Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 29(2), 120-130, 2023

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Üç boyutlu ve iki boyutlu eleman tiplerinin punta kaynaklı bileşenlerin gerilme ve ömür analizleri üzerindeki etkisi

Effect of 3 dimensional and 2 dimensional element types on stress and life analysis of spot-welded components

Ertuğrul Tolga DURAN[1*]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Orta Doğu Amerikan Üniversitesi, Dasman, Kuveyt.
ertugrult.duran@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 23.01.2022 Düzeltme Tarihi/Revision: 13.05.2022 doi: 10.5505/pajes.2022.35853
Kabul Tarihi/Accepted: 01.06.2022 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Sonlu eleman analizleri ve bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri günümüz araştırma-geliştirme projelerinde anahtar role sahiptir. Model tipine göre eleman seçimi simülasyon doğruluğu için azami önem arz etmekte iken, bazı durumlarda geometrik koşullar araştırmacılar için bu seçimi zorlaştırabilmektedir. Bu makalenin amacı punta kaynaklı bileşenler için üç boyutlu kübik ve iki boyutlu dörtgen elemanlar kullanılması durumunda oluşan farklılıklar hakkında bilgi sunmaktır. Çalışma kapsamında iki puntalı kayma numuneleri farklı eleman tipleri ile modellenerek gerilme analizleri ve üç farklı dinamik yük koşulunda yüksek döngü yorulma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde deplasman, gerilme değerleri ve tensörleri, yüksek döngü bileşen ömürleri incelenmiş ve iki farklı eleman tipi ile oluşturulan modeller arasındaki ayrımlar raporlanmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen ömür değerleri, yüksek döngü yorulma test verileri ile karşılaştırılarak farklı tip elemanlar için doğruluk derecelendirme çalışmaları tamamlanmıştır. Makale kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde kaynak bölgesinde rijit elemanlar ile eşleştirilen iki boyutlu dörtgen eleman modelleme yönteminin, üç boyutlu kübik eleman ile modellemeye nazaran yorulma testleri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Havacılık, otomotiv ve deniz sektöründe fazlaca uygulanan punta kaynak yönteminin yüksek döngü yorulma testleri ile doğrulanmış sonlu eleman analizlerinin modelleme prosedürü de çalışmada detaylandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Punta kaynak, Sonlu elemanlar analiz, Gerilme analizi, Yüksek döngü yorulma.

Abstract

Finite element analysis and computer-aided engineering methods have an essential role in modern research and development projects. Although proper element selection for the modeling type is critical for the accuracy of simulations, the selection process might be difficult for researchers in some cases where geometric conditions are challenging. The main objective of this paper is to present the differences in simulation results when three-dimensional cubic and two-dimensional quadrilateral elements are used for the modeling of spot-welded components. Following the modeling of shear specimens having two spot welds with different element types, static analysis, and high cycle fatigue simulations at three different dynamic load cases have been run within the context of this study. Displacement, stress values and tensors, as well as high cycle fatigue life have been evaluated as the output of analysis, and deviations due to different element types have been reported. Accuracy levels of different element types have been determined by comparing the life obtained by simulations with high cycle fatigue tests. The studies conducted within the content of this paper indicate that the rigid spot weld modeling with two dimensional quadrilateral elements give better consistency with the fatigue tests in comparison with the modeling with three dimensional cubical elements. The modeling procedures of correlated high cycle fatigue simulations have been detailed for spot welding, which is one of the most applied methods in aviation, automotive and marine industry.

Keywords: Spot weld, Finite element analysis, Stress analysis, High cycle fatigue.

1 Giriş

Sonlu eleman analizlerinde uygun eleman tipi seçimi araştırmacılar ve mühendisler için doğru simülasyonun ilk gereksinimidir. Modellemede sıkça kullanılan iki boyutlu dörtgen ve üç boyutlu kübik elemanlar, farklı formülasyonlara sahip olmaları sebebi ile aynı geometri kullanılsa dahi farklı deplasman, gerilme ve ömür sonuçları verebilmektedir. Bu anlamda eleman tipi seçimi ve simülasyon sonuçları üzerinde etkisi farklı disiplinler için daima ilgi konusu olmuş ve bu alanda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Romeed, Fok ve Wilson [1] karmaşık dental uygulamalar için iki ve üç boyutlu elemanlar kullanarak sonlu eleman analizler gerçekleştirmiş ve biyomekanik yapıların davranışlarını incelemiştir. Çalışmalarında [1] iki boyutlu elemanların dental uygulamaların mekanik karakterizasyonu için uygunluğu raporlanırken, üç boyutlu eleman tipleri ile hibrit modelleme gereksinimi olabilecek alanlar detaylandırılmıştır. Tıp alanında yapılan bir başka çalışmada Desai ve diğerleri [2] robotik cerrahi uygulamalarında yumuşak doku kesim işlemi simülasyonlarını üç boyutlu, ikinci mertebeden iki boyutlu ve doğrusal iki boyutlu elemanlar ile modelleyerek gerçekleştirmişler, farklı eleman tipleri ile yapılan analizlerin birbirine yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Koktan, Cajka ve Brozovsky [3] inşaat mühendisliği alanında gerçekleştirdikleri çalışmada yapı-toprak ilişkisini sonlu elemanlar analizleri ile incelemiş, iki boyutlu elemanlar kullanarak yapılan yaklaşımların üç boyutlu yarım-uzay modelleri ile tutarlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ata [4] gerçekleştirdiği araştırmada havacılık uygulamalarında kullanılan bükümlü karbon fiber takviyeli plastik laminantlar için iki boyutlu ve üç boyutlu simülasyonlar gerçekleştirmiştir. İki modellemenin de kritik bölge temini için benzer sonuçlar verdiği raporlanmış, kalınlık boyunca değişen etkilerin önem

*Yazışılan yazar/Corresponding author

haiz etmesi sebebiyle çalışmada bahsi geçen kompozit yapılarda dinamik delaminasyon belirlenmesinde üç boyutlu modelleme önerilmiştir. Duboust ve diğerleri [5] yayımladıkları makalede havacılık endüstrisinde kullanılan karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin kenar kırpma prosesi için geliştirdikleri sonlu eleman metodolojisini detaylandırmış, farklı eleman tiplerinin analiz sonuçları ve performans değerlendirmeleri üstündeki etkilerini raporlamışlardır. Salem ve diğerleri [6] yaptıkları çalışmada dikiş kaynak prosesinin sonlu elemanlar ile simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Ancak [6] bu çalışmada sadece üç boyutlu eleman tipi kullanılmıştır ve herhangi bir eleman tipi karşılaştırması sunulmamıştır.

Punta kaynaklı bileşenlerin analizlerinde eleman tiplerinin etkilerinin incelemesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Nielsen ve diğerleri [7] tek taraflı plaka-tüp punta kaynak işlemini simülasyonlar ile incelemiş, ancak modellemede sadece üç boyutlu elemanlar kullanmışlardır. Dincer ve diğerleri tarafından [8] farklı punta kaynak modelleme metodlarının gerilme ve ömür üstündeki etkileri incelenmiştir. Ancak çalışmalarında [8] sadece iki boyutlu elemanlar kullanılmış, plaka eleman tiplerinin sonuçlar üstündeki etkisi incelenmemiştir. Wagare ve diğerleri [9] punta kaynaklı bileşenler için yorulma analizleri gerçekleştirmiş ancak tek tip modelleme ve eleman ile çalışmışlardır. Kang [10], Radaj [11] ve Rupp [12] punta kaynak ömür analizleri için değerli çalışmalar literature sunmuşlardır. Ancak bu yayınların tamamında sadece iki boyutlu elemanlar ve tek tip kaynak modelleme tekniği kullanılmıştır. Punta kaynaklı bileşenler için Deng ve Chen [13] iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar ile modeller oluşturarak gerilme değerlerini incelemişler ve üç boyutlu elemanların daha yüksek gerilme sonuçları verdiği, iki boyutlu eleman tipinin doğruluğunun daha yüksek olduğunu raporlamışlardır. Deng ve Chen'in [13] karşılaştırmalı analizleri sadece statik simülasyonları kapsamaktadır, herhangi bir yorulma ve ömür mukayesesi yapılmamıştır. Palmonella ve diğerleri [14] punta kaynak modelleme için sonlu eleman analizler gerçekleştirmek ile birlikte çalışmaları kaynak çekirdek tiplerine ve yöntemlerin yapının doğal frekansları üstündeki etkisine yoğunlaşmışlardır. Nielsen ve diğerleri [15] punta kaynaklı yapıların elektro-termo-mekanik davranışları için yapısal analizler gerçekleştirmişler, modellerinde sadece üç boyutlu eleman tipini kullanmışlardır. Patil [16] ise yine tek tip eleman kullanarak punta kaynaklı araç yapılarının çarpışma simülasyonları ile ilgili çalışma detaylarını sunmuş, farklı eleman tiplerinin analiz sonuçları üstündeki etkisi ile ilgili herhangi bir karşılaştırma vermemiştir. Shafiq [17] punta kaynaklı araç bileşenlerinin çarpışma modelleme tekniklerini farklı punta kaynak çekirdek yöntemlerini kullanarak karşılaştırmıştır. Husain ve diğerleri [18] lazer punta kaynak yöntemi ile birleştirilen bileşenler için sonlu eleman modelleme yöntemini çalışmalarında detaylandırmıştır. Makalelerinde Husain ve diğerleri [18] tek tip model üstünde çalışmalarını sunmuşlardır. Dang [19] ise punta kaynak-lehimli hybrid yapıların modellenmesi için çalışmalar yapmış, ancak farklı eleman tiplerinin etkisini incelememiştir. Khan ve diğerleri [20] yayınlarında Ls-Dyna ticari yazılımında üç levhalı punta kaynaklı yapıların analizlerini gerçekleştirerek testler ile karşılaştırma sunmuşlardır. Hıdıroglu ve diğerleri [21] farklı punta kaynak yöntemlerinin yeni nesil otomotiv çeliklerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş, ancak çalışmalarında analiz tabanlı yorulma araştırması gerçekleştirmemişlerdir.

