

## ALÜMİNYUM PLAKALAR İLE TAKVİYELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Kemal ARSLAN<sup>1</sup>  
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Recep GÜNEŞ<sup>2</sup>  
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

M. Kemal APALAK<sup>3</sup>  
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

### ÖZET

*Sandviç yapılar bilinen en eski ve günümüzün de ileri teknolojik kompozit yapılarından biridir. Sahip olduğu birçok avantaj sayesinde havacılık ve uzay, otomotiv, marine ve savunma sanayinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum alaşımları, hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerinin her ikisine birden sahip olmasıyla özellikle havacılık ve uzay sanayisi için önemli bir rol oynamaktadır. Alüminyum plakalar ile takviyelendirilmiş bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe yükleri altındaki deformasyonları ve enerji absorbe kapasiteleri farklı çarpma enerjileri için sayısal olarak araştırılmıştır. Petek yapılı sandviç kompozitler, özellikle darbeli yüklemeler altında oluşan enerjinin absorbe edildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda kullanıldığı için yapıda alüminyum altıgen bal peteği tercih edilmiştir. Sandviç yapıyı oluşturan yüzey levhaları 2024-T3 alüminyum alaşımı ve çekirdek malzemesi de 3003-H19 alüminyum alaşımı olarak seçilmiştir. Sayısal analizler LS-DYNA sonlu elemanlar paket programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal model, ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL – Ansys Parametric Design Language) kullanılarak oluşturulmuş ve parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Darbe analizleri için yarı küresel uçlu vurucu kullanılmıştır. Sandviç yapı elemanlarının hasar kriteri için malzemelerin efektif plastik şekil değiştirme değerleri tanımlanmıştır. Farklı çarpma enerjileri için analizler gerçekleştirilmiş ve temas kuvveti, kinetik enerji ve deformasyon geometrisi gibi parametreler açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak, sandviç yapının penetrasyon ve perforasyon durumları incelenmiştir.*

### GİRİŞ

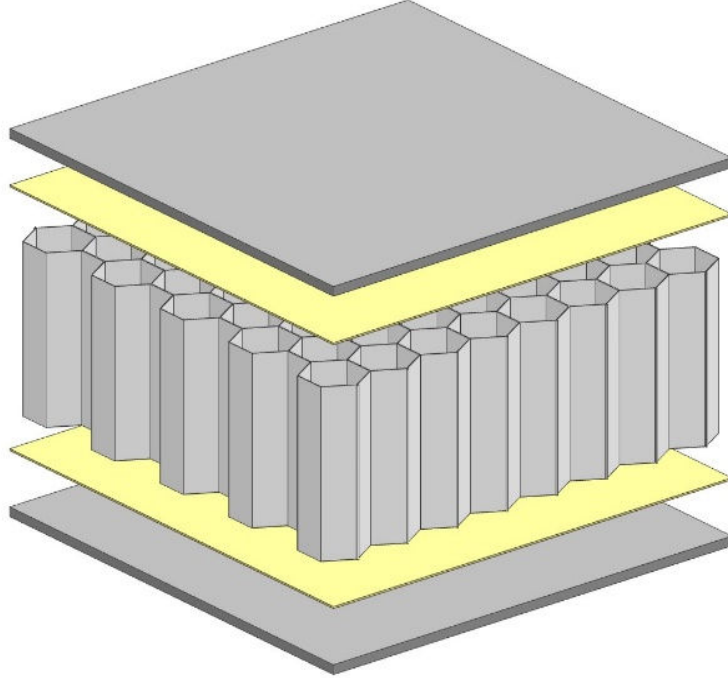
Sandviç yapılar, gün geçtikçe popüler hale gelen ve farklı malzeme kombinasyonları ile farklı tasarım konseptleri oluşturulabilen günümüzün de ileri teknolojik yapılarıdır. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde birleştirilmesiyle oluşturulur. Sandviç bir yapı temel olarak üç önemli elemana sahiptir. Şekil 1' de gösterildiği üzere en dışta üst ve alt yüzey levhaları, orta kısımda çekirdek malzeme ve ara katmanlarda bağlantıyı sağlayan yapıştırıcı katmanlarından oluşmaktadır. Dış yüzeyler ince ancak mukavim bir yapıya sahipken, çekirdek malzemenin mukavemet değeri yüzeylere göre daha düşük, sönümlenme özelliği yüksek ve de hafiftir. Bu sayede mukavemeti yüksek bir eleman oluşturulduğu gibi yapısal açıdan da düşük ağırlıklı bir yapı elde edilmiş olur. İçerideki çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi korumaktır; çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve de eğilme

<sup>1</sup> Kemal ARSLAN Fen Bilimleri Enst., e-posta: karslan@erciyes.edu.tr

<sup>2</sup> Doç. Dr. Recep GÜNEŞ, Makine Müh. Böl., e-posta: recepg@erciyes.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr. M. Kemal APALAK, Makine Müh. Böl., e-posta: apalakmk@erciyes.edu.tr

rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Sandviç yapılar; yüksek eğilme dayanımı ve rijitlik, hafiflik, uygun malzeme kombinasyonu ile düşük maliyet eldesi, termal yalıtım özelliği, ses yalıtım özelliği, uygun aerodinamik yüzeyler oluşturabilmesi, yüksek hızlara dayanım gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle hafiflik ve rijitliğin önemli olduğu havacılık ve uzay sanayinde, otomotiv sanayinde, gemicilik sanayinde ve askeri uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 1: Sandviç yapıların temel elemanları

