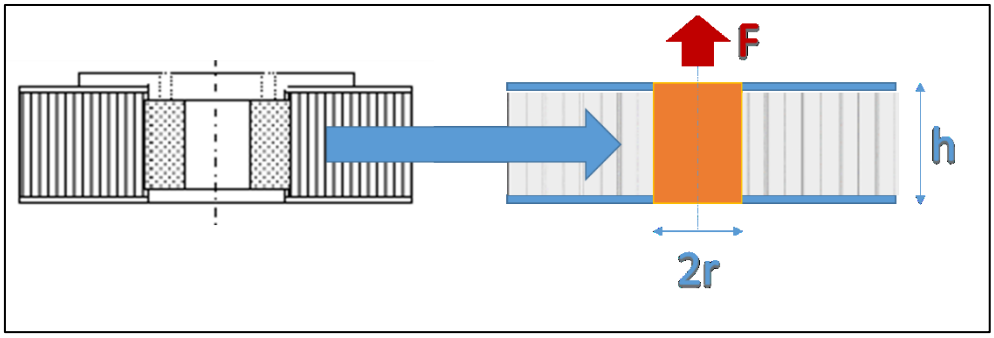
Şekil 4.5. Thomsen modeline göre tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı için yer değiştirme ve gerilme dağılımı [36]

Genel anlamıyla sonuçlar Ericksen modeli ile benzese de daha hassastır [34]. Özellikle, tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarda çekirdekteki en yüksek kesme geriliminin olduğu yerin çekirdek/dolgu malzemesi ara yüzünde olması bu iki modelde benzerlik taşımaktadır.

4.3. Basit Kesme Hesabı ili Modelleme

Bu metot çok detaylı olmasa da en basit metottur. Hassasiyetindeki düşüklüğün sebebi kabul edilen varsayımlardır ki bunlar:

- Gömülü bağlantı elemanı her zaman panel kalınlığı boyuncadır ve rijit bir silindir olarak kabul edilir (Şekil 4.6)
- Yüzey katmanlarının kalınlığı ve rijitliği ihmal edilir.
- Uygulanan düzlem dışı çekme kuvvetinin tamamı gömülü bağlantı elemanı/çekirdek ara yüzüne yayılır.
- En yüksek gerilim gömülü bağlantı elemanı/çekirdek arayüzünde olur.
- Ara yüzde izin verilen kesme kuvveti oluştuğunda hasar meydana gelir.



Şekil 4.6. Gömülü bağlantı elemanının basit kesme hesabıyla modellenmesi

Çekirdek malzemesinin kesme dayanımı τ_{maks} biliniyorsa, gömülü bağlantı elemanı silindirik olarak kabul edildiği için kritik yük, P_{krit} kolay bir şekilde hesaplanabilir:

$$\tau_{maks}=\frac{P_{krit}}{A}, \text{ ve } A=2\pi rh, \text{ dolayısıyla } P_{krit}=2\pi rh\tau_{maks} \quad (4.40)$$

Bu eşitlikte r, h ve A sırasıyla gömülü bağlantı elemanı yarıçapı, gömülü bağlantı elemanı yüksekliği ve ara yüz yüzey alanını göstermektedir.

Zenkert [28] bu hesabın yanı sıra vida ve kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı için de benzer hesaplamalar göstermiş ve bu hesaplama yönteminin oldukça kaba bir tahmin olduğunu söylemiştir. Vida için kritik yük değeri;

$$P_{krit}=\pi DT \quad (4.41)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada D, vidanın en küçük çapını ve T, yüzey tabakasının kesme gerilim dayanımını temsil etmektedir.

Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanları için kritik yük değeri:

$$P_{krit}=\pi(r^2\sigma+2rh\tau_{maks}) \quad (4.42)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada σ; çekirdek malzemesinin çekme dayanımını temsil etmektedir.

Gömülü bağlantı elemanı içeren panel önemli bir eğilme deformasyonuna maruz kalmıyorsa, basit kesme hesabıyla yapılan bu modelleme yöntemi, düzlem dışı çekme testlerinde elde edilen değerle kıyasla maksimum çekme kapasitesini %80 doğru tahmin edebilmektedir. Ama önemli bir eğilme deformasyonu mevcut ise maksimum düzlem dışı çekme dayanımı %100'e kadar hatalı olabilmektedir. Bu yüzden basit kesme hesabıyla modelleme sadece önemli bir eğilme deformasyonuna maruz kalmıyorsa tavsiye edilir. Kesmeden ve eğilmeden kaynaklı deformasyon oranı 915'den küçük ise basit kesme hesabı ile modelleme yapılabilir. Aksi takdirde geliştirilmiş basit kesme hesabı ile modelleme yöntemi kullanılabilir [34].

4.4. Geliştirilmiş Basit Kesme Hesabıyla Modelleme

Bu yöntem US Military Handbook 23A [38] tarafından yayınlanmıştır ve Ericksen modeli ile basit kesme hesabı modelleme yönteminin kombinasyonudur. Bu yönteme göre;

- Gömülü bağlantı elemanı panelin ortasına yerleştirilmiştir ve silindirik bir koordinat sistemi kullanılmıştır.
- Gömülü bağlantı elemanı silindirik ve panel boyunca olarak kabul edilmiştir.
- Kesme gerilimi ara yüze olan uzaklığı bağlı olarak değişir.
- En büyük kesme gerilimi gömülü bağlantı elemanına yakın bir bölgede görülür.
- İzin verilen kesme gerilimi oluştuğunda hasar meydana gelir.

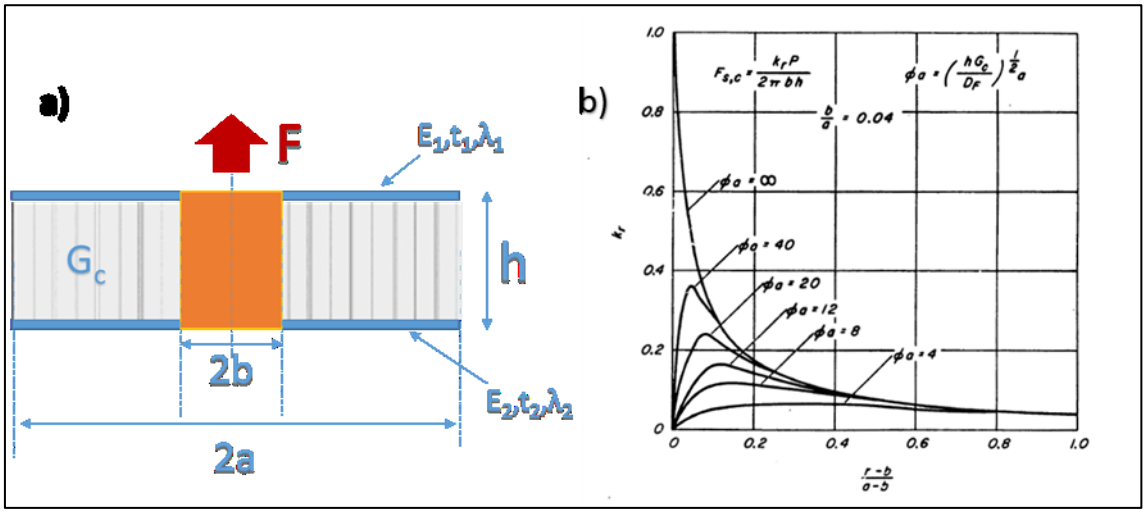
Çekirdekteki kesme gerilim dağılımı sınır koşullarına ve sandviç panelinin geometrik parametrelerine bağlı olarak değişir. Bu yöntemde basit kesme hesabı ile modelleme yöntemi ile aynı formül kullanılır fakat formüle bir k_3 faktörü eklenmiştir. Bu k_3 faktörü tüm kesme gerilimi dağılımında en büyük kesme gerilimine tekabül edecek şekilde seçilir. Diğer bir deyişle, bu yöntem dolgu ve çekirdek ara yüzündeki ortalama kesme gerilimi ile k_3 faktörünü çarparak çekirdekteki en büyük kesme gerilimini bulmaktadır.

$$\tau_{maks}=\frac{P}{2\pi rh}k_3 \tag{4.43}$$

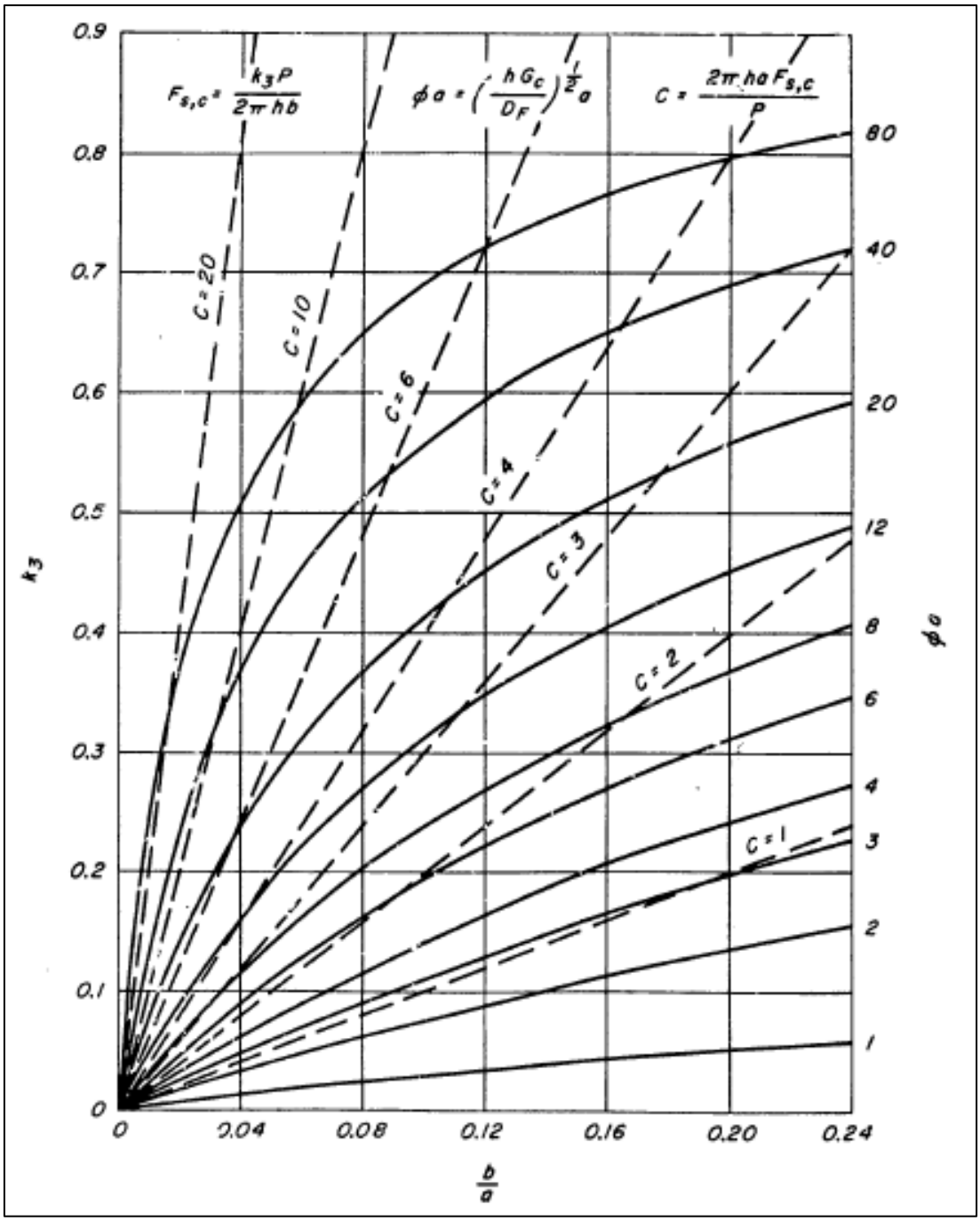
Buradaki k_3 faktörü Ericksen tarafından geliştirilen model yardımıyla hesaplanmış olup, US Military Handbook 23A [38] tarafından sağlanan bir grafik ile elde edilebilmektedir. Grafiğin kullanılması için önce bazı parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Bunlar;

$$\frac{a}{b} \qquad \phi_a=\left(\frac{hG_c}{D_F}\right)^2 a \qquad c=\frac{2\pi haF}{P} \qquad D_f=\frac{1}{12}\left(\frac{E_1t_1^3}{\lambda_1}+\frac{E_2t_2^3}{\lambda_2}\right) \qquad \lambda_{1,2}=1-\nu_{1,2}^2 \tag{4.44}$$

Şekil 4.7'de bu yöntemde kullanılan sandviç yapı parametreleri(a) ve yarıçapa bağlı gerilim dağılımı görülmektedir. Eş. 4.44'de hesaplanan parametreler ile Şekil 4.8'deki grafik kullanılarak k_3 katsayısı bulunabilmektedir.



Şekil 4.7. Geliştirilmiş basit kesme hesabıyla modelleme yöntemindeki a) parametreler, b) çapa bağlı gerilim dağılımı [38]



Şekil 4.8. Gömülü bağlantı elemanı parametreleri ile k_3'ün bulunabildiği grafik [39]

4.5. ECSS Yöntemi

ECSS gömülü bağlantı elemanı tasarım el kitabı [1] uzay sistemleri sektöründe en çok kullanılan ve literatürde analitik hesap bulunan kaynaklardan bir tanesidir. El kitabı içerisinde tasarım, üretim, test, entegrasyon, tamir, kalite kontrol gibi birçok konuda bilgi yer almaktadır. Gömülü bağlantı elemanı dayanım hesaplarının yanı sıra gömülü bağlantı

elemanının diğer gömülü bağlantı elemanlarına ya da kenara olan yakınlığından kaynaklı taşıma kapasitesindeki düşüş oranı, dolgu malzemesi yüksekliği, efektif ve gerçek dolgu malzemesi yarıçapı gibi hesaplar da sağlanmaktadır.

ECSS gömülü bağlantı elemanı el kitabının tasarımla ilgili verdiği ilk yönerge, gömülü bağlantı elemanının taşıma kapasitesinin ($P_{kapasite}$) tasarım yükünden (P_{dizayn}) büyük ya da tasarım yüküne eşit olması gerektiğidir. Tasarım yükü limit yük (P_{limit}) ile güvenlik katsayısının çarpımıyla elde edilir.

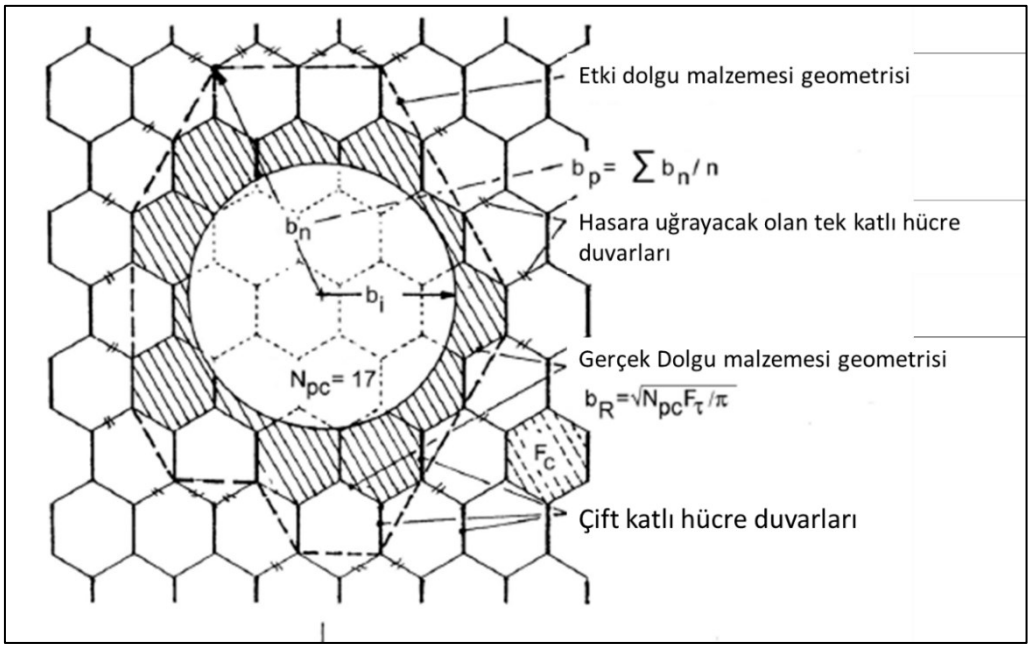
$$P_{kapasite} \geq P_{Dizayn} = P_{limit} \times GK \tag{4.45}$$

Burada $P_{kapasite}$ gömülü bağlantı elemanının taşıyabileceği yükü, P_{limit} ise gömülü bağlantı elemanının üzerine gelen en büyük yükü temsil etmektedir. Güvenlik katsayısı (GK), ECSS güvenlik katsayısı standartları dokümanına göre test edilmiş gömülü bağlantı elemanları için 1,25 ve test edilmemiş gömülü bağlantı elemanları için 2 olarak alınmalıdır.

ECSS gömülü bağlantı elemanı el kitabında alüminyum yüzey tabakası ve çekirdeğe sahip sandviç paneldeki gömülü bağlantı elemanlarının testler ve kendi analitik hesaplamaları ile tespit edilmiş ortalama ve minimum $P_{kapasite}$ değerleri grafikler halinde verilmiştir. Alüminyum sandviç panellerin yanı sıra bazı metalik olmayan çekirdekli sandviç yapılar da mevcuttur. ECSS analitik yönteminin kabul ettiği bazı varsayımlar bulunmaktadır:

- Ortalama $P_{kapasite}$ hesaplanırken yüzey tabakasının, çekirdeğin ve dolgu malzemesinin ortalama dayanım değerleri ve dolgu malzemesinin ortalama boyut değerleri kullanılmıştır.
- Minimum $P_{kapasite}$ hesaplanırken yüzey tabakasının, çekirdeğin ve dolgu malzemesinin en küçük dayanım değerleri ve dolgu malzemesinin en küçük boyut değerleri kullanılmıştır.
- $P_{kapasite}$ değerini etkileyen temel değişkenler çekirdek yüksekliği ve yüzey tabaka kalınlığıdır.

Etkin ve gerçek dolgu malzemesi geometrileri Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Etkin ve gerçek dolgu malzemesi geometrileri [1]

Dolgu malzeme yüksekliği, bağlayıcı cıvata ve çekirdek yükseklğine bağlı olarak hesaplanır. Aşağıdaki şartlardaki 7 mm değerinin bulunma sebebi, tasarım isteri olarak gömülü bağlantı elemanı dolgu boşluğunun, gömülü bağlantı elemanı boyundan en az 3-4 mm daha derin olması ve deliğin altında kalan çekirdek malzemenin en az 3 mm olması gereksinimi olmasındandır. Dolgu malzeme yüksekliği;

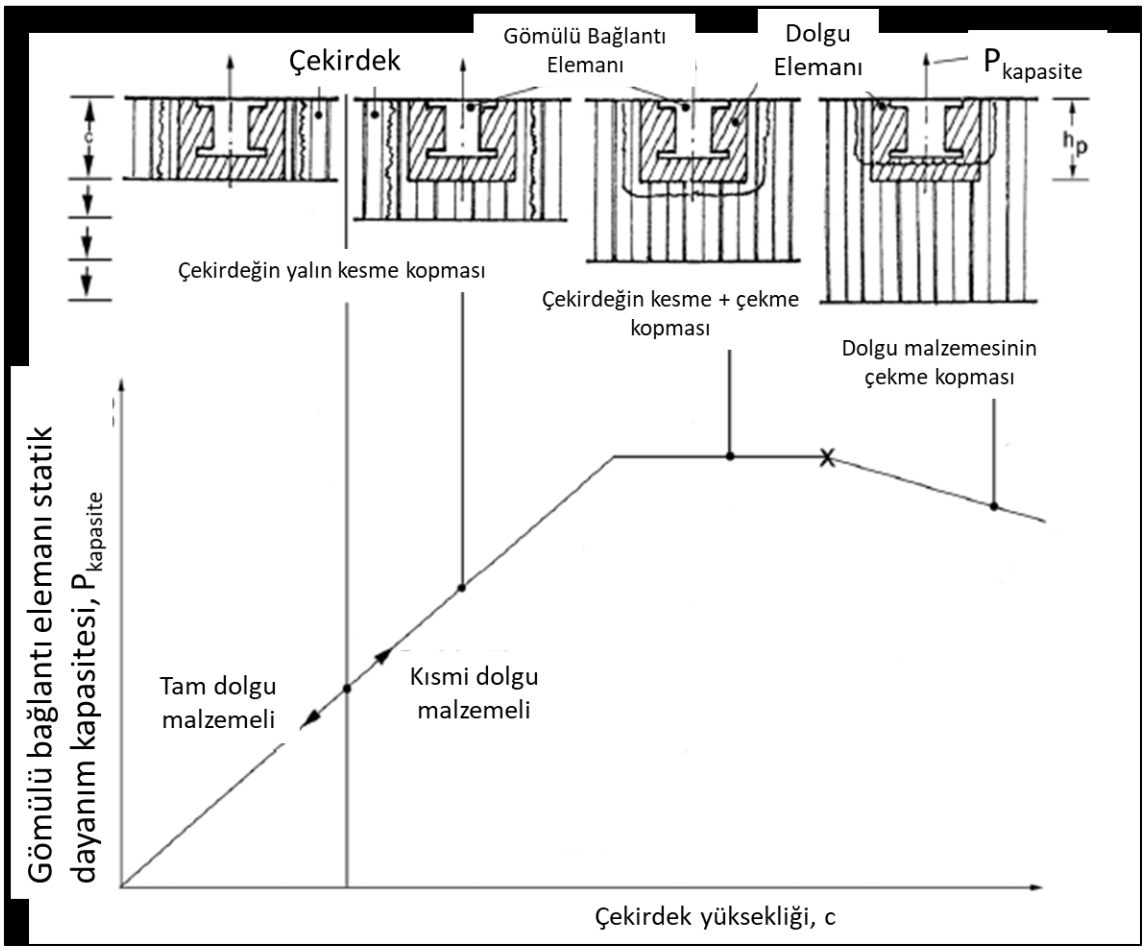
- $c \geq h_i \geq c-7mm$ ise $h_p = c$ olmalıdır. Bu durumda gömülü bağlantı elemanı tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanıdır.
- $c > h_i + 7$ mm ise $h_{p,min} = h_i + 7mm$ ve $h_{p,ort} = h_{p,min} + A \tanh\left(\frac{c-h_{p,min}}{h_{p,min}}\right)$ şeklinde hesaplanır.

Burada çekirdek hücre boyutu (S_c) 3,2 mm için A=2,5 ve 4,8 mm için A=5,0 mm'dir.

Etkin dolgu malzemesi çapı bp, bal peteği hücre duvarı boyutuna, gömülü bağlantı elemanı çapına ve gömülü bağlantı elemanının yerleştirilme pozisyonuna bağlıdır. Gerçek ve etkin dolgu malzemesi geometrisi Şekil 4.9'da görünmektedir. Dolgu malzemesinin ortalama ve en küçük çap değerleri; perforasyonlu çekirdekler için $b_{pmin} = 0,93192b_i + 0,874S_c - 0,66151$ ve $b_{pav} = 1,002064b_i + 0,940375S_c - 0,7113$ şeklinde hesaplanır. Perforasyonsuz çekirdekler için; $b_{pmin} = 0,9b_i + 0,7S_c$ ve $b_{pav} = b_i + 0,8S_c$ şeklinde hesaplanır.

En küçük $P_{kapasite}$ A temel değeri olarak kabul edilir (%95 özgüvenle, grubun %99'unu kapsayacak şekilde). Çünkü gömülü bağlantı elemanının her parametresinin en küçük değerde olması ihtimali oldukça düşüktür.

ECSS gömülü bağlantı elemanı tasarım el kitabında düzlem dışı çekme kuvvetine maruz kalmış gömülü bağlantı elemanları hasar modlarına göre 3 farklı grupta incelenmiştir. Hasar modları çekirdek ve gömülü bağlantı elemanının boyuna göre farklılık göstermektedir ve hasar modları daha çok çekirdekte görülmektedir (Şekil 4.10)



Şekil 4.10. ECSS'e göre gömülü bağlantı elemanlarının düzlem dışı çekme kuvveti altında çekirdek yüksekliğine bağlı olarak çeşitlenen kırılım modları [1]

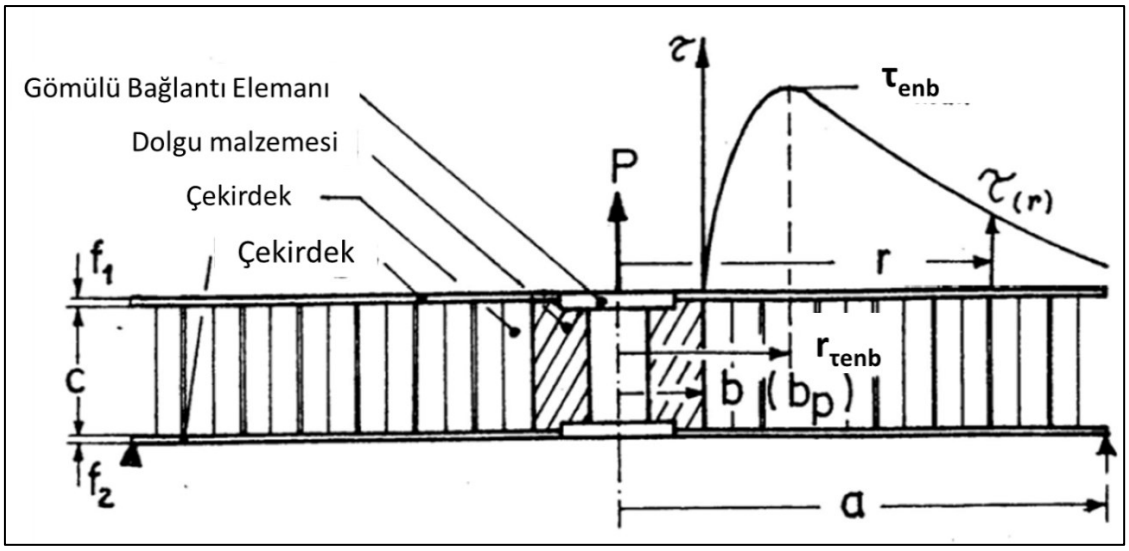
4.5.1. Çekirdekteki kesme geriliminden kaynaklanan hasar modu

Kalınlık boyunca olan ve tam dolgulu gömülü bağlantı elemanlar için düzlem dışı çekme kuvveti altındaki hasar modu çekirdek ile dolgu malzemesi ara yüzüne yakın bölgede çekirdekteki kesme gerilimi kaynaklı olmaktadır. Diğer bir deyişle bu durumda gömülü

bağlantı elemanının dayanımı çekirdek malzemesinin kesme gerilimi dayanımına bağlıdır. Kalınlık arttıkça kesme gerilimine maruz kalan alan arttığı için gömülü bağlantı elemanının dayanımı da artacaktır. Dolayısıyla Pkapasite çekirdek yüksekliğine bağlı olarak artmaktadır. Bazı durumlarda kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanları da aynı davranışı göstermektedir.

Tam Dolgu Malzemeli ya da Kalınlık Boyunca Gömülü Bağlantı Elemanı

Hasara sebep olan çekirdekte en yüksek kesme gerilimi τ_{enb}, Ericksen tarafından geliştirilen kesme gerilimi dağılımını $\tau(r)$ hesaplayan yöntem kullanılarak hesaplanır. Gömülü bağlantı elemanı çevresindeki kesme gerilimi dağılımı Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Gömülü bağlantı elemanı çevresindeki kesme gerilimi dağılımı [1]

$\beta=\frac{c}{f}\geq 10$, $f'=f$ ve $r<a$ için çekirdekteki kesme gerilimi;

$$\tau(r)=\tau_{nom}C^{*}K \qquad (4.46)$$

Eş.46'daki değerler; $\tau_{nom}=\frac{P}{2\pi bc}$, $C^{*}=\frac{\beta}{\beta+1}$, $K=\frac{b}{r}\left(1-\sqrt{\frac{r}{b}e^{\alpha(b-r)}}\right)$ ve $\alpha=\frac{1}{f}\sqrt{\frac{G_c}{E_f}12\left(1-v_f^2\right)\left(1+\frac{\beta}{2}\right)}$ şeklinde bulunur.

Eş. 4.46 Şekil 4.11'deki gerilim dağılımını vermektedir. Dolgu malzemesi ve çekirdek ara yüzündeki değer sıfırdır. En büyük kesme gerilimi $r_{\tau enb}$'te oluşmaktadır ve aniden düşüş göstermektedir.

En yüksek gerilimin oluştuğu konum, en büyük gerilimin oluştuğu yarıçap, $r_{\tau enb}=\frac{b}{1-e^{C_2(ab)^n}}$ eşitliği ile bulunur ve burada C_2=-0,931714 ve n=0,262866'dır.

Eş.4.46'da $r_{\tau enb}$ kullanılırsa K_{enb} ve dolayısıyla τ_{enb} bulunmuş olur.

$$\tau_{enb}=\tau(r_{\tau enb})=\tau_{nom}C^{*}K_{enb} \quad (4.47)$$

$\tau_{çek}$ çekirdeğin kesme dayanımını göstermektedir. Son olarak;

$$P_{krit}=\left(2\pi bc\tau_{çek}\right)\Big/ C^{*}K_{enb} \quad (4.48)$$

Olarak bulunur.

Kısmi Dolgu Malzemeli Bağlantı Elemanı

Kısmi dolgu malzemeli bir gömülü bağlantı elemanı üzerine düzlem dışı çekme kuvveti uygulandığı zaman gömülü bağlantı elemanının çevresindeki çekirdekte kesme gerilimi oluşmakla kalmıyor aynı zamanda gömülü bağlantı elemanı altında kalan çekirdekte de çekme gerilimi oluşmaktadır. Şekil 4.10'da göründüğü üzere çekirdek yüksekliği belli bir seviyeye ulaşana kadar kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sanki tam dolgulu ya da panel boyunca gömülü bağlantı elemanıymış gibi davranır ve hasar modu çekirdekteki kesme gerilimi sebepli oluşmaktadır. Çekirdeğin belli bir seviyenin üstünde olduğu durumlarda ise kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı hasar modu çekirdekteki kesmeyle beraber gömülü bağlantı elemanının altındaki çekirdekteki çekme gerilimi kaynaklı meydana gelmektedir.

Kısmi dolgu malzemeli bağlantı elemanları için düzlem dışı çekme dayanımını bulma prosedürü;

- Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının dayanımı, tam dolgu malzemeli ya da kalınlık boyunca olan gömülü bağlantı elemanının dayanımı (P_{AKrit}) gibi hesaplanır.
- Aynı zamanda kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme dayanımı (P_{BKrit}) çekirdekteki çekme ve kesme geriliminden kaynaklı hasar moduna göre hesaplanır.
- $P_{AKrit} < P_{BKrit}$ ise kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı tam dolgu malzemeli bağlantı elemanı gibi davranır.
- $P_{AKrit} > P_{BKrit}$ ise kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı kısmı dolgu malzemeli bağlantı elemanı gibi davranır.

4.5.2. Çekirdekteki çekme ve kesme geriliminden kaynaklı hasar modu

Çekirdek yüksekliğinin dolgu malzemenin yüksekliğinden belli bir ölçüde fazla olduğu durumlarda hasar modu sadece çekirdekteki kesme geriliminden kaynaklı olmaktan çıkıp aynı zamanda gömülü bağlantı elemanı altında kalan çekirdek malzemedeki çekme geriliminden de kaynaklı olmaktadır. Gömülü bağlantı elemanı hasara uğrarken önce gömülü bağlantı elemanı altındaki çekirdek malzeme çekme gerilimi altında kopmakta daha sonra gömülü bağlantı elemanı çevresindeki çekirdek kesme geriliminden kaynaklı hasara uğramaktadır.

ECSS gömülü bağlantı elemanı tasarım el kitabında düzlem dışı çekme yüküne maruz kalan gömülü bağlantı elemanının üzerindeki yükün alt elemanlara yayıldığı ifade edilmiştir.

- P_f üst yüzey tabaka tarafından taşınan yük bileşeni
- P_s dolgu malzeme çevresindeki çekirdeğin kesme gerilimi şeklinde taşınan yük bileşeni
- P_N dolgu malzemesinin altında kalan çekirdek tarafından çekme kuvveti olarak taşınan bileşeni olarak ifade edilebilir.

$$P_{kapasite}=P_f+P_S+P_N \tag{4.49}$$

Yüzey tabakanın taşıdığı yükü tahmin edebilmek ince öncelikle kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sanki tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı gibi kabul edilir ve iki yüzey tabaksının da yük taşıdığını hesaba dahil ederek eğilme ve kesme

kuvveti altındaki tam dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme kuvveti dayanımından çekirdeğin taşıdığı kuvvet çıkarılır ve kalan kısım bir yüzeyin katkısını bulmak için ikiye bölünür.

$$P_f=\frac{P_{\tau enb}-2\pi r_{\tau enb} c\tau_{enb}}{2} \tag{4.50}$$

Çekirdek üzerinde kesme gerilimi olarak taşınan yükü bulurken en büyük kesme gerilimin oluştuğu yer göz önüne alınır ve şu formülle hesaplanır;

$$P_S=2\pi r_{\tau enb} h_{dolgu} \tau_{enb} \tag{4.51}$$

Gömülü bağlantı elemanı altındaki çekirdeğin çekme kuvveti olarak taşıdığı yük;

$$P_N=\pi r_{\tau enb}^2 \sigma_{çek} \tag{4.52}$$

Burada $\sigma_{çek}$ çekirdek malzemenin çekme altındaki dayanımını temsil etmektedir. Sonuç olarak;

$$P_{kapasite}=\frac{P_{\tau enb}}{2}+\pi r_{\tau enb}\left(2h_{dolgu}-c\right)\tau_{enb}+\pi r_{\tau enb}^2 \sigma_{çek} \tag{4.53}$$

Olarak bulunur. Bu formülde çekmedeki kopma ile kesmenin aynı zamanda olduğu kabul edilmektedir.