Literatür taramasından da anlaşıldığı üzere araştırmalar genellikle punta kaynak modelleme yöntemlerine odaklanmış olup, sonlu eleman analizlerinde eleman tipi seçiminin deplasman, gerilme değerleri ve yorulma ömürleri üstündeki etkisi ile ilgili çalışmalar yok denecek kadar azdır ve detay simülasyon ihtiyacı gözlemlenmektedir. Bu kapsamda üç boyutlu kübik ve iki boyutlu dörtgen elemanlar kullanılarak çift puntalı kayma numune sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Birim yük altında gerçekleştirilen statik analizler neticesinde deplasman ve gerilme değerleri incelenmiş, iki modelleme tipinin birbirinden ayrıştığı hususlar detaylandırılmıştır. Ayrıca üç farklı dinamik yük altında yüksek döngü yorulma analizleri gerçekleştirilerek karşılaştırmalı ömür hesaplamaları tamamlanmıştır. Yorulma analiz sonuçlarının test verileri ile doğrulanması detaylandırılmış, farklı eleman tiplerinin simülasyon doğruluğu üstündeki etkisi yine bu çalışmada sunulmuştur.

2 Geometri ve sonlu eleman modelleme detayları

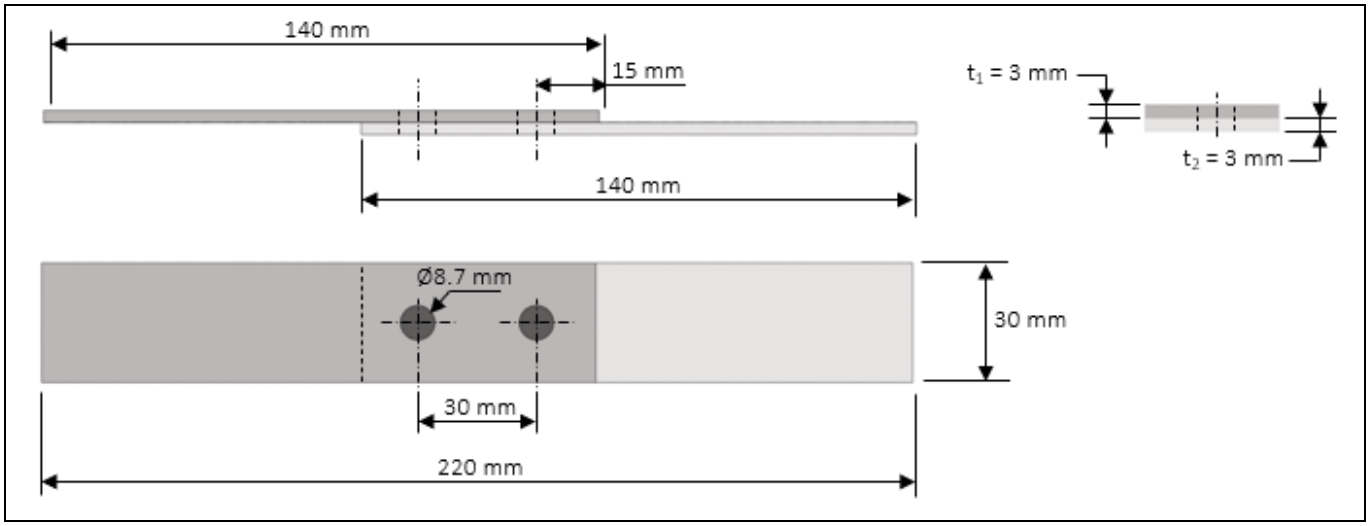
Dayanım ve yorulma analizleri için kullanılan çift puntalı kayma numunelerinin geometrik detayları ve boyutları Şekil 1'de verilmiştir. 3 mm kalınlığında ve 140 mm uzunluğundaki östenit çelik levhalar, birbirleri üstüne 60 mm örtüşecek şekilde çift punta ile kaynaklanmıştır. Kaynak merkezleri arasındaki mesafe 30 mm, kaynak merkezlerinin levha kenarlarına mesafesi ise şekilde de belirtildiği üzere 15 mm'dir. Kaynaklanmış numunenin toplam uzunluğu 220 mm, genişliği ise 30 mm olarak boyutlandırılmıştır. Sac levhaların malzeme özellikleri Tablo 1'de, yorulma eğrisi ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Numune temel boyutları ve malzeme özellikleri.

Table 1. Material properties and basic dimensions for the specimen.

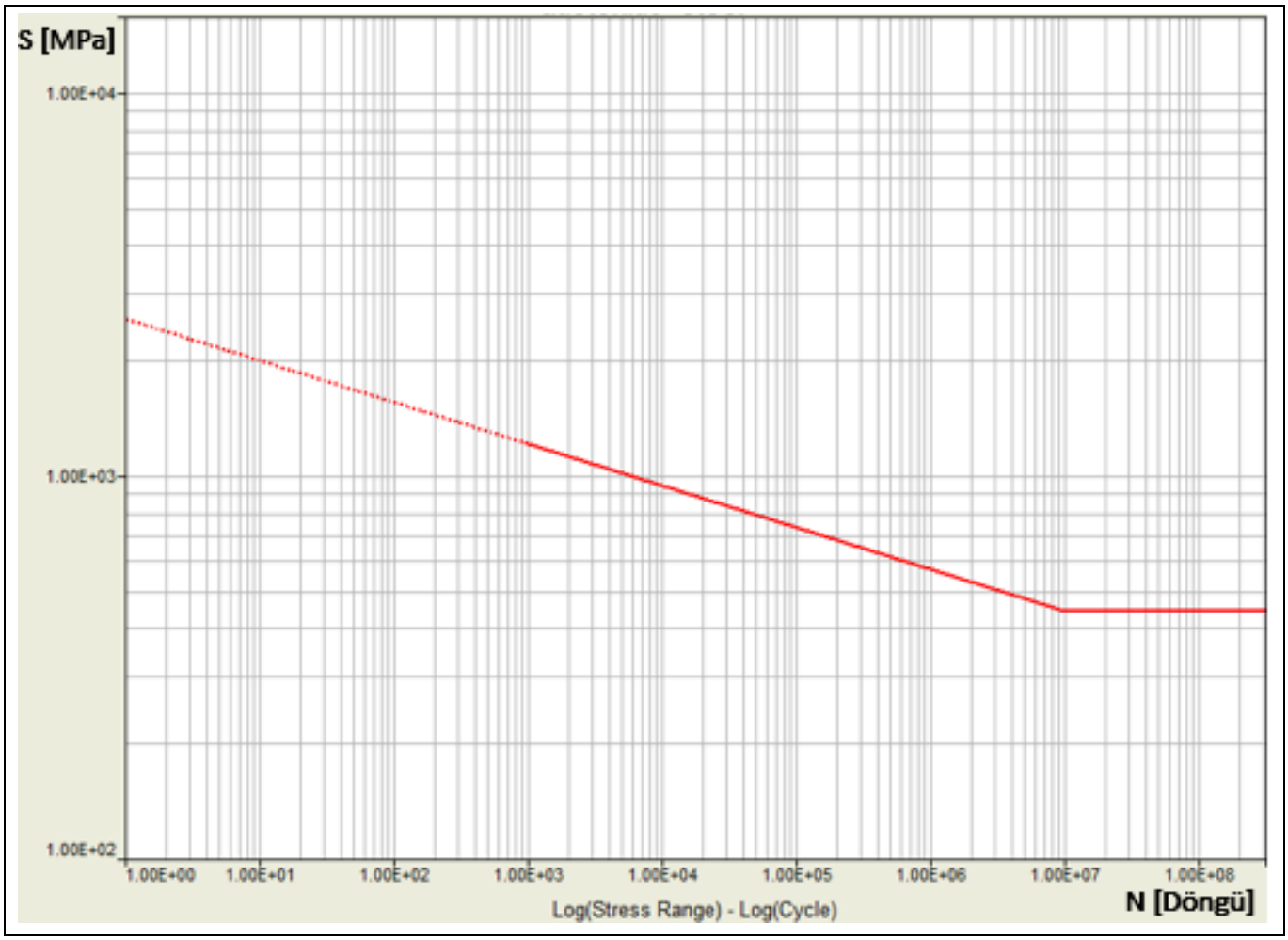
Özellik	Açıklama / Değer
Montaj tipi	Çift puntalı kayma numunesi
Sac levha adedi	2 adet
Sac levha kalınlığı	3 mm
Tek levha uzunluğu	140 mm
Toplam montaj uzunluğu	220 mm
Punta kaynak adedi	2 adet
Punta kaynak çapı	8.7 mm
Puntalar arası mesafe	30 mm
Malzeme	Östenit çeliği
Akma dayanımı	400 MPa
Çekme dayanımı	608 MPa
Yorulma dayanımı	434 MPa
Elastisite modülü	193000 MPa
Poisson oranı	0.3

