

Kaynak Robotu Köprü Çalışma İstasyonu Titreşim Analizi: Etkin Kütle Yöntemi

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 28.01.2026

Kabul/Accepted: 09.09.2026

Yayımlandı/Published: 06.10.2026

Vibration Analysis of Welding Robot's Gantry Workstation: Effective Mass Method

Özer ÖĞÜÇLÜ^{1*}, Ramazan ÖZTÜRK²¹ Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji, İzmir, Türkiye² Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği, Manisa, Türkiye

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Robotik kaynak hem kaynaklama hem de parçanın elleçleme işlemlerinin bir robot tarafından gerçekleştirildiği tamamen otomatik bir kaynaklama sürecidir. Bu süreçte işlemler için mekanik programlanabilir araçlar kullanılmaktadır. Genel olarak insandan bağımsız bir süreç olması nedeni ile robotik kaynak giderek daha yaygın hale gelmiştir. Son yıllarda robotik kaynak birçok sektördeki yüksek hacimli ve tekrarlanan kaynak işleri nedeni ile imalat sektöründe kullanılan en yaygın robotik uygulamalardan biri olmuştur. AYMAS Geri Dönüşüm Makinaları firması geri dönüşüm çözümlerinin üretiminde kaynaklı imalat yöntemlerini yoğun olarak kullanmaktadır. Bu çalışmada söz konusu kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere firmanın fabrikasında tasarımı ve imalatı yapılan kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun titreşim davranışı analizi ANSYS'de Etkin Kütle Yöntemi yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun baş, orta ve son konumdaki üç farklı durumu için ayrı ayrı Modal analizleri yapılmıştır. Böylece bu konumlar için etkin olan modlar ve doğal frekanslar ayrı ayrı belirlenmiştir. Dikey eksen kolunun baş konumunda iken Y-ekseni etrafında dönme yönünde en etkin mod olarak Mod 1 ve 7,15 Hz değerinin etkin doğal frekans olduğu bulunmuştur. Aynı şekilde orta konum için Y-ekseni etrafında dönme yönünde Mod 1 ve 8,75 Hz ve son konum için X-ekseni etrafında dönme yönünde Mod 3 ve 17,58 Hz en etkin mod ve frekans değerleri olduğu bulunmuştur. Bu modlar bu eksenler etrafında dönme yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda kaynak robotunun altı eksenindeki çalışma hareketinin ve köprü çalışma istasyonunun eksen hareketlerinde kullanılan elektrik motorlarının bir rezonansa yol açmadığı görülmüştür.

Abstract

Robotic welding is a fully automated welding process in which both the welding and the handling of the part are performed by a robot. In this process, mechanically programmable tools are used for the operations. Robotic welding has become increasingly widespread due to its largely human-independent nature. Recently robotic welding has become one of the most common robotic applications in the manufacturing sector due to the high volume and repetitive welding jobs across many industries. AYMAS Recycling Machinery company extensively uses manufacturing methods including welding in the production of its recycling solutions. In this study, the vibration analysis of the welding robot's gantry workstation, designed and manufactured at the company's factory for use in the welding processes, was performed using the Effective Mass Method in ANSYS. Modal analyses were performed for three different states of the vertical axis arm of the welding robot's gantry workstation in the initial, middle, and final positions. The effective modes and natural frequencies for these positions were determined respectively. When the vertical axis arm is in the initial position, Mode 1 is the most effective mode and the effective natural frequency is 7.15 Hz in the direction of rotation around the Y-axis. Likewise when the vertical axis arm is in the middle position, Mode 1 is the most effective mode and the effective natural frequency is 8.75 Hz in the direction of rotation around the Y-axis. When the vertical axis arm is in the final position, Mode 3 is the most effective mode and the effective natural frequency is 17.58 Hz in the direction of rotation around the X-axis. These modes contribute most significantly to the deformation in the direction of rotation around these axes. This study revealed that the six-axis working movements of the welding robot and the electric motors used in the axis movements of the gantry workstation did not cause any resonance.