4.5.3. Dolgu malzemesindeki çekme ve çekirdekteki kesme gerilimi kaynaklı hasar

Çekirdek yüksekliğinin dolgu malzemesinin yüksekliğinden oldukça fazla olduğu durumlarda hasar çekirdekteki kesmenin yanı sıra dolgu malzemesinde çekme geriliminden kaynaklı olmaktadır. Bu durumda gömülü bağlantı elemanının dayanımı dolgu malzemesiyle direkt olarak ilişkilidir.

$$P_{kapasite}=P_F+P_{SR}+P_{NR} \tag{4.54}$$

Burada;

- P_F üst yüzey tabaka tarafından taşınan yük bileşeni
- P_{SR} dolgu malzeme çevresindeki çekirdeğin kesme gerilimi şeklinde taşınan yük bileşeni
- P_{NR} gömülü bağlantı elemanının altında kalan dolgu malzemesinin tarafından çekme kuvveti olarak taşınan bileşeni olarak ifade edilebilir.

Son olarak ortaya çıkan formül;

$$P_{kapasite} = 2P_{NR}\frac{\left(\frac{1-\Psi}{1-2\Psi}\right)}{\left[\frac{1-\Psi}{1-2\Psi} - \frac{C^{*}K_{enb}r_{\tau enb}h_i}{bc}\right]} \tag{4.55}$$

$$2P_{NR} = \pi {b_R}^2 \sigma_{Rçek} \tag{4.56}$$

$$\Psi = \frac{c - h_j}{c} \tag{4.57}$$

Olur.

5. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI SONLU ELEMANLAR MODELİ

Analitik yöntemler kullanarak gömülü bağlantı elemanlarının dayanımının tespiti belli bir hassasiyette yapılabiliyor olsa da Zenkert [28] sandviç yapılarının ve gömülü bağlantı elemanlarının davranışlarını daha iyi gözlemlemek için sonlu elemanlar modeli kullanımını önermiştir. Bir parçanın dayanımının tespitinde test yapmaya göre daha ucuz ve hızlı, analitik yöntemlere göre daha hassasiyeti yüksek olmasından kaynaklı sonlu elemanlar metodu ile modellenerek nümerik yollarla parçanın dayanımının tespiti oldukça popüler bir konuma gelmiştir. Sonlu eleman metodu araçları ile birçok mühendislik problemleri çözülebilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile karmaşık ve lineer olmayan problemleri nümerik bir şekilde çözülebilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunda eleman tipleri üç boyutlu(3-b, katı eleman), iki boyutlu (2-b, kabuk eleman), bir boyutlu(1-b, kiriş eleman) ve sıfır boyutlu(0-b, boyutsuz) elemanlardan oluşabilmektedir. Elemanların kullanımı tercih edilirken modellenecek parça, modelin çözüm süresi gibi birçok konu göz önünde bulundurulmalıdır. 3-B elemanlar ile daha gerçekçi bir gerilim dağılımı sonucuna ulaşabilecekken, 2-B ve 1-B elemanlar daha hızlı çözümler sunmaktadır. Birçok durumda farklı tipte elemanlar bir arada kullanılmaktadır.

Literatürde gömülü bağlantı elemanlarının farklı tipte sonlu elemanlar modeli oluşturulma yöntemleri görülmektedir. Gömülü bağlantı elemanlarında hasar daha çok çekirdek ya da yüzey tabakada (İdeal durumlarda gömülü bağlantı elemanında hasar görülmesi beklenmemektedir ve çok nadir durumlarda dolgu malzemesinde görülmektedir.) görüldüğü için modelleme esnasında sandviç yapının modellenmesi üzerinde daha çok durulmuştur.

5.1. Bal Peteği Modellemesi

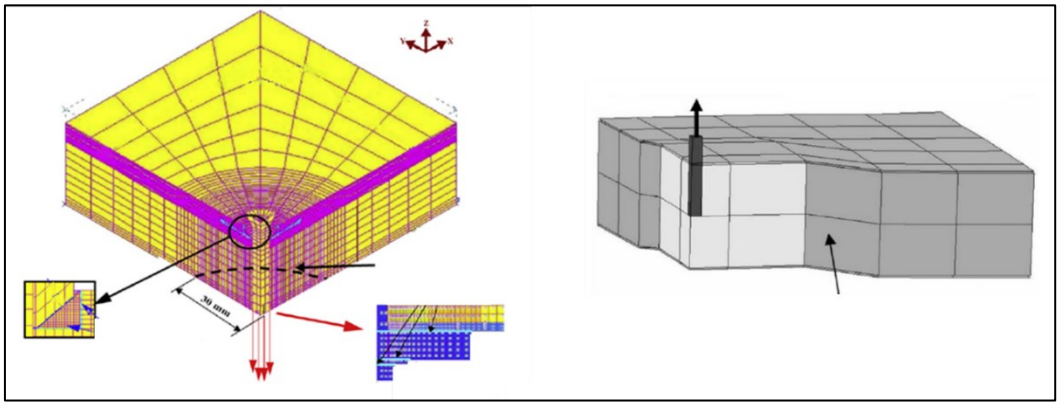
Gömülü bağlantı elemanı modeli oluşturulmadan önce bal peteği yapının modellenip test ile doğrulaması yapılmıştır. Bal peteği modeli oluşturulurken farklı eleman tipleri ve boyutları gibi değişkenler incelenmiş ve karar verilmiştir.

5.1.1. Eleman tipi

Bal peteği yapılarının modellemesinde farklı yöntemler kullanılabilir.

Katı model

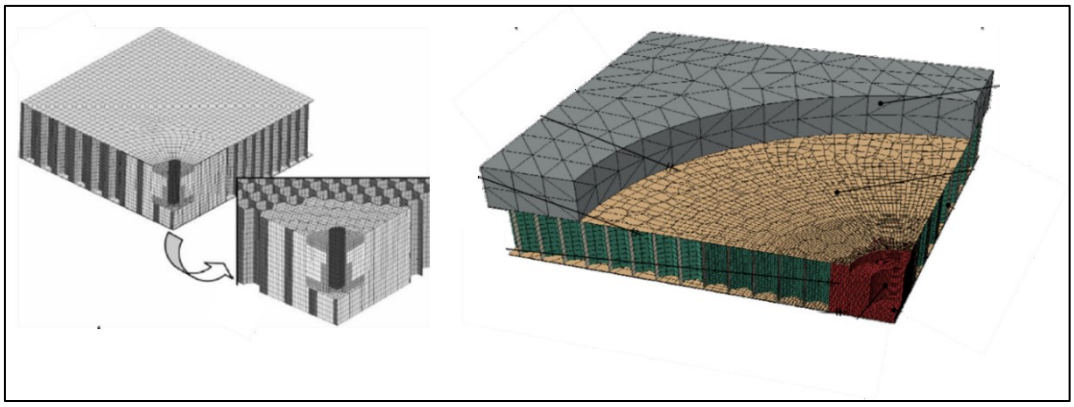
Bal peteği yapı katı olarak modellenebilir ve ortotropik malzeme özelliği kullanılabilir. Bu yöntemin modellemede kolaylık, global malzeme özelliklerini tanımlarken korelasyonda kolaylık gibi faydaları vardır. Dezavantajı ise bal peteği duvarlarında burkulma ya da yırtılma gözlemlenemiyor olmasıdır. Bu tarz modelleme örnekleri Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Bal peteği yapılarının katı modelleme örnekleri [5, 9]

Kabuk hücre duvarlı model

Bal peteği duvarları kabuk eleman ile modellenebilir. Bu yöntemin avantajı bal peteği yapının davranışı, burkulması ve hasara uğraması detaylı bir şekilde gözlemlenebiliyor olmasıdır. Dezavantajı ise modelin geometrik şeklinin oluşturulmasında zorluk ve bal peteği yapının yapısal kusuralar gibi bazı özel durumlardan dolayı orijinal malzemenin özelliğini tam olarak yansıtmaması dolayısıyla malzeme özelliğinin tespiti ve modele aktarılmasındaki zorluk sayılabilir. Bu tarz modelleme örnekleri Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Bal peteği yapılarının kabuk hücre duvarı modelleme örnekleri [9, 13]

İki boyutlu model

Bal peteği yapı kabuk bir katman olarak da modellenebilir. Bu oldukça ilkel bir yöntemdir. Çok büyük modellerde kullanışlı olabilmektedir ama lokal davranışı izlemek ve alt parça analizlerini gerçekleştirmek için uygun bir yöntem değildir.

5.1.2. Eleman boyutu

Eleman boyutu özellikle lineer olmayan analizlerde çok önemli bir konumda yer almaktadır. Eleman boyutunun büyük olması yanlış sonuçlar verebilecekken fazla küçük olması da çözüm süresinin uzamasına sebep olmaktadır. İdeal bir eleman boyutu belirlemek için eleman boyutu yakınsama çalışması yapılmalıdır. Bu çalışma farklı eleman boyutları dolayısıyla farklı eleman sayılarından oluşan aynı sonlu elemanlar modelinin aynı şartlar altındaki sonuçları kıyaslamayı içermektedir. Kıyaslanan değerin yakınsadığı eleman sayısı dolayısıyla eleman boyutu seçilmelidir. Gömülü bağlantı elemanı sisteminin hasar modunu incelerken bal peteği yapısının davranışı önemli olduğu için özellikle bal peteği yapısı üzerinden eleman boyutu yakınsama çalışması yapılmalıdır.

5.1.3. Yapısal kusurların ele alınması

Hücreli çekirdek yapılarında çok fazla yapısal kusur mevcuttur. Yapısal kusurların sonlu elamanlar modele aktarılması oldukça önemli bir konudur. Literatürde bununla ilgili birçok çalışma ve farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar, rasgele nodların bozulması, değişen elastik modül ya da duvar kalınlığının tanımlanması, hücre duvarlarının dalgalı

olarak modellenmesi, hücrelerin açısal deviasyonu ve bilgisayarlı tomografi taraması ile geometrideki gerçek yapısal kusurların belirlenmesidir [39]. Bu yöntemler simüle edilmiş modelin mekanik özelliklerini ideal geometriye göre oldukça düşürür ve dolayısıyla gerçek yapıdaki yapısal kusurlara yaklaşılmış olur. Bu yaklaşımlara alternatif olarak, ideal geometri üzerinde malzeme özelliği değerlerinin düşürülmesi de uygulanan yöntemlerden bir tanesidir. Heimbs [9] bu yöntemin güzel bir korelasyon sağladığını ve gerçekçi burkulma dağılımını koruduğunu ifade etmiştir. Seemann ve Krause [39] bu yöntemin en etkili ve mühendislik uygulamaları için uygun olan olduğunu ama burkulma sonrası davranışı değiştirdiğini ifade etmiştir.

5.2. Yüzey Tabaka Modellemesi

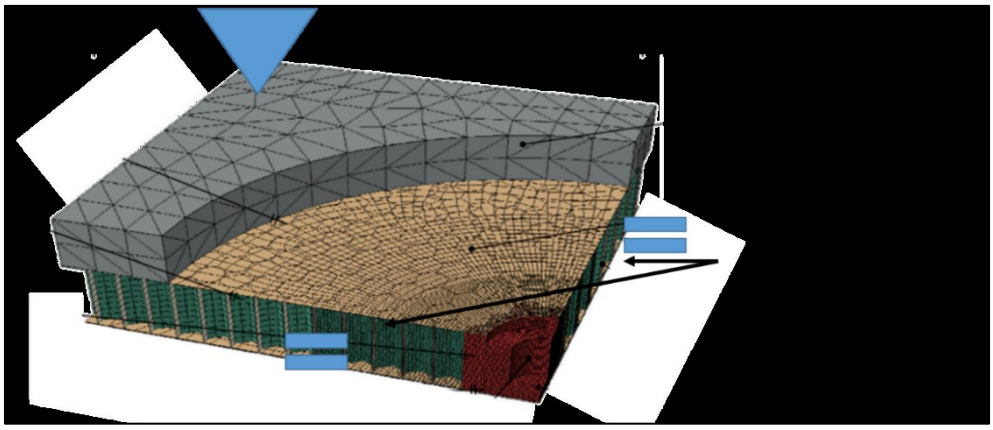
Bal peteği çekirdek modellemesiyle benzer şekilde, literatürde katı ve kabuk eleman ile modellenmiş yüzey tabakalar gözlemlenmiştir. Sandviç yapılarda yüzey tabaka kalınlığı kullanılan panelin boyutlarına göre oldukça küçük olduğu için kabuk eleman ile modellemek mantıklıdır.

5.3. Gömülü Bağlantı Elemanı Modellemesi

Çoğu durumda gömülü bağlantı elemanının kendisi nerdeyse rijitmiş gibi davrandığı için literatürde gömülü bağlantı elemanının kendisi rijit olarak ya da katı olarak modellenmiştir. Gömülü bağlantı elemanının hiç modellenmediği çalışmalar da yer almaktadır. Dolgu malzemesi bazı durumlarda hasara uğrayabileceği için literatürde katı olarak modellenmiştir.

5.4. Sınır Koşulları

Literatürdeki hemen hemen her modellemede simetri sınır şartı uygulanarak modelin yarısı ya da çeyreği modellenmiştir. Bu sayede çözüm hızı oldukça artmaktadır. Şekil 5.3'de gömülü bağlantı elemanları modellemesinde kullanılan simetri ve test fikstürü sınır şartları görülmektedir.



Şekil 5.3. Gömülü bağlantı elemanı modelindeki test fisktürü ve simetri sınır şartları [13]

5.5. Analiz Tipi

5.5.1. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslaması

Katı mekaniği problemlerinin çözümünde temel olarak iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır ve bunlar yer değiştirme miktarına bağlı olarak küçük yer değiştirme teorisi ve büyük yer değiştirme teorisidir. Yer değiştirmenin ve rotasyonun küçük olduğu durumlarda gerinim ve yer değiştirme arasında lineer bir ilişki kurmak mümkündür. Aynı zamanda küçük yer değiştirme teorisinde deforme olmuş ve deforme olmamış durumların aynı halde olduğu kabul edilir.

Küçük yer değiştirme teorisi sonlu elemanlar çözümünde kullanıldığında gerinimlerin ve rotasyonların dereceleri oldukça önemli bir hal almaktadır. Gerinim ve rotasyonların 10-2 derecesinde olduğu durumlarda küçük yer değiştirme teorisinin kullanımından kaynaklı hata genellikle %1'in altında olmaktadır ve oldukça hassas bir sonuç vermektedir. Bu teori gerinim ve rotasyon değerlerinin daha küçük olduğu problemlerde çok daha iyi sonuçlar vermektedir [40].

Sonlu elemanlar metodu bir yapının ya da malzemenin dayanım değerlerini bulmak için kullanıldığı analizlerde yapıda hasarın oluşması beklendiği için büyük yer değiştirme teorisi kullanılmalıdır.

Büyük yer değiştirmenin olduğu durumlarda mevcut yapı ilk durumda bulundu konuma göre önemli ölçüde hareket eder. Bu nümerik analizde her zaman aralığında büyük yer değiştirmenin meydana geldiğini ifade eder. Yer değiştirme meydana gelirken referans durumun tanımlanması çok önemlidir. Mühendislik problemlerinde iki farklı yaklaşım mevcuttur. Lagrangian anlatımına göre tüm değerler ilk haldeki duruma göre ifade edilirken, Eulerian anlatımında tüm değerler güncel halin terimi olarak ifade edilmektedir [40].

Eulerian anlatımı daha çok akışkanlar mekaniğinde kullanılmaktadır. Katı mekaniği için lagrangian anlatımı çok daha uygundur. Mühendislik problemlerinde kullanılmak üzere iki farklı Lagrangian anlatımı mevcuttur. Toplam Lagrangian formülasyonuna göre tüm değişkenler ve denklemler referans duruma göre tanımlanmıştır.Yenilenmiş Lagrangian formülasyonuna göre tüm değişkenler ve denklemler bir sonraki zaman adımında belirlenecek olan güncel duruma göre tanımlanmaktadır [41].

5.5.2 Explicit ve implicit analiz kıyaslaması

Katı mekaniği sonlu elemanlar çözümleri özellikle sanki statik problemler implicit ve explicit çözüm metodları ile çözülebilmektedir. İki metot da istenen çözümü aşamalı olarak sağlamaktadır.

Implicit metodunda problem aşamalı olarak çözülür ve istenen çözüm yakınsama kriteri sağlandığı zaman bulunmuş olur. Explicit metodunda ise sonlu elemanlar denklemleri dinamik olacak şekilde tekrar düzenlenir ve herhangi bir iterasyon yapılmadan aşamalı bir şekilde bulunur.

Implicit yaklaşımı çözülecek problem zamana bağlı olmayan bir durum ise tercih edilebilir. Statik problemler implicit yaklaşımı ile kolay bir şekilde çözülebilir. Explicit yaklaşımı ise çözülecek problemin zamana bağlı olduğu durumlarda kullanılabilir. Özellik yüksek şekil değiştirmenin olduğu çarpışma, ezilme, kırılma ve metal şekillendirme gibi analizler explicit yaklaşımı ile çözülebilmektedir [41]. İmplicit yaklaşımının özellikle 2B temel problemlerin çözümünde çok başarılı olduğu ve explicit yaklaşımının ise karmaşık problemlerde daha kullanışlıdır. Ayrıcı explicit yaklaşımının kontaktan ve malzemeden kaynaklı lineer olmayan durumları içeren problemlerin çözümünde iyidir [41].

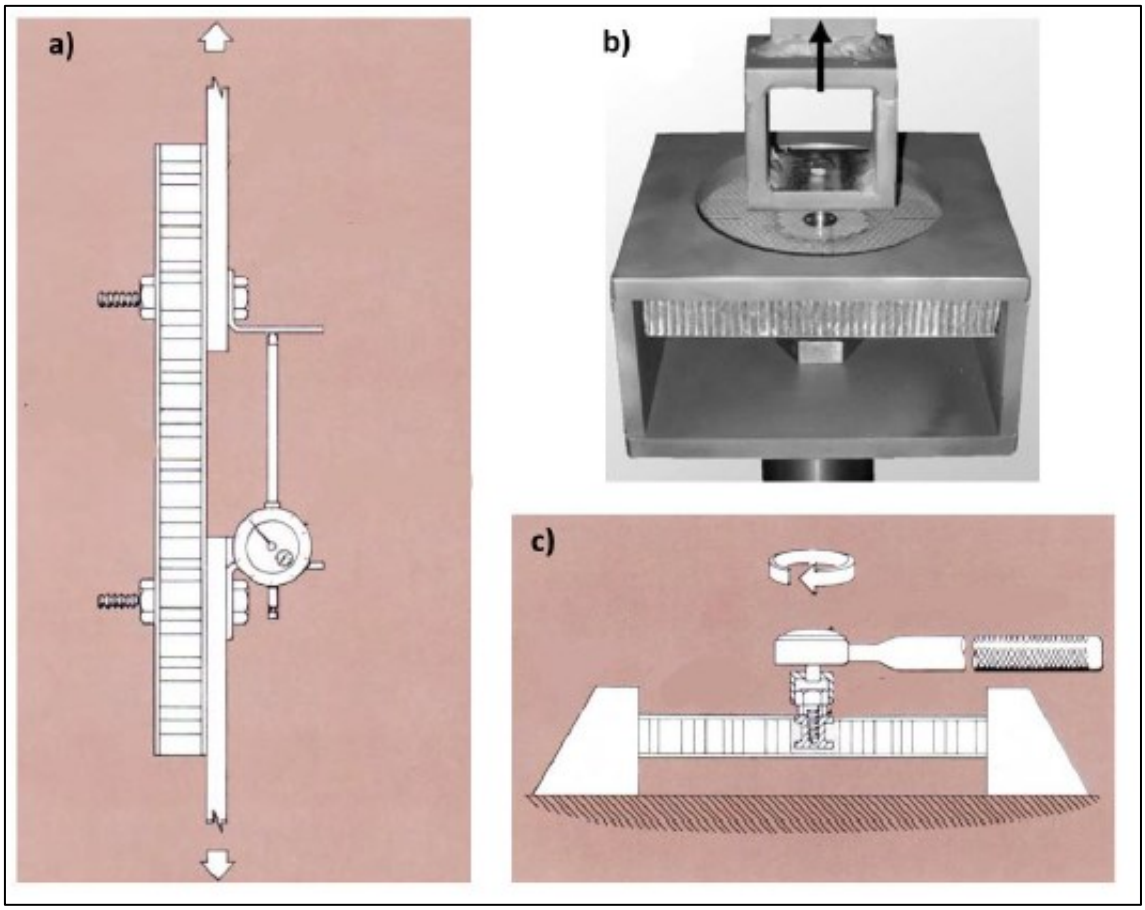
6. GÖMÜLÜ BAĞLANTI ELEMANI DENEYSEL YÖNTEMLERİ

Literatürde Gömülü Bağlantı Elemanı testleri için birçok farklı boyut ve metot kullanılmıştır. Bu çalışmada ECSS Gömülü Bağlantı Elemanı tasarım el kitabı [1] test standartları dikkate alınmıştır. SHUR-LOK şirketinin yayınladığı dokümanda da ECSS ile benzer bir yöntem tavsiye edilmektedir [29]. Güvenilir sonuçlar elde etmek için bu standartlara uyulmalıdır. Bazı genel açıklamalar şu şekildedir:

• En az üç numune test edilmelidir.
• Kalıpla üretilen alt parçalar için testten önce tam kürlenme sağlanmalıdır.
• Cıvata, tasarımda kullanılacak olan tork değeri ile torklanmalıdır.
• Sehim, bir ölçüm cihazıyla ölçülüp kayıt edilmelidir.

SHUR-LOK [29]'a göre, gömülü bağlantı elemanlarına uygulanan herhangi bir yük; gerilim, kesme veya tork yüklerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, bir gömülü bağlantı elemanı üç farklı test koşulu altında test edilerek doğrulanmalıdır. Bunlar çekme testi, kesme testi ve tork testidir (Şekil 6.1). Fakat istisnai durumlar dışında gömülü bağlantı elemanlarına kurulum dışında tork yükü gelmemekle beraber tork uygulanan durumlarda farklı uygulamalar ile kesme yüküne dönüştürülmesi mümkündür. Şekil 6.2.a ve Şekil 6.2.b'de sırasıyla örnek düzlem dışı ve düzlem içi test sonuçları görülmektedir.

Testler yapılmadan önce testin nasıl ve hangi şartlar altında (nem, sıcaklık v.b.) yapılacağı detaylı olarak belirtilmelidir. Kullanılacak fisktürler belirlenerek fotoğraf veya resimlerle desteklenmelidir. Test kurulumunun ve prosedürünün eksiksiz olması testte karşılaşılacak olası sorunların önüne geçecektir. Yük ve sehim eğrileri kayıt altına alınmalıdır [1, 29].



Şekil 6.1. a) düzlem içi, b) düzleme dik ve c) tork yükleme testleri [1, 29]

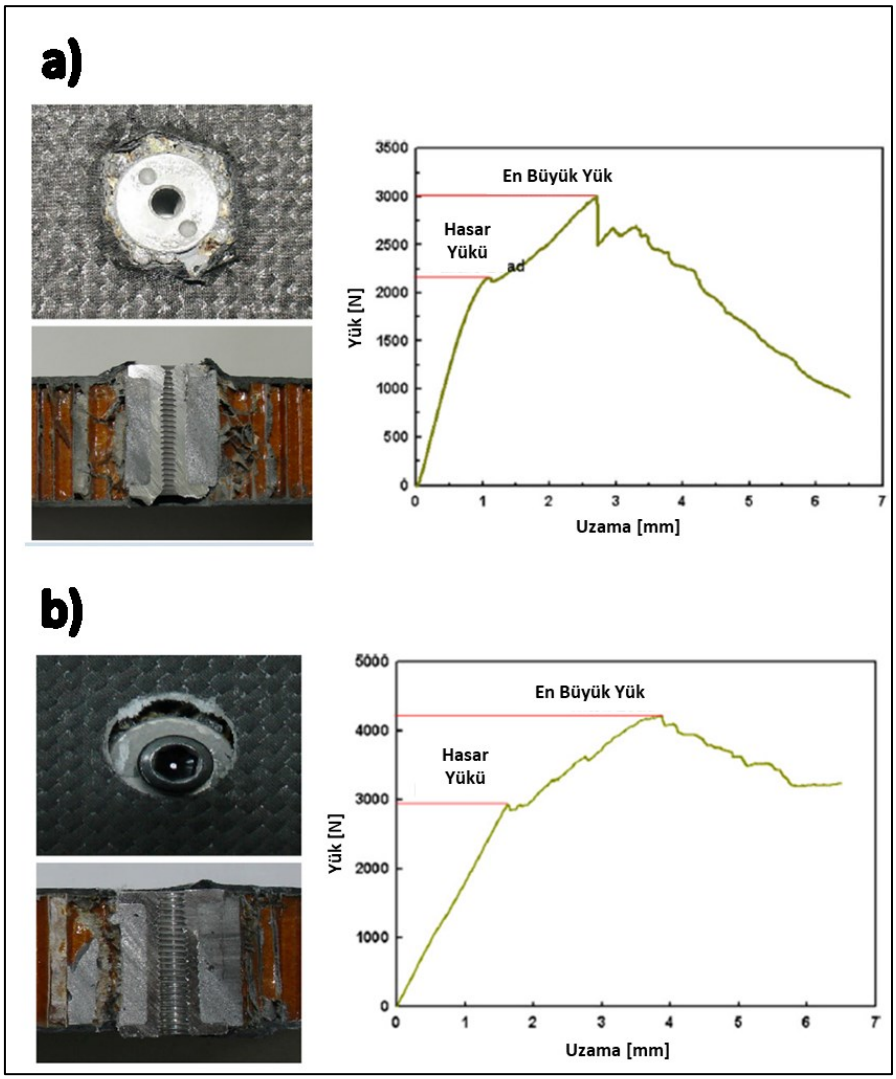
6.1. Düzleme Dik Çekme Testi

Test numune boyutları en azından 80 mm x 80 mm olmalıdır fakat test sırasında çekirdeğin ezilmesi gibi sorunlarla karşılaşmamayı garantiye almak için 100 mm x 100 mm boyutlar kullanılmalıdır.

Testi gerçekleştiren cihaz değerleri okuyabilmeli ve kayıt edebilmelidir. Yükleme hızı 2 mm/dk olmalıdır. Yükleme yönü düzlem dışı ve düzleme dik olmalıdır. Kullanılan bağlayıcı maksimum yüke dayanabilmelidir. 70 mm delik çapına sahip bir fikstür kullanılmalıdır ve numune fikstürün merkezine yerleştirilmelidir. Düzleme dik çekme testleri için kuvvet deplasman eğrisi önce lineer başlayıp daha sonra lineer olmayan bir davranış gösterir. Lineerliğin bittiği noktaya İlk pik değeri denir [1].

6.2. Düzlem İçi Çekme Testi

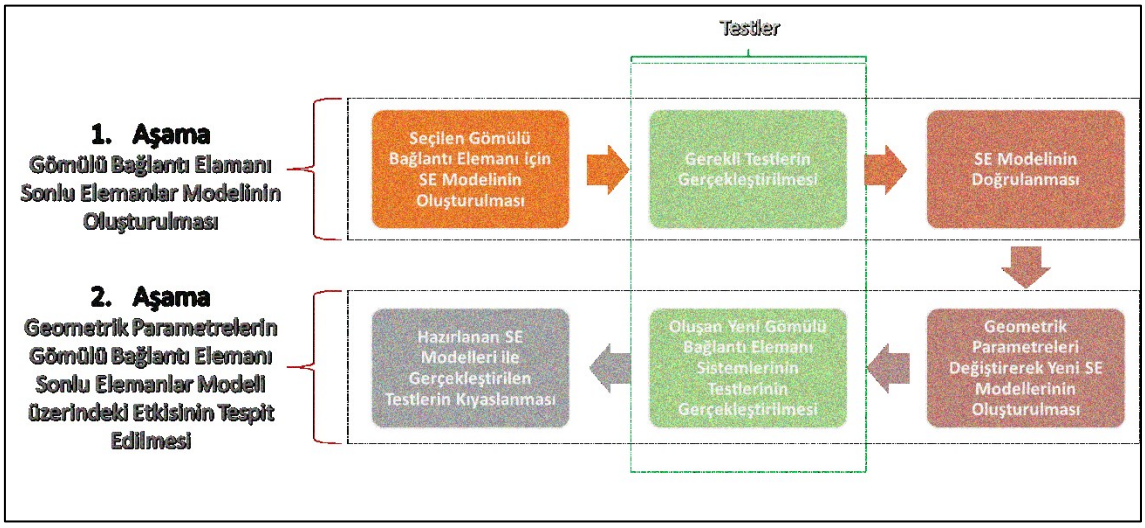
Test numune boyutlar 180 mm x 60 mm olmalıdır. Bağlama plakalarının boyutları kalınlık boyunca olan gömülü bağlantı elemanları için 130 mm x 40 mm x 5 mm ve simetrik olmalıdır. Diğer durumlarda bağlama plakalarının boyutları 200 mm x 40 mm x 5 mm olmalıdır. Bağlayıcılar numunenin merkezinde olmalıdır ve kuvvet doğrultusu numunenin merkezinden geçmelidir. Gömülü bağlantı elemanı tasarımında planlanan cıvata ve torklama değerleri kullanılmalıdır ve kullanılan cıvata maksimum yüke dayanabilmelidir. Test cihazı değerleri okuyabilmeli ve kayıt edebilmelidir. Yükleme hızı 2 mm/dk olmalıdır. Yük maksimum yükün %20 oranında düşerse numune kırılmış varsayılacaktır.



Şekil 6.2. Örnek a) düzleme dik ve b) düzlem içi çekme testi sonuçları [3]

7. MALZEME VE YÖNTEM

Özellikle bal peteği çekirdekli sandviç yapılarının kullanımı yaygınlaştıktan sonra gömülü bağlantı elemanlarının dayanımın tespiti oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Gömülü bağlantı elemanlarının dayanımları analitik, nümerik ve deneysel olarak tespit edilebiliyorken sonlu elemanlar metodu ile gömülü bağlantı elemanının dayanımın tespiti, analitik yöntemlere göre daha hassas ve deneysel yöntemlere göre daha hızlı ve daha maliyet etkin bir yöntem olmasından kaynaklı cazip bir konumda yer almaktadır. Sonlu elemanlar metodu ile dayanım tespiti için lineer olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi gerektiği için modelin gerçek durum ile kıyaslanarak doğrulanması gerekmektedir. Literatürde gömülü bağlantı elemanlarının modellendiği ve testler ile doğrulandığı birçok çalışma vardır. Bu çalışmada modellenerek testler ile doğrulanan sonlu elemanlar modelinin farklı geometrik değişkenlere karşı hassasiyeti incelenmiştir. Şekil 7.1'de görüldüğü üzere çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada seçilen panel boyunca standart bir gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme kuvveti altında sonlu elemanlar modeli oluşturulup testleri gerçekleştirilmiş ve model doğrulanmıştır.



Şekil 7.1. Çalışma yönteminin özeti

Çalışmanın ikinci aşamasında ise modeli hazırlanan ve doğrulanan gömülü bağlantı elemanı ile farklı geometrik değişkenlere sahip modeller oluşturulmuş ve her biri testler ile kıyaslanmıştır. Geometrik değişken olarak çekirdek kalınlığı, gömülü bağlantı elemanı çapı, yüzey tabaka kalınlığı ve gömülü bağlantı elemanı tipi ayrıca yükleme şekli

seçilmiştir. Sonuç olarak gömülü bağlantı elemanlarının dayanımlarını sonlu elemanlar modeli ile bulurken doğrulanmış bir model kullanıldığında geometrik değişkenlerin analizin sonucuna etkisi incelenmiştir. Çalışma boyunca gömülü bağlantı eleman sistemlerine yapılacak test ve konfigürasyonların özet tablosu Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Çizelge 7.1. Çalışma boyunca gömülü bağlantı elemanlara yapılacak olan test ve konfigürasyonların özet tablosu

	Gömülü bağlantı elemanı sistemi					
	Gömülü bağlantı elemanı		Sandviç yapı			
Grup No	Tipi	Çapı	Bal peteği Kalınlığı	Yüzey tabaka kalınlığı	Uygulanacak Test	Sonlu elemanlar modeli
1	Kalınlık Boyunca	M6	25,4 mm	0,41 mm	Düzlem dışı çekme	Korelasyon çalışması yapıldı.
2	Kalınlık Boyunca	M8	25,4 mm	0,41 mm	Düzlem dışı çekme	Kıyaslama yapıldı.
3	Kalınlık Boyunca	M6	45,6 mm	0,41 mm	Düzlem dışı çekme	Kıyaslama yapıldı.
4	Kalınlık Boyunca	M6	25,4 mm	0,3 mm	Düzlem dışı çekme	Kıyaslama yapıldı.
5	Kısmi Dolgu malzemeli	M6	25,4 mm	0,41 mm	Düzlem dışı çekme	Kıyaslama yapıldı.
6	Kalınlık Boyunca	M6	25,4 mm	0,41 mm	Düzlem içi çekme	Kıyaslama yapıldı.