Simülasyonlar için sonlu elemanlar analiz model detayları 3 boyutlu (3B) kübik elemanlar için Şekil 3'de, 2 boyutlu (2B) dörtgen elemanlar için ise Şekil 4'te verilmiştir. Modelleme ve analiz çalışmalarının tamamı Hyperworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu modellemede her bir levhanın kalınlığı boyunca 6 adet kübik eleman kullanılarak olası "kum saati deformasyon (hourglassing)" modunun önüne geçilmiştir. Kaynak çekirdeği ve etrafında eleman boyutları küçültülerek çözüm hassasiyetinin arttırılması sağlanmıştır. İki levhanın temas yüzeylerinde 8.7 mm'lik punta kaynak çaplarında bulunan çözüm noktaları birbirleri ile eşleştirilerek kaynak modellemesi gerçekleştirilmiştir.



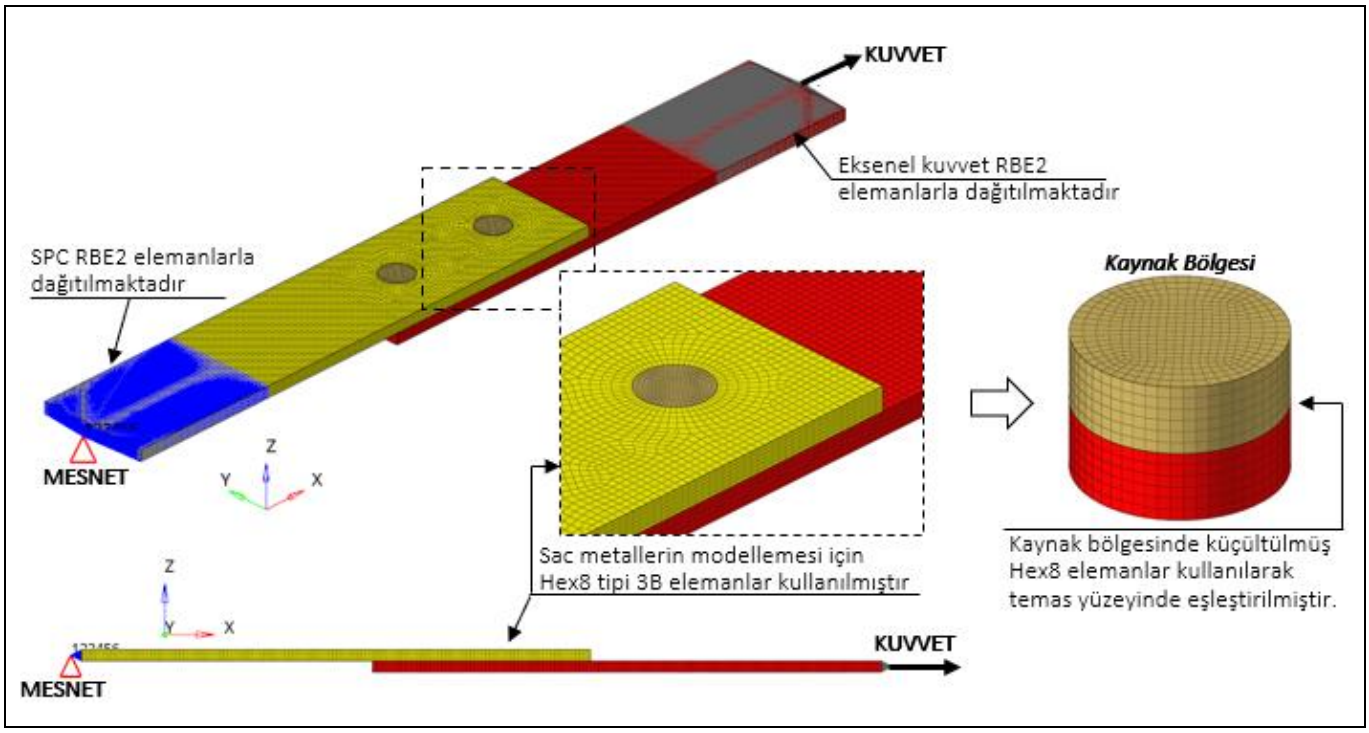
Şekil 1. Numune geometri detayları ve boyutlar.

Figure 1. Dimensions and geometric details for the specimen.



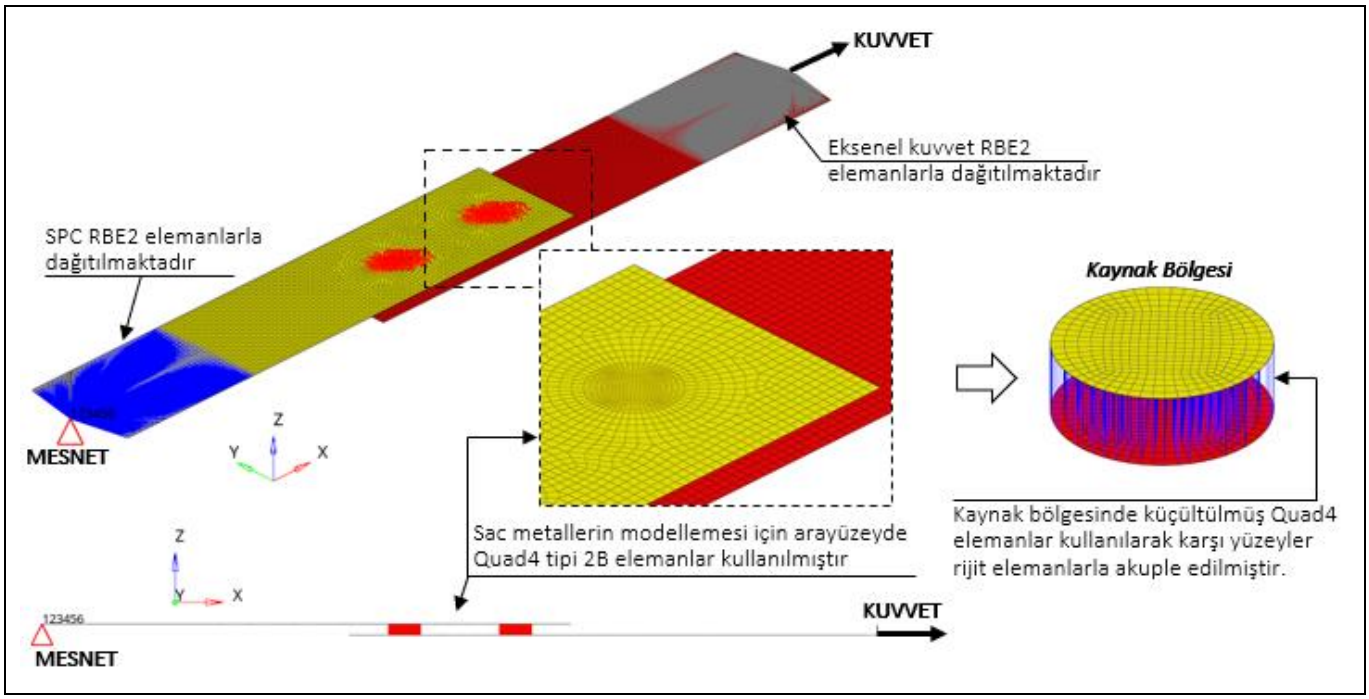
Şekil 2. Malzeme S-N (Gerilme-Döngü) eğrisi.