Bal peteği sandviç yapılar, özellikle yapıya etki eden darbeleri yüklemeler altında oluşan enerjinin absorbe edildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren yapılarda kullanılır. Sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak bal peteği kullanılarak oldukça hafif sistemler elde edilmesinin yanı sıra mekanik dayanımı yüksek bir yapı elde edilir. Bal peteği sandviç yapılar özellikle basma ve darbe yükleri altında yüksek dayanım göstermektedir. Petekli sandviç yapılar istenilen özelliklere göre altıgen, uzatılmış altıgen, kare, flex, dikdörtgen vb. şekillerde oluşturulabilir. Bal peteğinin yüzey levhaları ile birleşme geometrisi gereğince, en küçük temas alanında en geniş kaplama elde edilir.

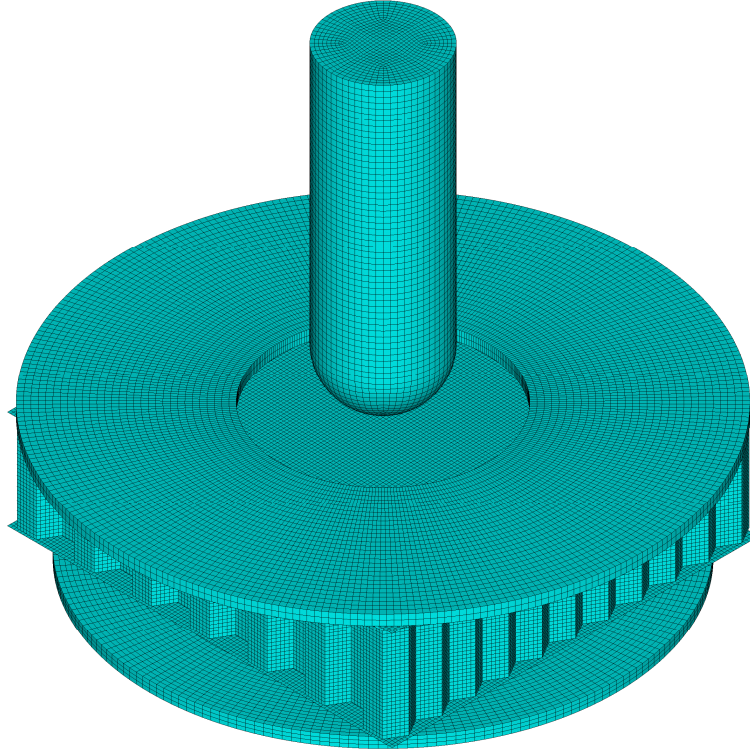
Bal peteği ile oluşturulmuş sandviç yapıların darbe davranışları ile ilgili literatürde farklı çalışmalar mevcuttur. Bal peteği çekirdek malzemelerinin enine ezilme davranışlarının modellenmesi için sayısal teknikler geliştirilmiş, alüminyum ve Nomex bal petekleri için bu teknikler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sayısal modelleme yapılırken detaylı mikro mekanik modelleme ve yarı-adaptiv eşleme tekniği (semi-adaptive coupling technique = SAC) kullanılmıştır [AktayL, 2008]. 3003 ve 5052 alüminyum alaşımı bal peteklerinin değişik hücre boyutları için yarı-statik ve darbe yüklemeleri altındaki davranışları sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Yanal atalet etkilerinden dolayı, darbe etkisi altında oluşan şekil değiştirmelerin yarı-statik yükleme durumundan daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, iki farklı alüminyum serisi için pekleşmeden dolayı oluşan gerilme artışının bu iki seri için farklı ezilme basıncına sebep olduğu ve bu etkiden dolayı da darbe yüklemesi altındaki bal peteğinin hücre duvarlarındaki ardı ardına oluşan katlanmaların temel sebebinin yanal atalet etkisi olduğu tespit edilmiştir. [HouB, 2012]. Alüminyum bal peteği sandviç yapıların farklı hücre boyutları için statik ve düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Sandviç yapının statik davranışını belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi

uygulanmıştır. Statik eğilme testi, mesnet genişliğine ve bal peteği hücre boyutlarına bağlı olarak aynı nominal panel boyutları için farklı hasar modları meydana getirmiştir. Sandviç yapının dinamik davranışı enerji denge modeline dayalı düşük hızlı darbe deneyi yapılarak ve teorik olarak incelenmiştir. [CrupiV, 2012]. Bal peteği sandviç yapılarda momentumun korunumu kanunu ile modifiye edilmiş enerji denge modelinin elastik bölgenin üstünde geçerliliğini koruması için çalışılmıştır. Sandviç yapının darbe etkisi altındaki geçici rejim yükü ve yer değiştirme bilgilerinin tahmin edilebilmesi için öncelikle statik yük-deformasyon cevabından sistemin elastik rijitliği, hasar başlangıcındaki kritik yükü ve hasar rijitliği belirlenmiş ve sayısal modele uygulanmıştır. Statik testten elde edilen bu üç parametrenin darbe modeline uygulanmasıyla sandviç yapıların darbe cevabına ve hasar cevabına uygun bir model geliştirilmiştir [FooC, 2008]. Düşük hızlı darbe etkisi altında alüminyum bal peteği sandviç yapıların hasar başlangıcı ve yayılımı sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Sayısal çalışmada alüminyum alaşımı için pekleşme malzeme modeli olarak bilineer ve Ramberg-Osgood malzeme modelleri kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Ramberg-Osgood modeli bilineer modele göre daha iyi sonuç verdiği için sayısal analizlerde kullanılmıştır. Ayrıca sandviç yapının ankastre sınır şartı için yüzey levhalarının membran reaksiyonu ihmal edilecek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, daha iyi sonuçlar elde etmek için enerji dengesi ile impuls-momentum eşitliklerinden yararlanılmıştır [FooC, 2008]. Al 2024-T3 plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışları sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar hasar şekli, hasar başlangıcı ve penetrasyon derinliği açısından karşılaştırılmış ve sayısal ve deneysel sonuçların önemli derecede benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. [ManesA, 2013]. Alüminyum bal peteği sandviç yapılarının farklı hücre boyutları için statik ve düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Metalik yüzey levhalarıyla desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı/düşük enerjili darbe davranışı için yeni bir modelleme geliştirilmiştir. Sandviç yapı Mindlin plaka elemanları ile modellenmiştir. Vurucu ve sandviç yapı arasına hesaplanmış statik temas yasası, lineer olmayan yay yerleştirilerek uygulanmıştır [CastaniéB, 2008].

## YÖNTEM VE UYGULAMALAR

### Sonlu Elemanlar Modeli ve Sayısal Analizler

Sonlu elemanlar simülasyonları LS-DYNA paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sandviç yapının oluşturulmasında kullanılan takviye plakaları ve bal peteği malzemelerinin bir boyutunun diğer iki boyutuna göre daha küçük olması sebebiyle kabuk eleman (shell element) kullanılarak modellenmiştir. Hem plakalar hem de bal peteği için diğer iki boyutun kalınlığa oranı 10 katından büyük olduğu için kabuk eleman kullanmak problemin çözümü için uygun olacaktır. Alüminyum alaşımı takviye plakaları 1 mm kalınlık ve 80x80 mm boyutlarına, alüminyum alaşımı bal peteği de 6.35 mm hücre çapı, 70 mikron hücre duvar kalınlığı ve 18 mm yüksekliğe sahiptir. Darbe analizleri 20 mm çapında yarı küresel uçlu vurucu ile yapılmıştır. Sandviç yapının darbe analizleri için oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2: Sandviç yapı sonlu elemanlar modeli

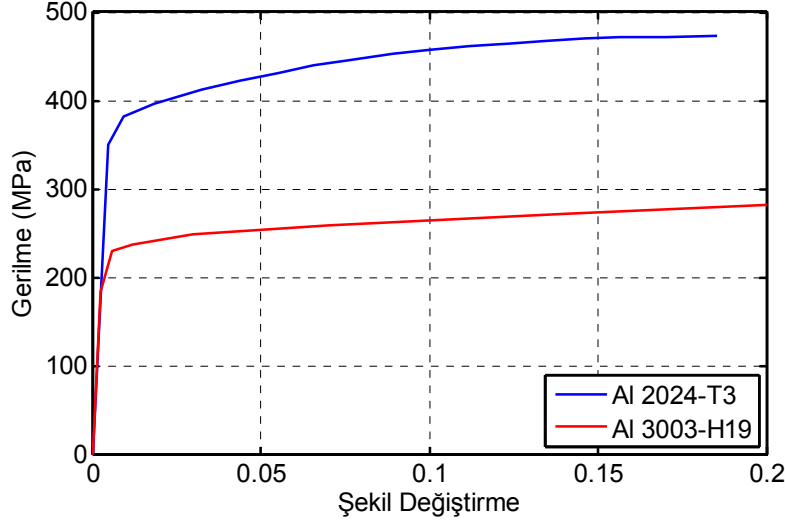
Sonlu elemanlar modeli; sandviç yapı, vurucu ve tutuculardan oluşmaktadır. Sandviç yapı elemanlarının sonlu elemanlar ağında SHELL 163 tipi eleman ve Belytschko-Leviathan shell eleman formülasyonu kullanılmıştır. Belytschko-Leviathan shell eleman formülasyonu elemanlarda fiziksel hourglass kontrolü sağladığı için yapıdaki oluşabilecek çarpılmalar ve yırtılmalar göz önüne alınmıştır. Vurucu ve tutucular rijit modellenmiş ve SOLID 164 tipi eleman kullanılmıştır. Analizlerde sandviç yapı elemanlarının elasto-plastik malzeme davranışını modelleyebilmek için MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde malzemeye ait mekanik değişkenler (elastiklik modülü, poisson oranı ve akma gerilmesi) ile çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin akma gerilmesinden sonraki kısmı ve son olarak da hasar kriteri olarak malzemenin kopma anındaki şekil değiştirme değeri (efektif plastik şekil değiştirme değeri) tanımlanmaktadır. Sandviç yapı elemanlarının mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Vurucu ve tutucular rijit olarak kabul edilmiş ve MAT\_RIGID malzeme modeli ile modellenmiştir.