7.1. Malzeme

Çalışmada kullanılacak olan numuneler alüminyum bal peteği çekirdek ve alüminyum yüzey malzemesinden oluşan sandviç yapı ile yine alüminyumdan üretilen gömülü bağlantı elemanından meydana gelmektedir. "1/8-5056-.0007" tipine sahip bal peteği yapının özellikleri Çizelge 7.2'de, bal peteği yapının malzemesi olan alüminyum 5056'nın özellikleri Çizelge 7.3'te, yüzey tabaka olarak kullanılan alüminyum 2024 T81'in özellikleri Çizelge 7.4'de ve gömülü bağlantı elemanının malzemesi olarak kullanılan alüminyum 7050 T7451'in özellikleri Çizelge 7.5'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Alüminyum 5056 bal peteği özellikleri

Yoğunluk [kg/m^3]	50
Elastik Modül [GPA]	0,669
Basma dayanımı [MPa]	1,793
Kesme modülü (yön 1) [GPA]	0,310
Kesme dayanımı (yön 1) [MPa]	1,379
Kesme modülü (yön 2) [GPA]	0,138
Kesme dayanımı (yön 2) [MPa]	0,759

Çizelge 7.3. Alüminyum 5056 alışım özellikleri

Bal peteği malzemesi	
Yoğunluk [kg/m^3]	2640
Elastik Modül [GPA]	71,0
Poissons oranı	0,33
Kesme modülü [GPA]	25,9
Kesme dayanımı [MPa]	179
Çekme dayanımı(akma) [MPa]	152
Çekme dayanımı(maksimum) [MPa]	290
Kopmadaki uzama (%)	35
Sertlik, Brinell	65

Çizelge 7.4. Alüminyum 2024 T81 alışım özellikleri

Yüzey tabaka malzemesi	
Yoğunluk [kg/m^3]	2768
Elastik Modül [GPA]	72,4
Poissons oranı	0,33
Kesme modülü [GPA]	28
Kesme dayanımı [MPa]	295
Çekme dayanımı(akma) [MPa]	372,3
Çekme dayanımı(maksimum) [MPa]	427,5
Kopmadaki uzama (%)	7
Sertlik, Brinell	128

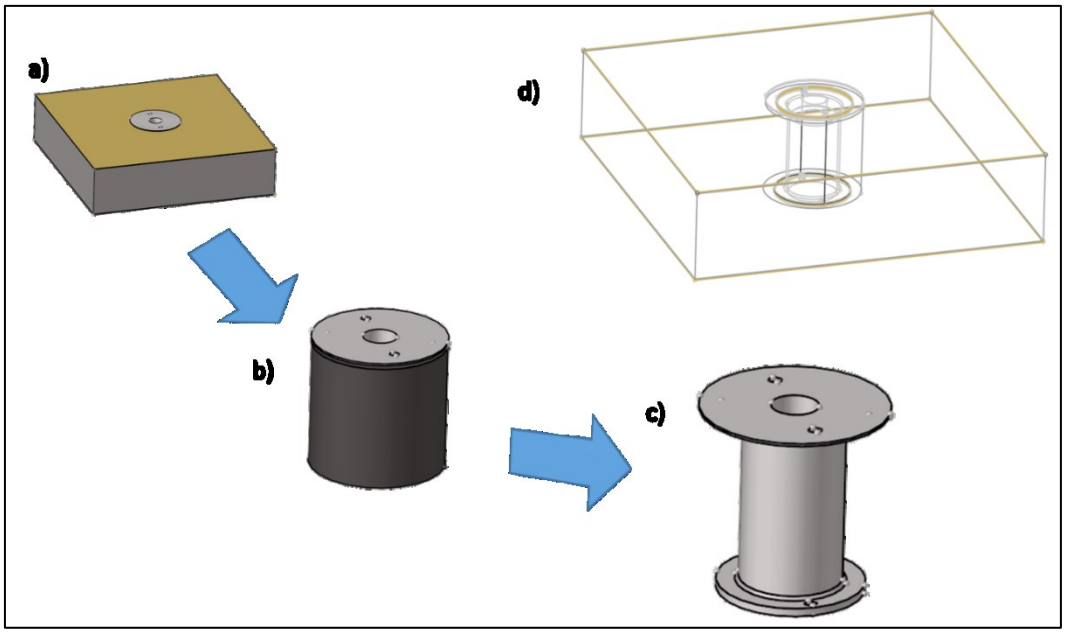
Çizelge 7.5. Alüminyum 7050 T7451 alışım özellikleri

Gömülü bağlantı elemanı malzemsi	
Yoğunluk [kg/m^3]	2823
Elastik Modül [GPA]	71,0
Poissons oranı	0,33
Kesme modülü [GPA]	27
Kesme dayanımı [MPa]	289,5
Çekme dayanımı(akma) [MPa]	441,2
Çekme dayanımı(maksimum) [MPa]	510,2
Kopmadaki uzama(%)	11
Sertlik, Brinell	140

7.2. Gömülü Bağlantı Elemanının Tasarımı

Çalışmada kullanılacak gömülü bağlantı elemanını belirlerken sektörde kullanılabilecek bir sandviç panel göz ölüne alınmış ve bir bağlantı gerekçesi oluşturulmuştur. Bir ekipmanın ya da yapısal bir parçanın panele bağlantısı düşünülerek panel kalınlığı boyunca olan bir gömülü bağlantı elemanı tasarlanmıştır.

Tasarım aşamasında veya daha önce tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilecek gömülü bağlantı elemanının test yüklerini ve karakteristiğini öngörmek için ilk aşamada bir analitik hesaplama yapmak gerekmektedir. Bu çalışmada birçok analitik yöntemin içerisinden ECSS [1]'in önerdiği yöntem tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli doğrulama çalışması yapılması için düzlem dışı çekmeye maruz kalan panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı sistemi seçilmiştir. Şekil 7.2.a'da panel boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanı sisteminin, Şekil 7.2.b'de gömülü bağlantı elemanı ve temsili dolgu malzemesinin, Şekil 7.3.c'de gömülü bağlantı elemanı ve Şekil 7.2.d'de gömülü bağlantı sisteminin şeffaf CAD görüntüleri görülmektedir. CAD'de kullanılan sandviç yapıdaki bal peteği temsili olarak katı modellenmiştir ve dolgu malzemesi yine temsili olarak gömülü bağlantı elemanının çevresini saracak şekilde çizilmiştir.

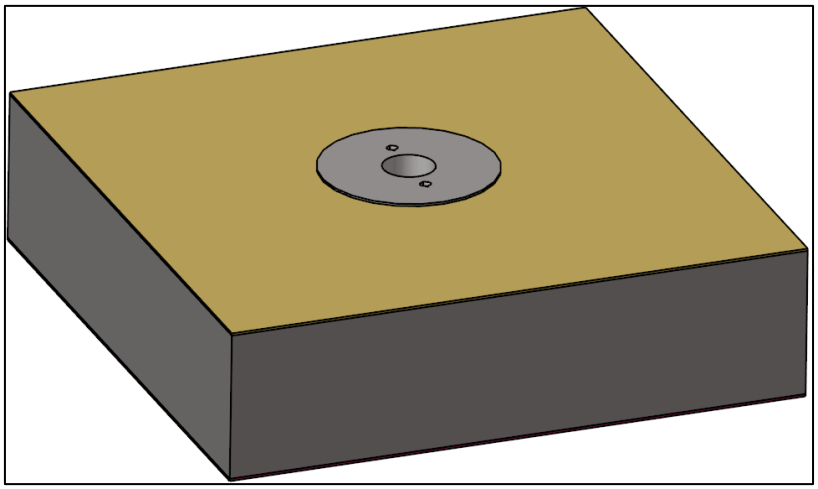


Şekil 7.2. a) Gömülü bağlantı elemanı sisteminin, b) temsili dolgu malzeme ile gömülü bağlantı elemanının, c) panel boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanının ve d) gömülü bağlantı elemanı sisteminin şeffaf CAD görüntüleri

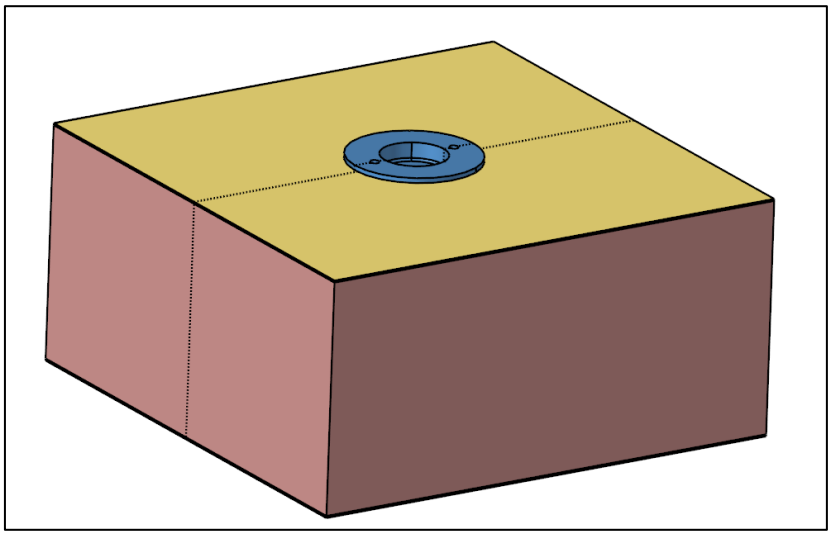
Düzlem dışı çekmeye maruz kalan panel kalınlığı boyunca tipli gömülü bağlantı elemanının ve sandviç yapının geometrik parametreleri değiştirilerek diğer gömülü bağlantı elemanı sistemleri elde edilmiştir. Elde edilen modeller;

- Gömülü bağlantı elemanının çapı büyütülerek,
- Bal peteği çekirdek kalınlığı arttırılarak,
- Yüzey tabaka kalınlığı azaltılarak,
- Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı kullanarak ve
- Panel kalınlığı boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanı sistemine düzlem içi yükleme maruz bırakılarak oluşturulmuştur.

Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı sistemi CAD görüntüsü Şekil 7.3'de görülmektedir. Gömülü bağlantı elemanının çapının artması dolgu malzemesinin çapının büyümesi anlamına gelmektedir. Analitik hesapta açıkça görüldüğü üzere dolgu malzemesi çapının artması gömülü bağlantı elemanının yüzey dışı çekme dayanımını arttırmaktadır. Dolayısıyla bu gömülü bağlantı elemanın başlangıçtakine göre daha yüksek dayanım değerine sahip olması beklenmektedir.



Şekil 7.3. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü

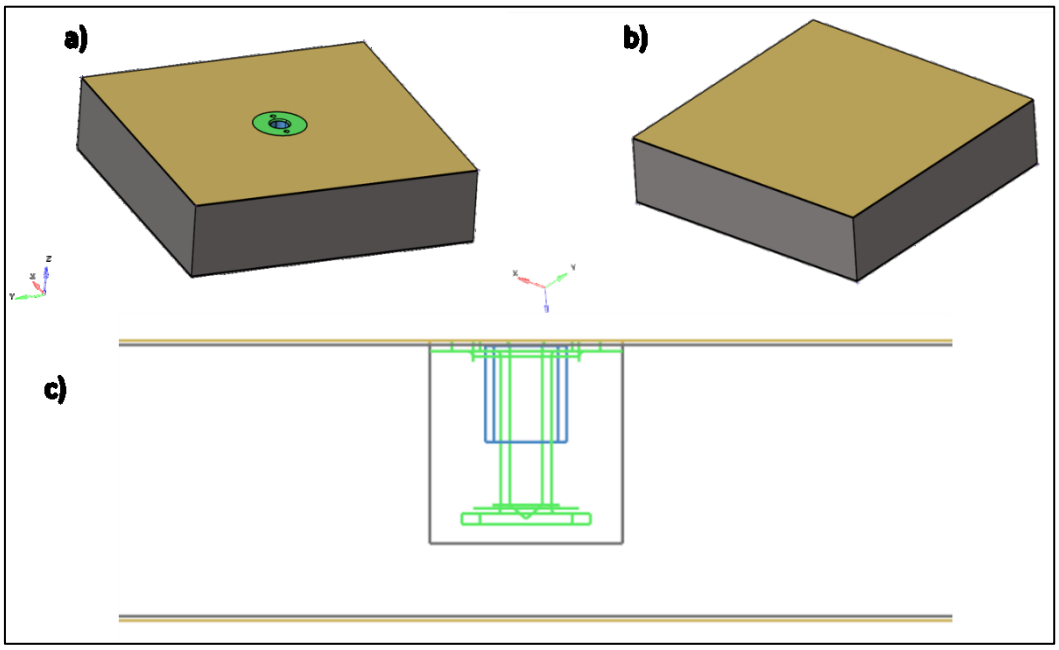


Şekil 7.4. Bal peteği yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü

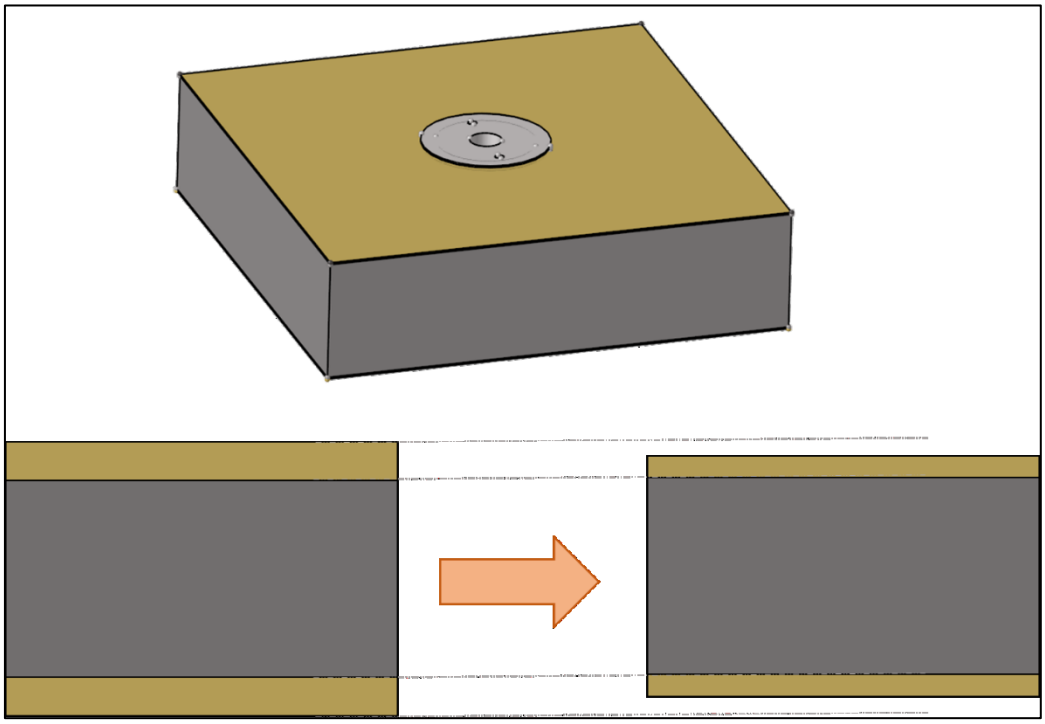
Elde edilen diğer gömülü bağlantı elemanı ise daha kalın bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç yapı içerisindeki gömülü bağlantı elemanıdır (Şekil 7.4). Yine analitik hesaptan yola çıkılarak başlangıçtaki modele göre daha yüksek düzlem dışı dayanım değeri göstermesi beklenmektedir.

Hazırlanan diğer bir sonlu elemanlar modeli ise kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı modelidir. Şekil 7.5'de kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sisteminin üstten, alttan ve yandan şeffaf görüntüsü görülmektedir.

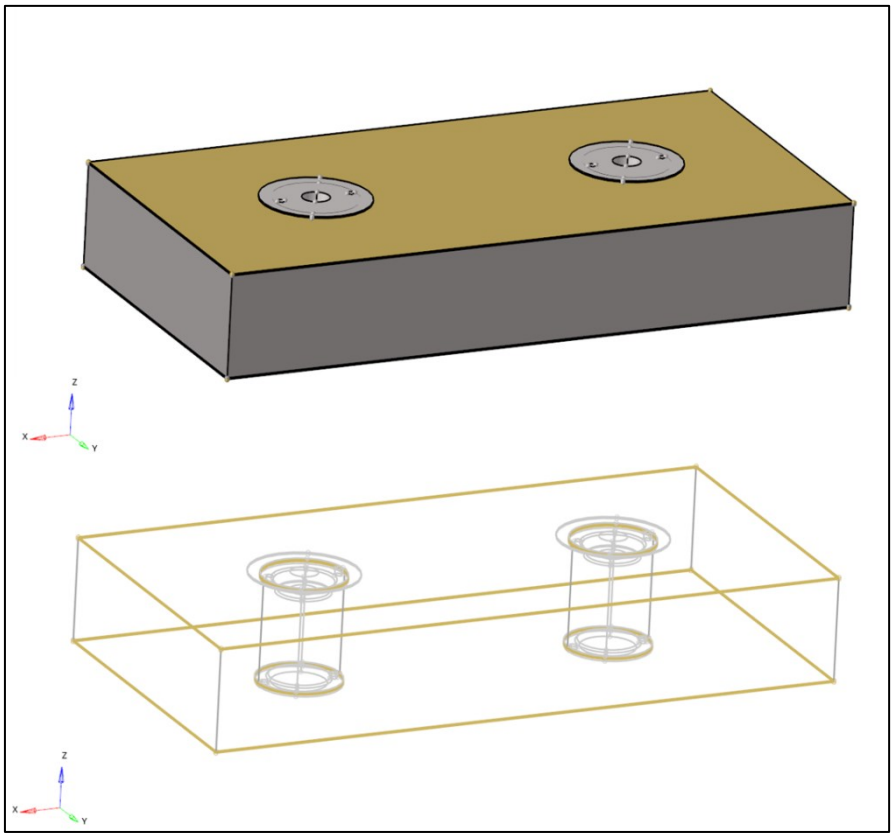
Sandviç yapının yüzey tabakasının inceltildiği ve son olarak düzlem içi yükleme için hazırlanan panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı sistemlerinin CAD görüntüleri Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de görülmektedir.



Şekil 7.5. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi a) üst, b) alt ve c) şeffaf CAD görüntüsü



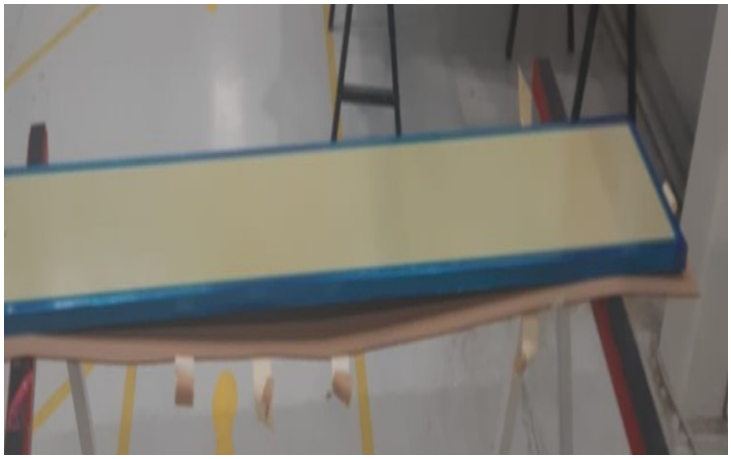
Şekil 7.6. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılan gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü



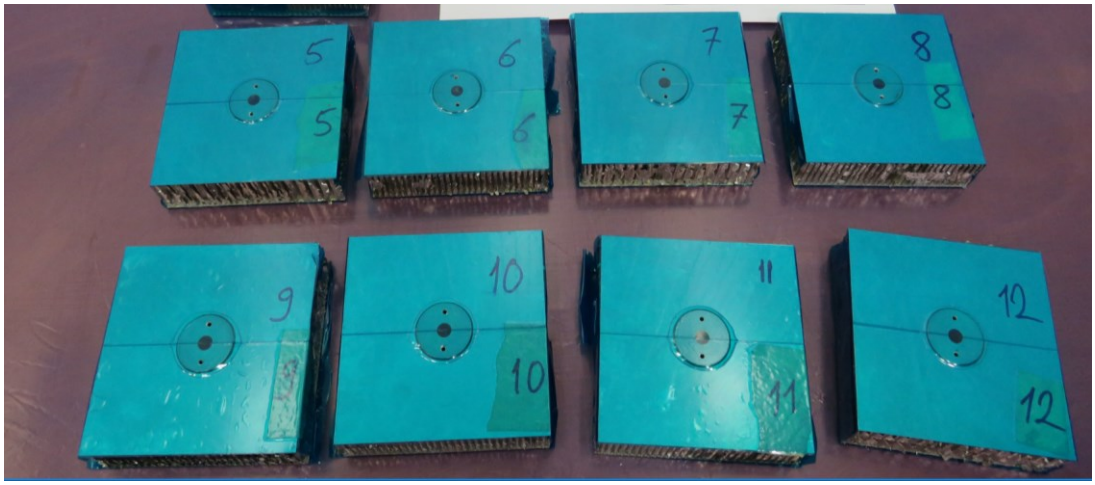
Şekil 7.7. Düzlem içi yükleme için hazırlanan gömülü bağlantı elemanı CAD görüntüsü

7.3. Numunelerin Üretilmesi

Testleri gerçekleştirilen gömülü bağlantı elemanları ECSS'te anlatılan b tipi yani panel üretildikten sonra entegre edilen gömülü bağlantı elemanlarıdır. İlk önce yüzey tabakalar ile çekirdek yapı yapıştırılmış ve kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemi tamamlanan panele (Resim 7.1) gömülü bağlantı elemanları yerleştirilmiş ve kuponlar kesilmiştir (Resim 7.2). Son olarak kuponlardaki gömülü bağlantı elemanlarına dolgu malzemesi doldurma işlemi uygulanmıştır. Dolgu malzemesinin hazırlanışı ve dolum işlemi Resim 7.3 ve Resim 7.4'de görülmektedir. Dolum işleminde kullanılan tabanca ve dolum işlemi tamamlanan numunelerin görüntüsü Resim 7.5'de görülmektedir.



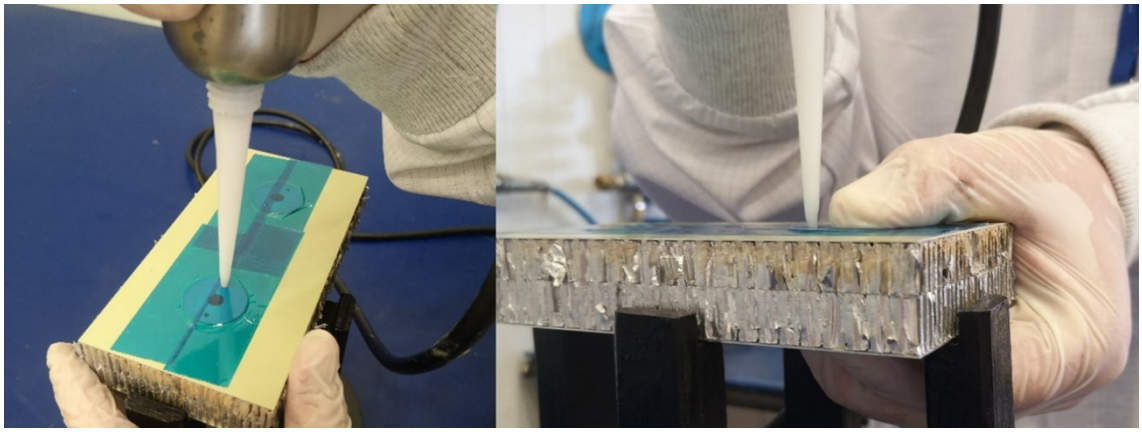
Resim 7.1. Üretimi tamamlanan sandviç panel



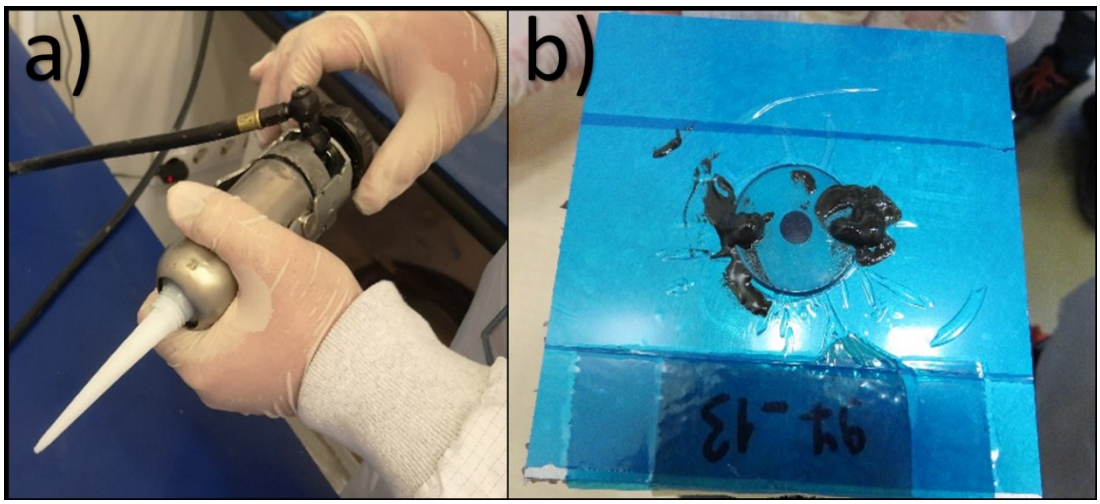
Resim 7.2. Dolgu malzemesi dolum işlemi öncesi gömülü bağlantı elemanı kuponları



Resim 7.3. Dolgu malzemesinin hazırlanması ve hava tabancasında kullanılmak üzere kartuş dolumun yapılması



Resim 7.4. Gömülü bağlantı elemanı kuponuna dolum işleminin yapılışı

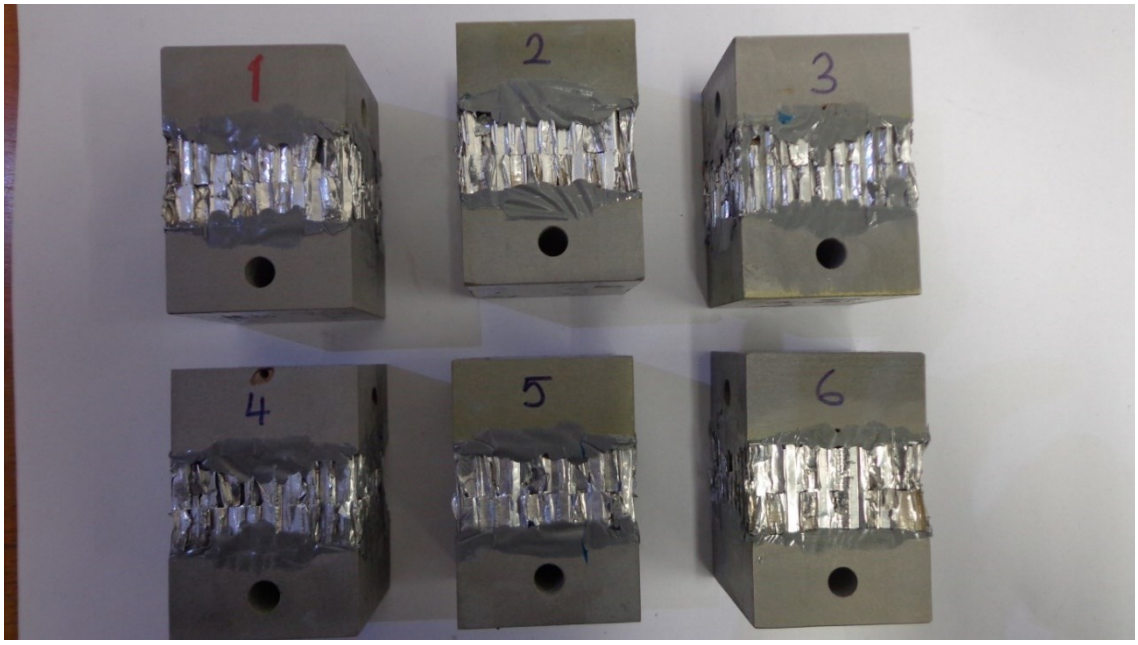


Resim 7.5. a) dolum işlemi yapmak için kullanılan hava tabancası, b) dolum işlemi gerçekleştirilen kupon görüntüsü

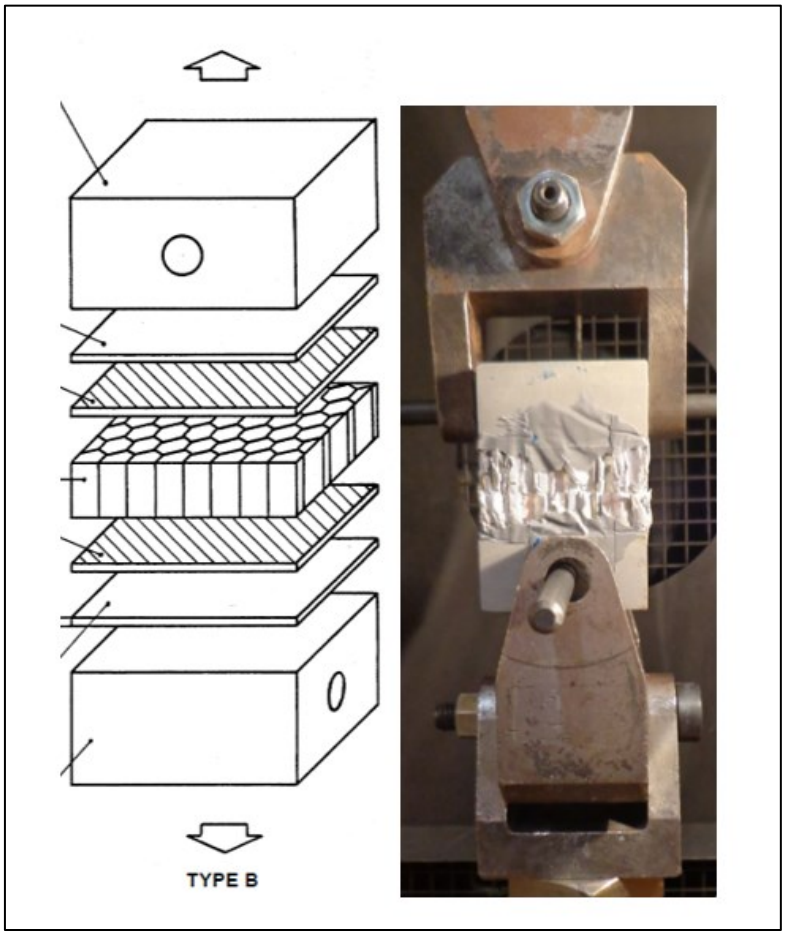
7.4. Gerçekleştirilen Testler

7.4.1. Bal peteği çekirdek yapı çekme testi

Alüminyum bal peteği yapısının davranışını incelemek için sandviç kupona düzlem dışı çekme testi uygulanmıştır. Testler ASTM C297'ye göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler 50 mm'ye 50 mm ölçüsünde hazırlanmıştır ve test için 6 tane numune kullanılmıştır. Testin kabul edilebilir hasar modu sandviç panelde oluşan hasardır. Yapıştırıcıda meydana gelen ayrılmalar kabul edilebilir hasar modu değildir. Resim 7.6 ve Şekil 7.8'de test için hazırlanan numuneler ve testin uygulanma şekli görülmektedir.