Figure 2. S-N (Stress-Cycle) curve for the material.



Şekil 3. 3-boyutlu doğrusal-kübik elemanlarla oluşturulan model detayları.

Figure 3. Details for the model constructed with 3-dimensional linear cubical elements.



Şekil 4. 2-boyutlu doğrusal-dörtgen elemanlarla oluşturulan model detayları.

Figure 4. Details for the model constructed with 2-dimensional linear quarilateral elements.

2 boyutlu modellemede ise herbir levhanın orta düzleminde dörtgen elemanlar kullanılarak modelleme yapılmıştır. İki levha eleman düzlemleri arasındaki mesafe bu modelde 3 mm'dir. Kaynak modellemesi için levhaların punta bölgesinde bulunan çözüm noktaları rijit tip elemanlar ile eşleştirilmiştir. Her iki model de bir uçtan mesnetlenmiş, diğer uçtan ise eksenel kuvvete maruz bırakılmıştır. Mesnet ve kuvvetlerin çözüm noktaları üstündeki dağıtımları için RBE2 tipi elemanlar kullanılmıştır. Testlerde kullanılan hidrolik çenelerin levhaya göre çok rijit olduğu düşünüldüğünde, kuvvet ve mesnet dağıtımı için rijit elemanların kullanılması en doğru yaklaşımdır.

Analiz modeli detayları her iki eleman tipi için Tablo 2'de verilmiştir. 3 boyutlu kübik elemanlar kullanıldığında toplam eleman sayısı 58898, çözüm noktası adedi ise 70242 olarak gözlemlenmiştir. 2 boyutlu dörtgen eleman ile oluşturulan modelde eleman sayısı 10670'e, çözüm noktası sayısı 10158'de düşmüştür. Tablo 2'de detaylandırıldığı üzere her iki model de eleman kalite kontrol kriterlerini sağlamaktadır ve analizler için uygundur.

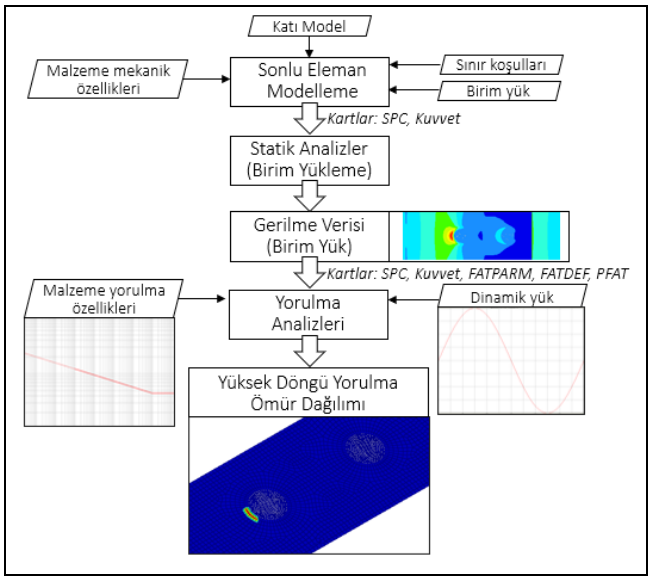
Tablo 2. Sonlu elemanlar model detayları.

Table 2. Finite element model details.

	3 boyutlu model	2 boyutlu model
Eleman tipi	Kübik (Hex)	Dörtgen (Quad)
Eleman mertebesi	Lineer (8 nodlu)	Lineer (4 nodlu)
Eleman sayısı	58898	10670
Çözüm noktası	70242	10158
Jacobi < 0.50	0.59 (asgari)	0.59 (asgari)
Çarpıklık > 5	1.85 (azami)	0.00 (azami)
En-boy oran > 5	3.10 (azami)	2.15 (azami)
Eğrilik > 60°	27.03 (azami)	27.03 (azami)

3 Karşılaştırmalı dayanım ve yorulma analizleri

Dayanım ve yüksek döngü yorulma analizleri yol haritası Şekil 5'te detaylandırılmıştır. Yorulma simülasyonları için ilk adım, birim yükleme (1N) altında gerilme analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Katı model, malzeme mekanik özellikleri ve sınır koşullarının belirlenmesinin ardından birim yük altında tamamlanan analizlerinin gerilme dağılımları yorulma analizleri için girdi teşkil etmektedir. Birim yük altında gerilme verisi tanımlanan yorulma modeline malzeme yorulma özellikleri ve dinamik yükleme koşulları (peryodu 352 sn.) sağlanarak gerçekleştirilen simülasyonlar ile ömür dağılımları elde edilmektedir. Yorulma analizlerinde ortalama gerilme etkileşimi için Goodman yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 5. Sonlu eleman tabanlı yüksek döngü yorulma analizleri yol haritası.

Figure 5. Roadmap for the finite element based high cycle fatigue analyses.

İki farklı modelleme yöntemi için karşılaştırmalı model ve analiz yükü detayları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Yorulma simülasyonları için model ve analiz yükü karşılaştırması.

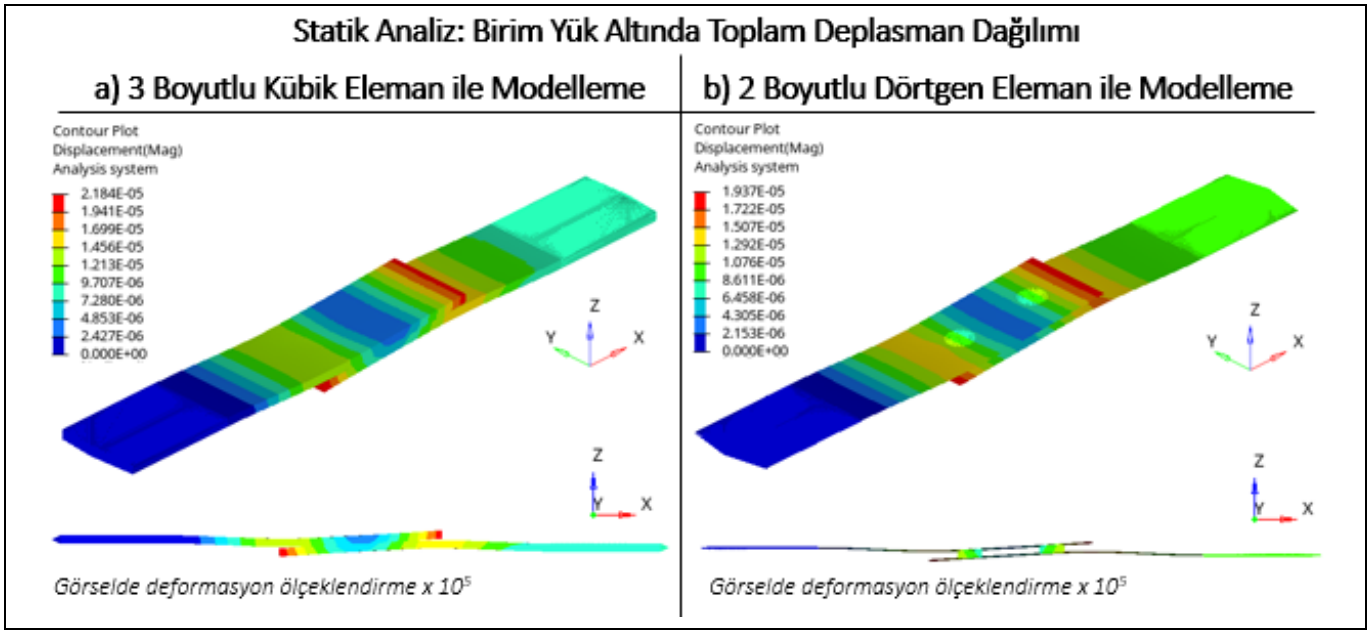
Table 3. Comparison of the model and analysis load for fatigue simulations.