Anahtar Kelimeler: Kaynak robotu; Sonlu elemanlar; Titreşim; Etkin kütle.**Keywords:** Robotic welding; Finite element analysis; Vibration; Effective mass.

1. Giriş

Endüstrinin tüm alanlarında yüksek kaliteli üretim yapmak için teknolojiyi geliştirmek ve teknolojik yenilikleri insan hayatının bir parçası haline getirmek kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. İnsanın fiziksel gücü sınırlı olduğundan çok fazla fiziksel güç gerektiren çeşitli işlerde

kullanılmak üzere insan tarafından yönetilen makinalar geliştirilmiştir. Ancak bu makinaların kendi kendine karar verme yetenekleri yoktur ve çalışmaları için genel olarak sürekli ve atanmış bir kullanıcı gerekmektedir. Teknoloji alanında gelişmeler arttıkça insanın yerini alacak, kendi kendini kontrol edebilen otonom sistemler üzerinde

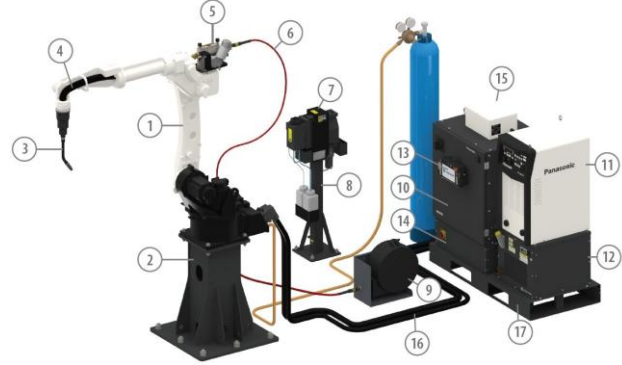
durulmuştur. Zamanla bu kavram genişlemiş ve bir işlemi başından sonuna kadar insanların işe karışmasına gerek kalmadan gerçekleştirebilecek robotlu otomasyon sistemleri ortaya çıkmıştır. Bilgi çağının ürünü olan bu karmaşık sistemler, çeşitli algılama elemanları yardımı ile çevresinden bilgiler alan, çevreden gelen bu verileri ve kendi bilgi tabanındaki verileri kullanarak karar verebilen ve herhangi bir kullanıcı yardımı olmadan kararların sonuçlarını uygulayabilen sistemlerdir (Gök vd. 2000).

Sanayi robotlarının temel kullanım amacı; üretim maliyetlerini düşürürken üretkenliği ve üretim kalitesini arttırmak, yapılması zor olan, insana fiziksel olarak zarar veren yorucu işlerde, sağlıksız ve zararlı kimyasal madde, yüksek ısı, yüksek gürültü, titreşim bulunan ortamlarda çalışmayı gerektiren uygulamalarda insanın yerine makina kullanmaktır. Kaynak robotları da kaynak işlemlerinin tekrarlanması gereken, kaliteli ve hızlı sonuç alınması gerekli olan noktalarda kullanılmaktadır. Kaynak uygulamalarının yapıldığı hemen her endüstri içerisinde robotik kaynaktan destek almak mümkündür. Robotik kaynak işlemlerinin sıklıkla kullanıldığı endüstriler; metal endüstrisi, yapı endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve havacılık endüstrisi olarak bilinmektedir.