Alüminyum 2024-T3 malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi tek eksenli çekme testinden, 3003-H19 alüminyum bal peteği malzemesinin gerilme şekil değiştirme eğrisi de literatürden elde edilmiştir [TrylanT, 2005]. 2024-T3 ve 3003-H19 alüminyum alaşımlarının gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3' de gösterilmiştir. Analizlerde sandviç yapıda darbe etkisiyle oluşan hasar mekanizmasını da görebilmek için malzemelerin efektif plastik şekil değiştirmeleri tanımlanmıştır. Plakaların efektif plastik şekil değiştirmeleri çekme testi sonucu elde edilen veriler ile 1 eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Alüminyum bal peteğinin efektif plastik şekil değiştirmesi ise literatürden yaklaşık bir değer alınmıştır [KılıçaslanC, 2012]. 2024-T3 ve 3003-H19 alüminyum alaşımları için efektif plastik şekil değiştirmeleri sırasıyla 0.62 ve 0.52 olarak elde edilmiştir.

$$\varepsilon_f = \ln \left( \frac{A_f}{A_0} \right) \quad (1)$$

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Akma Gerilmesi (MPa)	Efektif Plastik Şekil Değişirmesi
Al 2024-T3	73.1	0.33	2780	350	0.62
Al 3003-H19	69.0	0.33	2730	183	0.52

Tablo 1: Sandviç yapı elemanları malzeme özellikleri



Şekil 3: Alüminyum 2024-T3 ve 3003-H19 alaşımları için gerilme-şekil değiştirme eğrileri

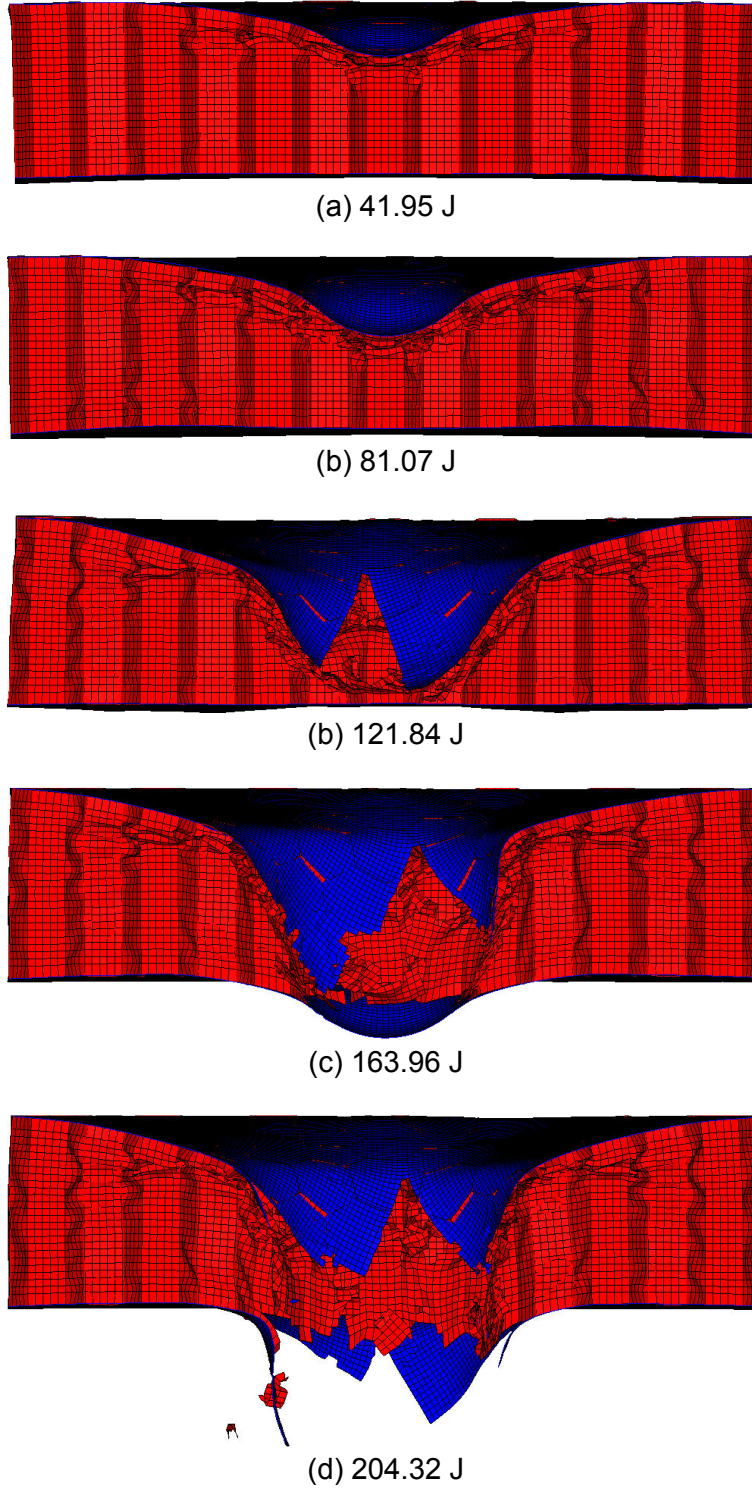
Çarpma analizlerinde temas modelinin tanımlanması oldukça önemli bir adımdır. Bu çalışmada, vurucu ile sandviç panel arasında malzemelerin hasar şekil değiştirmeleri tanımlandığı için ve sandviç yapıda hasar veya perforasyon gerçekleşebileceği için CONTACT\_ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Alüminyum plakalar ile bal peteği çekirdek ara yüzeyleri mükemmel yapışkan olarak kabul edilmiş ve bu yüzden ara yüzeylerde CONTACT\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sınır şartlarını oluşturan tutucular ve takviye plakaları arasında CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Son olarak, darbe esnasında elemanlar arasında oluşabilecek olası temaslar için CONTACT\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Vurucu ile sandviç panel arasındaki temas ve tutucu ile alüminyum plakalar arasındaki temas algoritmalarında statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırası ile 0.3 ve 0.2 olarak tanımlanmıştır.

