



Konferans Bildirisi

6 Silindirli Ticari Dizel Bir Motorda Egzoz Manifoldunun Tasarımı ve Analizi

Baran KAYA^{1*}, Cihan BÜYÜK², Miraç ÖZTÜRK³

¹ TÜMOSAN Teknoloji Mühendislik San. Tic. A.Ş., Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0002-7563-4625>,
baran.kaya@tumosanmuhendislik.com.tr,

² TÜMOSAN Teknoloji Mühendislik San. Tic. A.Ş., Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7400-5678>,
cihan.buyuk@tumosanmuhendislik.com.tr,

³ TÜMOSAN Teknoloji Mühendislik San. Tic. A.Ş., Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0007-4212-6938>,
mirac.ozturk@tumosanmuhendislik.com.tr,

* Sorumlu Yazar: baran.kaya@tumosanmuhendislik.com.tr

(First received October 14, 2023 and in final form December 22, 2023)

3rd International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2023)
December 13 - 15, 2023

Reference: Kaya, B., Büyük, C., Öztürk, M., 6 Silindirli Ticari Dizel Bir Motorda Egzoz Manifoldunun Tasarımı ve Analizi. Orclever Proceedings of Research and Development,3(1), 539-551.

Özet

Egzoz manifoldu, içten yanmalı motorlarda yüksek sıcaklık etkisinde çalışan motor parçalarından biridir. Yüksek sıcaklık etkisiyle genleşme hareketinden kaynaklanan sorunları önlemek için 6 silindirli bir ticari dizel motorun egzoz manifoldu 3 parça şeklinde tasarlanmıştır. 3 parçadan oluşan egzoz manifoldunda gaz kaçaklarını önlemek için yüksek sıcaklıklara dayanabilen segmanlar kullanılmaktadır. Egzoz manifoldu için, 1 boyutlu, termal, akış ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak segmansız olarak gerçekleştirilen egzoz manifoldu yapısal analizi sonucunda egzoz manifoldu deformasyon değerlerine uygun segman seçimi gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz sonucunda termomekanik yorulma çatlağı başlama bölgesini tayin etmekte kullanılan PEEQ (eşdeğer plastik gerinim) yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bu yöntem ile bir yaklaşım yapılmış olup çatlak başlama bölgesi incelenmiştir.

Anahtar: Egzoz manifoldu, sonlu elemanlar analizi, termomekanik, PEEQ



Design and Analysis of the Exhaust Manifold in a 6-Cylinder Commercial Diesel Engine

Abstract

The exhaust manifold is one of the engine parts in internal combustion engines that operates under the influence of high temperatures. To prevent issues arising from the expansion movement due to high temperature effects, the exhaust manifold of a 6-cylinder commercial diesel engine has been designed in three parts. Sealing rings that can withstand high temperatures are used in the three-part exhaust manifold to prevent gas leaks. For the exhaust manifold, 1-dimensional, thermal, flow, and structural analyses have been performed. Initially, based on the structural analysis of the exhaust manifold conducted without sealing rings, sealing ring selection was made according to the deformation values of the exhaust manifold. In the structural analysis, the PEEQ (equivalent plastic strain) method, which is utilized to determine the thermomechanical fatigue crack initiation area, is employed. In this study, an approach using this method was undertaken, and the crack initiation area was examined.

Keywords: Exhaust manifold, finite element analysis, thermomechanical, PEEQ



1. Giriş

Günümüzde dizel motorların modernleşmesi, aşırı doldurma sistemlerin motora entegrasyonu ile gerçekleşmektedir. Bu sistemlerle, motorlar daha güçlü ve verimli performanslar sergilemektedir. Bu sistem sadece motora değil çevreye olan emisyonların azaltılmasına etki etmektedir. Ancak, bu olumlu gelişmelerin yanı sıra, artan silindir içi basınç değerlerinden kaynaklı yüksek sıcaklıklar, silindir kafası, piston ve egzoz manifoldu gibi kritik motor bileşenlerine etki etmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışan motorlar ve egzoz sistemlerindeki bileşenler, ömrü boyunca şiddetli mekanik ve termal döngü yüklerine dayanmak zorundadır. Egzoz manifoldu üzerindeki sıcaklığın artışı ile egzoz manifoldunun genleşmesi cıvatalar ile kısıtlanır. Bu kısıtlamalar manifold üzerinde yüksek yerel streslere ve elastik olmayan deformasyonlara neden olur [1, 2]. Motor hacmi büyüdükçe egzoz manifoldları çok parçalı olarak kullanılmaktadır. Çok parçalı olarak kullanılmasının sebebi, manifolda etki eden termal yükleri azaltarak parça üzerindeki plastik şekil değişimini azaltıp, buna bağlı olarak termomekanik yorulma ömrünü arttırmaktır [3]. Çok parçadan oluşan egzoz manifoldlarında gaz kaçağı ve termal dengeyi sağlamak amacıyla segman parçaları kullanılmaktadır. Termomekanik yorulmaları önlemek için malzeme seçimi ve yük altındaki yapısal değerlendirme, egzoz manifoldu tasarımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma için egzoz manifolduna 1 boyutlu, akışkanlar dinamiği ve yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 1 boyutlu motor modeli kurulup sürekli rejimde çözdürülerek gerekli sıcaklık, basınç ve debi değerleri incelenir. Daha sonrasında HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analiziyle, konjuge ısı transferi kullanılarak egzoz manifoldu sıcaklık dağılımının değerlendirmesi yapılır. Ardından, termal analiz, termal yük olarak uygulanacak sıcaklık dağılımını değerlendirmek için yapılır. Daha sonra, gerilme ve deformasyonların hesaplanması, termal ve mekanik yükleri dikkate alarak yapısal analiz gerçekleştirilir. Son olarak, eşdeğer plastik gerilme değeri incelenerek termomekanik yorulma durumu incelenir.