	3 boyutlu model	2 boyutlu model
Model boyutu	9352 kB	1140 kB
Çözüm dosyası	2687 kB	396 kB
Çözüm süresi	34 saniye	5 saniye
Hafıza gereksinimi	2352 MB	800 MB

Tabloda verilen hafıza gereksinimi ve çözüm süreleri yüksek döngü yorulma simülasyonları için sağlanmıştır. Mevcut test numunelerinin boyutları ve bağıl olarak basit geometrileri sebebiyle her iki model için de hızlı çözüm elde etmek mümkündür. Ancak tabloda bilgilerin karşılaştırmalı olarak sunulmasındaki temel hedef 3 boyutlu kübik elemanlar ile modellemenin bağıl olarak getirdiği analiz yükünü ortaya koymaktır. 3 boyutlu kübik elemanlar kullanıldığında model dosyası boyutu yaklaşık 9 kat, çözüm dosyası boyutu ise 8 kat mertebesinde artmaktadır. Çözüm süresi gereksinimi kübik elemanlı model için dörtgen elemanlı modele göre yaklaşık 7 kat daha uzundur. Hafıza gereksinimlerine bakıldığında gene kübik elemanların çözüm için 3 kattan daha fazla hafızaya ihtiyaç duymaktadır. Araç gövdesi gibi bükümlü ve daha karmaşık profillerin söz konusu olduğu endüstriyel uygulamalarda kübik ve dörtgen elemanlı model ve analiz yükleri arasındaki farkın daha da artacağı düşünüldüğünde, 2 boyutlu dörtgen eleman ile modelleme yönteminin bu anlamda çok daha avantajlı olduğunu belirtmek mümkündür.

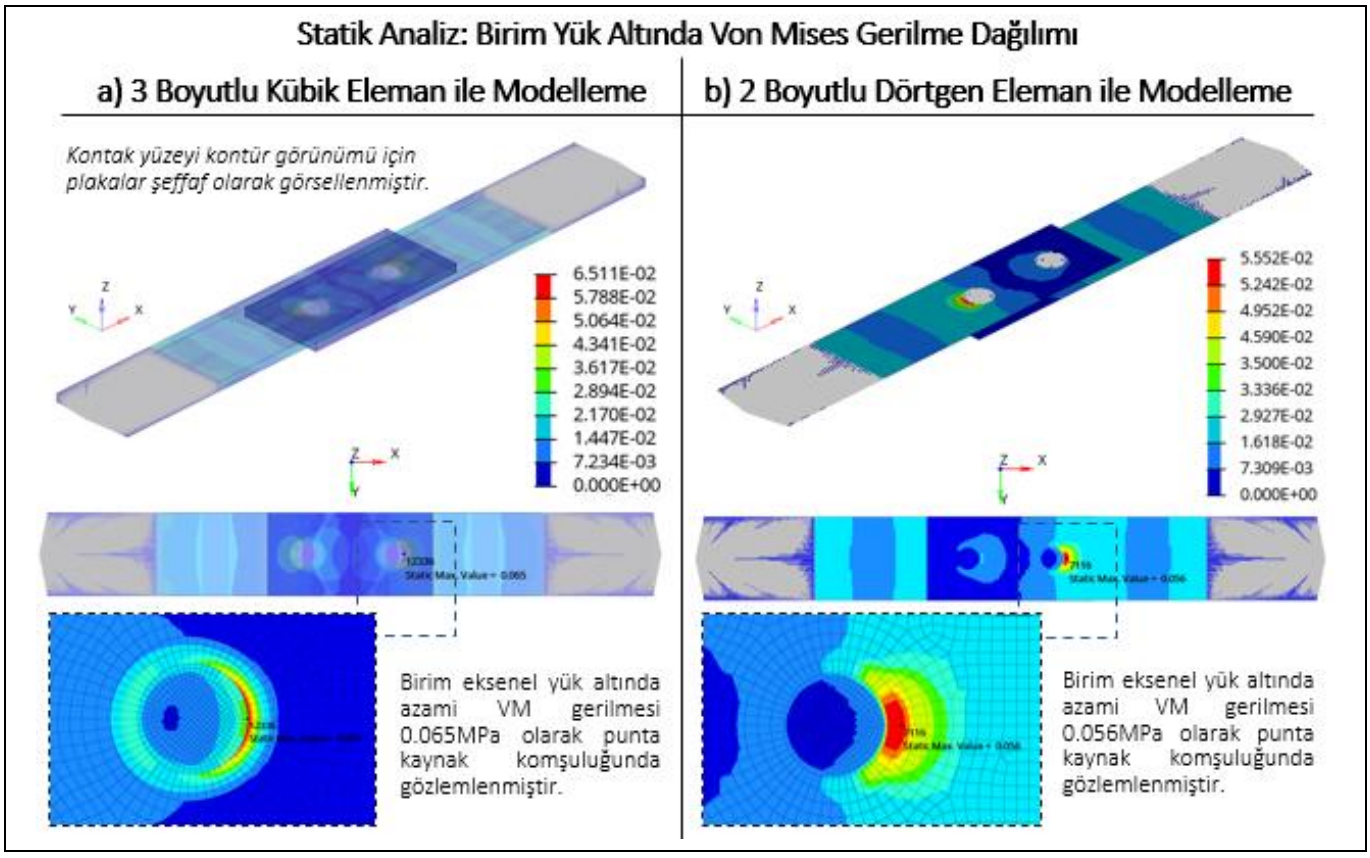
Birim yük gerilme analizleri hem 3 boyutlu model, hem de 2 boyutlu model için tamamlanarak deformasyon ve gerilme karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 6'da her iki model için de deplasman dağılımı verilmiştir. Deformasyon profilleri her iki modelleme yöntemi için benzer karakterdedir. Kuvvet uygulama noktasında eksenel uzama baskın olarak gözlemlenmekte iken, levhaların üst üste geldiği kaynak bölgesinde ise puntaların orta noktası merkez olacak şekilde eğilmede gözlemlenmektedir. Analiz sonuçlarından elde edilen deformasyon şekli bu tip yükleme durumları için tipiktir ve kaynak bölgesinde kayma gerilmesi yanında bir miktar çekme gerilmesinin de indirgenmesine sebebiyet vermektedir. 3 boyutlu kübik eleman kullanılan modelde toplam deplasman 21 µm, 2 boyutlu dörtgen elemanlı modeldeyse 19 µm olarak gözlemlenmiştir. Bu bağlamda 2 boyutlu ve RBAR kaynaklı modelleme yönteminin, 3 boyutlu kübik elemanların kullanıldığı metoda kıyasla daha rijit davrandığı anlaşılmaktadır.

Birim yük gerilme analizleri için VM (Von Mises) gerilme karşılaştırması Şekil 7'de sunulmuştur. Kübik elemanlı modelde kritik temas yüzeyi görüntüleme imkanı sağlayabilmek adına plakalar şeffaf olacak şekilde görsellenmiştir. Genel gerilme dağılımları incelendiğinde, her iki modelleme yönteminin de benzer karakterde olduğu farkedilmektedir. Azami gerilme her iki model için de punta kaynak etrafında yoğunlaşmıştır. Büyük punta kaynak çaplarında kaynak etrafı gerilme yığılması beklendik bir durumdur ve punta çekilme sonucu plaka hasarı tipiktir. VM gerilme değerleri incelendiğinde, kübik elemanlı modelin 0.065 MPa ile dörtgen elemanlı modelden (0.056 MPa) daha yüksek eşdeğer gerilme verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Statik analizler-birim yük altında deplasman karşılaştırması. (a): 3B kübik eleman ile modelleme. (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

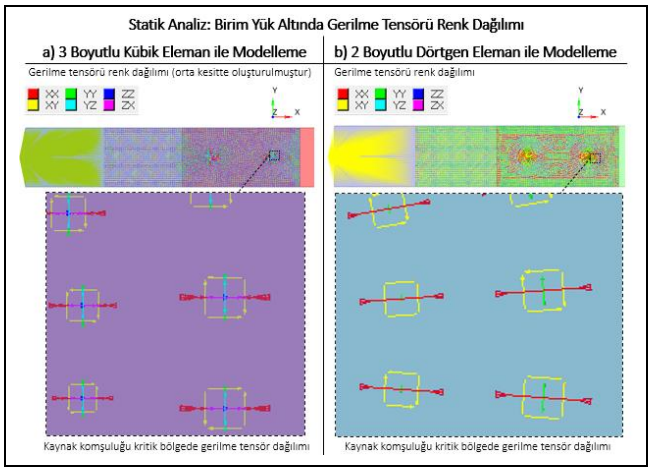
Figure 6. Static analyses-displacement comparison under unit load. (a): Modeling with 3D cubical elements. (b): Modeling with 2D quadrilateral elements.



Şekil 7. Statik analizler-birim yük altında VM gerilme karşılaştırması. (a): 3B kübik eleman ile modelleme. (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

Figure 7. Static analyses - Displacement comparison under unit load. (a): Modeling with 3D cubical elements. (b): Modeling with 2D quadrilateral elements.