Sayısal analizlerde sınır şartları alt ve üst tutucular ile tanımlanmıştır. Tutucular tarafından numuneye etki eden baskı kuvveti LOAD\_SEGMENT kartı kullanılarak sayısal modele uygulanmıştır. Üst tutucuya baskı kuvveti uygulanarak ve alt tutucunun da alt yüzeyi her yönde sabitlenerek sınır şartı oluşturulmuştur. Vurucu ve üst tutucu düzlem içi x ve z eksenlerinde hareket edemez iken y yönünde (darbe yönü) hareket edebilmektedir ve x,y,z eksenlerindeki dönme serbestliği engellenmiştir. Alt tutucunun ise her eksenlerdeki hareketi ve dönme serbestliği engellenmiştir.

Darbe analizleri vurucu kütesinin sabit olduğu ( $m = 5.045 \text{ kg}$ ) ve vurucu hızının değiştiği beş farklı enerji seviyesinde ( $E = 41.95, 81.07, 121.84, 163.96 \text{ ve } 204.32 \text{ J}$ ) yapılmıştır. Yapılan ön analizlerde toplam temas süresinin 12 ms' yi geçmediği görülmüş ve takip eden analiz süreleri 12 ms olarak dikkate alınmıştır.



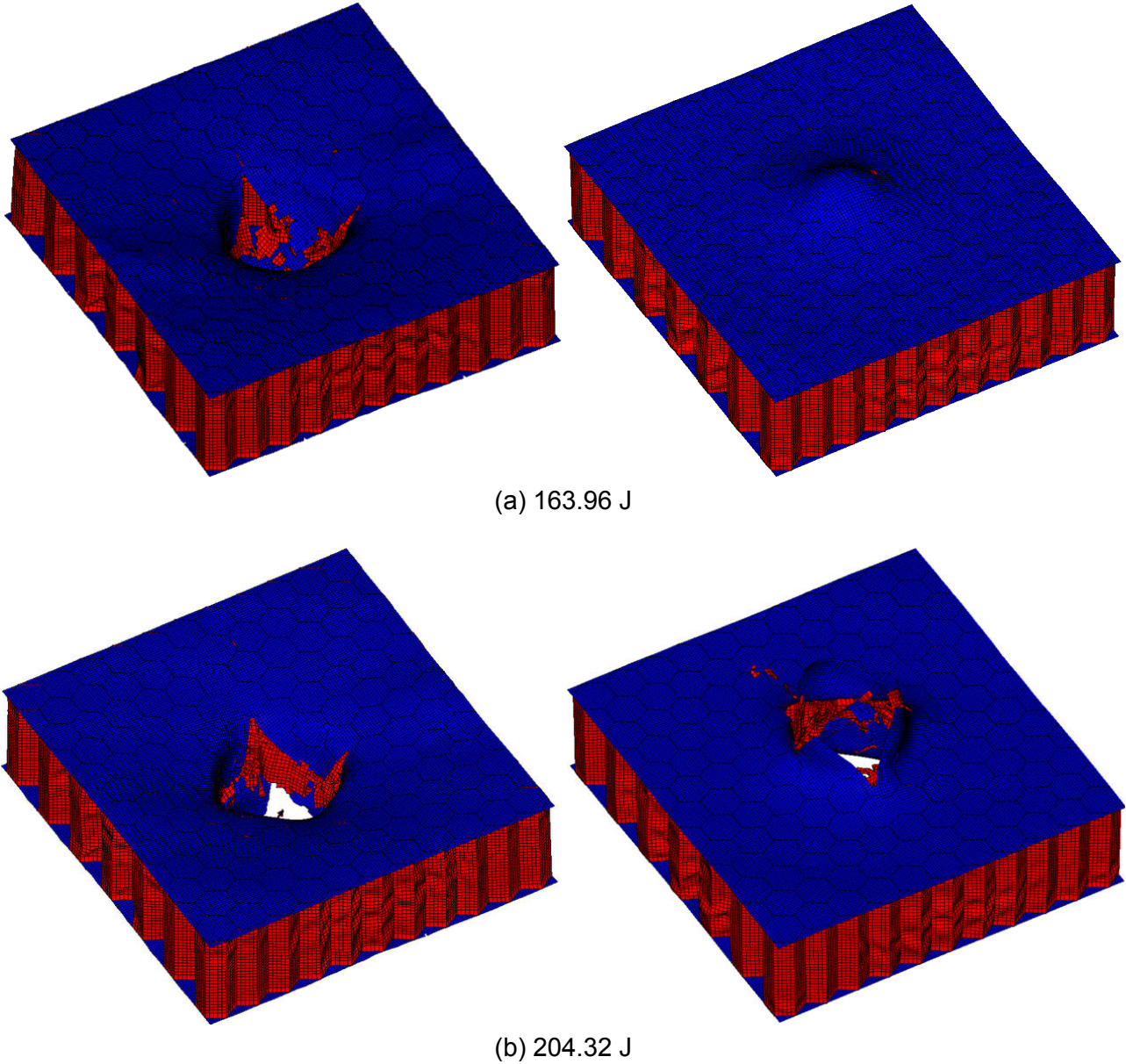
Farklı çarpma enerjilerinin sandviç yapıda oluşturduğu deformasyon geometrileri Şekil 4' de gösterilmiştir.