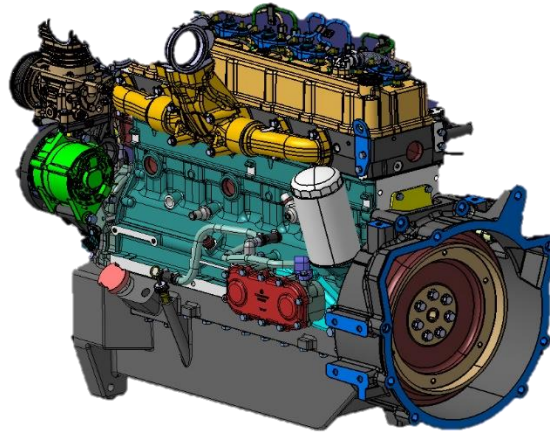
2. Materyal ve Yöntem

Tasarım ve analiz çalışmasının gerçekleştirildiği egzoz manifoldu 6 silindirli ticari bir dizel motor üzerinde kullanılmaktadır. İlgili motora ait özellikler Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1: Motor Bilgileri

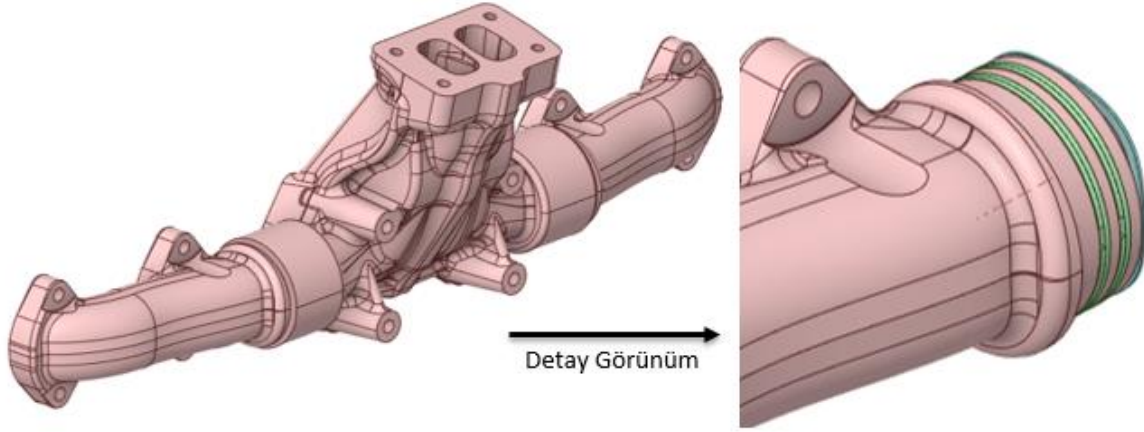
Çap x Strok	104 mm x 115 mm
Sıkıştırma Oranı	17:1
Anma Gücü @ 2200 dev/dk	197 HP
Anma Torku @ 1300 – 1700 dev/dk	800 Nm
Toplam Motor Hacmi	5.8 Litre

Common-rail yakıt sistemi ile bu motor yakıtı daha verimli bir şekilde kullanarak hem yakıt ekonomisini optimize etmekte hem de emisyonları azaltmaktadır. İlgili motorda turboşarj aspirasyonu ile 197 beygir güç ve 800 Nm tork performans sunmaktadır. İlgili motora ait görsel Şekil 1’de yer almaktadır.