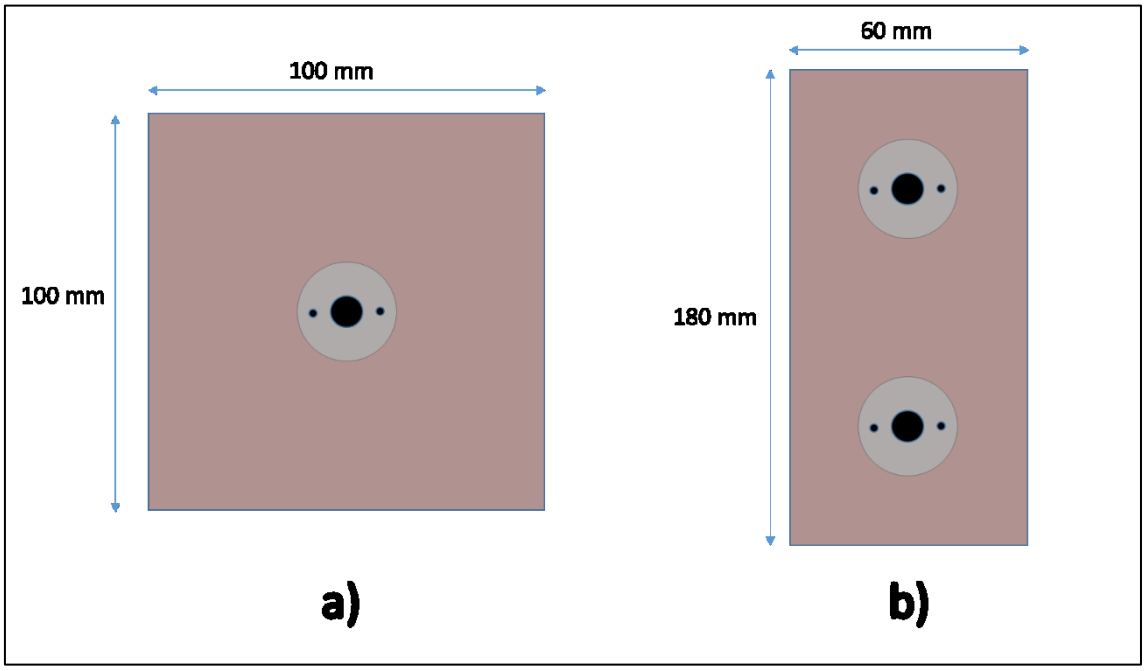
Resim 7.6. Bal peteği çekirdek malzemesine uygulanacak düzlem dışı çekme testi için hazırlanan numuneler



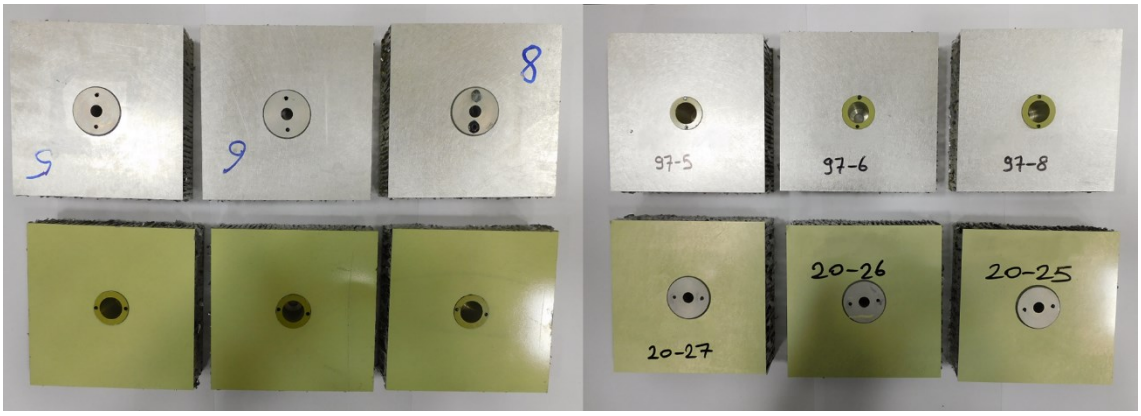
Şekil 7.8. Bal peteği yapılarına düzlem dışı çekme test uygulaması

7.4.2. Gömülü bağlantı elemanı testleri

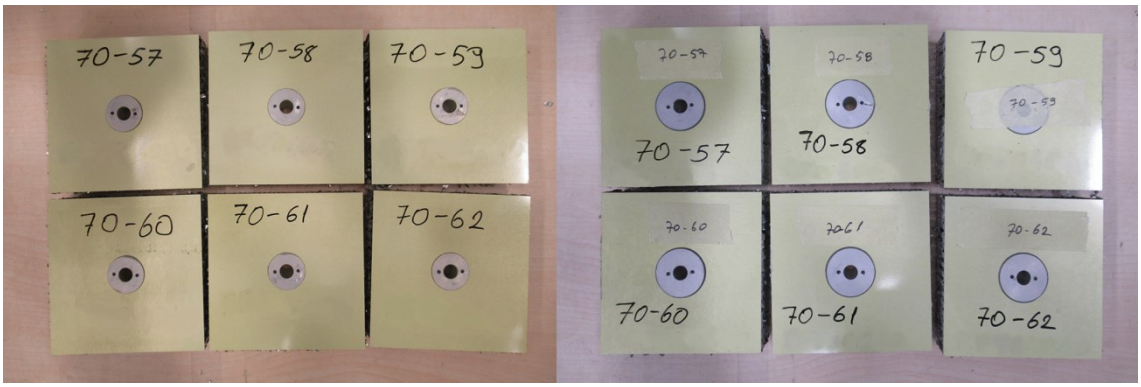
Gömülü bağlantı elemanı sistemi testleri 5. Bölümde anlatılan test standartlarına uygun numuneler ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.9). Daha kalın çekirdeğe sahip sandviç yapıya sahip gömülü bağlantı elemanı sistemi test grubu için dört diğer gömülü bağlantı elemanı sistemleri için altı numune üretilmiştir. Numuneler Resim 7.7, Resim 7.8, Resim 7.9, Resim 7.10, Resim 7.11 ve Resim 7.12'de görülmektedir. Yapıştırma öncesi uygulan ön işlem alüminyum levha üzerinde sarıya benzer bir renk bırakmaktadır. Bu çalışmada kullanılan küçük flanşlı gömülü bağlantı elemanlarında bu işlemin dayanıma etkisi beklenmemektedir. Bu sebeple ön işlem uygulanmamış paneller de kullanılmıştır. Bu sebepten dolayı numunelerde farklı renkler ve tonları görülmektedir. Resim 7.13'te sırasıyla düzlem dışı ve düzlem içi çekme testlerinin uygulanışı görülmektedir.



Şekil 7.9. Düzlem dışı ve düzlem içi çekme testleri için numune boyutları



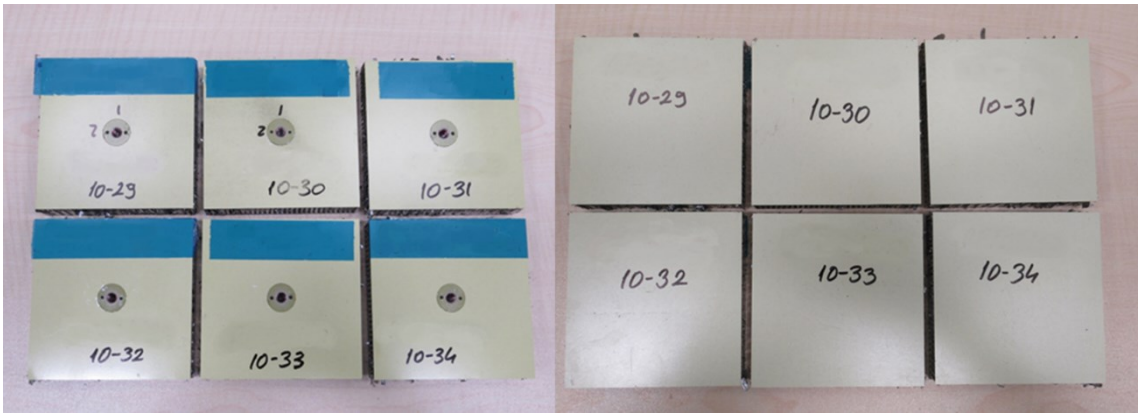
Resim 7.7. Düzlem dışı çekme testi için panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



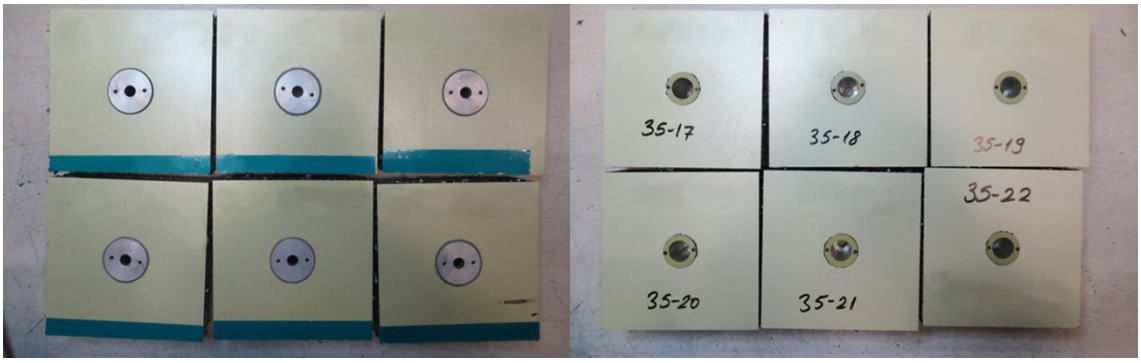
Resim 7.8. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



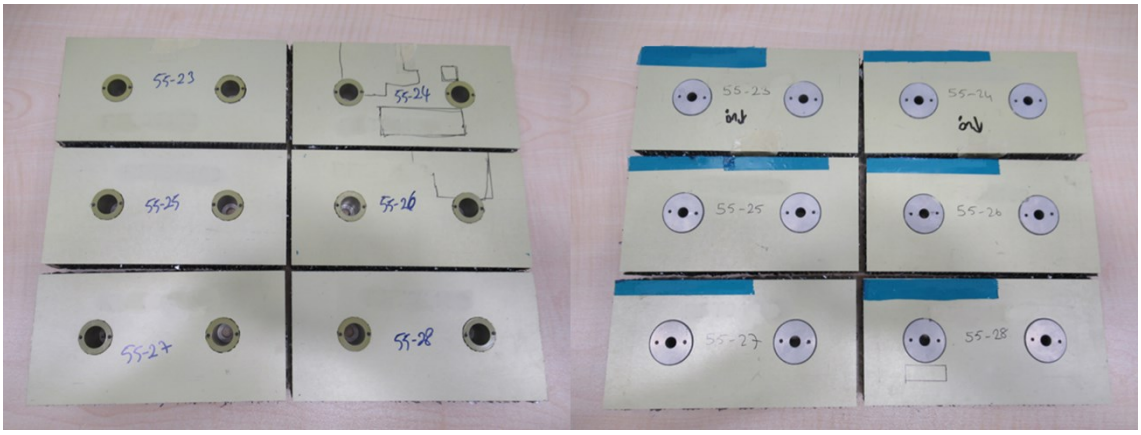
Resim 7.9. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak bal peteği yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



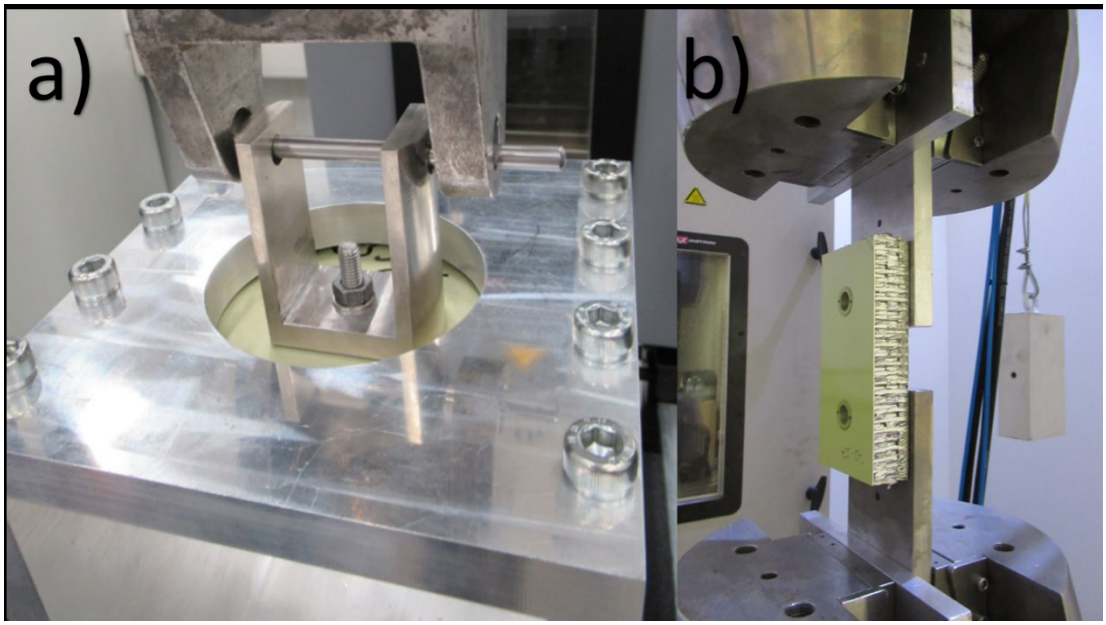
Resim 7.10. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



Resim 7.11. Düzlem dışı çekme testi uygulanacak yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



Resim 7.12. Düzlem içi çekme testi uygulanacak panel kalınlığı boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri

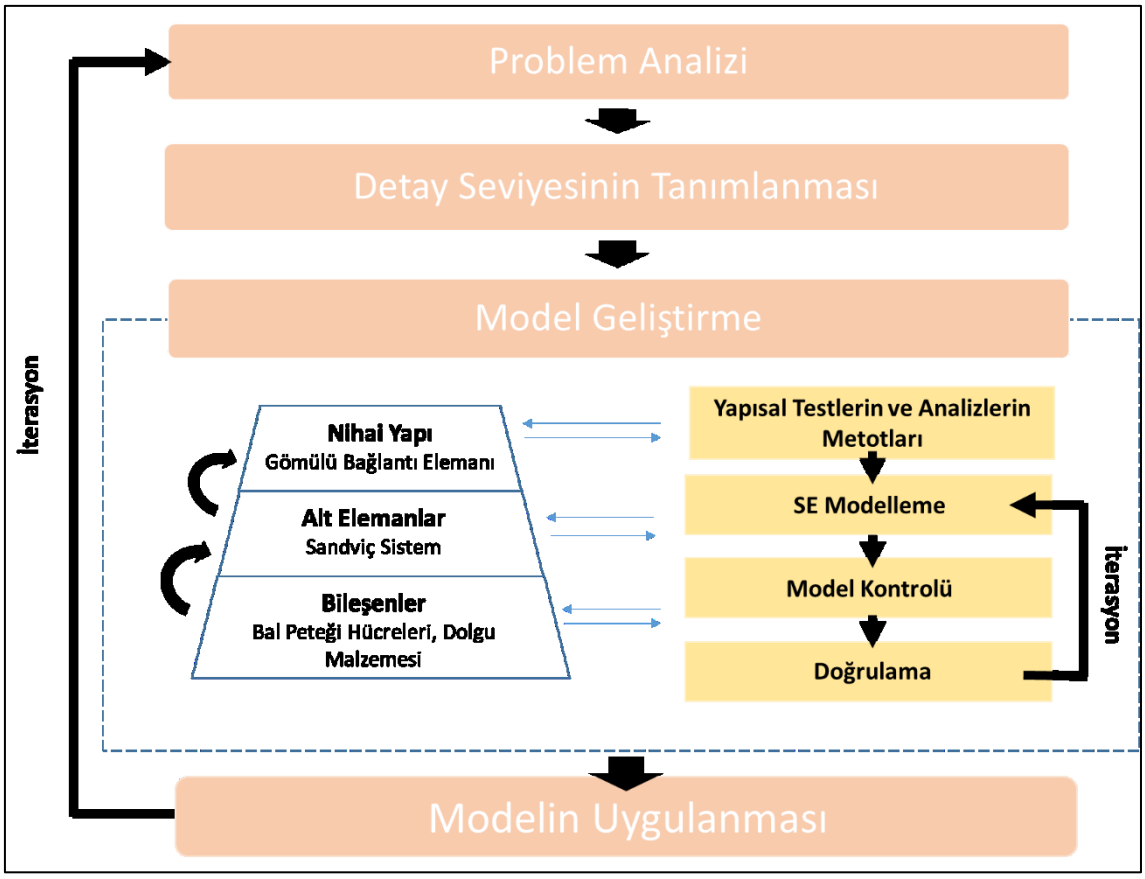


Resim 7.13. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi çekme testlerinin gerçekleştirilmesi

7.5. Sonlu Elemanlar Modeli

7.5.1. Yöntem

Bir yapının özellikle lineer olmayan sonlu elemanlar modeli oluşturulması oldukça kapsamlı bir uygulamadır. Modelin doğru çalışabilmesi için detaylı iterasyonlar yapılmalıdır. Seemann ve Krause [13] sonlu elemanlar modeli oluşturulacak bir gömülü bağlantı elemanı sistemi için izlenecek yolu Şekil 7.10'da özetlemişlerdir.

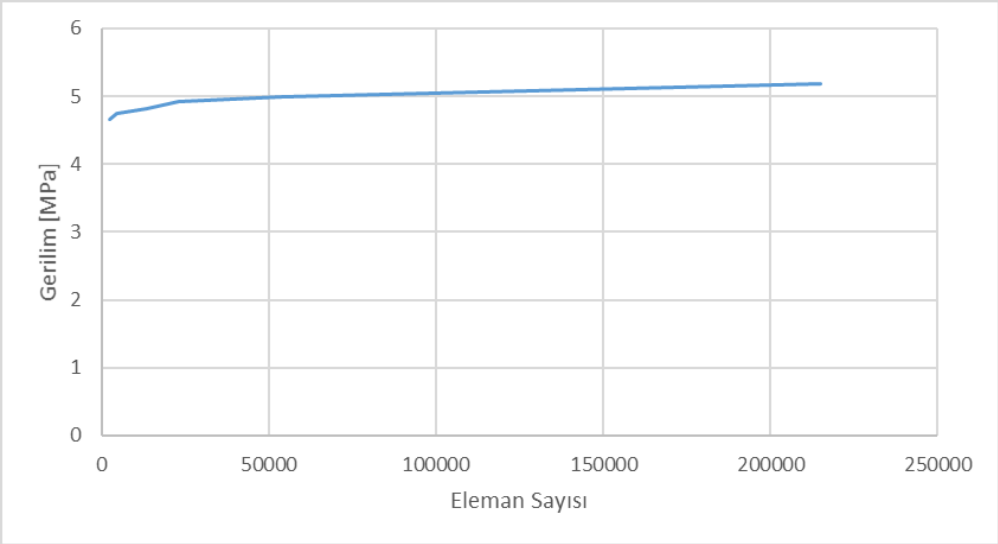


Şekil 7.10 Kompleks yapıların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması [13]

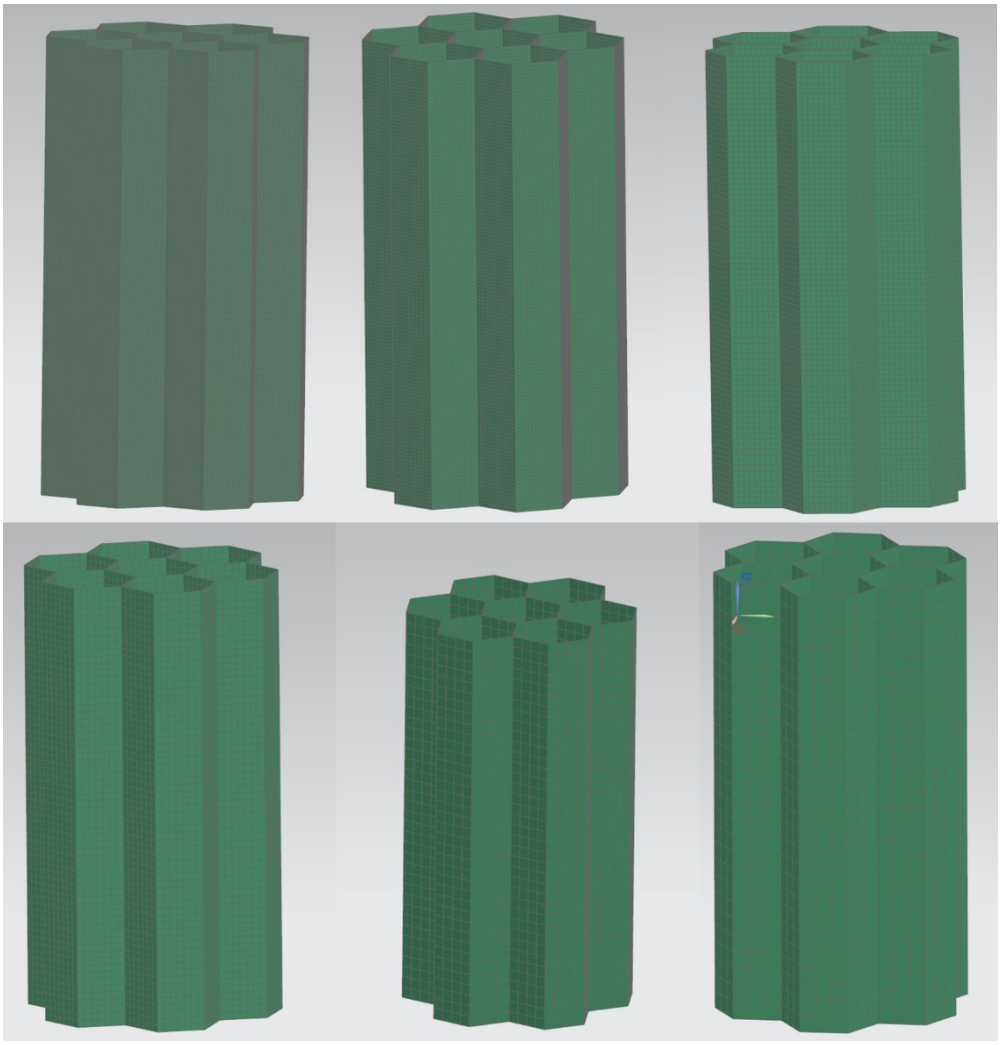
Bahsedilen yöntem, mekanik performansın tahmininde farklı seviyelerde elemanların testlerinin ve modellemelerinin yapılmasını ve her bir fazda korelasyonu kapsamaktadır. Bileşenlerden nihai yapıya doğru gidilerek iterasyonlar halinde modellemenin tamamlanması, kompleks detayları olan yapıların sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ve korelasyonunda oldukça etkin bir yoldur. Dolayısıyla ilk başta bal peteği yapılarının, yapıştırıcıların daha sonra sandviç yapının ve en son gömülü bağlantı elemanı sisteminin modellenmesi tamamlanır ve doğrulanır [13]. Bu çalışmada benzer bir yöntem uygulanmıştır. İlk önce tasarlanan gömülü bağlantı elemanının dayanımını tahmin etmek ve testini gerçekleştirmeden önce yüklerle ilgili bilgi edinmek için analitik hesaplamalar ile gömülü bağlantı elemanının dayanım değeri tahmin edilmiştir. Daha sonra sandviç yapının yüzey dışı çekme testi gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler ile sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Ve son olarak elde edilen veriler ile hazırlanan gömülü bağlantı elemanı sistemi modellenmiş ve yapılan testler ile doğrulanmıştır. Bu işlemler yapılırken iterasyonlar yapılmış ve modeli iyileştirmek için ince ayar yapılmıştır.

7.5.2. Eleman boyutu optimizasyon çalışması

Özellikle lineer olmayan sonlu elemanlar modelinde eleman boyutu çözüm hızını çok etkilediği için oldukça önemli bir konumda yer almaktadır. İdeal eleman boyutunu belirlemek için farklı eleman boyutlarıyla hazırlanan küçük bir bal peteği yapı parçası modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 7.11'de görülmektedir. Farklı eleman boyutlarıyla modellenmiş bal peteği parçaları Şekil 7.12'de görülmektedir. Eleman boyutunun gerilme değeri üzerinde etkisinin belli bir eleman sayısı üzerinde oldukça az olduğu görülmektedir. Fakat özellikle 0,2 ve 0,1 mm eleman boyutuna sahip modellerin analiz süreleri oldukça artmıştır. Seemann ve Krause [42] benzer bir bal peteği modeli üzerine detaylı şekilde çalışmışlar ve sadece sonuç değil aynı zamanda eleman sayısının analiz süresine etkisini de göz önünde bulundurarak 0,4 mm boyutunu seçmişlerdir. Benzer bir yaklaşımla bu çalışmada 0,4 mm eleman boyutu seçilmiştir.



Şekil 7.11. Farklı eleman boyutlarıyla gerçekleştirilen analiz sonuç grafiği



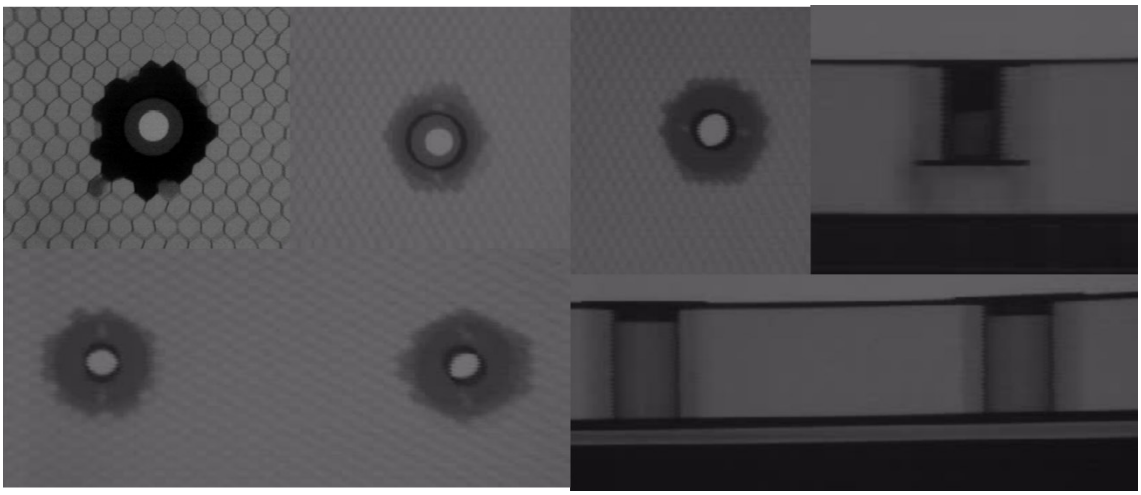
Şekil 7.12. Farklı eleman boyutlarıyla oluşturulan bal peteği yapı parçası modelleri

7.5.3. Dolgu malzemesi şeklinin belirlenmesi

Yükün gömülü bağlantı elemanından sandviç yapıya aktarılmasında önemli rol oynayan dolgu malzemesinin tam dolu olarak doldurulması gerekmektedir. Gömülü bağlantı elemanlarına kontrol amaçlı üstten ve yandan x-ray çekimleri gerçekleştirilmiştir. Ve örnek bir numune kesilerek gözle muayene edilmiştir. Farklı gömülü bağlantı elemanlarının üstten ve yandan x-ray görüntüleri ile kesilerek dolgu malzeme doluluğu incelenen gömülü bağlantı elemanı Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de görülmektedir.

Gömülü bağlantı elemanlarının sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasındaki diğer zorluk gömülü bağlantı elemanının bal peteği yapıdaki konumuna bağlı olarak farklı dolgu malzemesi geometrilerine sahip olmasıdır. Slimane ve diğerleri [43] gömülü bağlantı

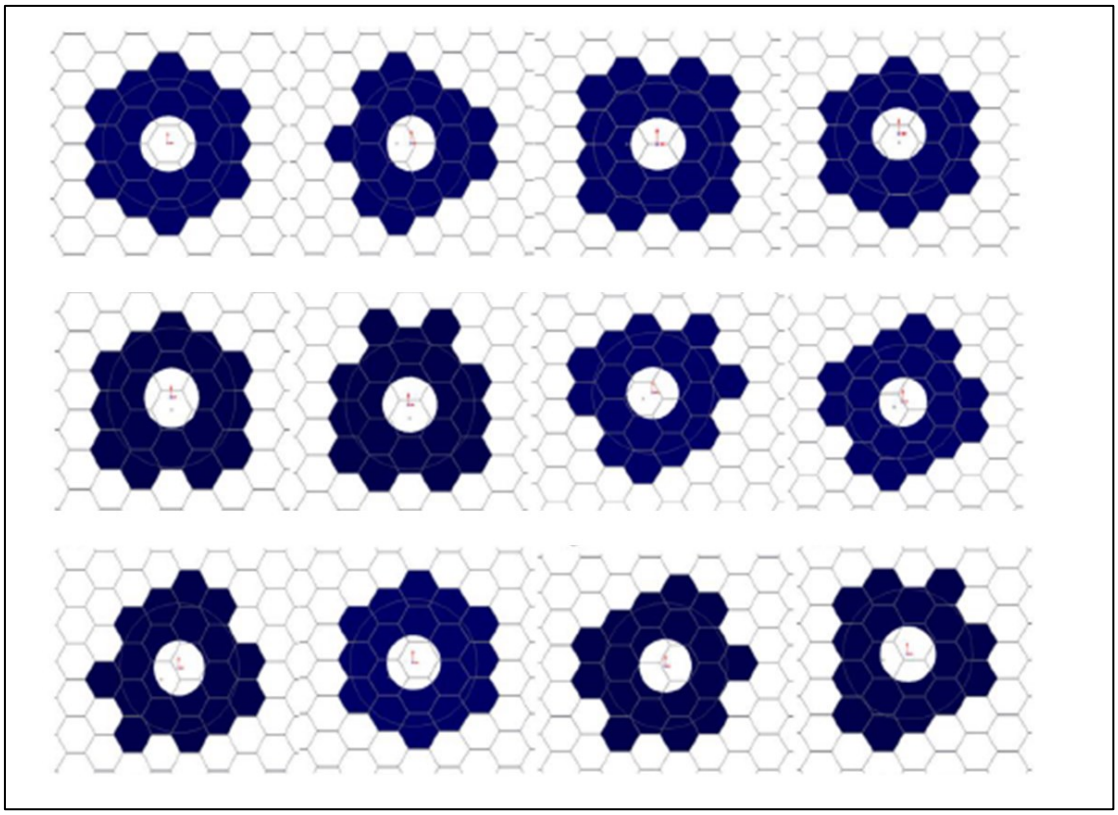
elemanın sahip olabileceği farklı dolgu malzeme geometrilerini ve bunun dayanıma olan etkilerini araştırmışlardır. Şekil 7.13'de görüldüğü gibi dolgu malzemesi oldukça farklı şekiller alabilmektedir. Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'deki kontrol amaçlı yapılan uygulamalar sonlu elemanlar modeli oluştururken dolgu malzemesinin geometrisini belirlemek için kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile oluşturulan dolgu malzeme geometrisi Şekil 7.16'da görülmektedir.