Amerikan Robot Enstitüsü robot kavramını; "Robot, çeşitli görevlerin gerçekleştirilmesi için; malzeme, parça, takım ya da değişken programlanmış hareketler aracılığıyla, özel parçaları hareket ettirmek amaçlı tasarlanmış, çok fonksiyonlu, yeniden programlanabilir manipulatördür" olarak açıklamaktadır. Sanayi robotunun en kapsamlı tanımı ve robot tiplerinin sınıflandırması ISO 8373 standardında belirlenmiştir. Bu standarda göre bir robot; "Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipulatördür" ifadesi ile tanımlanır. Bu tanımda yer alan "programlanabilir"; programlanmış hareketleri veya yardımcı fonksiyonları fiziksel değişiklik yapmadan değiştirilebilen demektir, "çok amaçlı"; fiziksel değişikliklerle farklı bir uygulamaya uyarlanabilen demektir, "fiziksel değişiklik"; mekanik yapısında veya kontrol sisteminde yapılan değişiklikler demektir, "eksen" ise; robotun doğrusal veya dairesel moddaki hareketini belirlemekte kullanılan yön demektir (Yumurtacı vd. 2003).

Şekil 1'de kaynak robot sistemlerinin genel yapısı gösterilmiştir. Burada; 1-Robot Kol, 2-Robot Çalışma İstasyonu, 3-Kaynak Torcu ve Şok Sensör, 4-Torç Kablosu, 5-Tel Sürme Ünitesi, 6-Tel Taşıyıcı Kılavuz Hortum, 7-Otomatik Torç Temizleme Ünitesi, 8-Torç Temizleme Ünitesi Montaj Sehpası, 9-Tel Sepet Taşıma Aparatı, 10-

Kontrolör, 11-Kaynak Makinesi, 12-Su Soğutma Ünitesi, 13-LCD Kumanda Ünitesi, 14-Trafo, 15-Kumanda Kutusu, 16-Kablo Grubu, 17-Metal Taşıyıcı Palet parçaları gösterilmektedir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 1. Kaynak robotlarının genel yapısı

AYMAS Geri Dönüşüm Makineleri firması, 2003 yılında İzmir'de kurulmuştur. Firma, deneyimli ve nitelikli kadrosunun makine ve ekipman üretimindeki geniş tecrübelerini, güncel üretim ekipman ve teknolojileriyle harmanlayarak müşterilerine uzun ömürlü ve sorunsuz geri dönüşüm çözümleri sağlamaktadır. AYMAS Geri Dönüşüm Makinaları firması ürün yelpazesinde; hurda makasları, hurda balya makineleri, talaş sıkıştırma ve kırma çözümleri, parçalayıcılar ve kablo sıyrıcılar bulunmaktadır (İnt. Kyn. 2).

AYMAS Geri Dönüşüm Makinaları firması bugüne kadar 550'ye yakın makine siparişi almış ve bu makinelerin imalatlarını ve teslimatlarını gerçekleştirmiştir. Firma üretim sürecinde gelişen kaynaklı imalat işlemlerinde kullanılmak üzere iki adet kaynak robotu köprü tipi çalışma istasyonu imalatını kendi fabrikasında gerçekleştirmiştir. Burada yapılan çalışmada söz konusu kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun titreşim davranışı analizi; ANSYS'de Etkin Kütle Yöntemi yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem; yapının toplam kütleinin belirli bir doğal frekans modu için titreşimlere ne kadarının dahil olduğunu gösteren Etkin Kütle Katılım özelliğini kullanır. Etkin Kütle Katılım değeri yüksek olan bir mod, yapının belirli bir yöndeki bozulmaya karşı dinamik tepkisine önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu yöntem, hızlı hesaplamalar yapması ve çözüm için düşük işlem gücü gerektirmesiyle tanımlanmaktadır. Bu yüzden birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır.

Etkin Kütle, havacılık ve uzay endüstrisinde elastik bir yükün belirli bir yönde taşıma sistemine uyguladığı kuvvetleri tahmin etmek için kullanılan bir sistem özelliğidir. Ayrıca Deneysel Etkin Kütle, sonlu elemanlar modelinden hesaplanan Etkin Kütlenin doğrulanmasında kullanılabilir. Ancak bir sistemin Etkin Kütlesini ölçmek zordur ve bu işlem, yük ile test tabanı arasında kuvvet

duyargaları yerleştirilerek denenir. Mayes vd. (2012) bir sürüş noktasını ve temel frekans tepki fonksiyonunu ölçen ve temel tepkiyi sınırlandırmak ve etkin kütleli hesaplamak için yakın zamanda geliştirilen bir yöntemi kullanan bir metod sunmuştur.