Kritik kaynak etrafında karşılaştırmalı gerilme tensörü dağılımı Şekil 8'de detaylandırılmıştır. Kaynak komşuluğu kritik bölgede gerilme tensör dağılımı incelendiğinde XY kayma gerilmelerinin iki modelleme yöntemi için de aynı karakterde ve birbirine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. 3 boyutlu kübik elemanlar kullanılan modelde XX ve YY normal gerilmelerinin daha yüksek değerde olduğu tensor dağılımından anlaşılmaktadır. ZZ normal gerilmesi ile YZ ve ZX kayma gerilmeleri 3 boyutlu kübik elemanlı modelde düşük seviyede de olsa gözlemlenirken, 2 boyutlu dörtgen elemanlı modelde formülasyon gereği bu yönlerde değerler sıfırdır. Birim yük altında gerçekleştirilen simülasyonlar için karşılaştırmalı azami gerilme değerleri her bir tensör bileşeni için ayrıca Tablo 4'te detaylandırılmıştır. Tabloda sunulan değerler analizlerde gözlemlenen azami büyüklükler olup, 3 boyutlu kübik elemanların, 2 boyutlu dörtgen elemanlara kıyasla kaynak etrafında daha yüksek maksimum gerilme sonuçları verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Statik analizler-irim yük altında gerilme tensörü karşılaştırması. (a): 3B kübik eleman ile modelleme. (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

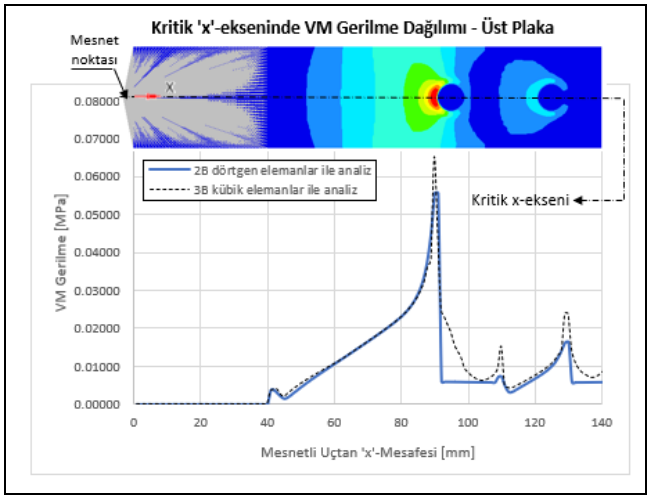
Figure 8. Static analyses-stress tensor comparison under unit load. (a): Modeling with 3D cubical elements. (b): Modeling with 2D quadrilateral elements.

Tablo 4. Birim yük altında gerilme analizleri-tensörel ve VM gerilme değerleri (model üstünde kritik bölgede okunan azami değerler).

Table 4. Stress analyses under unit load – Tensor and VM stress values (maximum values read from the critical region on the model).

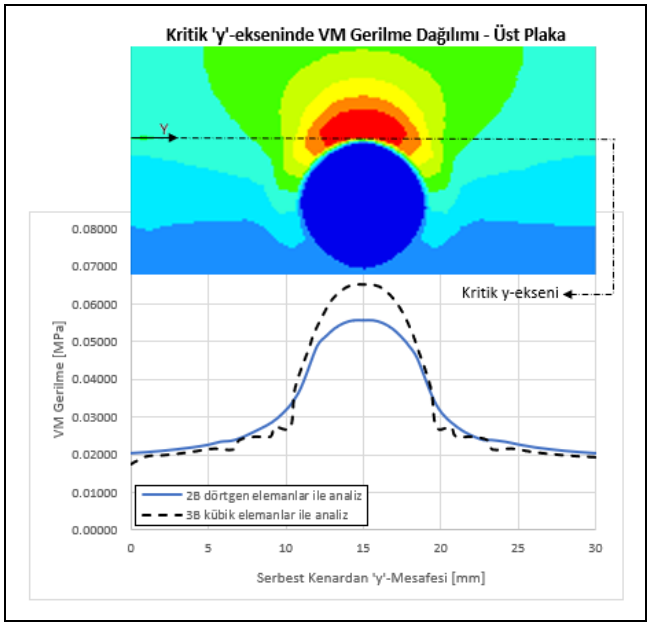
	3 boyutlu model	2 boyutlu model
σ_x	0.073 MPa	0.062 MPa
σ_y	0.073 MPa	0.035 MPa
σ_z	0.019 MPa	0.000 MPa
τ_{xy}	0.021 MPa	0.017 MPa
τ_{yz}	0.003 MPa	0.000 MPa
τ_{zx}	0.005 MPa	0.000 MPa
σ_{VM}	0.065 MPa	0.056 MPa

Üst plaka boyunca kritik x-ekseni üzerinde VM gerilmesi karşılaştırması Şekil 9'da verilmiştir. Şekilde x-ekseni mesnetli uçtan mesafe, y-ekseni ise analiz sonucunda elde edilen VM gerilme değeridir. Grafikten de gözlemleneceği üzere ilk punta kaynak bölgesine kadar her iki model benzer büyüklükte gerilme profili vermektedir. İlk punta kaynak çekirdeğine komşu olan eleman sırasında her iki model için de gerilme değeri azami seviyeye ulaşırken, 3 boyutlu kübik elemanlar 2 boyutlu dörtgen elemanlara göre daha yüksek değerler vermektedir. İlk punta çekirdeğinden sonra genel dağılım olarak 3 boyutlu kübik eleman ile analizlerle elde edilen gerilme değerlerinin daha yüksek seviyelerde devam ettiği gözlemlenmektedir. Kritik y-ekseni boyunca VM gerilme dağılımı ise Şekil 10'da detaylandırılmıştır.



Şekil 9. Statik analizler-kritik x-ekseninde VM gerilme değişimi.

Figure 9. Static analyses-VM stress change on the critical x-axis.



Şekil 10. Statik analizler-kritik y-ekseninde VM gerilme değişimi.

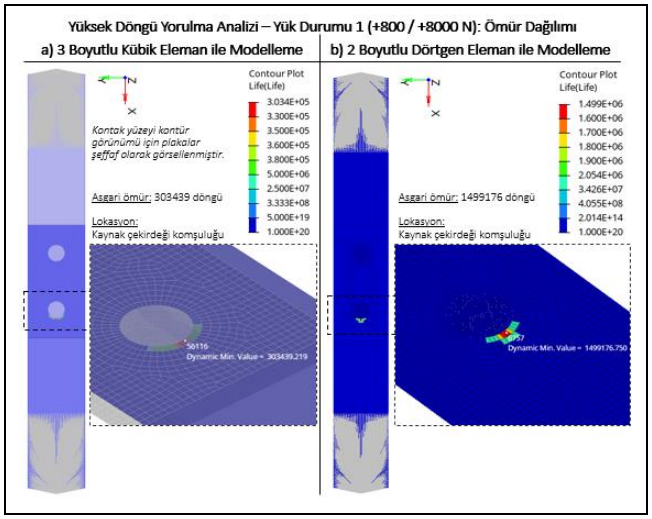
Figure 10. Static analyses-VM stress change on the critical y-axis.

Kübik elemanlarla oluşturulan model punta kaynak komşuluğundaki kritik bölgede dörtgen elemanlı modele göre bariz şekilde daha yüksek gerilme sonucu vermektedir. Ancak kaynak bölgesinden uzaklaştıkça her iki modelleme yöntemi için de kritik y-ekseninde benzer gerilme değerleri okunmaktadır.

Yüksek döngü yorulma analizleri aşağıda belirtilen 3 farklı dinamik yükleme durumu için gerçekleştirilmiştir:

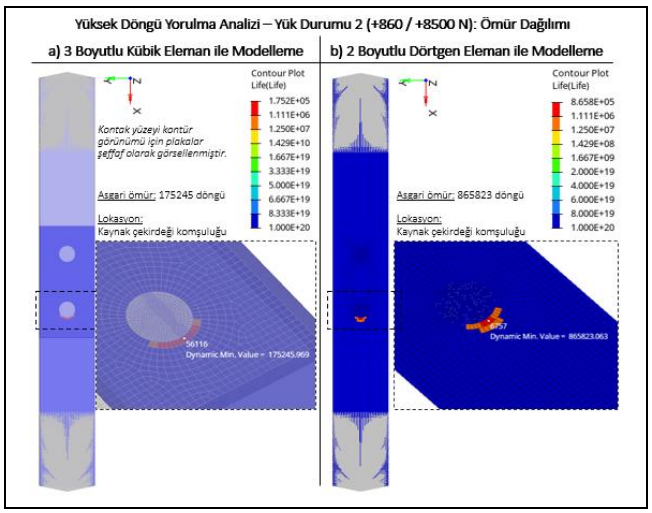
- Dinamik yükleme durumu 1: Fmin = +800N / Fmaks = +8000N,
- Dinamik yükleme durumu 2: Fmin = +860N / Fmaks = +8500N,
- Dinamik yükleme durumu 3: Fmin = +900N / Fmaks = +9000N.