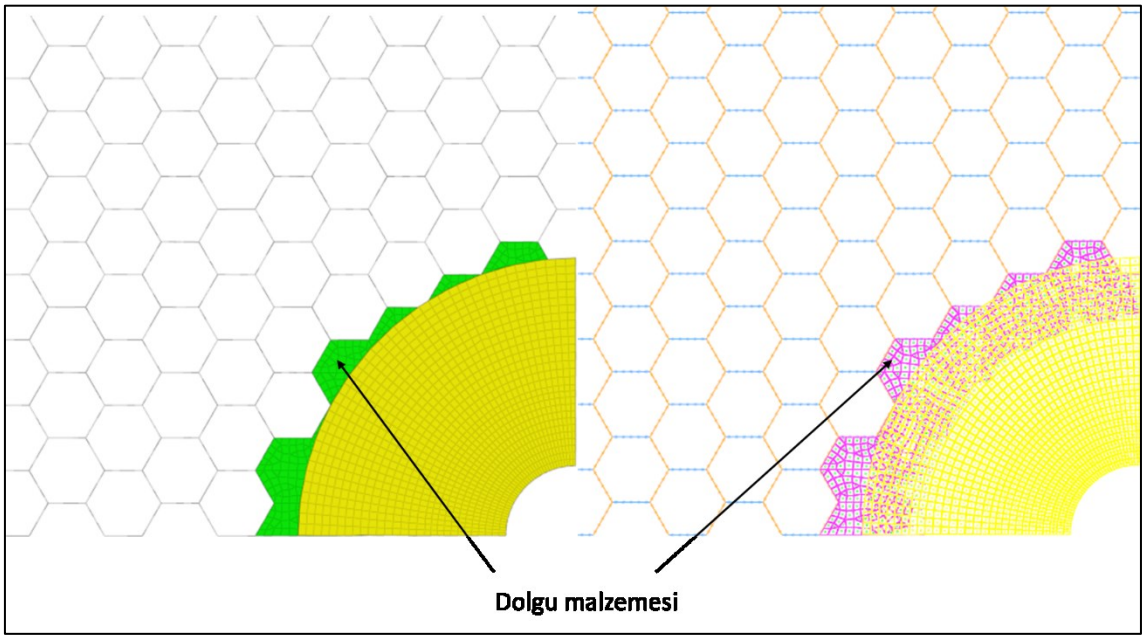
Şekil 7.13. Gömülü bağlantı elemanlarının üstten ve yandan x-ray görüntüleri



Şekil 7.14. Kesilerek dolgu malzemesi doluluğu incelenen gömülü bağlantı elemanı



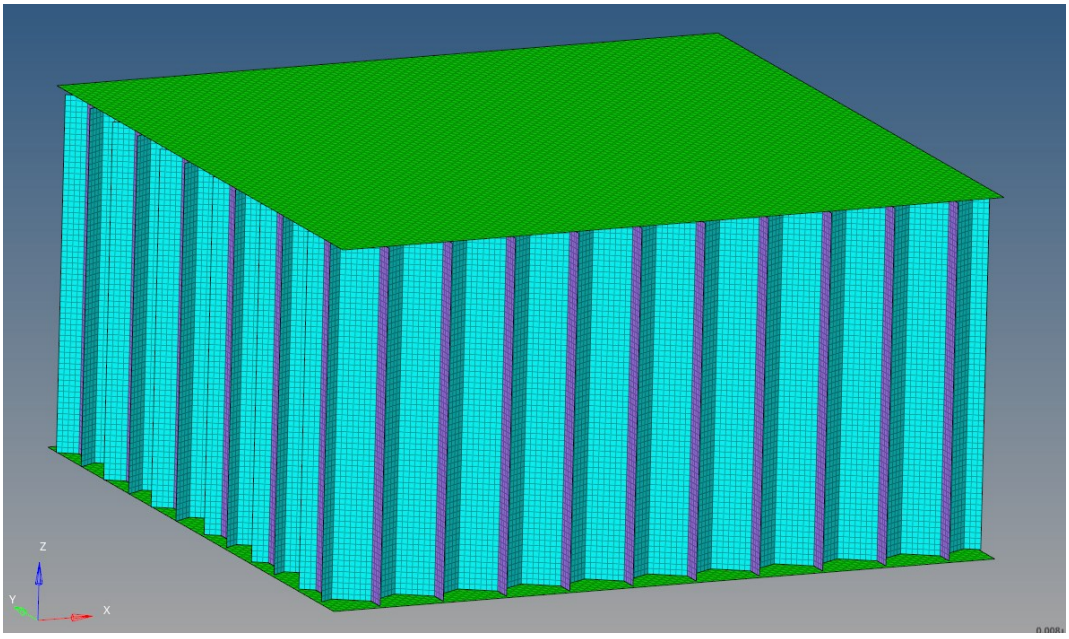
Şekil 7.15. Gömülü bağlantı elemanının bal peteğindeki konumuna bağlı olarak sahip olabileceği farklı dolgu malzemesi şekilleri [43]



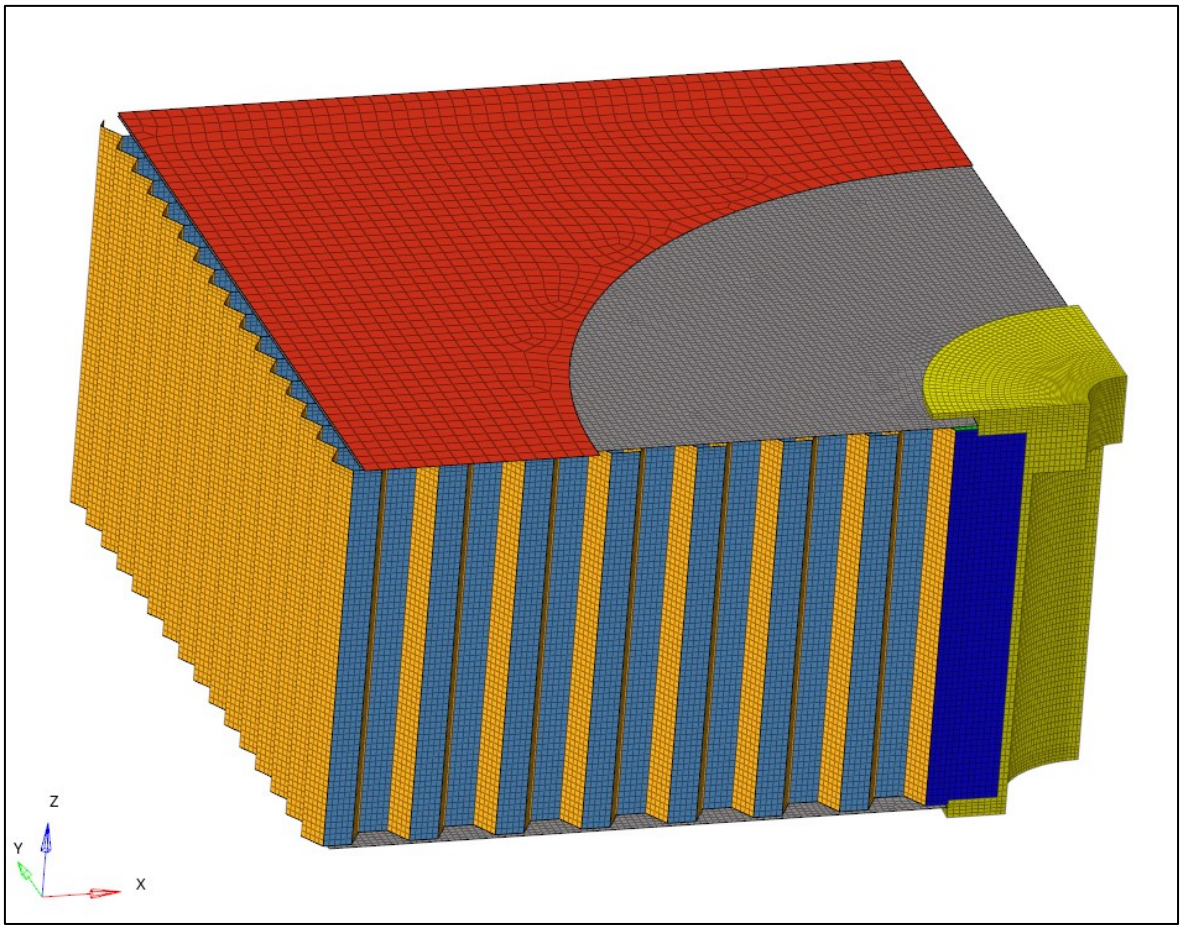
Şekil 7.16. Dolgu malzemesinin sonlu elemanlar modelindeki şekli

7.5.4. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Sonlu elemanlar modeli Hypermesh programı ile hazırlanmış ve çözücü olarak Radioss kullanılarak lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bal peteği yapının hücre duvarları kabuk elemanlar ile 0,4 mm eleman boyutuyla modellenmiştir. Yüzey tabakalar da aynı şekilde kabuk elemanlarla modellenmiştir. Gömülü bağlantı elemanı ve dolgu malzemesi katı elemanlar ile modellenmiştir. Gömülü bağlantı elemanı, dolgu malzemesi ve bal peteği yapı ara yüzlerdeki eleman nodlarından birleştirilmiştir. Bal peteği yapı ve yüzey tabaka arasında sıkı kontak oluşturulmuştur. Fikstür rijit bir şekilde modellenmiş ve sandviç yapıyla aralarına kontak oluşturulmuştur. Analiz süresini kısaltmak için gömülü bağlantı elemanının dörtte biri modellenmiş ve simetri sınır şartları oluşturulmuştur. Bal peteği düzlem dışı çekme testi için hazırlanan model Şekil 7.17de görülmektedir. Test ile doğrulama çalışması için hazırlanan gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modeli Şekil 7.18'de görülmektedir.

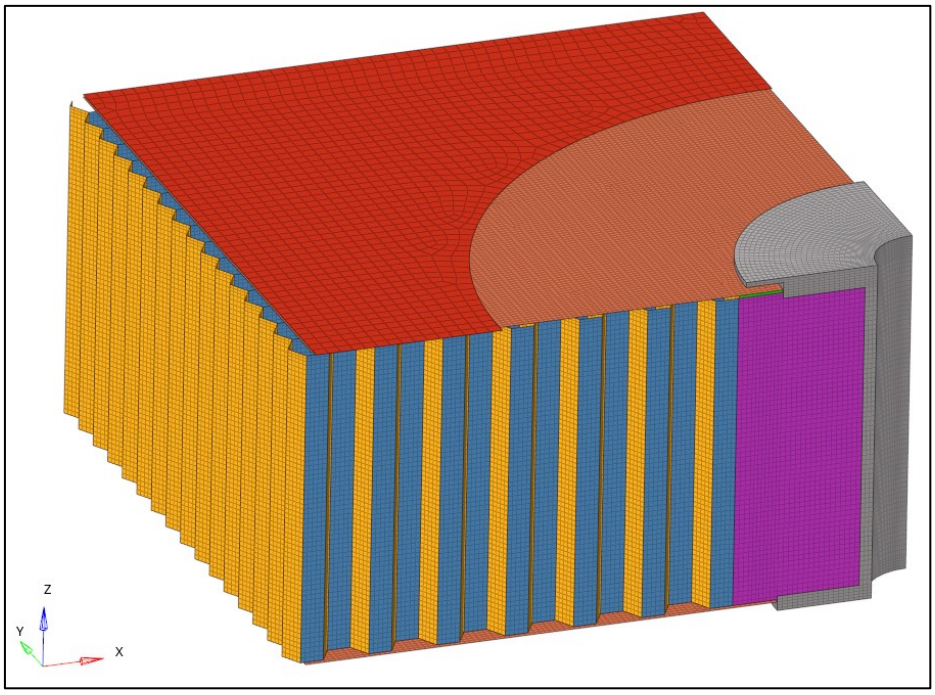


Şekil 7.17. Bal peteği çekirdek yapının sonlu elemanlar modeli

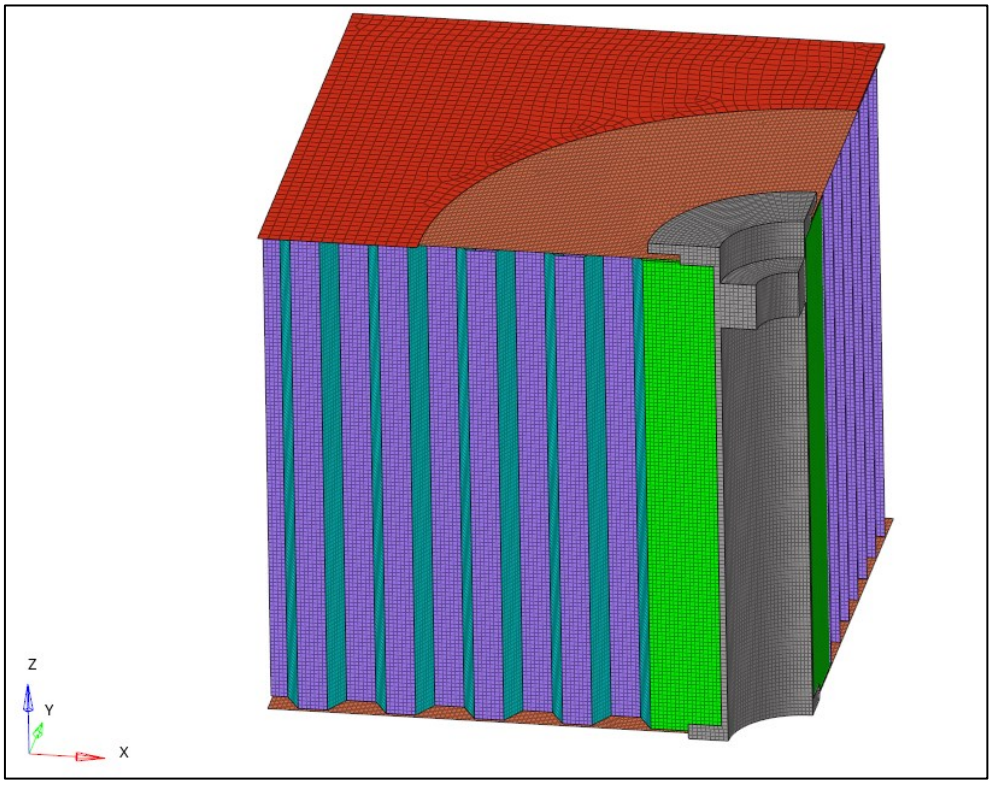


Şekil 7.18. Korelasyon çalışmasında kullanılan panel kalınlığı boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanının sonlu elemanlar modeli

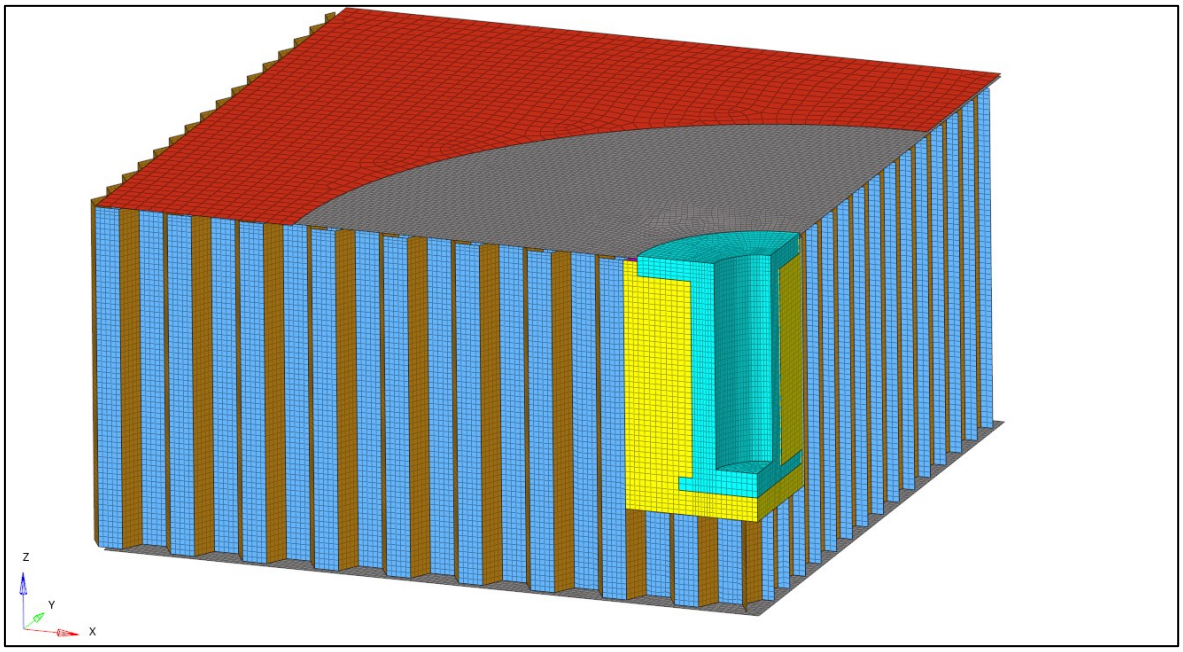
Aynı mantıkla oluşturulan çapı arttırılmış, bal peteği kalınlığı arttırılmış, kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarının düzlem dışı çekme testi için ve kalınlık boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanının düzlem içi çekme testi için hazırlanan sonlu elemanlar modelleri Şekil 7.19, Şekil 7.20, Şekil 7.21 ve Şekil 7.22'de görülmektedir.



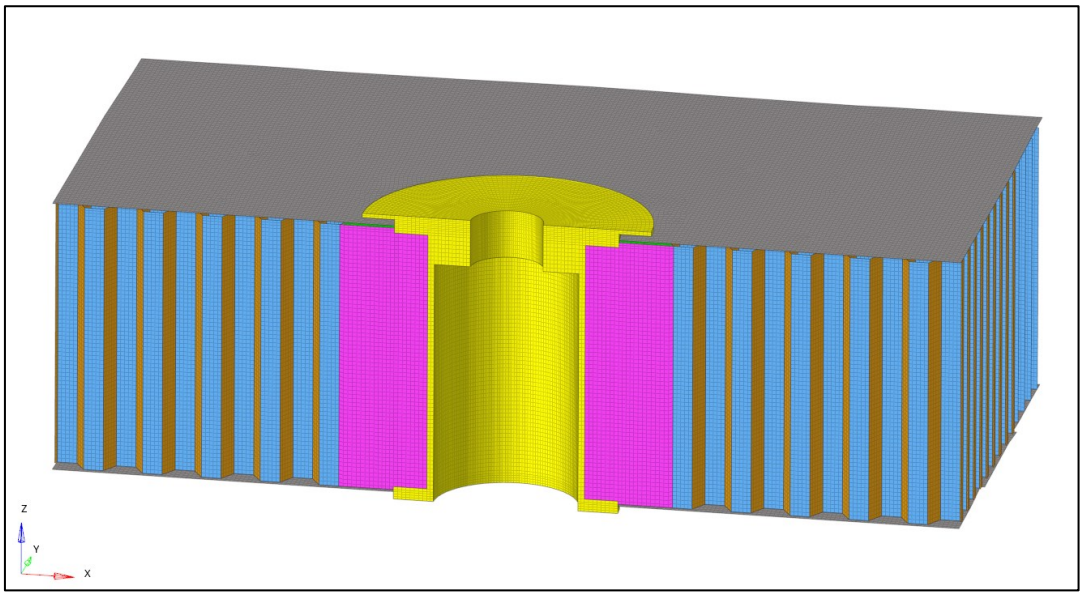
Şekil 7.19. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanının sonlu elemanlar modeli



Şekil 7.20. Çekirdek yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sonlu elamanlar modeli



Şekil 7.21. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modeli



Şekil 7.22 Düzlem içi yükleme için hazırlanan gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modeli

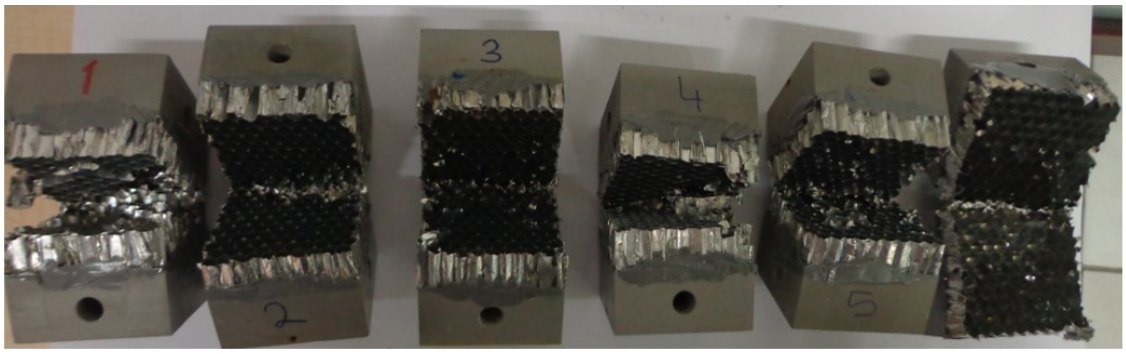
8. BULGULAR

Çalışmanın bu kısmında sonlu elemanlar model analizlerinin ve yapılan testlerin sonuçları sunulmuştur.

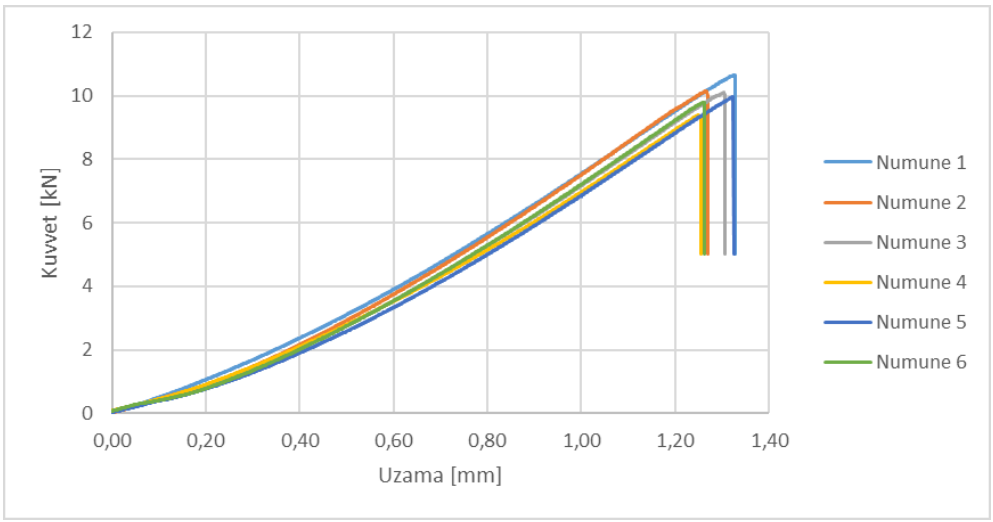
8.1. Bal Peteği Yapı

8.1.1. Bal peteği çekme testi sonuçları

Bal peteği yapısının düzlem dışı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testleri tamamlanmış numuneler Resim 8.1'de görülmektedir. Bal peteği yapılarına uygulanan düzlem dışı çekme testi sonucunda elde edilmiş kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.1'de ve test sonuçları Çizelge 8.1'de görülmektedir.



Resim 8.1. Testleri gerçekleştirilmiş bal peteği yapılar



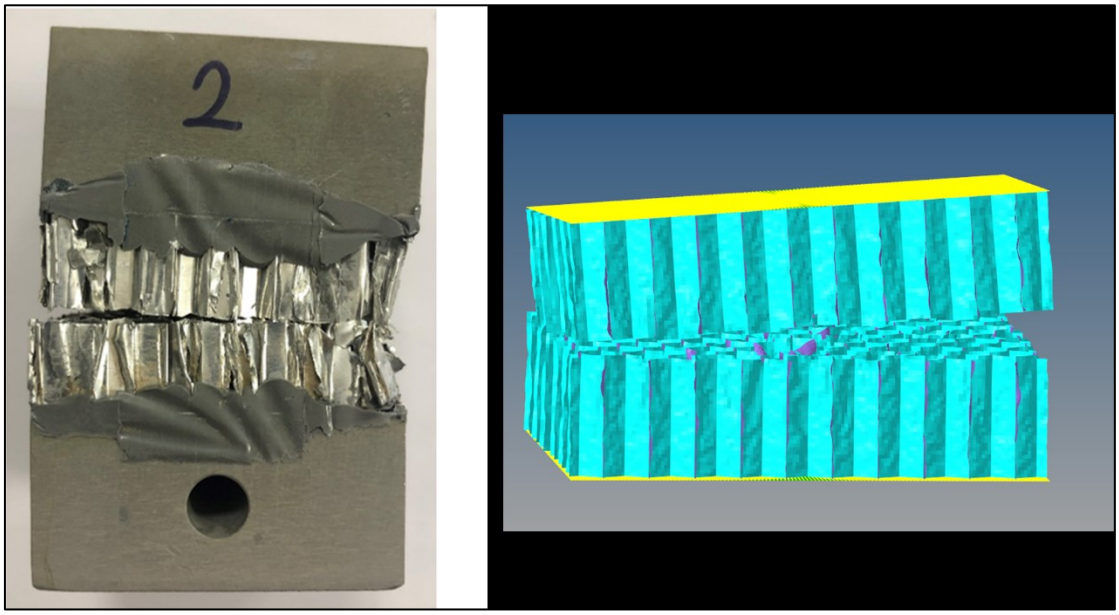
Şekil 8.1. Bal peteği çekme testi kuvvet uzama eğrileri

Çizelge 8.1. Bal peteği yapıların çekme testi sonuçları

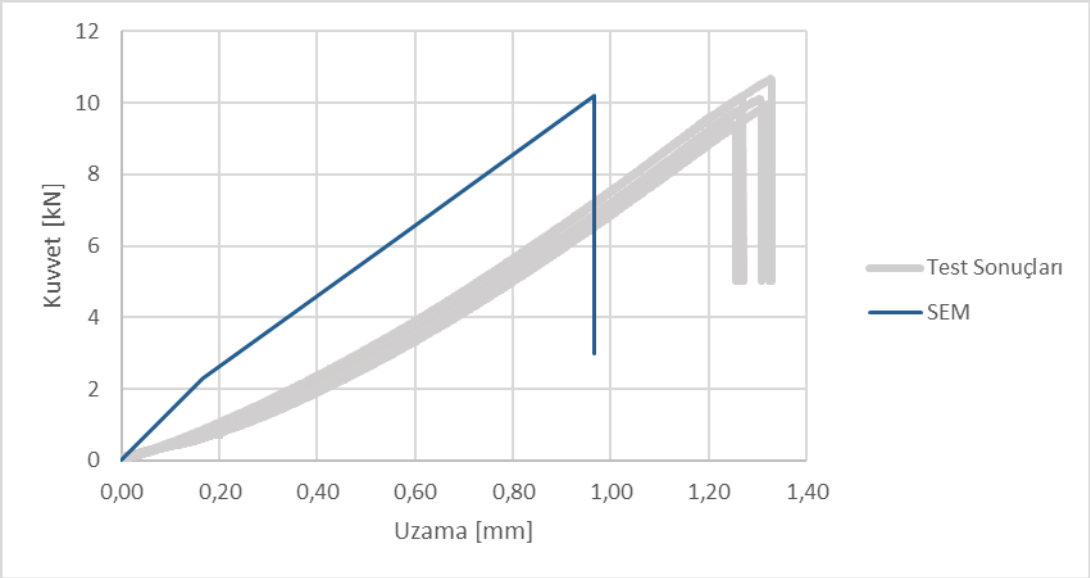
	Kritik Kuvvet [kN]	Uzama [mm]
Numune 1	10,63	1,33
Numune 2	10,16	1,27
Numune 3	10,12	1,30
Numune 4	9,40	1,25
Numune 5	9,96	1,32
Numune 6	9,79	1,26
Ortalama	10,01	1,29
Standart sapma	0,38	0,03

8.1.2. Sonlu elemanlar modeli

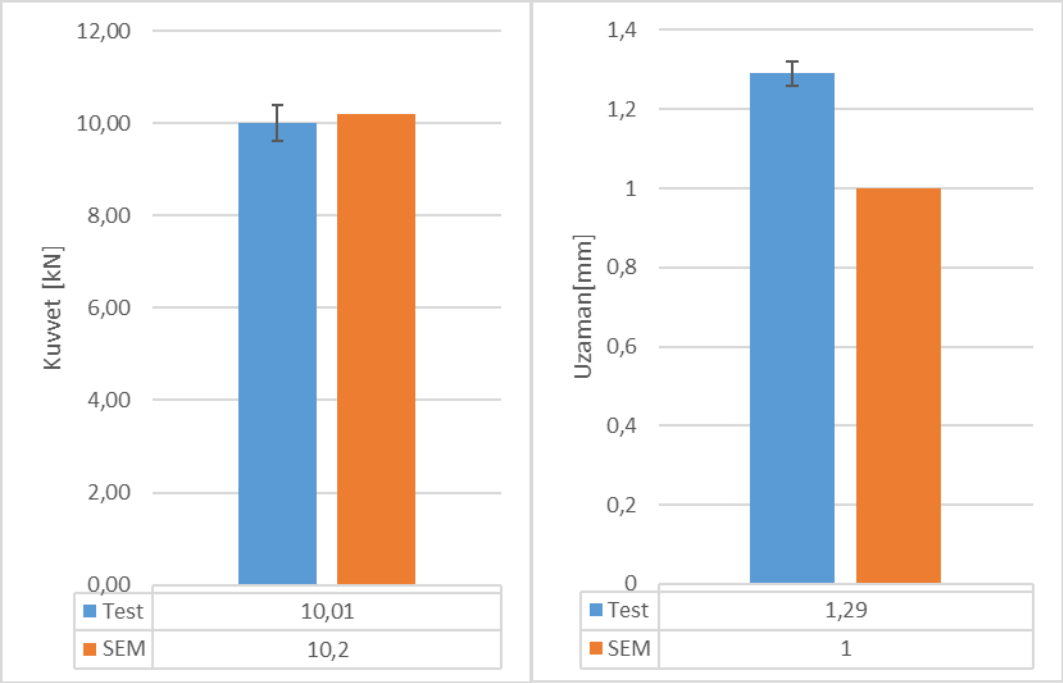
Bal peteği testlerinden elde edilen verilerle hazırlanan sonlu elemanlar modelinin analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve test numunesinin hasar modları Şekil 8.2'de görülmektedir.



Şekil 8.2. Test numunesinin ve sonlu elemanlar modelinin hasar modları



Şekil 8.3. Test ve SEM kuvvet/uzama eğrileri



Şekil 8.4. Bal peteği yapı için ortalama test ve sonlu elemanlar modeli sonuçları kıyaslaması

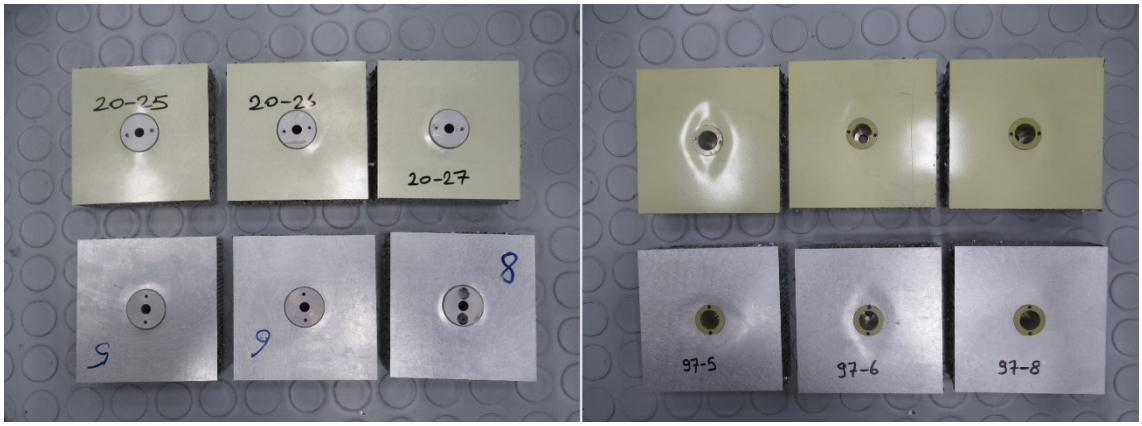
Sonlu elemanlar modeliyle ve testle elde edilen kritik kuvvet değerleri oldukça yakın olsa da uzama miktarında açıkça bir fark görülmektedir. Bu farkın sebebi test blokları ile sandviç yapı arasında bulunan yapıştırıcıdaki esnemenin sonlu elemanlar modeline dahil edilememiş olmasıdır. Mevcut korelasyonun bu faz için yeterli olduğu düşünülmüş model üzerindeki ince ayar gömülü bağlantı elemanı modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir.

8.2. Korelasyon Çalışması

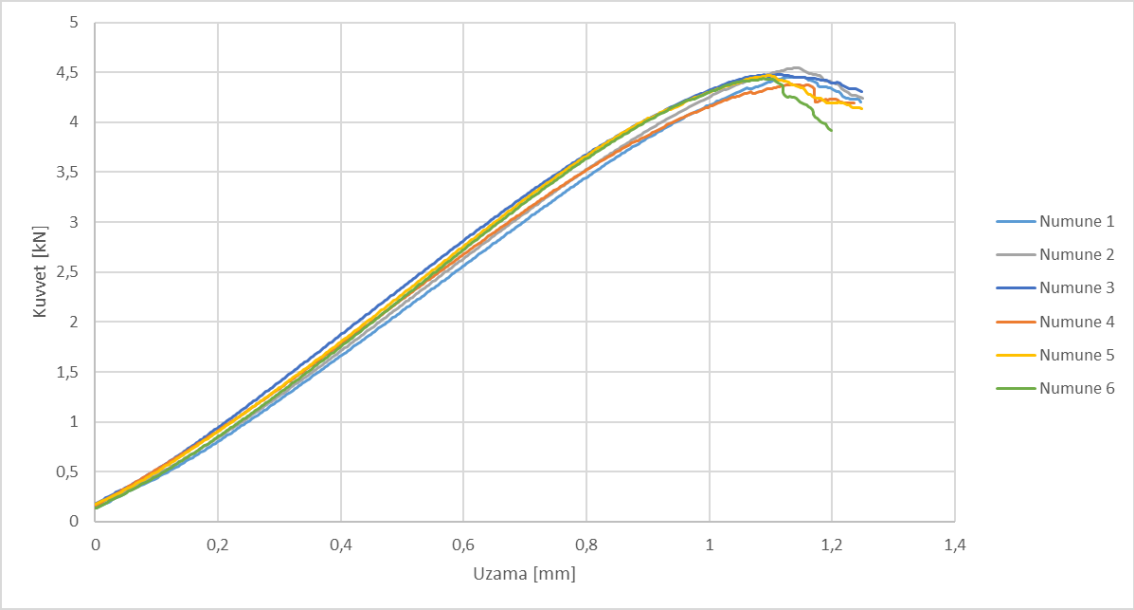
Bal peteği yapısının testlerinden elde edilen verilerle hazırlanan panel kalınlığı boyunca tipine sahip gömülü bağlantı elemanı sisteminin sonlu elemanlar modeli ile korelasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

8.2.1. Gömülü bağlantı elemanı sistemi düzlem dışı çekme testi sonuçları

Korelasyon çalışması için Çizelge 7.1'deki 1 nolu gömülü bağlantı elemanı sisteminin düzlem dışı testleri gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.2'de görülmektedir. Test sonucunda elde edilmiş kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.5'de ve test sonuçları Çizelge 8.2'de görülmektedir.