Şekil 1: 6 Silindirli Ticari Dizel Motor

Yüksek performans ve düşük emisyon taleplerinin artmasıyla dizel motorlarının çalışma şartları giderek daha da zorlaşmaktadır. İsterler karşısında motor komponentleri doğrudan etkilenmektedir. Etkilenen motor komponentlerinin başında egzoz manifold gelmektedir. Egzoz manifoldunun tasarımı motor performansını, yakıt tüketimini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda çevresel kirliliğine de etkisi bulunmaktadır [4]. İlgili motorda, yapısal esneklik, ısıl genleşmeye karşı dayanım, kolay montaj ve demontaj için 6 silindirli bir ticari dizel motorun egzoz manifoldu 3 parça şeklinde tasarlanmıştır. 3 parçadan oluşan egzoz manifoldunda ısı izolasyonu, sızdırmazlık ve egzoz gazı sıcaklığını dengelemek amacıyla segmanlar kullanılmaktadır. 6 silindirli ticari dizel motorda kullanılan egzoz manifoldu yapısına ait görsel Şekil 2’de yer almaktadır.



Şekil 2: Segmanlı Egzoz Manifoldu

Yapılan tasarım sonrasında egzoz manifoldunun maksimum 750°C çalışma şartlarına uygun malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, manifoldun bağlantı cıvataları ve segmanlarının da bu çalışma şartlarına uygun olması gerekmektedir. Dizel motorların egzoz manifoldları döküm yöntemi ile üretilmektedir. Egzoz manifoldu, küresel grafitli Si-Mo katkılı dökme demir malzeme kullanılmaktadır. Yüksek silikon molibden (HiSiMo) dökme demir, egzoz manifoldları gibi yüksek sıcaklıkta çalışan motor bileşenleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıradan küresel grafitli dökme demir, silisyum ve molibden katkısı ile daha iyi sıcaklık dayanımı sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan motor bileşenlerinin dayanıklılığını doğru bir şekilde tahmin etmek için, bu bileşenlerde kullanılan HiSiMo dökme demirin termomekanik yorulma davranışını anlamak büyük öneme sahiptir [5, 6]. Egzoz manifold ve turbo üzerinde kullanılan cıvataların dayanım sınıfları gerekli mukavemet hesaplamaları ile seçilmiştir. Cıvata ve segman parçalarında, yüksek sıcaklıklara dayanabilen paslanmaz çelik malzemesi olan Nimonic 80A kullanılmaktadır. Bu malzemenin standart malzemelere kıyasla artan sıcaklıklarda çekme ve akma dayanımının iyi ve çalışma sıcaklıklarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Egzoz manifoldu malzemesine ait özellikler Tablo 2 ve Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 2: HiSiMo Malzemesinin Kimyasal Bileşeni [6]

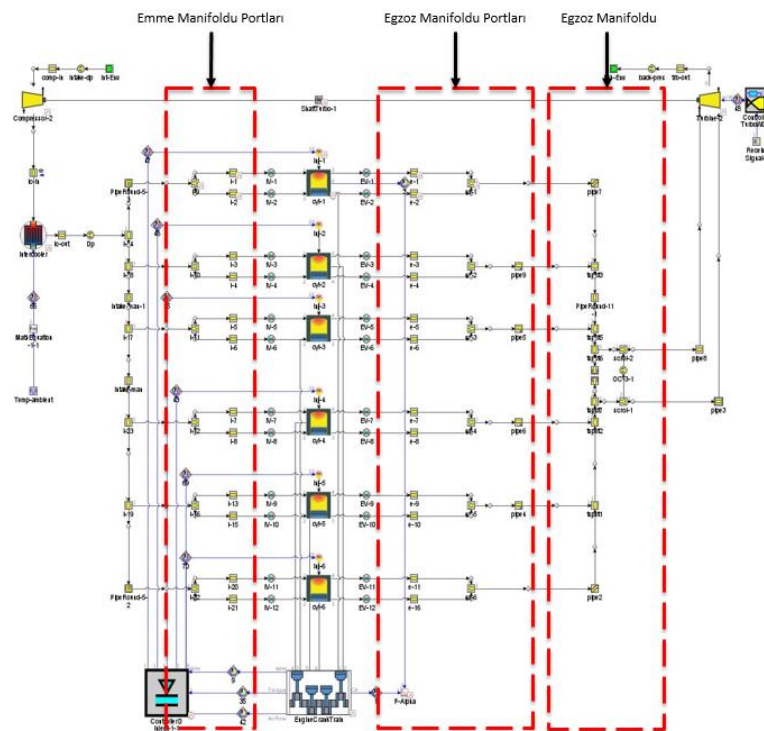
C	Si	Mn	P	S	Mo	Mg	Fe
3.26	4.28	0.21	0.018	0.010	0.48	0.032	Deng.