Şekil 4: Farklı çarpma enerjileri için sandviç yapı deformasyon geometrileri

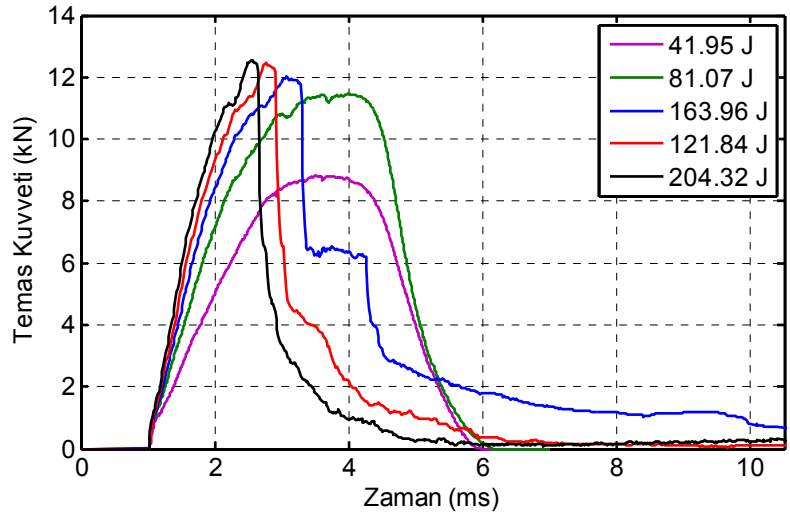
Deformasyonlar incelendiğinde 41.95 J ve 81.07 J enerji seviyelerinde sandviç yapıda belli oranlarda penetrasyon gözlenmektedir. Bu enerji seviyeleri için sandviç yapıda oluşan merkezi çökmeler sırasıyla 6.51 mm ve 9.97 mm' dir. Bu iki enerji seviyesinde vurucu sandviç yapının arka plakasına etki etmemiştir. Üst plaka ve bal peteğinde plastik deformasyon oluşmuş, bal peteğinin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerinde katlanmalar oluşmuştur. 121.84 J enerji seviyesinde sandviç yapıda kısmi perforasyon oluşmuştur. Vurucu, üst plaka ve bal peteğinde hasar oluştururken, alt

plakaya henüz ulaşmamış ve etki etmemiştir. 163.96 J enerji seviyesinde ise 121.84 J enerji seviyesinden farklı olarak vurucu alt plakaya da etki etmiş ve sandviç yapının arka yüzeyinde şişme oluşmuştur. 204.32 J enerji seviyesinde ise vurucu sandviç yapının tüm elemanlarını delip geçerek tam perforasyon oluşmuştur. Bu enerji seviyesinde sandviç yapının arka yüzeyinde şişmeyi takip eden radyal yırtılmalar oluşmuş ve perforasyon olayı gerçekleşmiştir. 163.96 J ve 204.32 J enerji seviyeleri için sandviç yapının ön ve arka yüzeyinde meydana gelen deformasyonlar Şekil 5' de gösterilmiştir. Yapılan bu beş enerji seviyesindeki analizlere göre, 121.84 J çarpma enerjisi sandviç yapı için emniyetli sayılabilecek enerji seviyesidir. Çünkü darbe etkisi sandviç yapının arka yüzeyine henüz ulaşmamış, bal peteği yapıya gelen çarpma enerjisinin tümünü absorbe etmiştir.