Resim 8.2. Testleri gerçekleştirilmiş kalınlık boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı numuneleri



Şekil 8.5. Kalınlık boyunca tipindeki gömülü bağlantı elemanı testleri kuvvet/uzama eğrileri

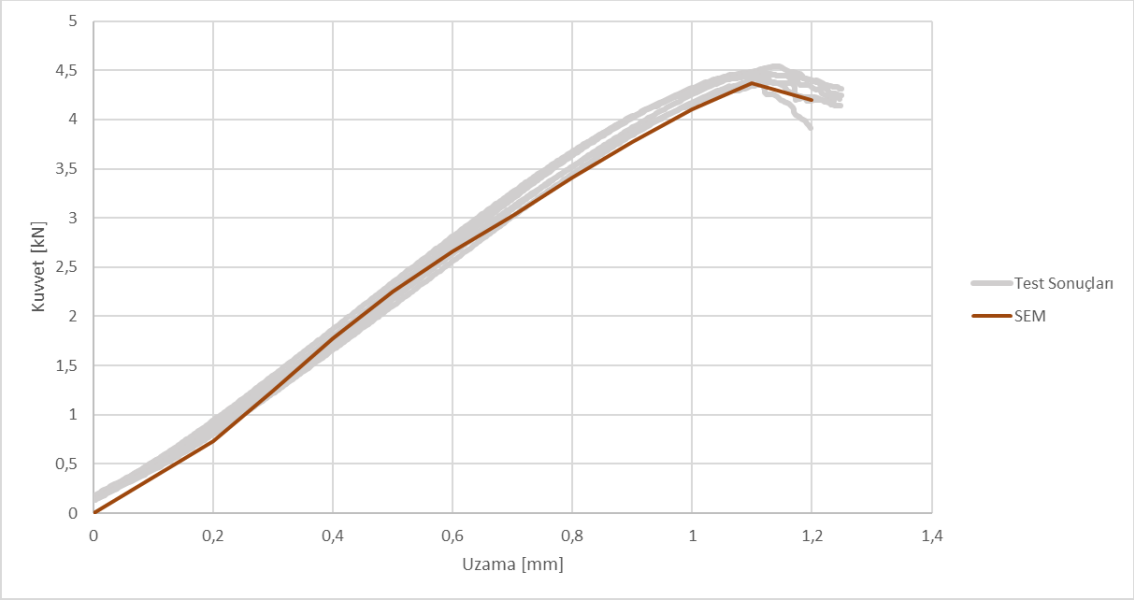
Çizelge 8.3. Korelasyon çalışması için seçilmiş gömülü bağlantı elemanı test sonuçları

	Kritik Yük[kN]	Uzama[mm]
Numune 1	4,45	1,13
Numune 2	4,54	1,15
Numune 3	4,48	1,12
Numune 4	4,38	1,13
Numune 5	4,47	1,10
Numune 6	4,44	1,09
Ortalama	4,46	1,12
Standart Sapma	0,05	0,02

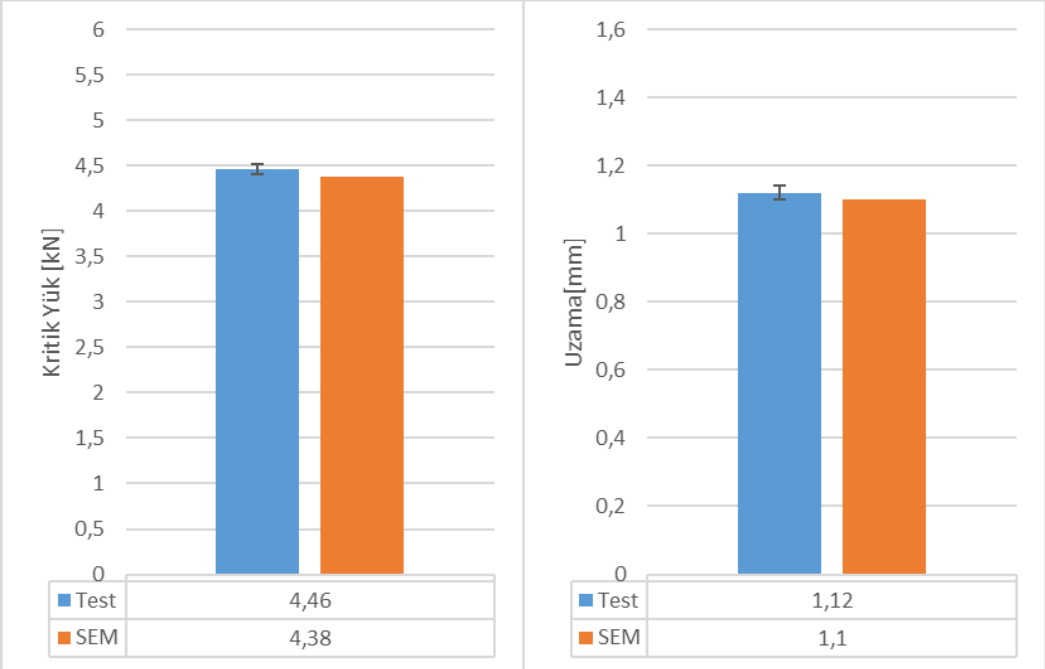
8.2.2. Sonlu elemanlar modeli

Gerçekleştirilen testlerden elde edilmiş veriler ve Şekil 7.10'da anlatılan yöntem ile gömülü bağlantı elemanı sisteminin modeli hazırlanmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve testler ile elde edilmiş kuvvet/uzaman eğrileri Şekil 8.6'da ve kritik yük-uzama sonuçları Şekil 8.7'de görülmektedir. Seçilmiş gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı çekme yükü için hazırlanan sonlu elemanlar modelinin test sonuçlarıyla oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Modelde görülen hasarın (Şekil 8.8Şekil) beklenildiği gibi dolgu

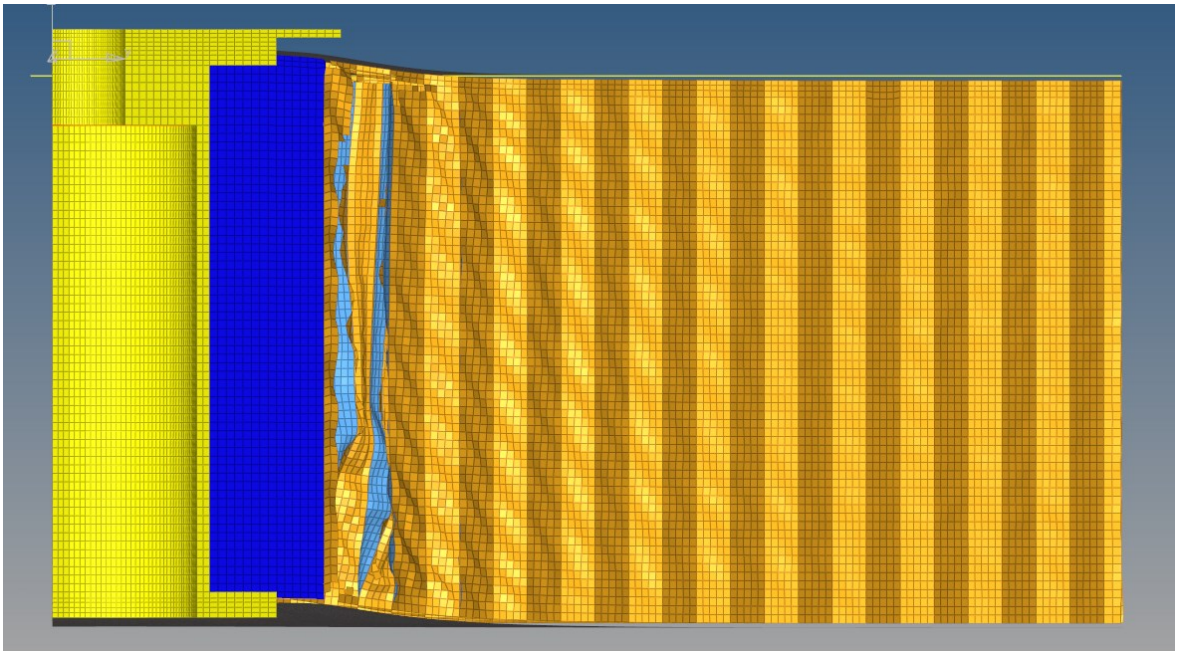
malzemesi ve çekirdek ara yüzünün biraz uzağında meydana geldiği görülmektedir. Gerilim dağılımı Şekil 8.9 ve çekirdekteki detaylı gerilim dağılımı Şekil 8.10'da görülmektedir. Ayrıca Şekil 8.11'de bal peteği yapının davranışı açık bir şekilde görülmektedir. Sonuç olarak ilgili sonlu elemanlar modeli çalışmanın ikinci aşaması için uygun bulunmuştur.



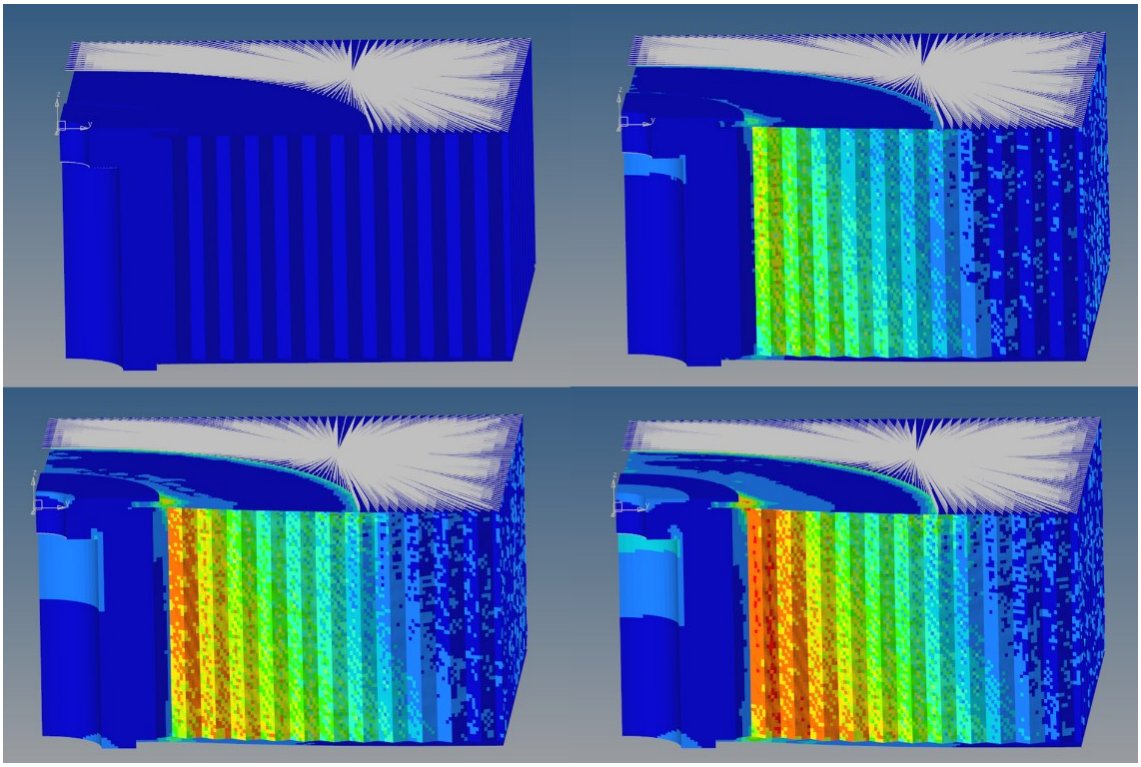
Şekil 8.6. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilmiş kuvvet/uzama eğrileri



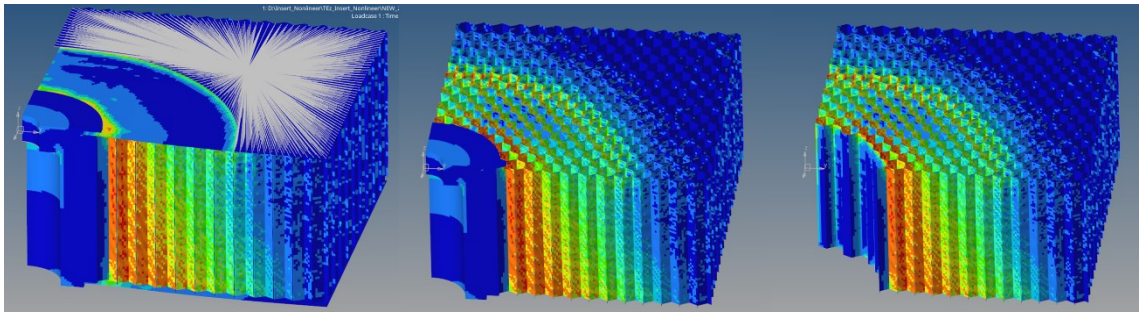
Şekil 8.7. Test ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması



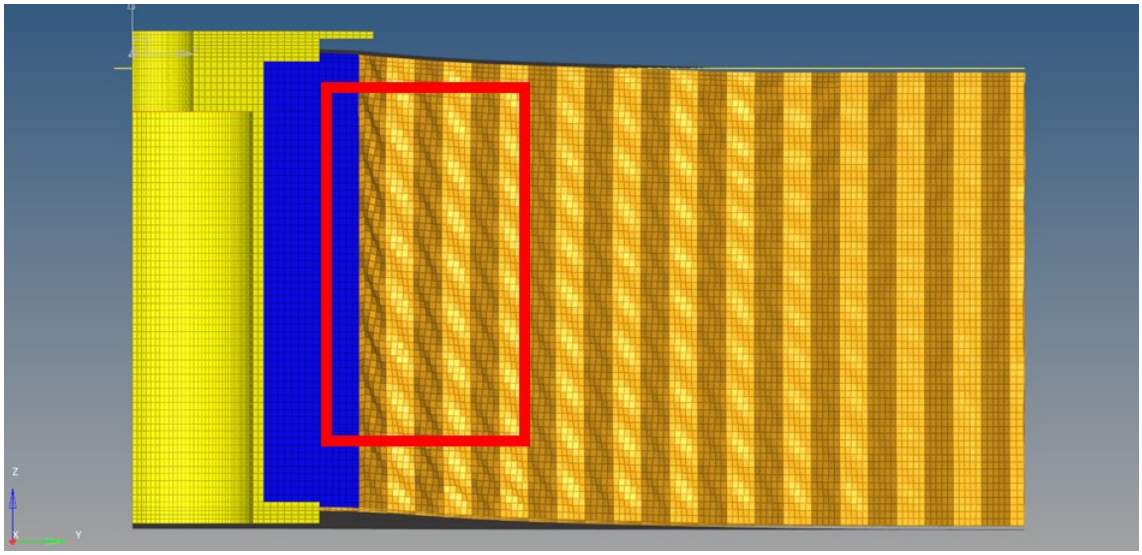
Şekil 8.8. Gömülü bağlantı elemanı modeli hasar modu



Şekil 8.9. Gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı



Şekil 8.10. Gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelinde çekirdekteki gerilim dağılımı



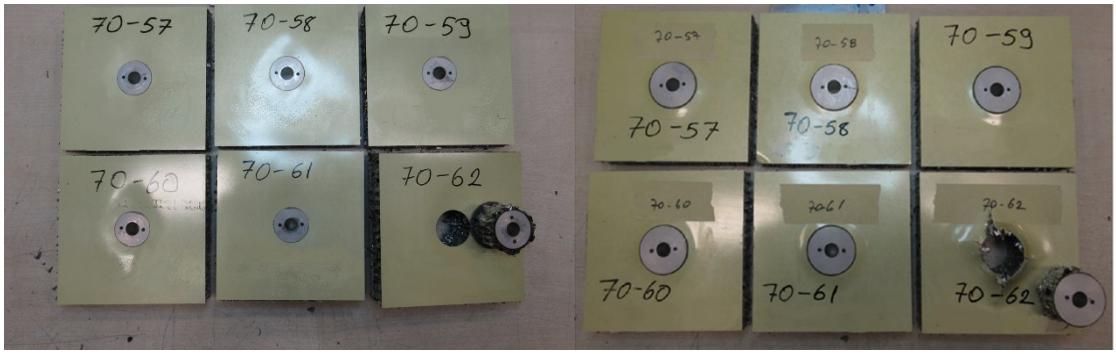
Şekil 8.11. Sonlu elemanlar modelindeki bal peteği yapının davranışı

8.3. Farklı Geometrik Parametrelere Sahip Gömülü Bağlantı Elemanları

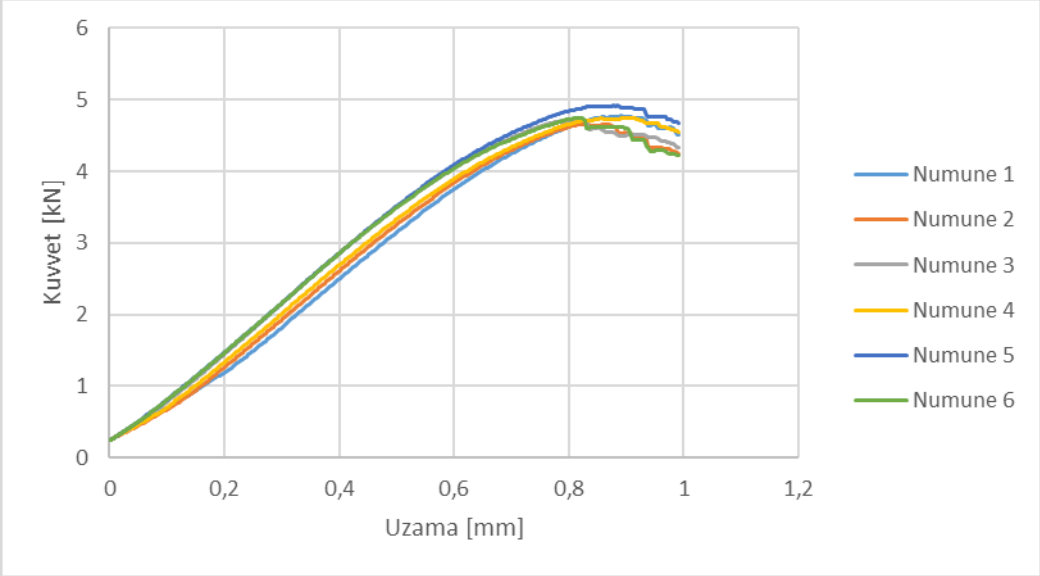
8.3.1. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı

Test sonuçları

Çizelge 7.2'deki 2 nolu yani çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı için düzlem dışı testler gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.3'de görülmektedir. Numunelere ait kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.12'de ve test sonuçları Çizelge 8.3'de görülmektedir.



Resim 8.3. Testleri gerçekleştirilmiş çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi numuneleri



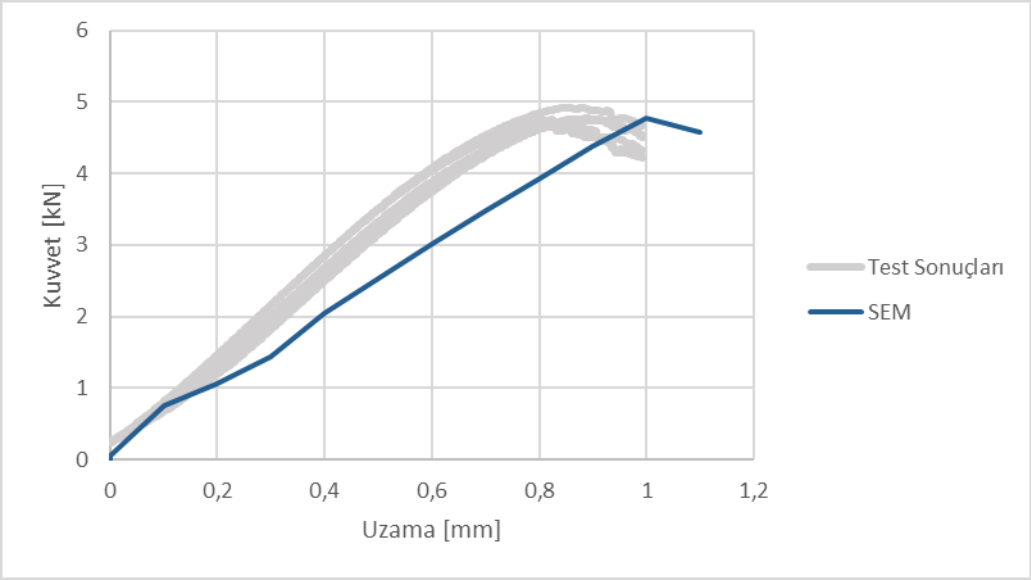
Şekil 8.12. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının kuvvet/uzama eğrileri

Çizelge 8.3. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları

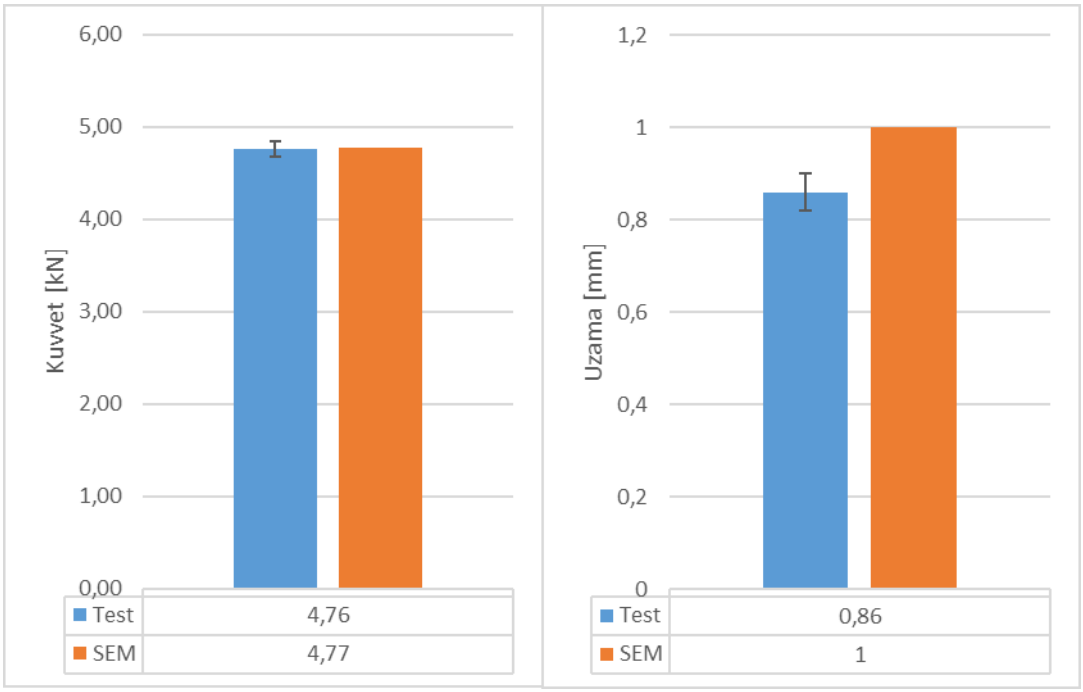
	Kritik Yük[kN]	Uzama[mm]
Numune 1	4,77	0,89
Numune 2	4,66	0,83
Numune 3	4,72	0,82
Numune 4	4,74	0,90
Numune 5	4,91	0,89
Numune 6	4,75	0,83
Ortalama	4,76	0,86
Standart Sapma	0.08	0.04

Sonlu elemanlar modeli sonuçları

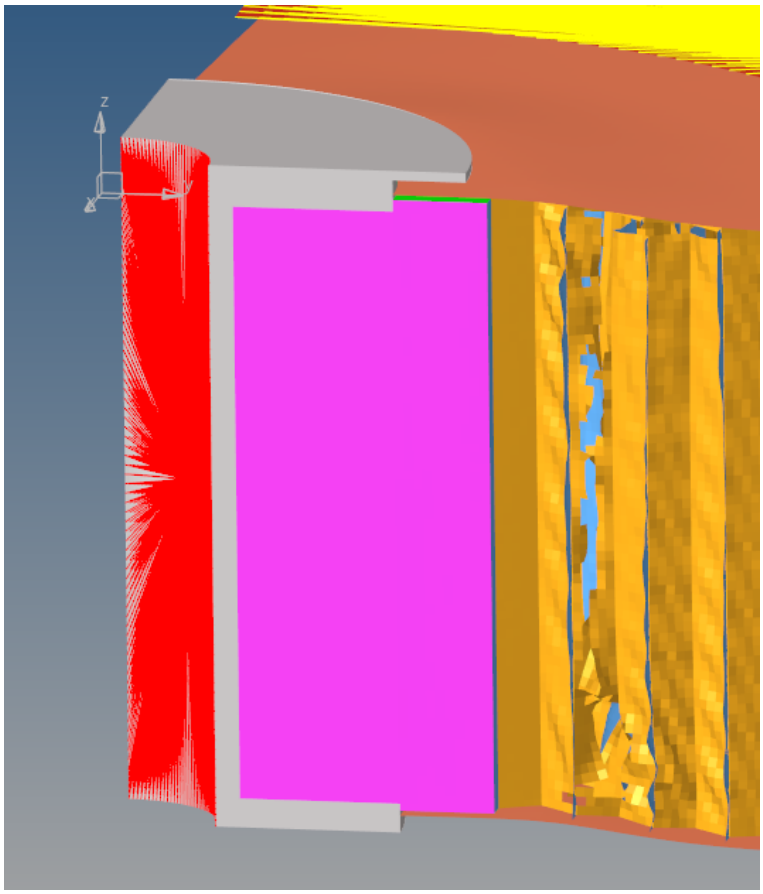
Korelasyonu tamamlanan modelden yola çıkarak oluşturulan çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanı sistemi modeliyle analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kuvvet/uzama grafiği Şekil 8.13'de görülmektedir. Şekil 8.14'de sonlu elemanlar modeli ve test sonuçlarının kıyaslaması görülmektedir. Sonlu elemanlar modeli ile yapılan analiz sonucunda elde edilen kritik yük değeri test verileriyle oldukça uyumludur fakat uzama miktarları arasında %14 gibi bir fark söz konusudur. Şekil 8.15 ve Resim 8.4'te görüldüğü gibi test ve modelin hasara uğrama şekilleri tutarlıdır. İki hasar da dolgu malzemesinin biraz ötesinde çekirdekte oluşmuştur. Ayrıca gerilim dağılımı Şekil 8.16'da görülmektedir.



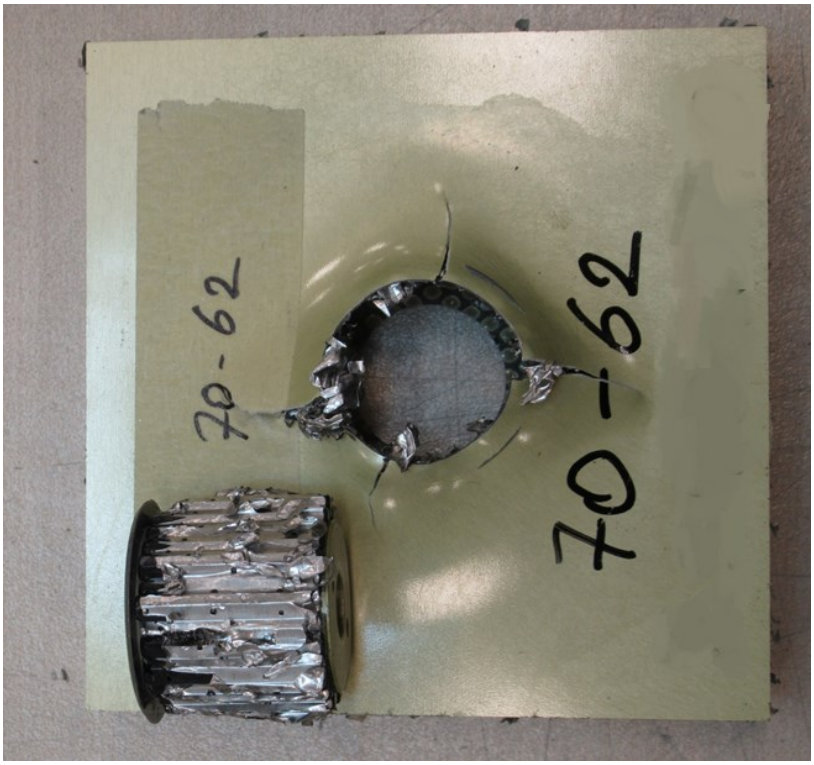
Şekil 8.13. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi için sonlu elemanlar modeli ve düzlem dışı çekme testi sonucu elde edilmiş kuvvet/uzama grafiği



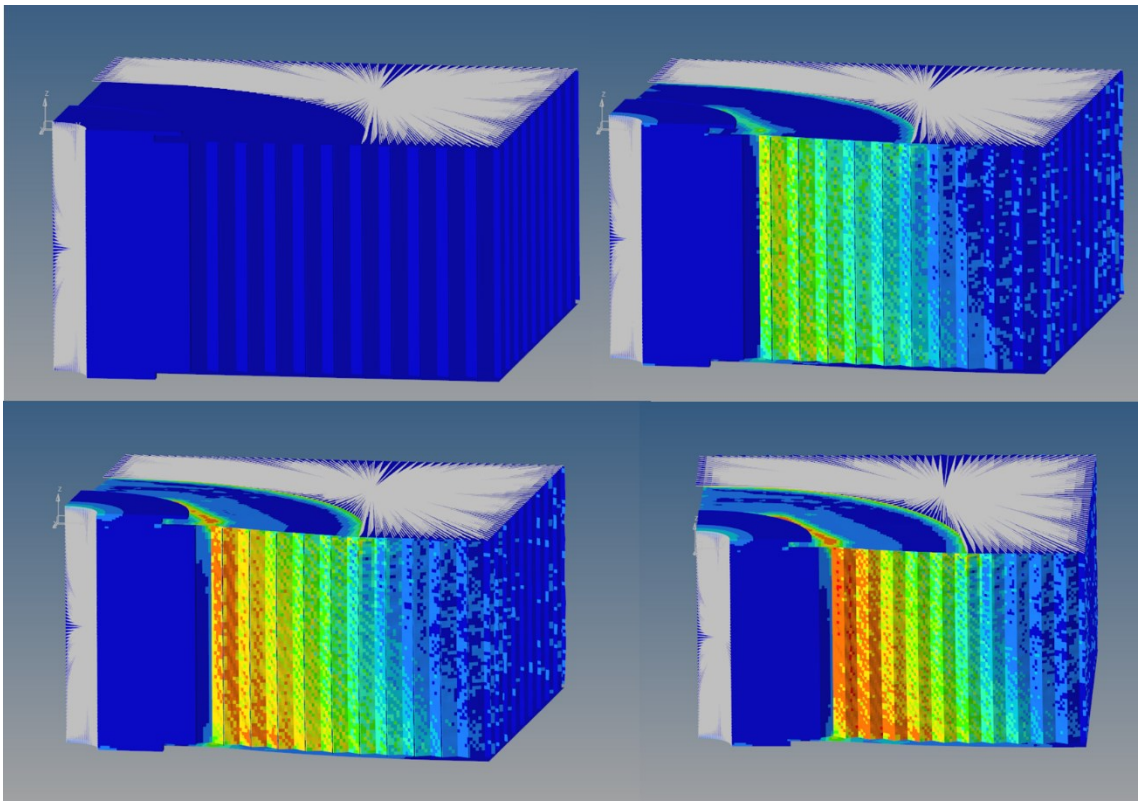
Şekil 8.14. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanının test ve analiz sonuçları



Şekil 8.15. Çapı büyütülmüş gömülü bağlantı elemanının hasar modu



Resim 8.4. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı test numunesinin kopmuş görüntüsü

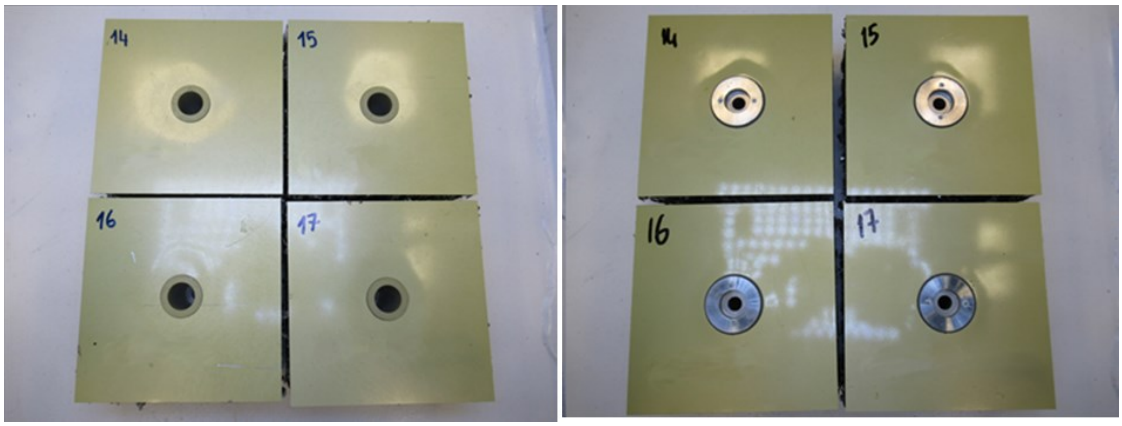


Şekil 8.16. Çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı

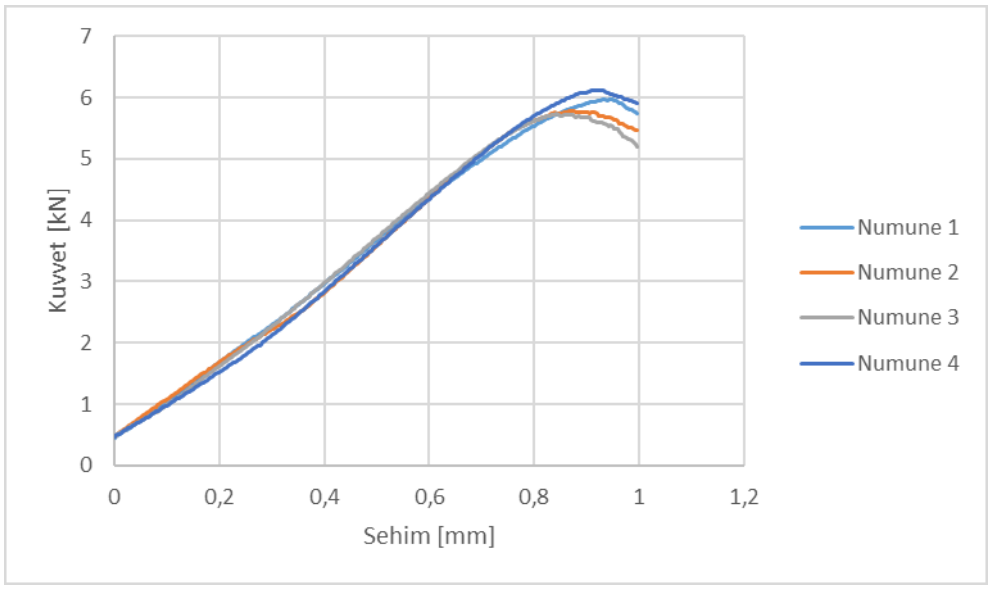
8.3.2. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı

Test sonuçları

Çizelge 7.1'deki 3 nolu yani bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı için düzlem dışı testler gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.5'te görülmektedir. Numunelere ait kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.17'de ve test sonuçları Çizelge 8.4'de görülmektedir.