Tablo 3: HiSiMo Malzemesinin Mekanik Özellikleri [6]

Sıcaklık (°C)	E (GPa)	Rp0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)
Oda Sıcaklığı	168	412	632	14	9
300	159	342	536	12	7
400	154	326	486	3	2
500	146	266	358	11	11
600	139	175	192	31	32
700	118	80	98	35	37
800	86	32	38	50	61

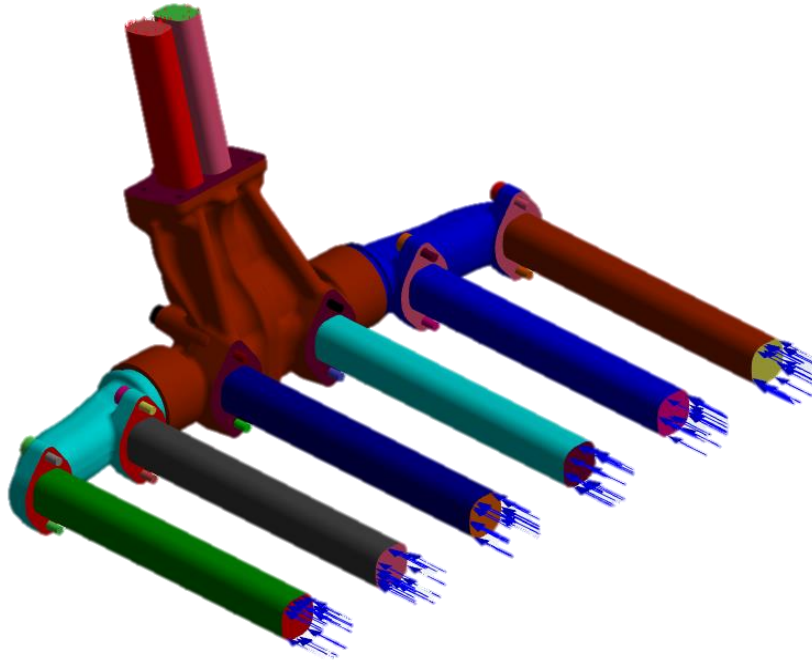
2.1. Analiz Metodolojisi

Manifold yapısı üzerinde etkili olan başlıca yükler; sıcaklık, cıvata ve dış kuvvetlerdir [7]. Egzoz manifoldu için, ilk olarak 1 boyutlu analiz ardından HAD analizi, son olarak yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te 1 boyutlu motor modeli üzerinde emme ve egzoz manifoldu detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3: GT-Power Yazılımındaki Motor Modeli

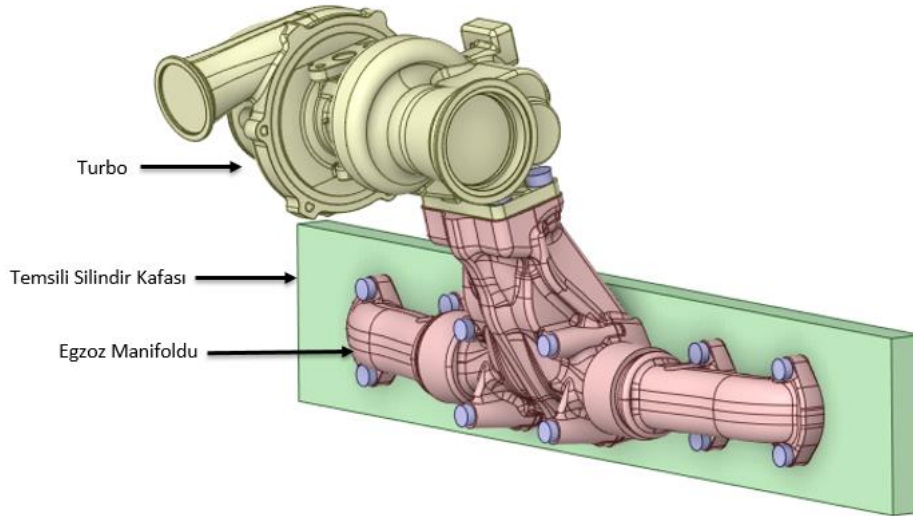
İlk olarak 1 boyutlu motor modeli kurularak analiz sürekli rejimde çözdürülerek sıcaklık, basınç, kütleli debi, yoğunluk, özgül ısı ve viskozite değerleri alınmıştır. 1 Boyutlu analizde 6 silindri motor modeli GT-Power programında hazırlanmıştır. 1 Boyutlu analiz sonucunda alınan sıcaklık, kütleli debi ve total basınç değerleri HAD analizinde girdi olarak kullanılmıştır. Akışkanlar dinamiği analizi Ansys Fluent'te sürekli rejim olarak çözdürülerek sıcaklık, basınç düşümü ve egzoz gazı hızları incelenmiştir. HAD analizine ait görsel Şekil 4'te bulunmaktadır.