Yüksek döngü yorulma analizlerinin sonucunda elde edilen ömür dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 11, 12 ve 13'te verilmiştir.



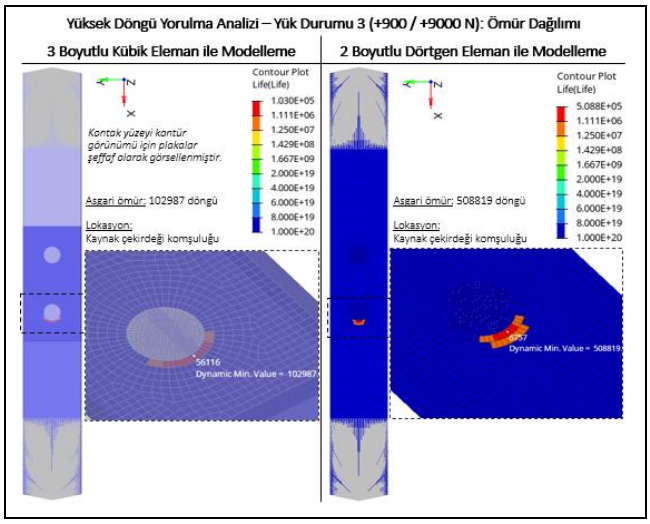
Şekil 11. Yüksek döngü yorulma analizleri-ömür karşılaştırması, Yük durumu 1 (+800 N / +8000 N). (a): 3B kübik eleman ile modelleme, (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

Figure 11. High cycle fatigue analyses-life comparison, Load case 1 (+800 N/+8000 N). (a): Modeling with 3D cubical element. (b): Modeling with 2D quadrilateral element.



Şekil 12. Yüksek döngü yorulma analizleri-ömür karşılaştırması, yük durumu 2(+860 N/+8500 N). (a): 3B kübik eleman ile modelleme. (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

Figure 12. High cycle fatigue analyses-life comparison, Load case 2 (+860 N/+8500 N). (a): Modeling with 3D cubical element. (b): Modeling with 2D quadrilateral element.



Şekil 13. Yüksek döngü yorulma analizleri-ömür karşılaştırması, Yük durumu 3 (+900 N / +9000 N). (a): 3B kübik eleman ile modelleme. (b): 2B dörtgen eleman ile modelleme.

Figure 13. High cycle fatigue analyses-life comparison, Load case 3 (+900 N/+9000 N). (a): Modeling with 3D cubical element. (b): Modeling with 2D quadrilateral element.

Dinamik yükleme koşullarında gerçekleştirilen analizler neticesinde her iki modelleme yöntemi için de benzer bir dağılım gözlemlenmiştir. Numunenin genelinde sonsuz ömür değerleri okunurken, punta kaynak komşuluğunda yüksek gerilme yığılması neticesinde ömür değerlerinin 105 döngü mertebelerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Analizler neticesinde her iki model için de asgari ömrün puntaya komşu olan ilk eleman sırasında olduğu anlaşılmaktadır ve bu bölge yorulma başlangıcı için olası çatlak çekirdeklenme bölgesi olarak nitelendirilebilir. Numune analizlerinde model üstünde okunan asgari yorulma ömür döngü değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Yüksek döngü yorulma analizleri – Ömür karşılaştırması.

Table 5. High cycle fatigue analyses-life comparison.

	3 boyutlu model	2 boyutlu model
+800N/+8000N	303438 döngü	1499176 döngü
+860N/+8500N	175245 döngü	865823 döngü
+900N/+9000N	102987 döngü	508819 döngü

Karşılaştırma neticesinde 3 boyutlu kübik eleman ile oluşturulan modelin 2 boyutlu dörtgen elemanlara göre net bir şekilde daha düşük ömür değerleri verdiği anlaşılmaktadır. Yorulma analizleri karşılaştırmalı sonuçları birim yük altında okunan gerilme değerleri ile uyum içerisindedir.

4 Test verisi ile karşılaştırma ve doğrulama

İki farklı modelleme yöntemi ile gerçekleştirilen analiz çalışmaları, 3 boyutlu kübik ve 2 boyutlu dörtgen eleman kullanımı neticesinde oluşan farkları açıkça ortaya koymaktadır. Uygun eleman tipi seçimine karar verebilmek adına analiz çalışmalarının ömür hesaplamaları test verisi ile karşılaştırılmıştır. Yüksek döngü yorulma testleri [22] Şekil 14'te sunulan test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizleri ve test karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 14. Yüksek döngü yorulma test düzeneği [22].

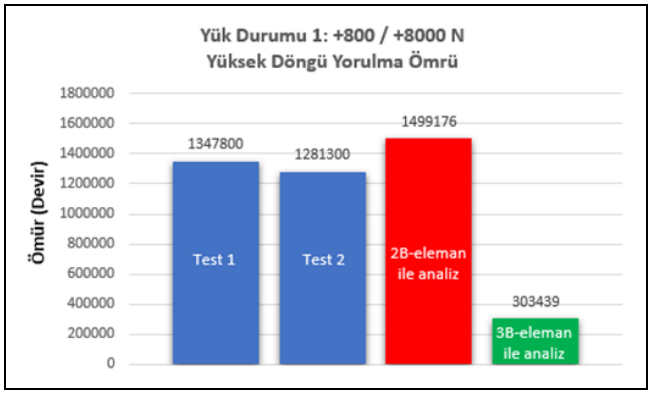
Figure 14. High cycle fatigue test setup [22].

Tablo 6. Yüksek döngü yorulma ömrü, test ve analiz karşılaştırması.

Table 6. High cycle fatigue life, comparison of test and analysis.

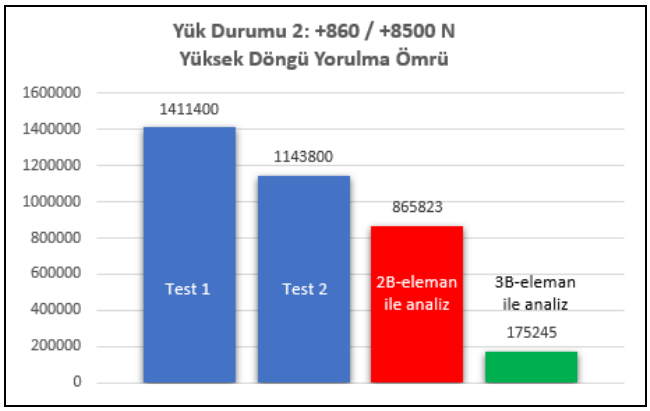
	Test #1 [döngü]	Test #2 [döngü]	3 b. mod. [döngü]	2 b. mod. [döngü]
+800N/+8000N	1347800	1281300	303438	1499176
+860N/+8500N	1411400	1143800	175245	865823
+900N/+9000N	476300		102987	508819

Farkları daha belirgin şekilde görselleştirmek adına ayrıca Şekil 15-16 ve 17'de sırasıyla dinamik yükleme durumu 1-2 ve 3 için sunulmuştur. Test verisi ile karşılaştırma sonucunda 2 boyutlu dörtgen elemanlar ve rijit kaynak bağlantılı modelin, çift puntalı kayma yorulma testleri ile yüksek oranda tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 3 boyutlu kübik elemanlar ile gerçekleştirilen yorulma analizlerinde ise teste göre çok daha düşük ömür döngüsü hesaplanmıştır. Hem modelleme yükünde getirdiği avantajlar, hem de testlerle doğrulamadaki başarısı düşünüldüğünde, punta kaynaklı kayma numuneleri için 2 boyutlu dörtgen eleman seçiminin daha doğru tercih olacağı belirtilebilir.



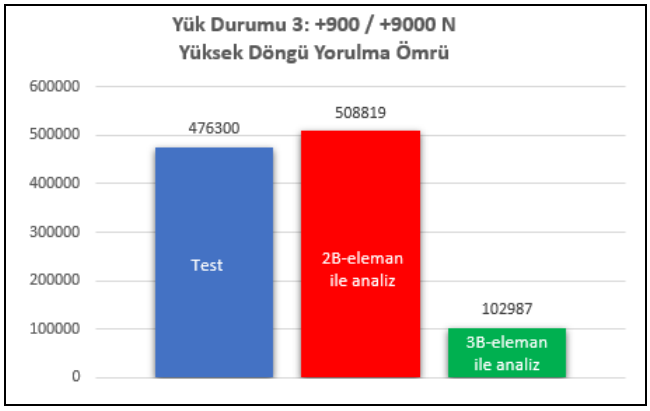
Şekil 15. Yüksek döngü yorulma analizleri ve test karşılaştırması, Yük durumu 1: +800N / +8000N.