Bir gemi direğinin tepesindeki antenlerden biri, aynı konumda daha büyük kütleyle sahip yeni bir antenle değiştirildiğinde, titreşim sorunu ortaya çıkmaktadır. Çünkü direk yapısının doğal frekanslarının, döner ekipmanın doğal frekanslarıyla çakışması nedeniyle rezonansa girmekte ve direk yapısının tamamı titreşmeye başlamaktadır. Ahmad vd. (2016) çalışmalarında gemi direğindeki bu titreşim sorununu çözmek için Etkin Kütle ve Katılım Etkeni özelliklerini kullanmışlardır.

Vysoký (2017) çalışmasında küçük bir uçak pervanesinin modal analizini incelemektedir. Bu çalışmada, ANSYS ortamında sonlu elemanlar yöntemi benzetiminin olası üç durumu ele alınmıştır. Modal analizden elde edilen önemli sonuçlar; hesaplanan doğal frekanslar, mod şekilleri, katılım etkenleri ve etkin kütleler açıklanmıştır. Son olarak çalışmada her üç durum için hesaplanan frekanslar karşılaştırılmıştır.

Nieto vd. (2018) literatürde mevcut olan Modal Katılım Etkeninin farklı tanımlarını incelemiş ve özellikle havacılık ve uzay mühendisliğinde uygulanmaları için basit bir sınıflandırma ve birleşik bir kavram önermişlerdir. Thales Alenia Space ve Top Modal firmaları yakın zamanda Etkin Kütle değerlerini deneysel olarak belirlemek için farklı bir yaklaşım geliştirdiler. Belirli koşullar yerine getirildiğinde, uzay aracı ve alt sistem arayüzlerindeki yükler bu Etkin Kütle değerleri kullanılarak değerlendirilebilir. Arena vd. (2018) bu yöntemin ardındaki teorik altyapıyı sunmuş ve doğruluğunu kanıtlamak için sayısal benzetimler gerçekleştirmiştir. Deneysel doğrulama; ucunda kütle bulunan sabitlenmiş bir kırıktan oluşan basit bir test örneği ve Thales Alenia Space firması tarafından geliştirilen ve başarıyla test edilen bir aygıtın iki ana alt sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Wylie ve Barilaro (2023) çalışmalarında; rezonans frekanslarını ve kütle katılım etkenlerini tahmin etmek için modal sonlu eleman analizini kullanarak baskılı devre kartlarının sürtünme kilitleme mekanizmalarının uyumluluğunu belirleme yöntemini sunmuşlardır. Heo vd. (2023) çalışmalarında asimetrik bir akışkan-yapı etkileşim sistemi için modal etkin kütleli tanımlamış ve hesaplanması için gerekli denklemleri türetmişlerdir. Uyum sağlamak amacıyla, yalnızca simetrik yapı sistemlerindeki modal etkin kütle kısaca gözden geçirilmiş ve ardından asimetrik sistemlerdeki modal etkin kütleli tanımı verilmiştir. Son olarak bu çalışmada yer alan modal

etkin kütle tanımının ve türetilmesinin geçerliliği, ANSYS'te basit bir örnekle gösterilmiştir.