Resim 8.5. Testleri gerçekleştirilmiş bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı numuneleri



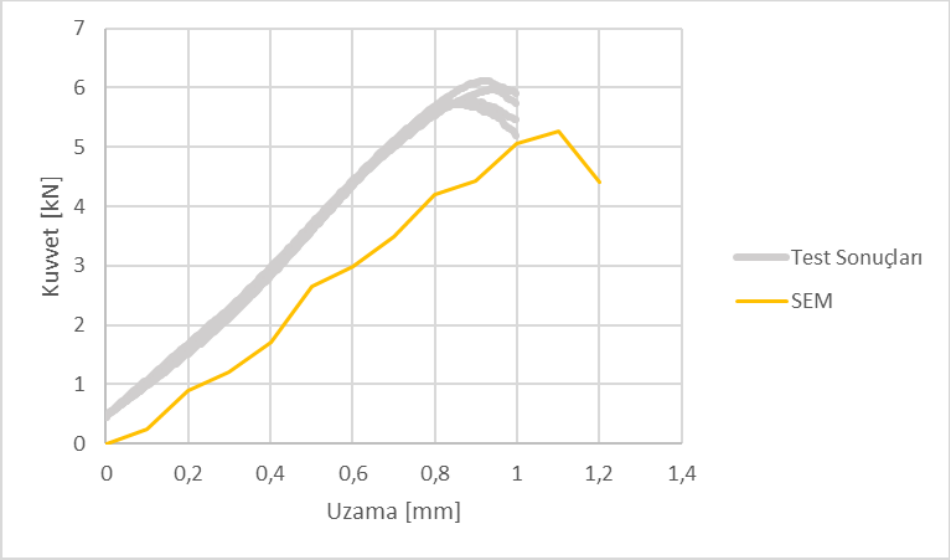
Şekil 8.17. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı kuvvet/uzama eğrileri

Çizelge 8.4. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları

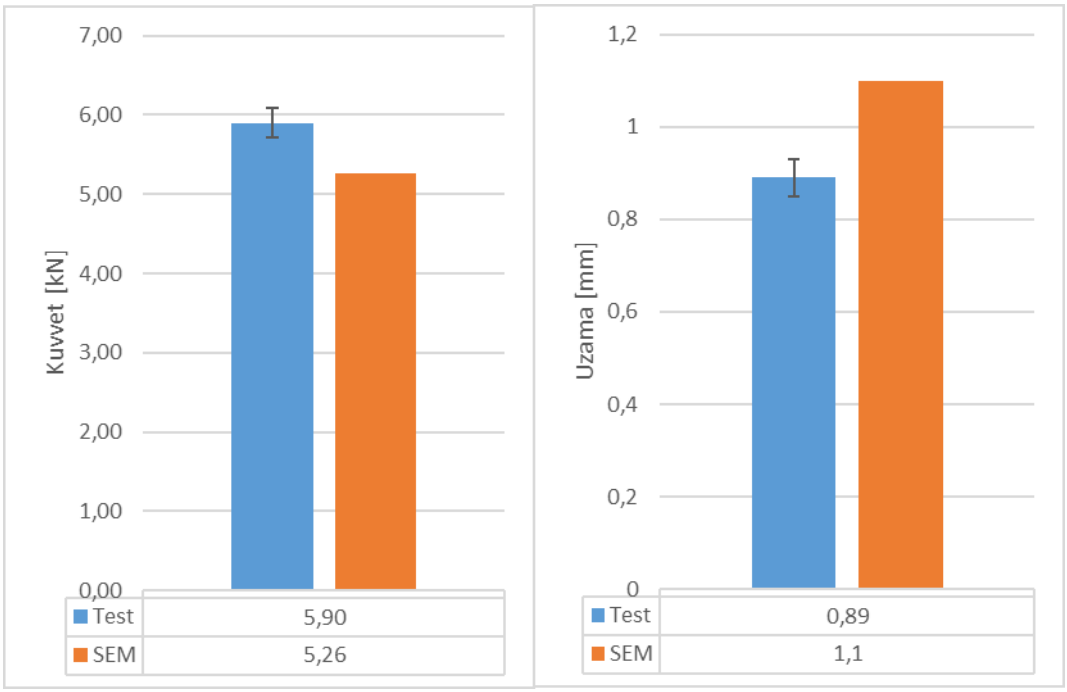
	Kuvvet [kN]	Uzama [mm]
Numune 1	5,97	0,94
Numune 2	5,79	0,87
Numune 3	5,73	0,84
Numune 4	6,12	0,92
Ortalama	5,90	0,89
Standart sapma	0,18	0,04

Sonlu elemanlar modeli sonuçları

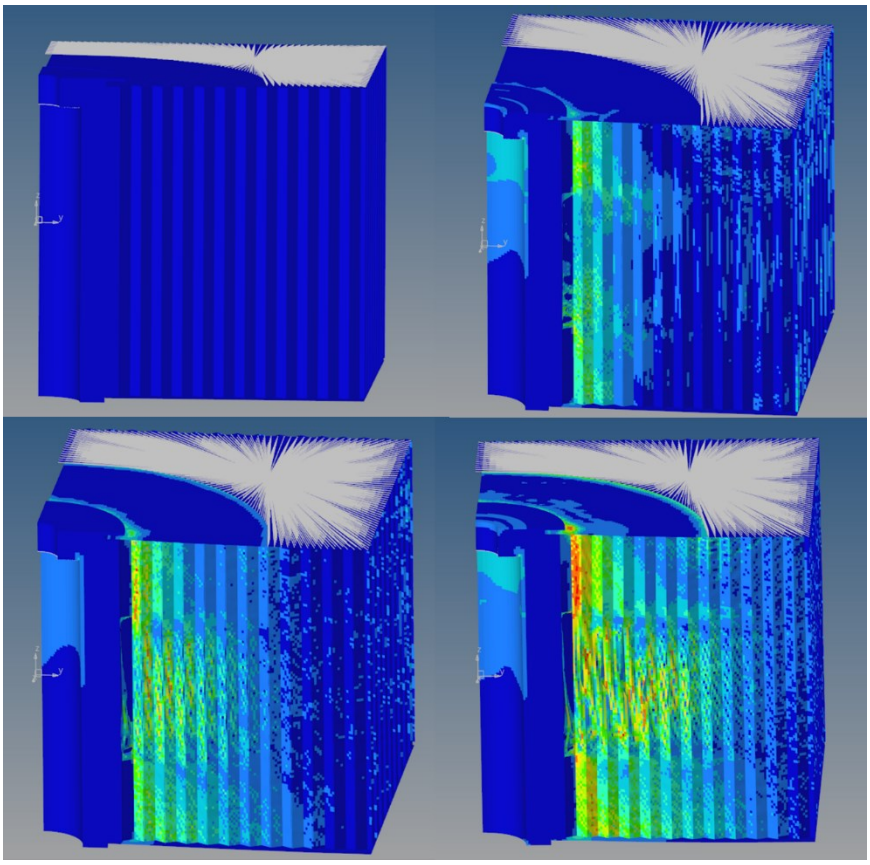
Korelasyonu tamamlanan modelden yola çıkarak oluşturulan bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı modeliyle analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.18'de görülmektedir. Genel hatlarıyla eğri şekli birbirine oldukça benzese de Şekil 8.19'da görüldüğü gibi kritik kuvvet değerlerinde %11 ve uzama miktarlarında %24'lük bir fark görülmektedir. Gerilim dağılımı Şekil 8.20'de görülmektedir. Ayrıca Sonlu elemanlar modelinin hasar modu Şekil 8.21'de görülmektedir. Bal peteği yapının yüksekliği arttığı için, özellikle bu modelde bal peteği yapıdaki kesme burkulmaları açık bir şekilde görülmektedir.



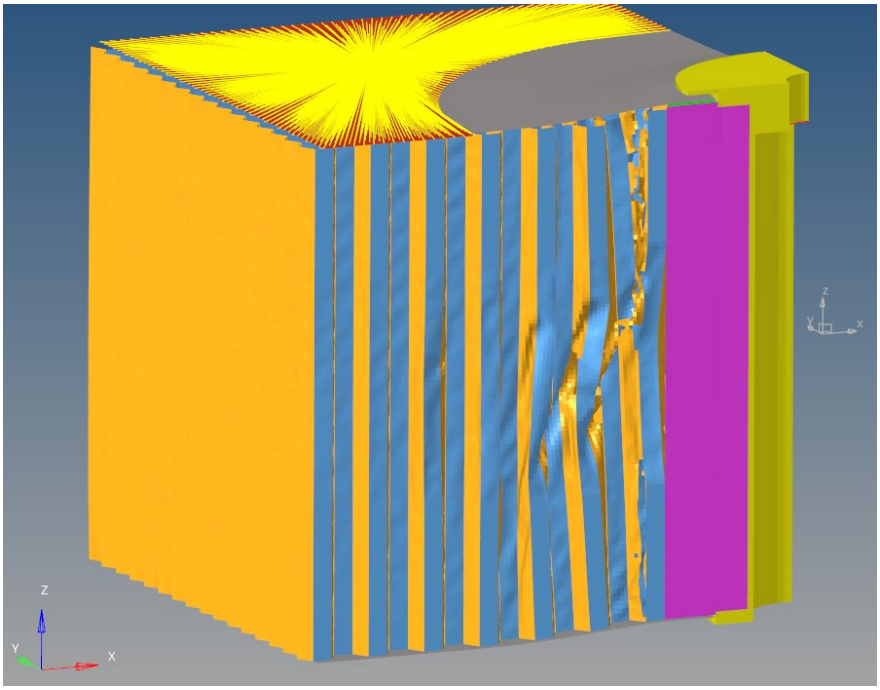
Şekil 8.18. Bal peteği kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı için analiz ve test sonucu elde edilmiş kuvvet/uzama grafiği



Şekil 8.19. Bal peteği kalınlığı arttırılmış sonlu elemanlar modeli analiz ve test sonuçlarının kıyaslaması



Şekil 8.20. Bal peteği yapının kalınlığı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı

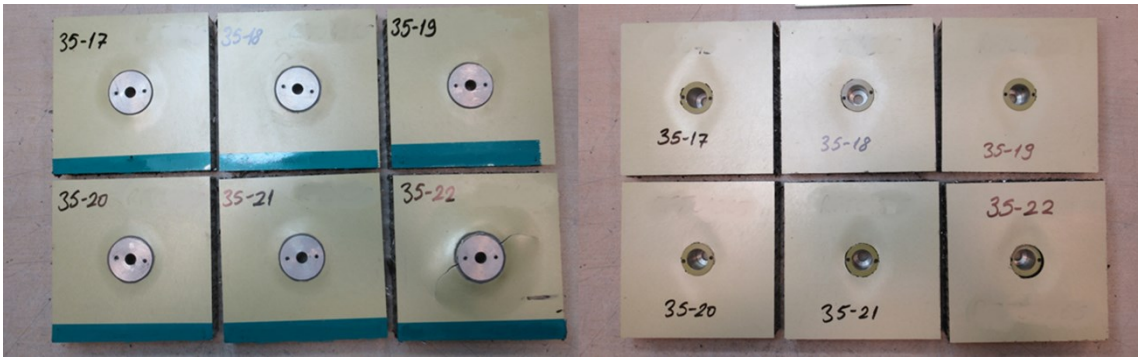


Şekil 8.21. Bal peteği kalınlığı arttırılmış modelin hasar modu

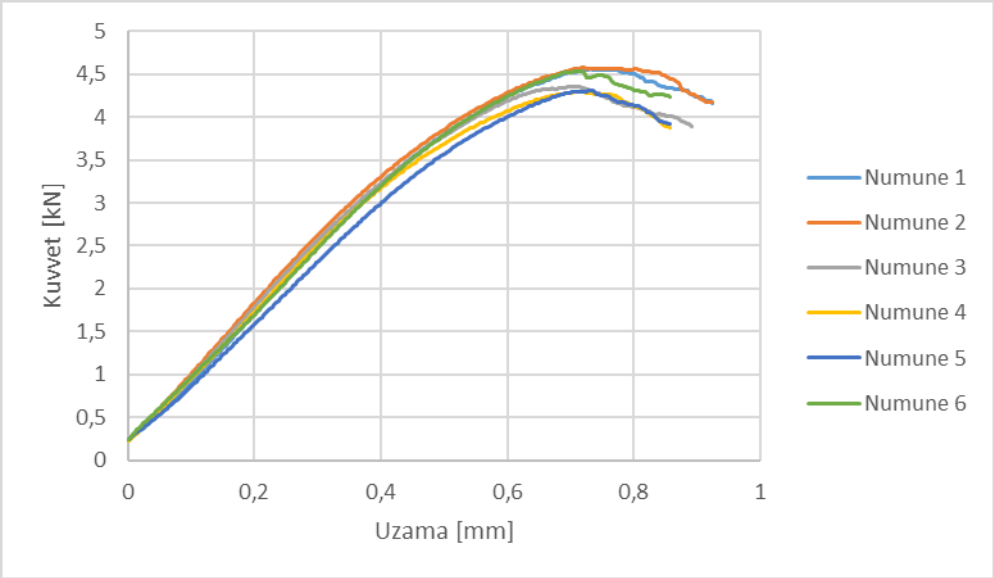
8.3.3. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı

Test sonuçları

Çizelge 7.1'deki 4 nolu yani yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı için testler gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.6'da görülmektedir. Numunelere ait kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.22'de ve test sonuçları Çizelge 8.5'te görülmektedir.



Resim 8.6. Testleri gerçekleştirilmiş yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı numuneleri



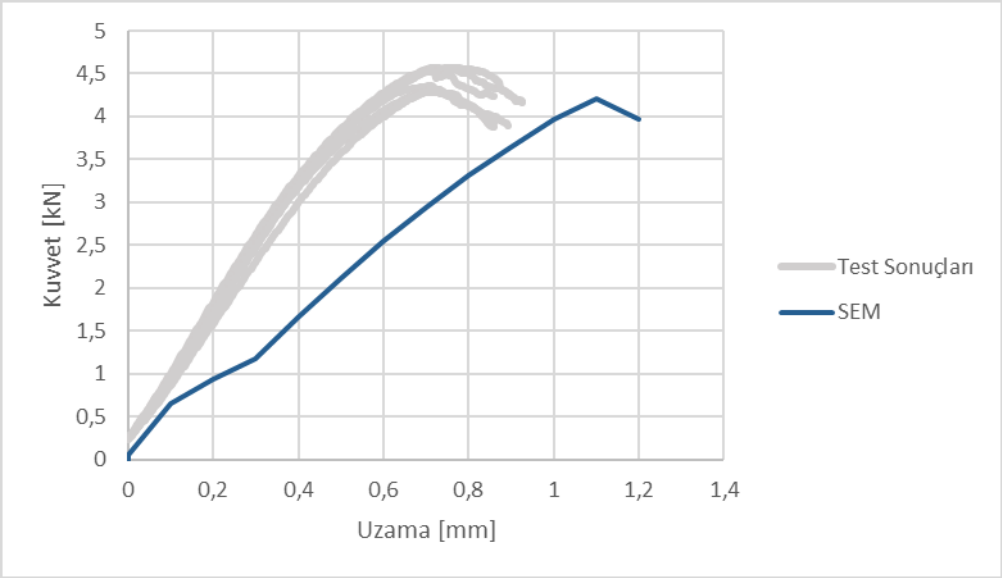
Şekil 8.22 Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanların kuvvet/uzama eğrileri

Çizelge 8.5. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları

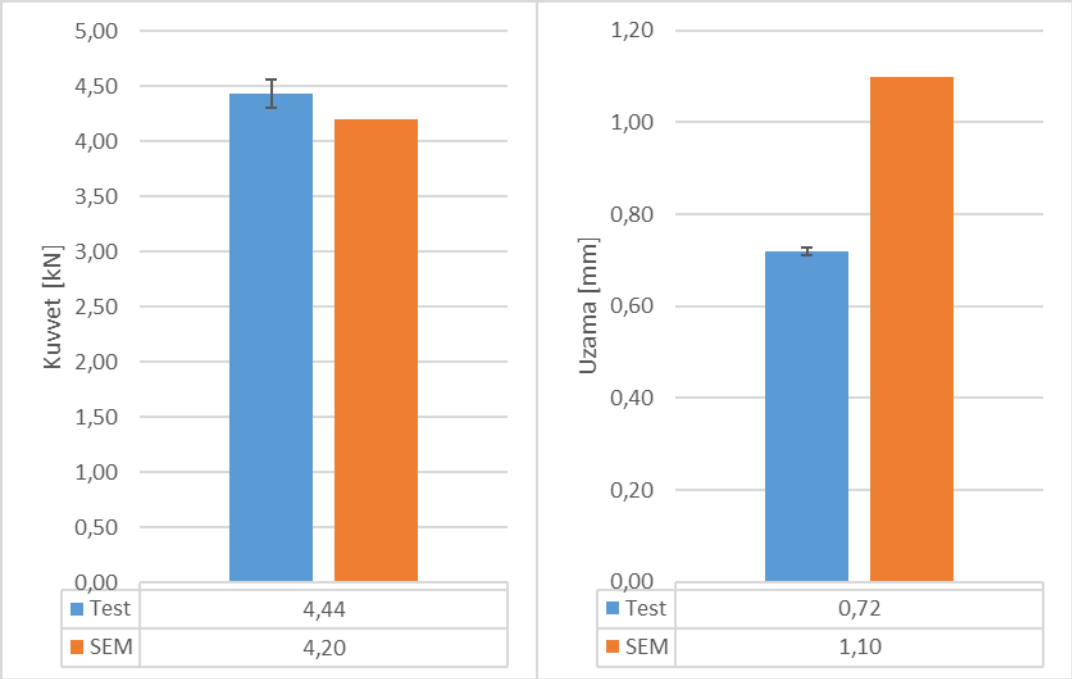
	Kritik Yük[kN]	Uzama[mm]
Numune 1	4,55	0,73
Numune 2	4,57	0,72
Numune 3	4,35	0,71
Numune 4	4,29	0,71
Numune 5	4,31	0,73
Numune 6	4,54	0,72
Ortalama	4,44	0,72
Standart Sapma	0,13	0,01

Sonlu elemanlar modeli sonuçları

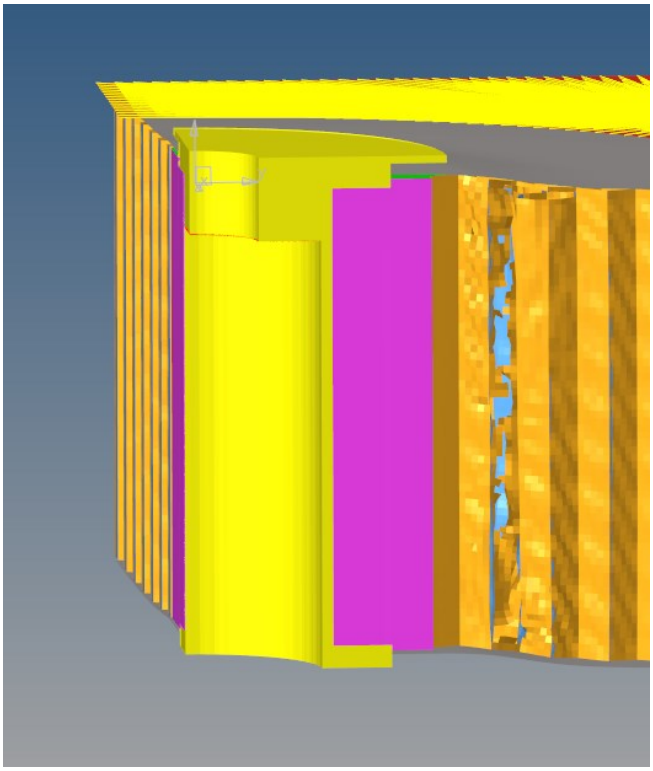
Korelasyonu tamamlanan modelden yola çıkarak oluşturulan yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı modeliyle analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.23'de görülmektedir. Şekil 8.24'de model ve test sonuçları kıyaslanmıştır. Kritik yük değeri için yaklaşık %5'lik bir fark varken uzamada yaklaşık %50'lik bir fark vardır. Sonlu elemanlar modelinin hasar modu Şekil 8.25'de ve gerilim dağılımı Şekil 8.26'da görülmektedir.



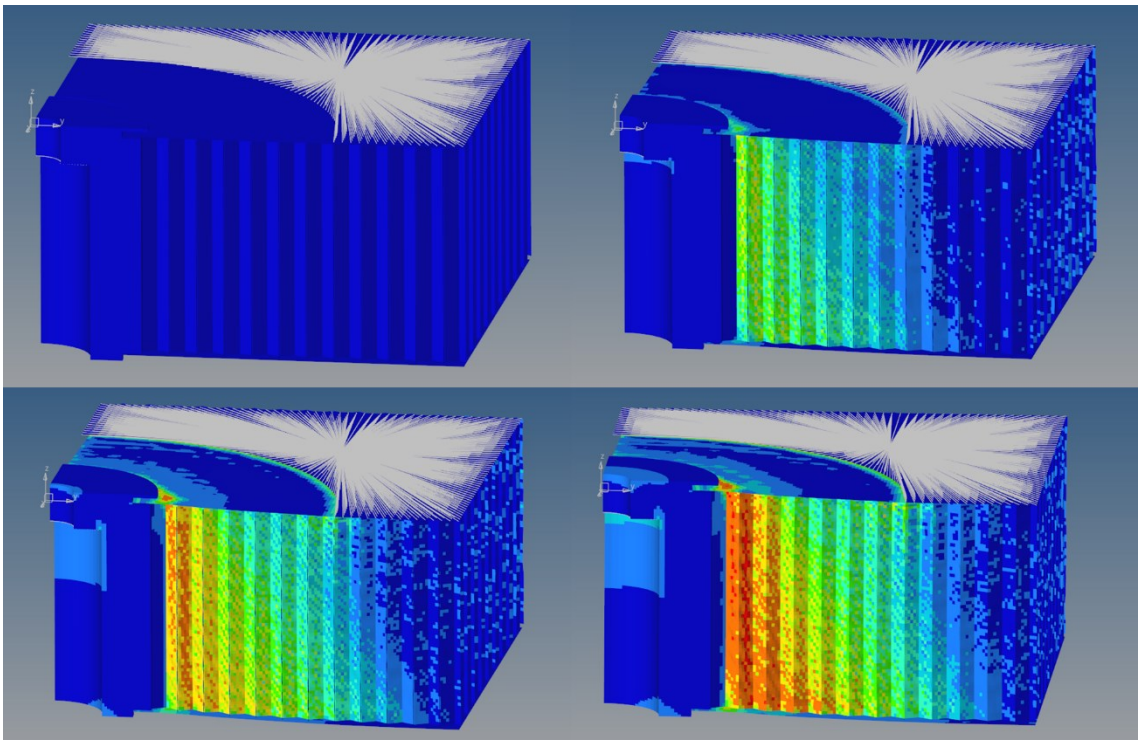
Şekil 8.23. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş kuvvet uzama eğrileri



Şekil 8.24. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanının analiz ve test sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 8.25. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sonlu elemanlar modelinin hasar modu

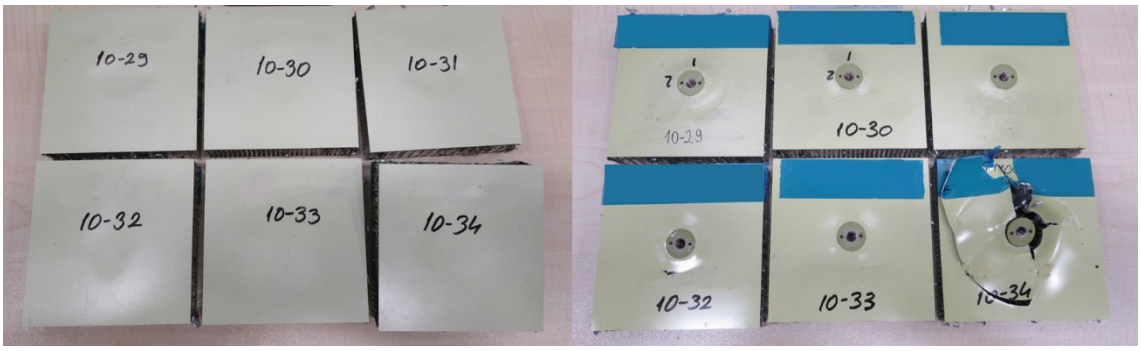


Şekil 8.26. Yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı

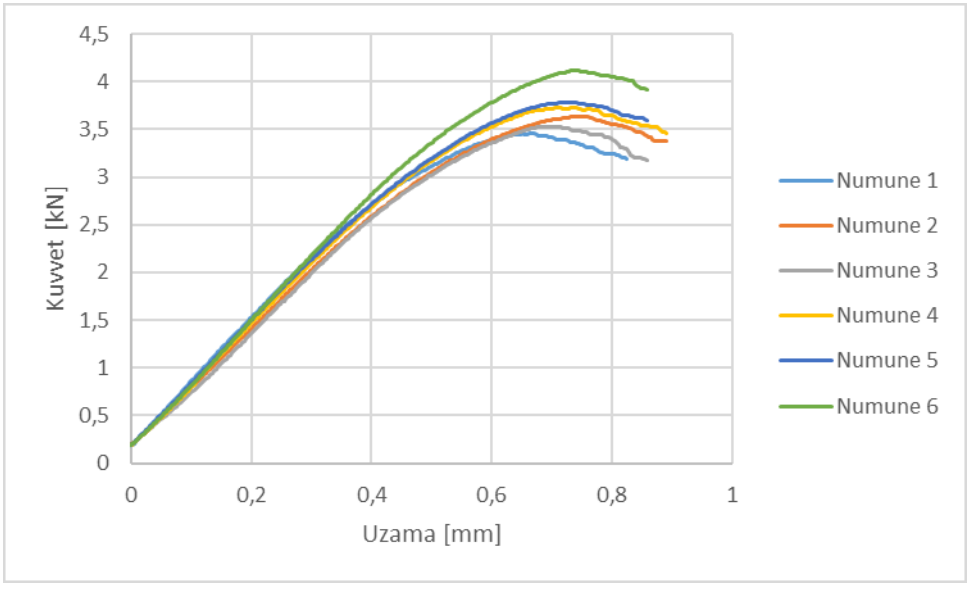
8.3.4. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı

Test sonuçları

Çizelge 7.1'deki 5 nolu yani kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı için düzlem dışı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.7'de görülmektedir. Numunelere ait kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.27'de ve test sonuçları Çizelge 8.6'da görülmektedir.



Resim 8.7. Testleri gerçekleştirilmiş kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı numuneleri



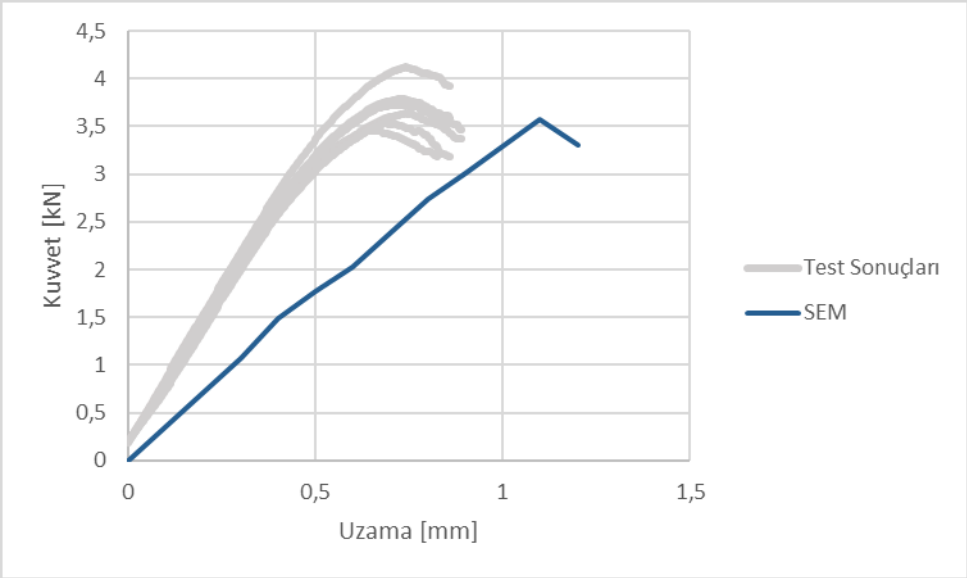
Şekil 8.27. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanların kuvvet/uzama eğrileri

Çizelge 8.6. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanlarının test sonuçları

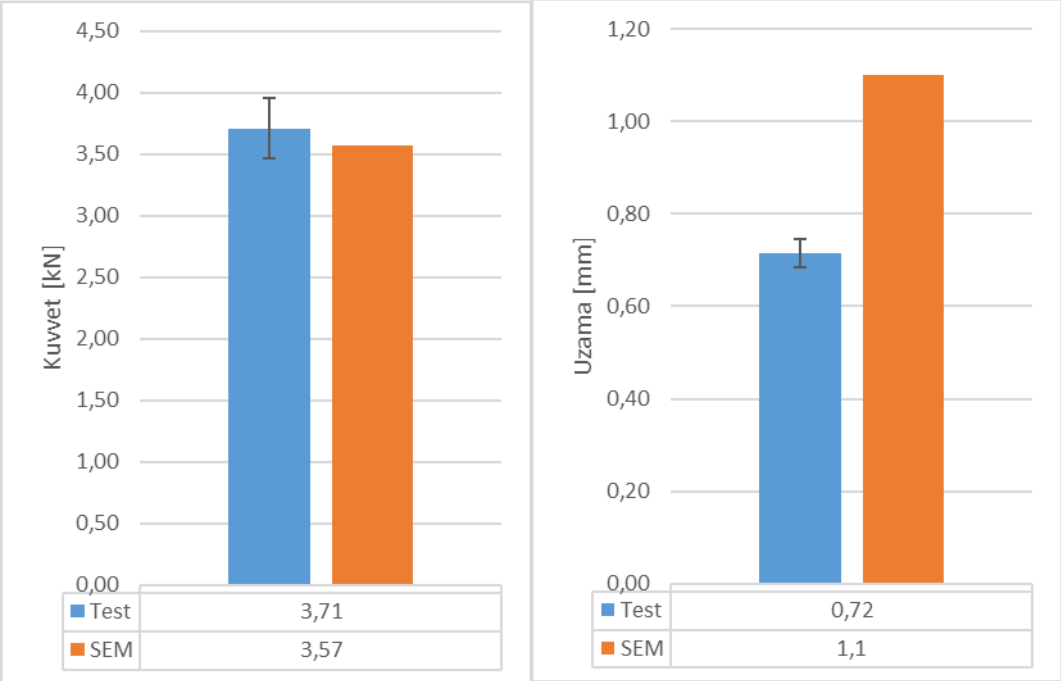
	Kritik Yük[kN]	Uzama[mm]
Numune 1	3,46	0,67
Numune 2	3,64	0,74
Numune 3	3,53	0,69
Numune 4	3,73	0,73
Numune 5	3,79	0,72
Numune 6	4,12	0,74
Ortalama	3,71	0,72
Standart Sapma	0,24	0,03

Sonlu elemanlar modeli sonuçları

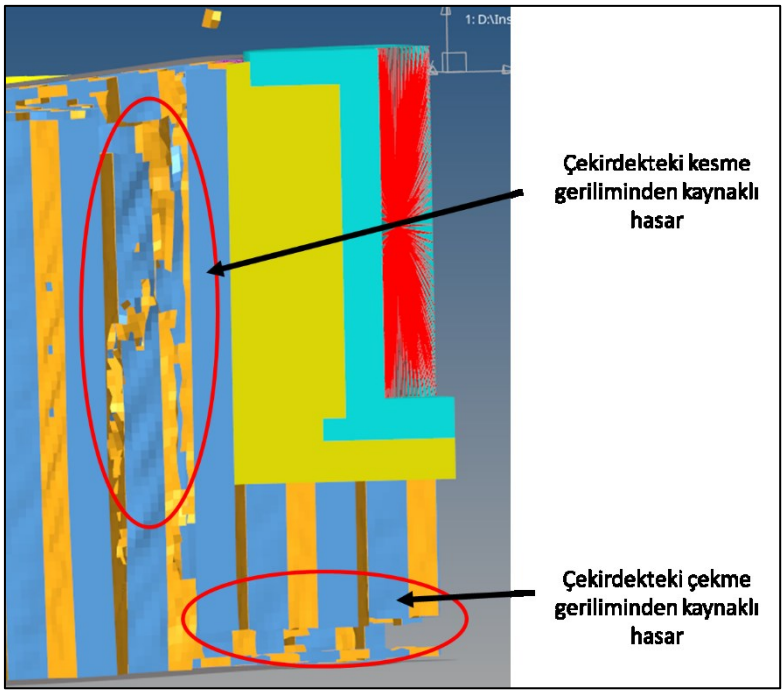
Korelasyonu tamamlanan modelden yola çıkarak oluşturulan yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlantı elemanı modeliyle analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.28'de görülmektedir. Şekil 8.29'da model ve test sonuçları kıyaslanmıştır. Kritik yük değeri için yaklaşık %4'lik bir fark varken uzamada yaklaşık %50'lik bir fark vardır. Sonlu elemanlar modelinin hasar modu Şekil 8.30'da görülmektedir. Dolgu malzemesinin yanlarındaki bal peteği yapı kesmeden kaynaklı hasara uğrarken, gömülü bağlantı elemanı altındaki kısımda çekmeden kaynaklı hasar oluşmaktadır. Görülen bu hasar modu testte görülen ile uyuşmaktadır (Resim 8.8). Ayrıca sonlu elemanlar modelinin gerilim dağılımı Şekil 8.31'de görülmektedir.