Figure 15. High cycle fatigue analyses and test comparison Load case 1(+800 N / +8000).



Şekil 16. Yüksek döngü yorulma analizleri ve test karşılaştırması, Yük durumu 2: +860N / +8500N.

Figure 16. High cycle fatigue analyses and test comparison Load case 2 (+860 N / +8500).



Şekil 17. Yüksek döngü yorulma analizleri ve test karşılaştırması, Yük durumu 3: +900N / +9000N.

Figure 17. High cycle fatigue analyses and test comparison Load case 3 (+900 N / +9000).

5 Sonuçlar

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan punta kaynaklı bileşenler için farklı eleman tipi ile modelleme ve validasyon çalışmaları bu makale kapsamında detaylandırılmıştır. Bu bağlamda çift puntalı kayma numuneleri 3 boyutlu kübik ve 2 boyutlu dörtgen elemanlarla modellenerek yüksek döngü yorulma analizleri gerçekleştirilmiş ve ömür döngü değerleri test verileri ile karşılaştırılmıştır. Analizler neticesinde 2 boyutlu dörtgen elemanlar ile oluşturulan modelin bağıl olarak daha rijit davrandığı ve daha düşük deplasman genliği verdiği belirtilmelidir. Öte yandan 3 boyutlu kübik elemanlarla oluşturulan modelde kaynak çevresinde oluşan gerilme değerleri daha yüksek mertebelerde elde edilmiştir ve bu bağlamda literatür ile uyumludur [13]. Yüksek döngü yorulma analizleri neticesinde çatlak çekirdeklenme risk bölgesi her iki modelleme yöntemi için de kaynak etrafında gözlemlenmiştir. Toplam ömür döngüsü olarak ise 3 boyutlu elemanlar bariz şekilde daha düşük değerler vermektedir. Yüksek döngü yorulma testleri ile karşılaştırma neticesinde, 2 boyutlu dörtgen elemanlı model ile hesaplanan ömür değerlerinin testlerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. 3 boyutlu kübik eleman ile oluşturulan model ile elde edilen ömür değerleri ise test verilerinin çok aşağısında kalmıştır. Bu makale

kapsamında gerçekleştirilen analiz ve test karşılaştırma çalışmaları neticesinde, testler ile yüksek mertebede tutarlılık, modelleme avantajı ve bağıl olarak kısa çözümleme süreleri düşünüldüğünde, çift puntalı kayma numuneleri için 2 boyutlu dörtgen elemanlar ve rijit kaynak bölgesi ile modellemenin daha doğru yaklaşım olacağı sonucuna varılmıştır.

6 Conclusion

The modeling with different element types and validation studies for spot welded components, which are commonly used in automotive industry, have been detailed in this paper. In this context, high cycle fatigue analyses and life cycle test comparison of double spot welded overlapped sheet metal specimens have been conducted by using 3 dimensional cubical and 2 dimensional quadrilateral elements. The analyses indicates that the model with 2 dimensional quadrilateral elements acts relatively more rigid and gives lower displacement magnitudes. On the other hand, the stress levels around the weld nuggets are found to be higher for the model constructed with 3 dimensional cubical elements, which is consistent with the literature [13]. The high cycle fatigue analyses point out the risk for crack initiation around the weld nugget region for both models. The total life cycle for 3 dimensional elements is observed to be much lower. The comparison with high cycle fatigue tests show good agreement with life cycles obtained with the model using 2 dimensional quadrilateral elements. On the other hand, the life cycle results of the model using 3 dimensional cubical elements are observed to be much lower than experimental data. Based on the high level of correlation with tests, modeling advantage, and relatively shorter simulation time, modeling double spot welded overlapped sheet metal specimens with 2 dimensional elements and rigid weld regions appears to be a more accurate method within the context of the analyses and test comparison presented in this study.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Ertuğrul Tolga DURAN fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması başlıklarının oluşturulması, simülasyonların gerçekleştirilmesi, analizlerin işlenmesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuç bölümünün yazılmasında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

9 Kaynaklar

[1] Romeed SA, Fok SL, Wilson NHF. "A Comparison of 2D and 3D finite element analysis of a restored tooth". *Journal of Oral Rehabilitation*, 2006. https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2005.01552.x

[2] Chanthasopeephan T, Desai JP, Lau ACW. "3D and 2D finite element analysis in soft tissue cutting for haptic display". *ICAR '05. Proceedings. 12th International Conference on Advanced Robotics,* Seattle, WA, USA, 18-20 July 2005.

[3] Koktan J, Cajka R, Brozovsky J. "Comparison of 2D and 3D finite element structural analysis of foundation slab on elastic half-space". *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* 14(6), 1112-1119, 2019.

[4] Ata TT. 2D and 3D Finite Element Analyses of Dynamic Delamination in Curved CFRP Laminates. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.

[5] Duboust N, Pinna C, Ghadbeigi H, Avyar SS, Phadnis VA, Collis A, Kerrigan K. "2D and 3D finite element models for the edge trimming of CFRP". *16th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, *Procedia CIRP 58*, Cluny, France, 15-16 June 2017.

[6] Saleem J, Majid A, Bertilsson K, Carldberg T. "3-dimensional finite element simulation of seam welding process". *Elektronik IR Elektrotechnika*, 19(8), 73-78, 2013.

[7] Nielsen CV, Chergui A, Zhang W. "Single-sided shet-to-tube welding investigated by 3D Numerical Simulations". *7th International Seminar on Advances in Resistance Welding*, Busan, Korea Republic, 12-14 September 2012.

[8] Dincer S, Çınar A, Dursun AK, Asureciler B, Duran ET, Mugan A. "A comparative study on the finite element models for spot welds and their verification". *SAE Technical Paper Series*, *2006-01-0590, SAE World Congress*, Detroit, Michigan, 3-6 April 2006.

[9] Wagare V. *Fatigue Life Prediction Of Spot-Welded Joints: A Review*. Editors: Chaari F, Gherardini F, Ivanov V, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 445-455, Singapore, Springer, 2018.

[10] Kang HT, Dong P, Hong JK, "Fatigue analysis of spot welds using a mesh-insensitive structural stress approach". *International Journal of Fatigue*, 29, 1546-1553, 2007.

[11] Radaj D. "Local fatigue strength characteristic values for spot welded joints". *Engineering Fracture Mechanics*, 37(1), 245-250, 1990.

[12] Rupp A, Störzel K, Grubisic V. "Computer aided dimensioning of spot-welded automotive structures". *SAE Technical Paper Series, 950711, International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, 27 February-2 March 1995.

[13] Deng X, Chen W. "Performance of shell elements in modeling spot-welded joints". *Finite Elements in Analysis and Design*, 35(1), 41-57, 2000.

[14] Palmodella M, Friswell MI, Mottershead JE, Lees AW. "Finite element models of spot welds in structural dynamics: Review and updating". *Computers and Structures*, 83(8-9), 648-661, 2005.

[15] Nielsen CV, Zhang W, Perret W, Martins PAF, Bay N. "Three-dimensional simulations of resistance spot welding". *Journal of Automobile Engineering*, 229(7), 885-897, 2015.

[16] Patil S. Modeling and Chracaterization of Spot Weld Material Configurations for Vehicle Crash Analysis. PhD Thesis, Wichita State University, Kansas, USA, 2014.

[17] Shafiq ASRT. Modeling of spot Weld with Failure for Crash Simulations. MSc Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2017.

[18] Husain NA, Khodaparast HH, Snaylam A, James S, Dearden G, Ouyang H. "Finite element modeling and updating of laser spot weld joints in a top hat structure for dynamic analyses". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, JMES1787*, 224(4), 851-861, 2009.

[19] Dang W. Finite element modeling of hybrid (Spot welded/bonded) joints under service conditions. PhD Thesis, Universite de Technologie De Compiegne, Compiègne, France, 2015.

[20] Khan Q, Armaki HG, Gill AS, Zilincik S, Gawade A. "Characterization and modeling of spot-weld joints with *Mat_100_DA parameter optimization using LS-OPT, and 3 sheet spot-weld modeling method development in LS-Dyna". *15th International LS-DYNA User Conference*, Dearborn, MI, USA, 10-12 June 2018.

[21] Hıdıroğlu M, Kahraman U, Kahraman N. "The effect of AC and MFDC resistance spot welding technology on mechanical properties of new generation automotive steels". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(4), 465-471, 2021.

[22] Yang L, Yang B, Yang G, Xiao S, Zhu T, Wang F. "A comparative study of fatigue estimation methods for single-spot and multispot welds". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(6), 1142-1158, 2020.