Şekil 4: HAD Analiz Modeli

Yapısal analizin amacı, manifold üzerinde oluşan gerilmelerinin, deformasyonların ve yorulma ömrünün incelenmesidir. Egzoz manifoldunun yapısal analizi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, egzoz manifoldu üzerinde bulunan cıvataların sıkma torklarının uygulanması; ikinci aşama, turboşarj ağırlığının etkisi için yerçekimi ivmesinin uygulanması; son aşama da ise, HAD analiz çıktısı olan sıcaklıkların analizde uygulanmasıdır. Yapısal analiz Ansys Mechanical'da ağ yapısı ve bağlantılar oluşturularak analiz modellenmiştir. Analiz modelinde bulunan cıvataların sıkma torklarına karşılık gelen ön gerilme kuvveti hesaplanmıştır [8]. Manifold üzerinde bulunan cıvatalara 20 kN, turbo cıvatalarına 35 kN cıvata ön gerilmesi uygulanmıştır. Egzoz manifoldu, temsili silindir kafasından analiz modeli kısıtlanmıştır.

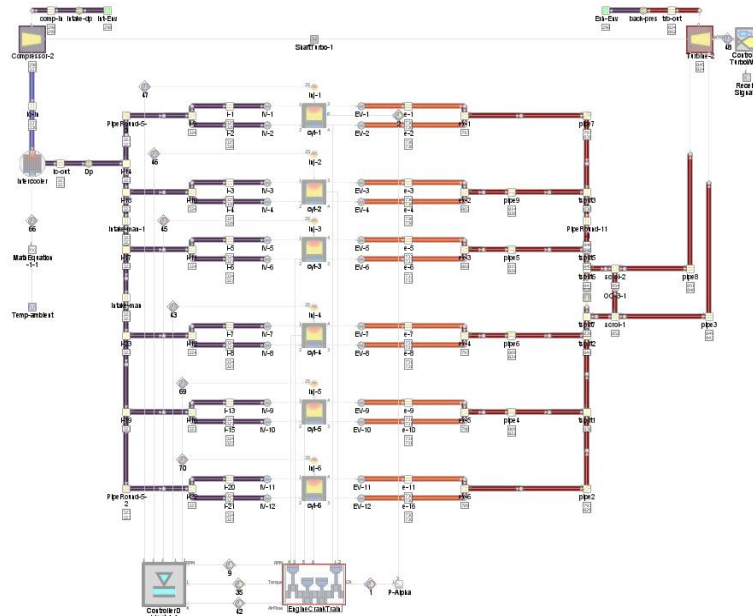
Egzoz manifold yapısal analizinde kullanılan analiz modeline ait görsel Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5: Yapısal Analiz Modeli

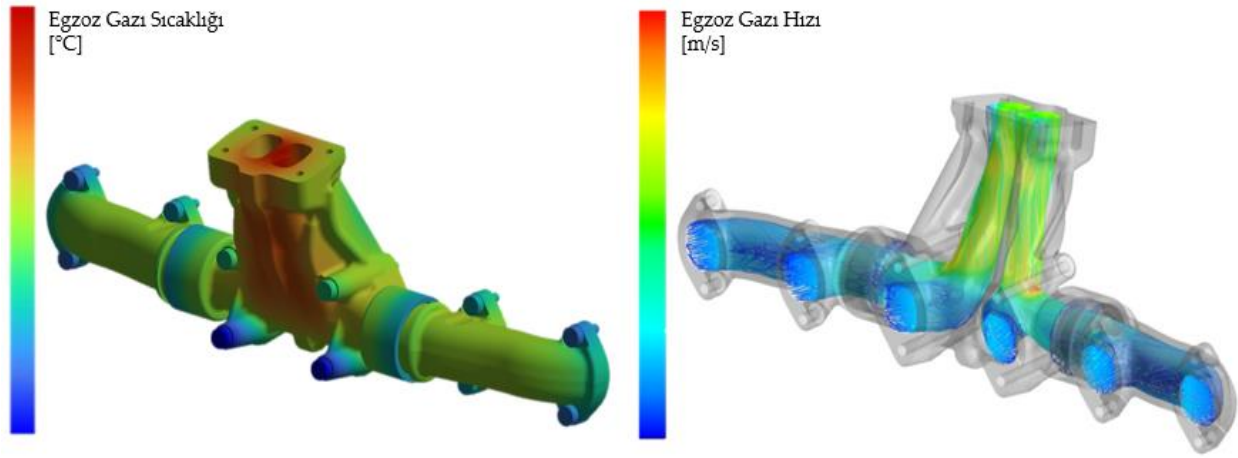
3. Sonuçlar

1 boyutlu analizden sonra, egzoz manifoldu ve manifold portları detaylı olarak incelenmiştir. Detaylı olarak sıcaklık değerleri incelenmiştir. Motor modelinde gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum sıcaklık 620°C'dir. Motor modelinin sıcaklık çıktılarına ait görsel Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 6: Motor Modeli Sıcaklık Sonuçları