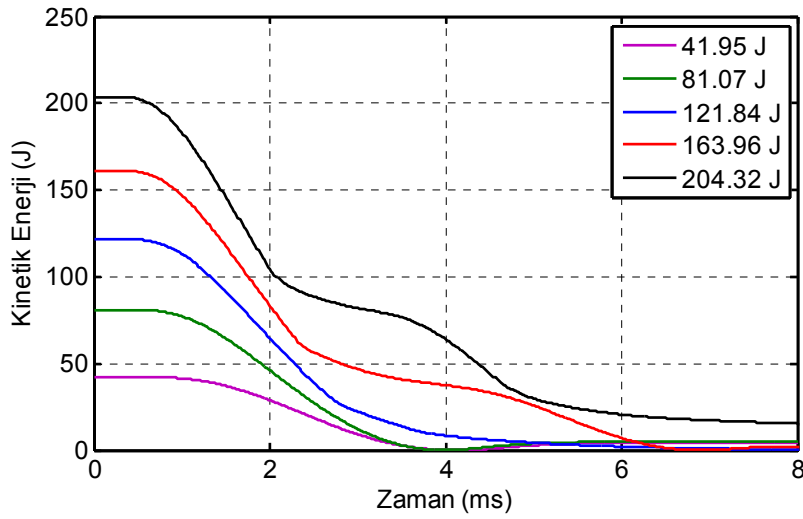


Şekil 5: 163.96 J ve 204.32 J enerji seviyeleri için sandviç yapının ön ve arka yüzünde oluşan deformasyonlar

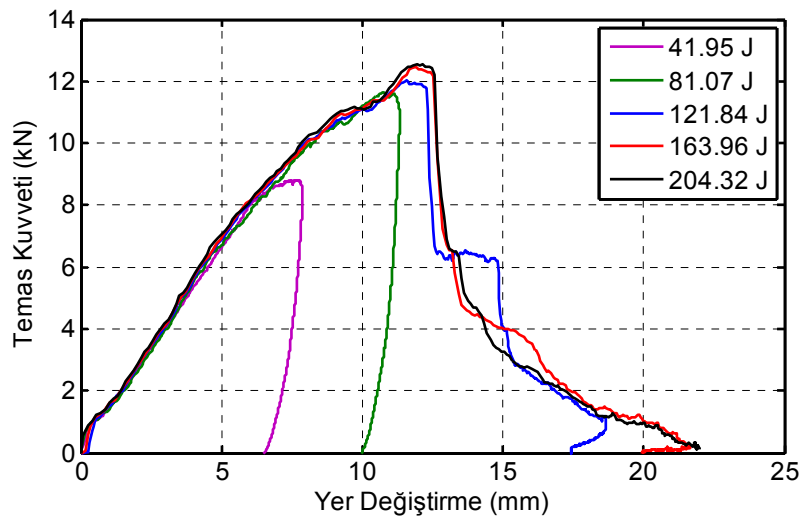
Yapılan analiz sonuçlarına göre elde edilen temas kuvveti-zaman, kinetik enerji-zaman ve temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri Şekil 6' da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6: Farklı arpma enerjilerine göre; (a) temas kuvveti-zaman, (b) kinetik enerji-zaman, (c) temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri



41.95 J, 81.07 J, 121.84 J, 163.96 J ve 204.32 J enerji seviyelerinde sandviç yapıda oluşan en büyük temas kuvvetleri sırasıyla 8.83 kN, 11.48 kN, 12.04 kN, 12.45 kN ve 12.54 kN' dur. Grafiklerden de görüleceği gibi artan çarpma enerjisi ile artan temas kuvveti yapıda oluşan hasardan sonra yaklaşık aynı kalmaktadır. 121.84 J, 163.96 J ve 204.32 J enerji seviyeleri için temas kuvveti grafikleri incelendiğinde en büyük kuvvet değeri yaklaşık aynı kalmakla beraber, hasarın arka plakaya ilerlemesi ile birlikte temas kuvvetindeki azalmalar görülmektedir. Yani hasar düzeyi arttıkça temas kuvvetindeki azalma ani olarak gerçekleşmektedir. Bu değişim yapıda hasar oluşturan en küçük ve en büyük enerji seviyelerinin (121.84 J ve 204.32 J) temas kuvveti değişimlerinden görülmektedir. 204.32 J enerji seviyesinde temas kuvvetindeki azalma ani bir şekilde gerçekleşirken, 121.84 J enerji seviyesindeki azalma kademeli olarak gerçekleşmektedir. Hasar düzeyinin büyüklüğüne göre temas süresi açısından da farklılıklar görülmektedir. Yapıdaki hasar düzeyi arttıkça temas süresi azalmaktadır.