Patkar ve Joladarashi (2025) çalışmalarında, bir atık gaz tahliye turboşarjının pnömatik aktüatör düzeneğinin modal ve rastgele titreşim analizini sunmuşlardır. Modern turboşarjlar türbin hızını etkili bir şekilde kontrol eden ve egzoz gazının bir kısmını kısa yoldan geçirerek aşırı turbo basıncını sınırlayan bir atık gaz valfi ile geliştirilmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, aktüatör düzeneğindeki Modal Katılım Etkeni değişimleri, Doğal Frekanslar ve Eşdeğer Gerilimler açısından sayısal olarak analiz edilmiştir. Georgiev (2025) çalışmasında MacPherson tipi süspansiyonun titreşim davranışını, elemanlarını ayırarak analiz etme yöntemini önermektedir. Bu yöntem, elemanın toplam kütlelerinin belirli bir doğal frekans modu için titreşimlere ne kadarının dahil olduğunu gösteren Etkin Kütle Katılım özelliğini kullanır. Etkin Kütle Katılım Etkeni yüksek olan bir mod, yapının belirli bir yöndeki bozulmaya karşı dinamik tepkisine önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu yöntem, hızlı hesaplamalar yapması ve çözüm için düşük işlem gücü gerektirmesiyle tanımlanmaktadır.

Xie vd. (2018) sonlu eleman ağ oluşturma doğruluğunun modal analiz üzerindeki etkisini araştırmak için ağ doğruluğunu değişken alarak ve ANSYS yazılımını Modal analiz için kullanarak, açık deniz platformu için kullanılan köprü tipi bir kaynak makinesinin çeşitli sonlu eleman modellerini oluşturmuşlar ve aynı zamanda bu analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Vasiljević (2022) çalışmasında bir köprü tipi vinç taşıyıcı yapısının türetilen çözümü için Modal parametrelerin bazı karşılaştırmalı değerlerini hem analitik hem de Sonlu Elemanlar Yöntemi ile sayısal olarak elde etmiştir. Böylece sayısal yöntemin Modal analiz açısından karmaşık bir taşıyıcı yapının yapısal davranışına ilişkin güvenilir bir genel kalite tahmini verebileceğini göstermiştir. Miao vd. (2024) freze makinesinin muhtemel zayıf noktalarını etkin bir şekilde belirlemek ve ürün geliştirme döngüsünü önemli ölçüde kısaltmak için SOLIDWORKS yazılımı aracılığıyla küçük bir köprü tipi CNC freze makinesinin üç boyutlu modelini tasarlamışlardır. ABAQUS yazılımını kullanarak bu freze makinesinin genel yapısının statik gerilme analizini gerçekleştirmişler ve gereksinimleri karşılayacak mukavemet ve katılık değerleri elde etmişlerdir. Ayrıca bu köprü tipi freze makinesinin Modal analizini yaparak, tasarım gereksinimlerini karşılayan bir CNC freze makinesi yapısının son halinin elde edilmesini sağlamışlardır. Fang vd. (2025) gemi bölümlerinin boyanması için kullanılan köprü tipi manipülatörün ucundaki püskürtme tabancasının titreşimine yol açan teleskopik kolun dinamik modelini, kinematik modelini ve Modal özelliklerini analiz ederek optimum giriş şekillendirmesine

dayalı yeni bir PID (oransal-integral-türevsel) kontrolcü tasarlamışlar; bu çalışmada tasarlanan bu kontrolcü, geleneksel PID kontrolcüsü, kesirli dereceli PID kontrolcüsü ve bulanık kesirli dereceli PID kontrolcüsü ile karşılaştırmışlardır. Solazzi ve Zrnic (2025) yaptıkları çalışmada yükleyici vinç olarak bir üst yapı kullanan yeni bir köprü tip vinç tasarımı önermişlerdir. Yükleyici kolları gibi bazı bileşenlerde, hafiflik özelliklerinden faydalanmak için yapısal çelik yerine alüminyum alaşımı kullanmışlardır. Her iki malzeme yapılandırması durumunda köprü tipi vincin dinamik davranışını katı modelleme ve sayısal Modal analizler yardımı ile incelemiştir.