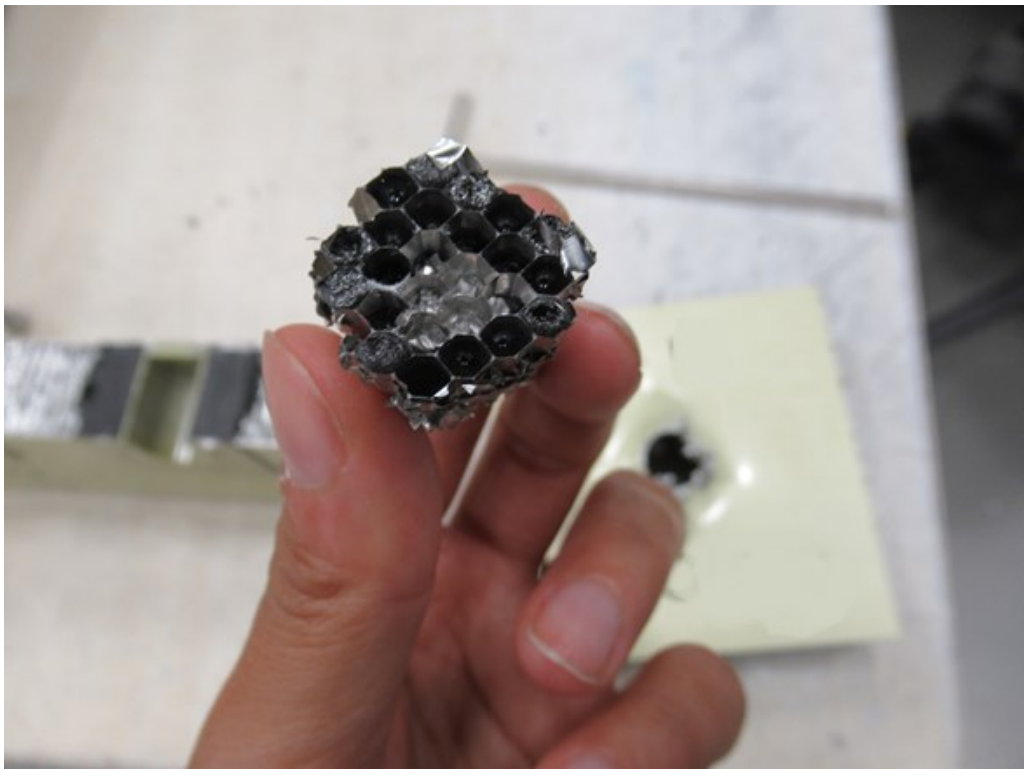
Şekil 8.28. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş kuvvet uzama eğrileri



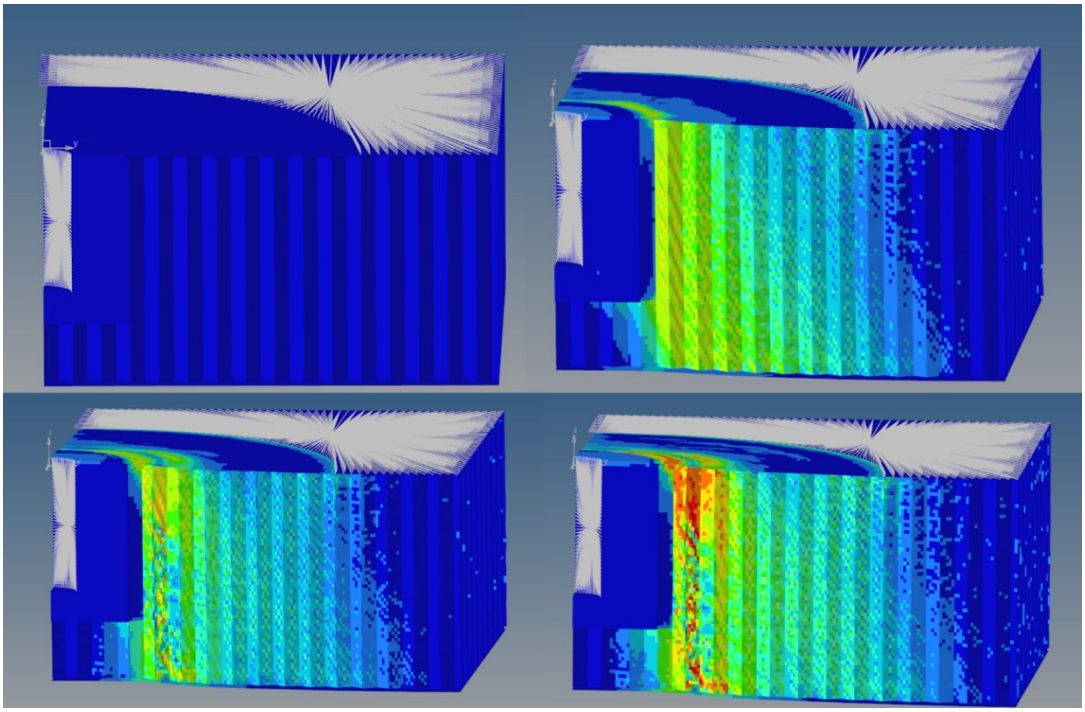
Şekil 8.29. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanının analiz ve test sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 8.30. Sonlu elemanlar modeli hasar modu



Resim 8.8. Test sonucu görülen hasar modu

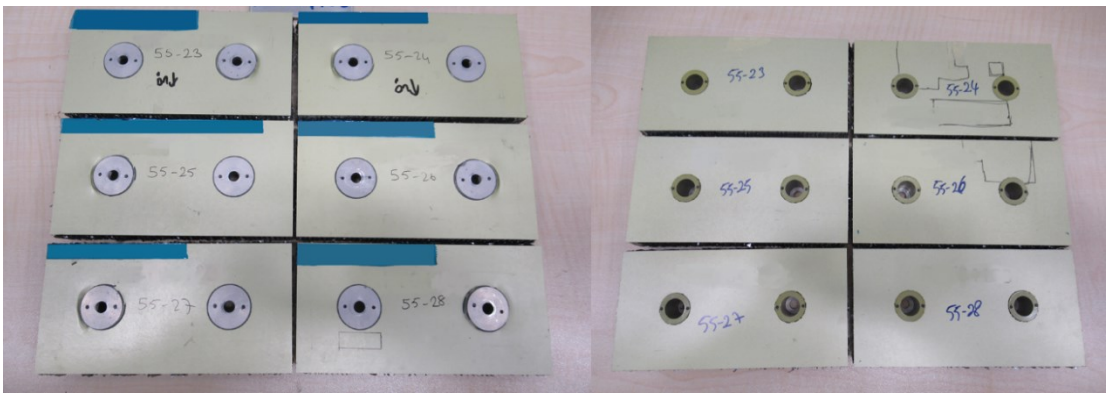


Şekil 8.31. Kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı

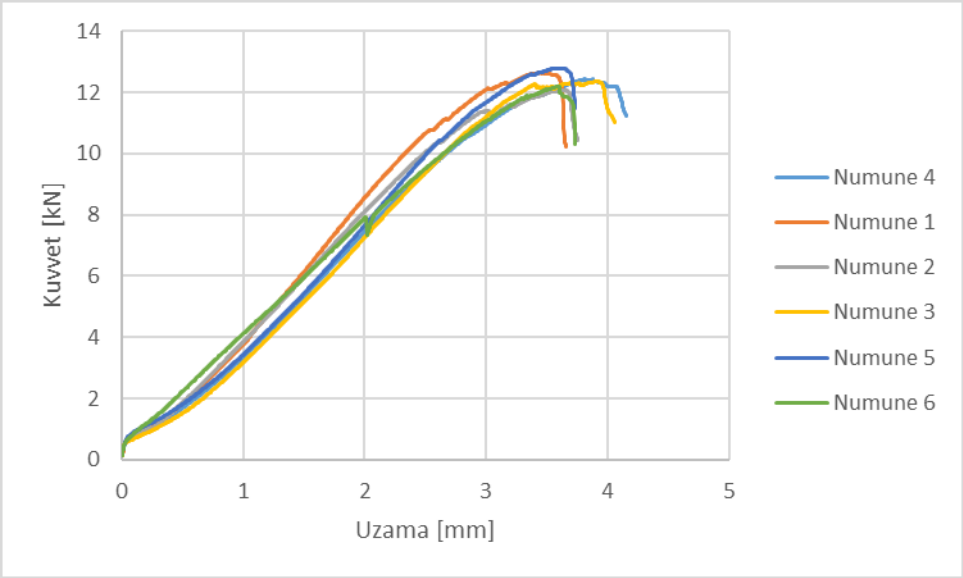
8.3.5. Düzlem içi yükleme altındaki gömülü bağlantı elemanı

Test sonuçları

Çizelge 7.1'deki 6 nolu yani korelasyon çalışması için seçilen gömülü bağlantı elemanı sisteminin düzlem içi çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testleri gerçekleştirilen numuneler Resim 8.9'da görülmektedir. Numunelere ait kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.32'de ve test sonuçları Çizelge 8.7'de görülmektedir.



Resim 8.9. Düzlem içi testleri gerçekleştirilen gömülü bağlantı elemanı



Şekil 8.32. Düzlem içi testleri gerçekleştirilen gömülü bağlantı elemanlarının kuvvet ve uzama eğrileri

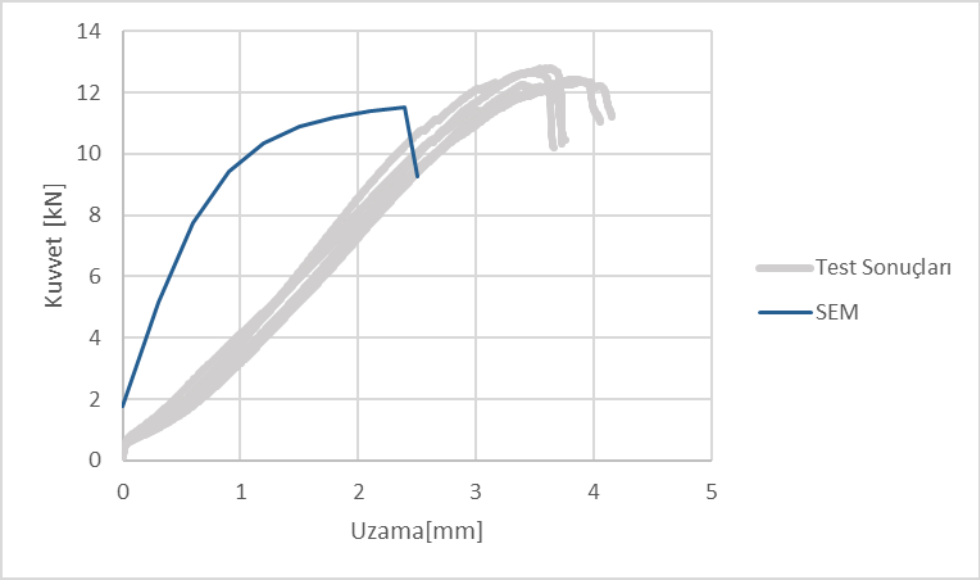
Çizelge 8.7. Düzlem içi testlerin sonuçları

	Kuvvet [kN]	Uzama [mm]
Numune 1	12,65	3,44
Numune 2	12,07	3,65
Numune 3	12,34	3,91
Numune 4	12,43	3,81
Numune 5	12,78	3,64
Numune 6	12,19	3,60
Ortalama	12,4	3,7
Standart sapma	0,3	0,2

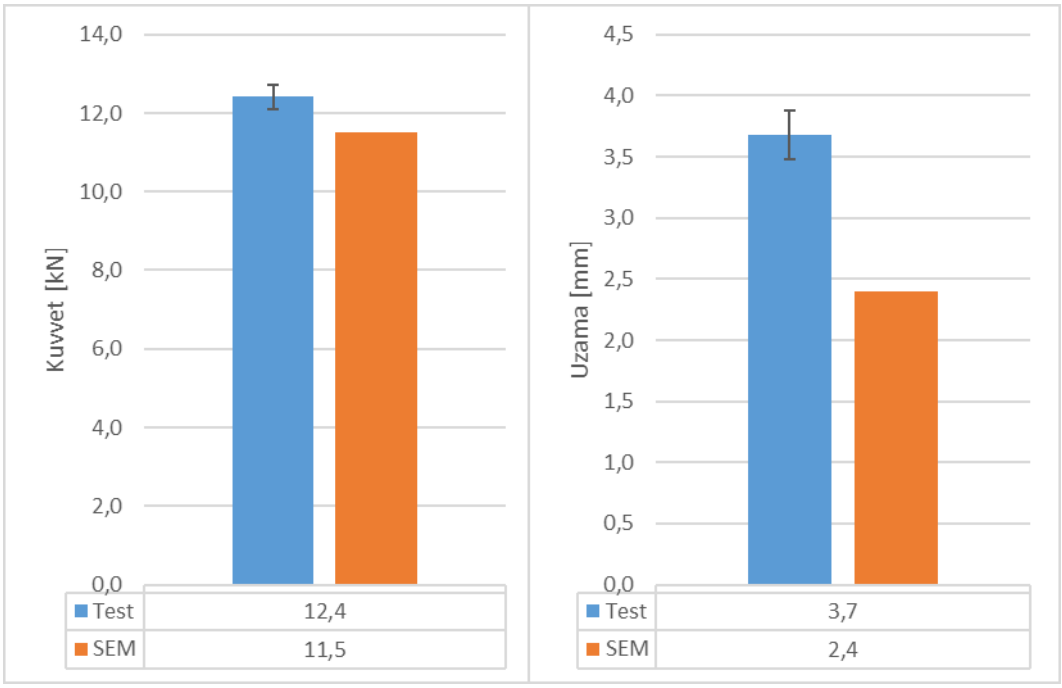
Sonlu elemanlar modeli sonuçları

Korelasyon çalışması yapılan gömülü bağlantı elemanının sonlu elemanlar modeli kullanılarak düzlem içi çekme yükü altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ve test ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri Şekil 8.33'de görülmektedir. Şekil 8.34'de görüldüğü gibi kritik yük arasındaki fark %10'un altında olmasına rağmen hem uzamadaki fark hem grafik şeklinin çok tutarlı olmaması düzlem dışı yük altında

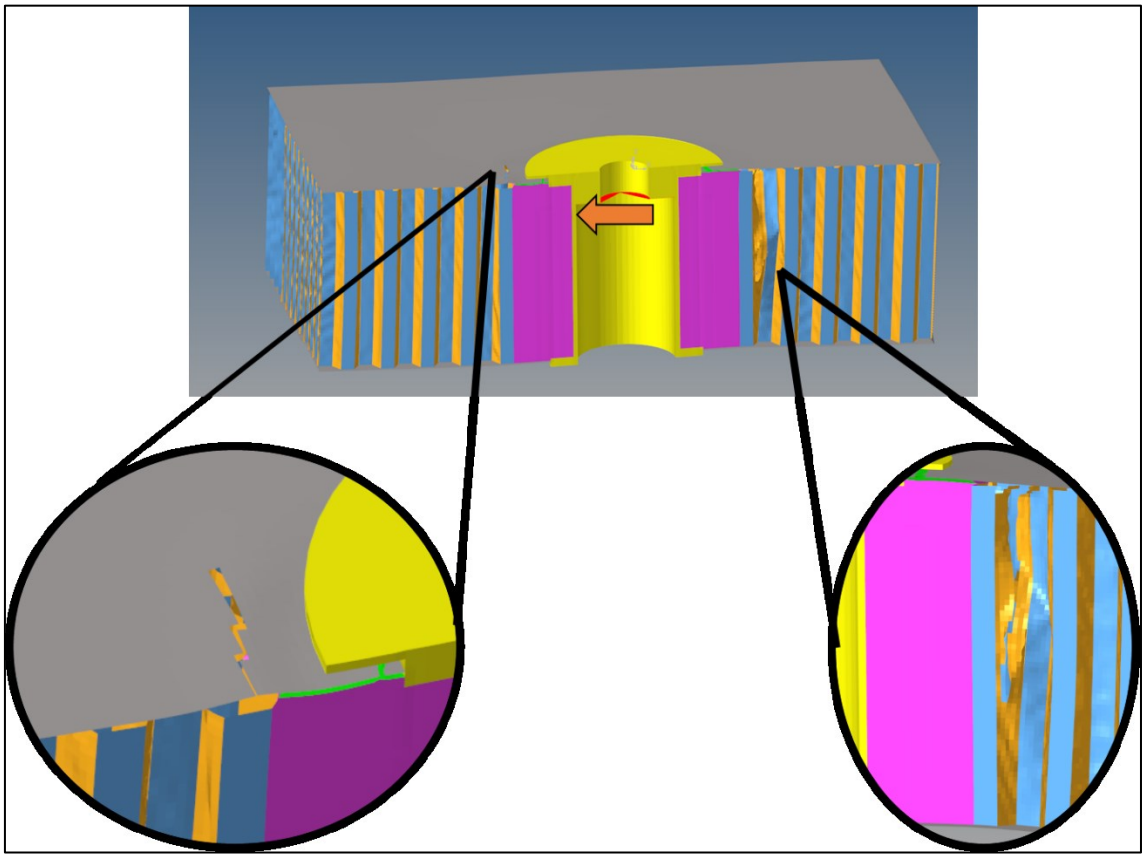
doğrulaması yapılan bir modelin direk olarak düzlem içi yük altında kullanmanın çok sağlıklı olmadığını göstermektedir. Buna rağmen Şekil 8.35 ve Resim 8.10'da sonlu elemanlar modelinin ve testi gerçekleştirilen numunenin hasar modunun benzerliği, bu modelin sistemin mekaniğini anlamak için kullanışlı olduğunu göstermektedir. Şekil 8.35'de gömülü bağlantı elemanının çekme yönünde yüzey tabakadaki hasar ve çekme yönünün tersinde çekirdekteki hasar ve Şekil 8.36'da gerilim dağılımı görülmektedir.



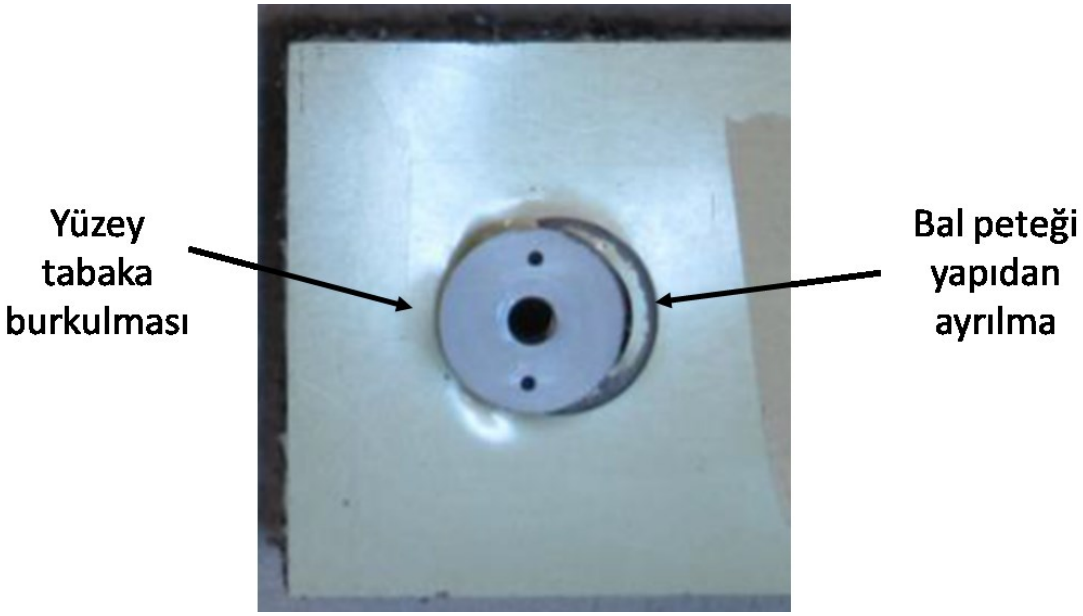
Şekil 8.33. Düzlem içi yük altındaki gömülü bağlantı elemanının test ve sonlu elemanlar modeli ile elde edilen kuvvet/uzama eğrileri



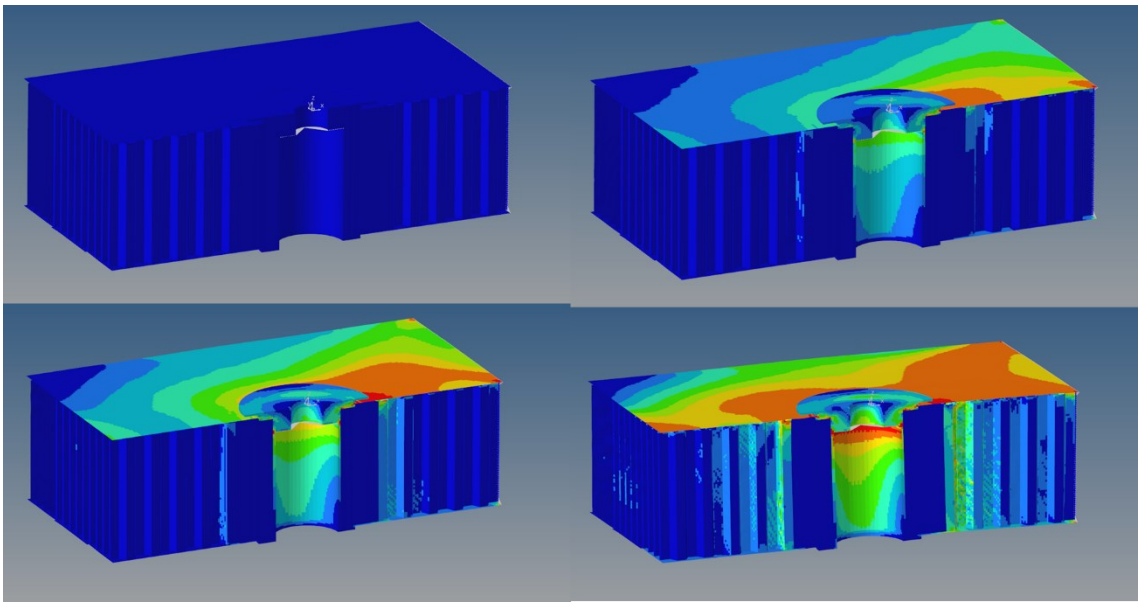
Şekil 8.34. Düzlem içi çekme yüklemesi altındaki gömülü bağlantı elemanı için test ve sonlu elemanlar ile elde edilen verilerin kıyaslaması



Şekil 8.35. Sonlu elemanlar modeli düzlem içi yük altındaki hasar modu



Resim 8.10. Test numunesinin hasar modu



Şekil 8.36. Düzlem içi testi altında gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlu elemanlar modelindeki yükleme altındaki gerilim dağılımı

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında geometrik parametrelerinin gömülü bağlantı elemanı sistemi sonlar elemanlar modelinin doğruluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir.
Bal peteği yapılarının sonlu elemanlar modelinin hazırlanması için düzlem dışı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. 50 mm x 50 mm boyutunda 6 numune ile testler gerçekleştirilmiştir ve elde edilen veriler ile bal peteği sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Korelasyon çalışmasında kullanılan test numuneleri dışında 5 değişken ile birlikte toplam 6 test grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan gruplar; gömülü bağlantı elemanının çapının arttırıldığı, bal peteği yüksekliğinin arttırıldığı, yüzey tabaka kalınlığının azaltıldığı, kısmi dolgulu gömülü bağlantı elemanının kullanıldığı düzlem dışı çekme testi numunelerinin yanı sıra ilk model için kullanılan gömülü bağlantı elemanı ile düzlem içi test numuneleridir. Testleri yapılacak gömülü bağlantı elemanları soğuk yapıştırma işlemi ile üretilmiştir. Diğer bir deyişle panel üretimi işlemi tamamlandıktan sonra gömülü bağlantı elemanı entegrasyonu gerçekleştirilmiştir.

İlk sonlu elemanlar modeli oluşturulurken gerçekleştirilen testlerin yanı sıra dayanım üzerinde oldukça önemli bir konu olan dolgu malzemesinin şekline testi gerçekleştirilen numunelerin x-ray görüntüleri ile karar verilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile %2'nin altında hata payı ile kritik yük ve uzama elde edilerek güzel bir korelasyon yakalanmıştır.
Doğrulama işlemi gerçekleştirilmiş modelden yola çıkılarak elde edilen çapı arttırılmış gömülü bağlantı elemanı modelinin kritik yükü oldukça iyi seviyede tespit ettiği fakat uzama miktarlarında %16'lık bir fark gözlemlenmiştir. Benzer şekilde elde edilen bal peteği yüksekliği arttırılmış modelin sonuçlarındaki sapma kritik yük tespitinde %11 ve uzama miktarında %24'dür. Yüzey kalınlığı azaltılmış modelin kritik yük değerinde %5 fakat uzama miktarında %50 civarında bir fark görülmüştür. Benzer şekilde kısmi dolgu malzemeli modelin kritik yük değerinde %4 ve uzama miktarında %50'lik bir fark gözlemlenmiştir. Son olarak düzlem içi yükleme altındaki gömülü bağlantı elemanı modelinin kritik yük değerine yaklaştığı fakat kuvvet uzama grafiğinin test ile tutarlı olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamındaki tüm modellerin hasar davranışının beklenilenlerle oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bir gömülü bağlantı elemanının düzlem dışı test verileri ile elde edilmiş sonlu elemanlar modeli ile malzeme değişimi olmaksızın çap değişimi, yüzey tabaka kalınlığı değişimi ve kısmi dolgu malzemeli gömülü bağlantı elemanı kullanımı olan grupların kritik yük değeri tespitinde kullanılabileceği fakat uzaman miktarlarını doğru bir şekilde tespit edemediği sonucuna varılmıştır. Özellikle kısmi dolgu malzemeli ve yüzey tabaka kalınlığı azaltılmış gömülü bağlanyı elemanı sistemlerinde uzama miktarında ciddi sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bal peteği yüksekliği arttırılmış gömülü bağlantı elemanlarının dayanım tespitinde bu tarz bir modelin kullanımının yüksek hassasiyet göstermeyeceği fakat davranışı anlamak ve ilk tasarım aşamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak düzlem içi testler için mevcut modelin kritik yük değerine yakınlaştığı görülse de kuvvet uzama eğrilerindeki tutarsızlıktan dolayı düzlem içi yükleme dayanımı tespiti için bu tarz bir modelin kullanımı riskli bulunmuştur.

Yapılacak araştırmalar için muhtemel çalışma önerileri şu şekilde sıralanabilir:

- Yapıştırma dayanımının önemli olduğu büyük flanşlı gömülü bağlantı elemanı sistemi hakkında model korelasyonu ve değişkenlerin etkisi incelenebilir.
- Benzer çalışma düzlem dışı yerine düzlem içi çekme testleri ile gerçekleştirilerek benzer kıyaslamalar yapılabilir.
- Sıcak yapıştırma ile üretilen gömülü bağlantı elemanı sistemleri için de benzer bir çalışma gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. European Space Agency. (2011). *ECSS-E-HB-32-22A: Insert Design Handbook*. (First edition). Netherlands: European Space Agency, 488.

2. Kim B.J and Lee D.G. (2008). Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels. *Composite Structures*, 86(1–3), 55–60.

3. Song K.I., Choi J.Y., Kweon J.H., Choi J.H. and Kim K.S. (2008). An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures. *Composite Structures*, 86(1–3), 107–13.

4. Bunyawanichakul P., Castanie B. and Barrau JJ. (2005). Experimental and numerical analysis of inserts in sandwich structures. *Applied Composite Materials*, 12(3–4), 177–91.

5. Bunyawanichakul P., Castanie B. and Barrau JJ. (2008). Non-linear Finite Element Analysis of Inserts in Composite Sandwich Structures. *Composites Part B*, 39(6), 1077–1092.

6. Bunyawanichakul P., Kumsantia P. and Castanié B. (2012). An experimental-numerical approach of the metallic insert in CFRP/honeycomb sandwich structures under normal tensile load. *Advanced Materials Researc*h, 399-401, 500-505.

7. Raghu N., Battley M. and Southward T. (2009). Strength variability of inserts in sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 11(6), 501–517.

8. Nguyen K.H., Park Y.B., Kweon J.H and Choi J.H. (2012). Failure Behaviour of Foam-Based Sandwich Joints under pull-out Testing. *Composite Structures,* 94(2), 617-624.

9. Heimbs S. and Pein. M. (2009). Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts. *Composite Structures*, 89(4), 575-588.

10. Bianchi G., Aglietti G.S. and Richardson G. (2011). Static performance of hot bonded and cold bonded inserts in honeycomb panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 13(1), 59-82.

11. Roy R., Nguyen K.H., Park Y.B., Kweon J.H. and Choi J.H. (2014). Testing and modelling of nomex honeycomb sandwich panels with bolt insert. *Composites Part B: Engineering*, 56, 762-769.

12. Seemann R. and Krause D. (2014). *Numerical modelling of nomex honeycomb cores for local analyses of sandwich panel joints*. 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona.

13. Seemann R. and Krause D. (2015). *Virtual testing of nomex honeycomb sandwich panel inserts*. 20th International Conference on Composite Materials, Kopenhag.

14. Bozhevolnaya E. and Lyckegaard A. (2005). Structurally graded core inserts in sandvich panels. *Composite Structures*, 68(1), 23-29.

15. Qi G., Ma L. and Wang S. (2019). Modeling and reliability of insert in composite pyramidal lattice truss core sandwich panels. *Composite Structures*, 221, 110888.

16. Birman V. (2018). Review of Current Trends in Research ve Applications of Sandwich Structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221-240.

17. HexWeb. (2000). *Honeycomb Sandwich Design Technology Manuel*. Web: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf Son Erişim Tarihi 15.11.2022.

18. Marshall A. (1982) Sandwich Construction. In G. Lubin (Ed.), *Handbook of Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 557-601.

19. Castanie B. Bouvet C. and Ginot M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, 100004.

20. Niu M. (1998). *Airframe stress analysis ve sizing*. (Second edition). Granada Hills: Adaso Adastra Engineering Center, 75.

21. Allen H.G. (1969). *Analysis and Design of Sandwich Panels*. (First edition). London: Pergamon Press, 56.

22. Burton W.S. and Noor A.K. (1997). Assessment of Continuum Models for sandwich Panel Honaycomb Cores. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 145, 341-360.

23. Thomsen O.T. (2009). Sandvich Materials for Wind Turbine Blades: Present ve Future. *Journal of Sandwich Structures ve Materials*, 11, 7-26.

24. DIAB Group. (2020). DIAB Sandwich Handbook. Web: http://www.diabgroup.com/media/q5yldbe4/diab-guideline-to-core-and-sandwich.pdf Son Erişim Tarihi 15.11.2022.

25. Aydıncak İ. (2007). *Investigation of Design and Analyses Principles of Honeycomb Structures*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

26. İnternet: HEXCEL Corp. Web: http://www.hexcel.com/Markets Son Erişim Tarihi 15.11.2022.

27. SHUR-LOK Company. (1999). Fasteners for Sandwich Structure Catalog.

28. Zenkert D. (1997). *The handbook of sandwich construction*. London: Emas, 250.

29. İnternet: SHUR-LOK Company. (1999). Design Manual Fasteners for Sandwich Structure. Web: http://www.shur-lok.com/ Son Erişim Tarihi 15.11.2022.

30. İnternet: SHUR-LOK Company. Sandwich Panel Inserts. Web: http://www.shur-lok.com Son Erişim Tarihi 15.11.2022.

31. Wolff J., Trimpe F., Zerlik R. and Hühne C. (2015). *Evaluation of an Analytical Approach Predicting the Transversal Failure Load of Insert Connections in Sandwich Structures*. Conference: 20th International Conference on Composite Materials, 19–24.

32. Ericksen W. (1953). The Bending of a Circular Sandwich Plate Under Normal Load. *United States Forest Products Laboratory*. Wisconsin, 1-36.

33. Montrey H. M. (1973). Bending of a Circular Sandwich Plate by Load Applied Through an Insert. *United States Department of Agrıculture*. Madison, 1-34.

34. Rodriguez J. D. (2018). *Analysis of the nonlinear behavior of inserts in sandwich structures: application to an innovative sizing method*, Doctoral Thesis Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse.

35. Thomsen O. T. (1995). Theoretical and experimental investigation of local bending effects in sandwich plates. *Composite Structures*, 30-1, 85–101.

36. Thomsen O. T. (1997). Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' Inserts: evaluation of differences in structural performance. *Composite Structures*, 40-2, 159–174.

37. Thomsen O. T. and Rits W. (1998). Analysis and design of sandwich plates with Inserts - a high-order sandwich plate theory approach. *Composites Part B*, 29(6), 795-807.

38. Departement of defense USA. (1974). *MIL-HDBK-23A*. (First edition). Washington: Departement of defense USA, 291-392.

39. Seemann R. and Krause D. (2017). Numerical Modeling of Nomex Honeycomb Sandwich Cores at Meso-Scale Level. *Composite Structure*s, 159, 702-718.

40. Bhatti M.A. (2006). *Advanced topics in Finite Element Analysis of Structures*. Hoboken: Wiley, 200.

41. Dere F. (2013). *Experimental and Finite Element Analysis of Rotary Draw Tube Bending Process*, Yüksek Lisans Tezi, Orto Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

42. Seemann R. and Krause D. (2014). *Numerical modelling of Nomex honeyomb cores for Detailed analyses of sandwich panel joints*. 11th World Congress on Computational Mechanics, Spain, 20-25.

43. Slimane S., Kebdani S., Boudjemai A., and Slimane A. (2017). Effect of position of tensionloaded inserts on honeycomb panels used for space applications. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12, 393-408.



Gazili olmak ayrıcalıktır