Sandviç yapının enerji absorbe etme kapasitesi incelendiğinde, kinetik enerji grafiklerinden de görüleceği gibi çarpma enerjisinin büyük bir kısmının bal peteği tarafından absorbe edildiği görülmektedir. Yapıda oluşan hasar ile beraber kinetik enerji grafiklerinde değişimler görülmektedir. 163.96 J ve 204.32 J enerji seviyeleri için sandviç yapının darbe cevabı üç evreden oluşmaktadır. Bu enerji seviyelerinin kinetik enerji grafiklerinden de görüleceği gibi sırasıyla üst plaka, bal peteği ve alt plakanın hasarı bu üç evreyi temsil etmektedir. 204.32 J enerji seviyesinde sandviç yapıda tam perforasyon gerçekleştiği için enerjinin hepsi absorbe edilememiş ve vurucu üzerinde yaklaşık 14 J' lük bir artık enerji kalmıştır. 121.84 J enerji seviyesinde, sandviç yapı çarpma enerjisinin tümünü absorbe ettiği ve vurucu alt plakaya etki edemediği için bu evreler açık bir şekilde görülememektedir.

Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan, yapının absorbe ettiği enerjiyi göstermektedir. Kuvvet-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde, artan çarpma enerjisi ile yapının absorbe ettiği enerjinin arttığı görülmektedir. Bal peteğinin tamamen delinmesinden sonra absorbe edilen enerji görüldüğü gibi yaklaşık aynı kalmaktadır. Bu da bal peteğinin, yapının enerji absorbe etme kapasitesine olan etkisini açıkça göstermektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, alüminyum plakalar ile takviyelendirilmiş alüminyum bal peteği sandviç yapıların darbe etkisi altındaki davranışları, darbe enerjisi değişiminin sandviç yapının darbe cevabına etkisi, penetrasyon ve perforasyon durumları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu elde edilen sonuçlar:

- Enerji seviyesi arttıkça temas kuvveti artmaktadır ve yapıda oluşan hasardan sonra en büyük temas kuvveti değeri yaklaşık aynı kalmaktadır. Yapıdaki hasar düzeyi arttıkça temas süresi azalmaktadır.
- Sandviç yapıya gelen çarpma enerjisinin büyük bir kısmının bal peteği tarafından karşılandığı görülmüştür. Bal peteği hücrelerinin darbe etkisiyle katlanması ve kapanması enerjinin absorbe edilmesinde etkili olmuştur.
- 121.84 J enerji seviyesinde, vurucunun yapının alt plakasına etki etmemesi ve bal peteğinin, çarpma enerjisinin tamamını vurucunun alt plakaya yaklaştığı sıralarda absorbe etmesi, bu ve daha düşük enerji seviyelerinin sandviç yapı için emniyetli olduğu görülmüştür.
- Sandviç yapıda oluşan perforasyonun plakalarda oluşan şişmeyi takip eden radyal yırtılmalar sonucu oluştuğu tespit edilmiştir.

- Sandviç yapının hasarlı sonuçlanan darbe cevabının sırasıyla üst plaka, bal peteği ve alt plaka hasarı olarak üç evreden oluştuğu görülmüştür.
- Bal peteğinin tamamen hasara uğramasından sonra yapının absorbe ettiği enerjinin yaklaşık aynı kalması, bal peteği çekirdeğin yapının enerji absorbe etme kapasitesine etkisini açıkça göstermektedir.
- Oluşturulan bu yapının hafiflik, yüksek dayanım ve rijitlik gibi özelliklere sahip olması ve yapılan analizler sonucu 121.84 J enerji seviyelerine kadar yapıya gelen darbeleri emniyetli bir şekilde karşılaması, bu yapının havacılık ve uzay sanayinde kullanılmasında başarılı sonuçlar vereceğini göstermektedir.

## TEŞEKKÜR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu' na (TÜBİTAK) 112M917 nolu araştırma projesi desteği ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne FYL-2013-4729 nolu proje desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

Aktay, L., Johnson, A.F., Kröplin, B.H., Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2616-2630, 2008.

ANSYS LS-DYNA®, The general purpose finite element software, Houston, Texas: Swanson Analysis Systems, Inc.

Castanié, B., Bouvet, C., Aminanda, Y., Barrau, J.J., Thevenet, P., Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins, *International Journal of Impact Engineering*, 35, 620-634, 2008.

Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Collapse modes in aluminum honeycomb sandwich panels under bending and impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 43, 6-15, 2012.

Foo, C.C., Seah, L.K., Chai, G.B., Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels, *Composite Structures*, 85, 20-28, 2008.

Foo, C.C., Chai, G.B., Seah, L.K., A model to predict low-velocity impact response and damage in sandwich composites, *Composite Science and Technology*, 68, 1348-1356, 2008.

Hou, B., Zhao, H., Pattofatto, S., Liu, J.G., Li, Y.L., Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 2754-2762, 2012.

Kılıçaslan, C., Odacı, İ.K., Düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda hasar oluşumu ve sonlu elemanlar simülasyonları, *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 53, 40-48, 2012.

Manes, A., Gilioli, A., Sbarufatti, C., Giglio M., Experimental and numerical investigations of low velocity impact on sandwich panels, *Composite Structures*, 99, 8-18, 2013.

Tryland, T., Alternative model of the offset deformable barrier, *LS-DYNA Anwederforum*, 2005.