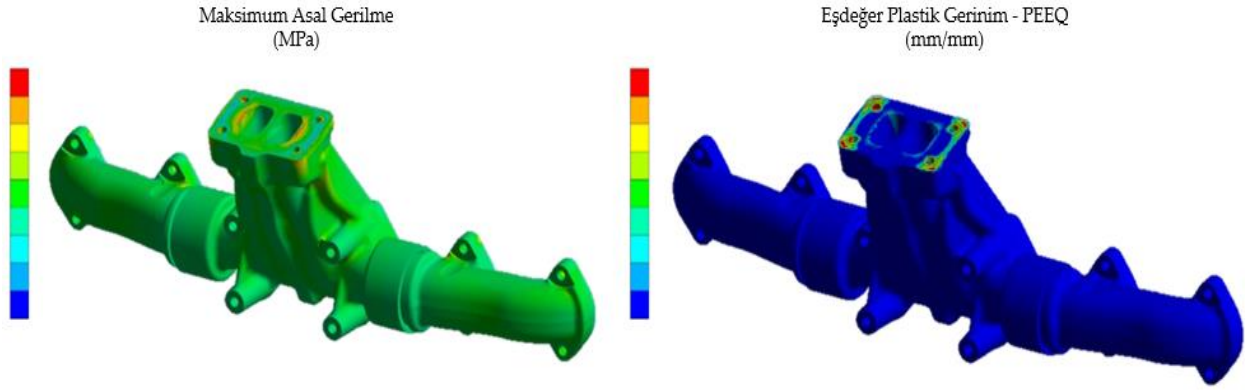
1 boyutlu analizin sonunda, HAD analizi için gerekli girdi bilgileri alınıp tanımlamalar yapılmıştır. Analiz sonucunda egzoz manifoldunda 120 mbar basınç düşümü görüldü. Egzoz manifoldu üzerinde maksimum sıcaklığın 570°C olduğu ve bu maksimum sıcaklık değerinin turbo temas yüzeyinde olduğu gözlemlendi. Egzoz manifoldu üzerinde minimum sıcaklıkların ise uçlarda cıvata bölgelerindedir. Egzoz manifoldunda gerçekleştirilen akışkanlar dinamiği analiz sonucuna ait görseller Şekil 7’de yer almaktadır.



Şekil 7: HAD Analizi Sonucu Egzoz Manifoldu Sıcaklık ve Egzoz Gazı Hız Çıktıları

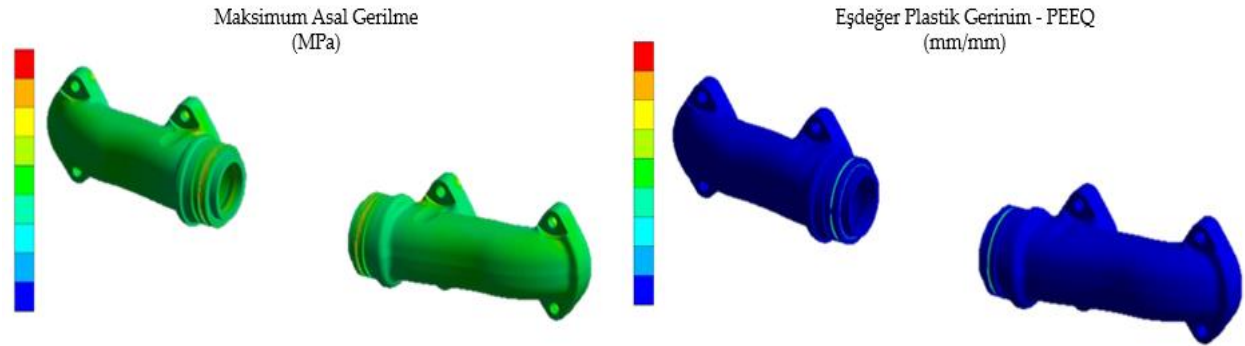
HAD analiz sıcaklık dağılımı yapısal analize tanımlanması gerçekleştirilerek lineer olmayan bir analiz gerçekleştirildi. Segman olmadan gerçekleştirilen ilk analizde orta manifold hariç 2 manifold parçasının yönlü deformasyon değerlerine karşılık gelen segman üretimi gerçekleştirilmiştir.

Segman tasarımı ile segmanlı olarak tekrarlanan analiz sonucunda, manifold üzerindeki gerilmeler, manifold ile silindir kafası arasındaki açılma değeri, kontak basınçları ve PEEQ değerleri incelenmiştir. Egzoz manifolduna uygulanan sınır şartları ile manifold üzerinde 480 MPa çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu manifoldun plastik şekil değiştirme durumuna girdiğinin göstergesidir. Bu durumda parça üzerinde PEEQ değeri incelendiğinde maksimum 0,04 mm/mm görülmektedir. Bu değer egzoz manifoldunun en sıcak bölgesi olan turbo temas yüzeyinde görülmektedir. Manifold üzerinde oluşan gerilme ve PEEQ sonuçlarına ait görseller Şekil 8 ve Şekil 9’da yer almaktadır.



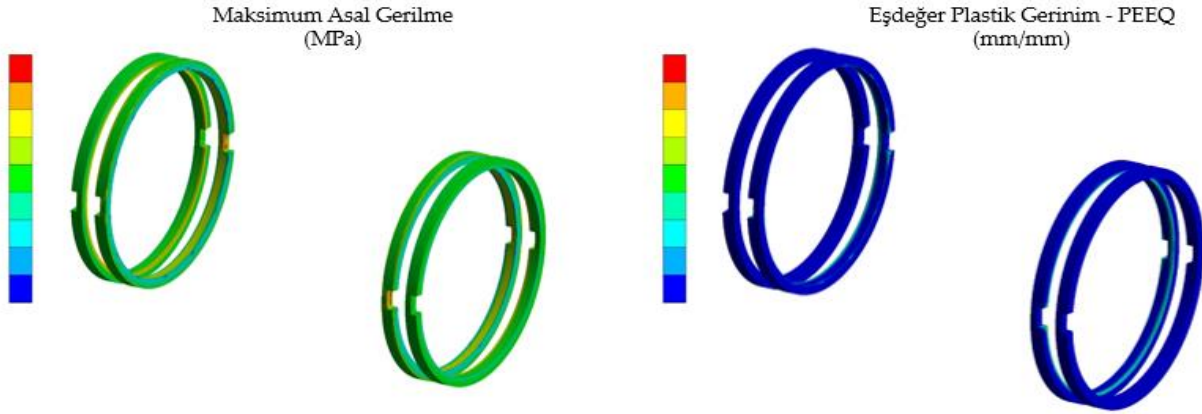
Şekil 8: Segmanlı Egzoz Manifoldu Maksimum Asal Gerilme ve PEEQ Sonuçları

Turbo temas yüzeyinde çekme gerilmesinin ve PEEQ değerinin yüksek çıkmasına ek olarak yüksek sıcaklıklı egzoz gazının giriş bölgelerinde bulunan segmanların oturma yüzeylerinde çekme gerilmesi malzemenin akma mukavemet değerinin üstündedir. Bu bölgede görülen maksimum çekme gerilmesi 480 MPa ve maksimum PEEQ değeri ise 0,015 mm/mm'dir. Orta manifold olmadan iki egzoz manifoldunun üzerinde oluşan maksimum asal gerilme ve PEEQ değeri sonuçlarına ait görsel Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9: Segmanlı Egzoz Manifoldu Maksimum Asal Gerilme ve PEEQ Sonuçları

Egzoz manifoldu üzerinde gaz kaçaklarını önlemek amacıyla kullanılan segmanların yapısal durumu incelendiğinde, uygulanan sınır şartları sonucunda segmanlar üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmesi 360 MPa'dır. Bu durum segmanların plastik şekil değiştirme durumunda olduğunu gösterir. PEEQ değeri incelendiğinde maksimum eşdeğer plastik gerinim değeri 0,04'tür. Bu değer yüksek sıcaklıktaki egzoz gazının giriş bölgelerinden olan ilk segmanlarda görülmektedir. Segmanlar üzerinde oluşan gerilme ve PEEQ sonuçlarına ait görseller Şekil 10'da yer almaktadır.



Şekil 10: Egzoz Manifoldu Segmanlarının Maksimum Asal Gerilme ve PEEQ Sonuçları

Egzoz manifoldu ile silindir kafası arasında contalar kullanılmaktadır. Contaların kullanılmasının amacı, silindir kafasından çıkan egzoz gazı kaçağını önlemektir. Yapılan analizler sonucunda egzoz manifoldu ile silindir kafası arasındaki açılma miktarları yönlü deformasyon değerleriyle incelenmiştir. Maksimum açılma orta manifoldun dışındaki 2 egzoz manifoldu parçasının port kenarlarında bulunmaktadır. Maksimum açılma miktarı 0,1 mm'dir. Y yönündeki deformasyon değerleri incelenmiştir. Egzoz manifoldunun port temas yüzeylerinin yönlü deformasyon analiz sonuçlarına ait görseller Şekil 11'de yer almaktadır.



Şekil 11: Egzoz Manifoldu Yönlü Deformasyon Sonuçları

Egzoz manifoldunda kullanılan segmanların, oturacağı yüzeyden ayrılmamaları büyük önem taşımaktadır. Segmanların oturacağı yüzeyden ayrılması durumunda gaz kaçağı problemi oluşacaktır. Aynı şekilde segmanların kendi aralarında ayrılma durumu

oluşması istenmemektedir. Segmanların kendi aralarında ve yüzeyden ayrılma durumunu incelemek amacıyla parçaların arasındaki kontak basınçları incelenmiştir. Kontak basınçları minimum 66 MPa'dır. Segmanlar ile ilgili incelenen kontak basınç analiz sonuçlarına ait görseller Şekil 12'de bulunmaktadır.



Şekil 12: Segman Kontak Basıncı

4. Tartışma

Egzoz manifoldu üzerinde oluşan PEEQ değerleri incelendiğinde çatlak başlangıcı için belirlenen limit değerinin altında kaldığı gözlemlendi. Egzoz manifoldu üzerindeki maksimum gerilemelerin yüksek egzoz gazı sıcaklıklarının olduğu bölgede görüldü. Egzoz manifoldu üzerinde olumsuz bir durum ön görülmemektedir. Egzoz manifoldu ile silindir kafası arasındaki açılma miktarları incelendiğinde en çok açılma sol ve sağ manifold port kenar uç yüzeylerinde görülmüştür. Egzoz manifoldu ve silindir kafası arasında kullanılan conta ile gaz kaçağı probleminin önüne geçildi.

Egzoz manifoldu üzerinde kullanılan segmanların PEEQ değerleri incelendiğinde, belirli bir limit değerinin altında kaldığı gözlemlenerek herhangi bir çatlak başlama durumunun olmayacağı ön görülmektedir. Segmanların egzoz manifoldu üzerinde oturduğu yüzeylerden ve birbirleri arasındaki ayrılma/açılma durumları incelendiğinde, herhangi bir ayrılma/açılma durumu oluşmayacağı gözlemlendi. Böylelikle herhangi bir gaz kaçağı problemi ön görülmemektedir.

Bir sonraki çalışmalarda GT-Power ve Ansys programlarını birbirine bağlı çözülürerek daha doğrulayıcı sonuçlar alınması hedeflenmektedir. İlgili egzoz manifoldunun test ve validasyon çalışmaları sürmektedir.



5. Teşekkür

Süreç boyunca destek ve yardımları için müdür ve ekip liderlerime, çalışmanın tamamlanmasında emeği geçen tüm ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Türkiye'nin dizel motor üretimi ve geliştirilmesinde etkin rolü olan Tümosan Teknoloji Mühendislik San. Tic. A.Ş.'ye desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Referanslar

- [1] T. Seifert, R. Hazime, ve S. Dropps, "TMF Life Prediction of High Temperature Components Made of Cast Iron HiSiMo: Part II: Multiaxial Implementation and Component Assessment," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 7, no. 2, pp. 421–431, Nisan. 2014, doi: 10.4271/2014-01-0905.
- [2] A. de Azevedo Cardoso ve E. Andreatta, "Thermomechanical analysis of diesel engine exhaust manifold," *SAE Technical Paper Series*, 2016. doi: 10.4271/2016-36-0258.
- [3] N. Mamiya, T. Masuda, ve Y. Noda, "Thermal fatigue life of exhaust manifolds predicted by simulation," *SAE Technical Paper Series*, Mart. 2002, doi: 10.4271/2002-01-0854.
- [4] Y. Li, J. Liu, W. Huang, ve Y. Wu, "Failure analysis of a diesel engine exhaust manifold," *International Journal of Metalcasting*, vol. 17, no. 1, pp. 538–550, Nisan. 2022, doi: 10.1007/s40962-022-00796-8.
- [5] R. Bosch, *Automotive Handbook*, Bentley Pub, 2011.
- [6] K. Avery, J. Pan, ve C. Engler-Pinto, "Effect of Temperature Cycle on Thermomechanical Fatigue Life of a High Silicon Molybdenum Ductile Cast Iron," *SAE Technical Paper Series*, Nisan. 2015, doi: 10.4271/2015-01-0557.
- [7] T. Göcmez ve U. Deuster, "An integral engineering solution for design of exhaust manifolds," *SAE Technical Paper Series*, Nisan. 2009, doi: 10.4271/2009-01-1229.
- [8] *Systematic calculation of high duty bolted joints*, VDI 2230, 2003.