Bu çalışmalarda köprü tipi çalışma istasyonu yapılarının titreşim analizi yapılmış fakat sadece son çalışmada Kütle Katılım Etkeni farklı iki malzeme yapılandırılmasının karşılaştırılması için hesaplanmış ve kullanılmıştır. Burada yapılan çalışmada ise imalatı yapılacak olan kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun titreşim analizi ANSYS'de Etkin Kütle Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonucu bu yöntemle göre etkin olan modlar ve doğal frekanslar bulunmuştur. Böylece bu etkin frekanslar ile çalışma istasyonunda çalışan ekipmanların uyarma frekansları ile çakışma durumları kontrol edilmiştir. Ayrıca kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun baş, orta ve son konumdaki durumları için ANSYS'de ayrı ayrı Modal analizleri yapılmış böylece farklı çalışma konumlarındaki değişimler karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Modal analiz doğrusal elastik yapıların titreşim özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu analiz işlemi bir yapının doğal frekanslarını ve normal modlarını hesaplar. Modal analiz, tüm dinamik analizlerin en temelidir ve diğer analizlerden önce yapılması önerilir. Doğal frekanslar ve modlar bir yapının en önemli özelliklerinden bazılarıdır; yapının nasıl tepki vereceğini belirlerler. Bu teknik, yapının titreşim davranışını belirlemek için kullanılır ve doğal frekans, mod şekli, mod katılım etkeni, etkin kütle ve modal gerilim dağılımını kapsar. Hareketin genel denklemi; Denklem 1 ile ifade edilir (Kelly 1993).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

Denklem 1'de, M ; kütle, $\ddot{x}$; ivmeyi, C ; sönümlemeyi, $\dot{x}$; hızı, K ; katılığı, x ; yer değiştirmeyi ve $f(t)$; dış yükü temsil etmektedir. Serbest ve sönümlememiş titreşim için basitleştirilmiş doğrusal hareket; Denklem 2 ile verilir.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

Yapının her noktasının harmonik hareket yaptığı varsayılır. Bu hareket basit bir yaylı kütle sisteminin

salınımı; Denklem 3 ile verilen genlik, frekans ve faz açısı ile tanımlanan periyodik bir hareket olur.

$$x = A \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

Denklem 3'te A ; genliği, ω ; açısal frekansı, t ; zamanı ve θ ; faz açısını temsil etmektedir. Yapının her noktası için harmonik hareket varsayıldığına göre iki bilinmeyen; yer değiştirme ve ivme olan Denklem 2'yi harmonik bir formatta ifade etmek gerekir. Yer değiştirme; Denklem 4 ile yapının her noktası için tanımlanır.

$$\{x\} = \{A\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (4)$$

İvme; zamana göre yer değiştirmenin iki türevi alınarak Denklem 5 olarak elde edilir.

$$\{\ddot{x}\} = -\omega_i^2 \{A\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (5)$$

Denklem 4 ve 5'teki yer değiştirme ve ivmenin harmonik ifadeleri Denklem 2'de yerlerine konularak Denklem 6 elde edilir.

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{A\}_i = \{0\} \quad (6)$$

Denklem 6 tipik bir özdeğer problemidir. Burada ω_i ; özdeğer ve $\{A\}_i$; özvektör olmaktadır. Her ikisini bulmak için matrisin determinantı sıfıra eşitlenir ve çözüm alınır.

$$\det([K] - \omega_i^2 [M]) = 0 \quad (7)$$

Titreşimin diğer iki önemli özelliği ise Katılım Etkeni ve Etkin Kütlelerdir. Mod Katılım Etkeni, Denklem 8 ile ifade edilir (Vysoký 2017).

$$\gamma_i = \{A\}_i^T [M] \{D\} \quad (8)$$

Denklem 8'de $\{A\}_i$; mod şekillerini, $[M]$; kütle matrisini, $\{D\}$; uyarma yönü vektörünü temsil etmektedir. $\{D\}$; varsayılan birim yer değiştirme vektörüdür ve küresel kartezyen yönlerin her birindeki uyarılma yönüne ve bu eksenlerin her biri etrafındaki dönüşü bağlıdır. Etkin Kütle Denklem 9 ile ifade edilir (Vysoký 2017).

$$M_{e,i} = \gamma_i^2 \quad (9)$$

Mod Katılım Etkeninin karesi Etkin Kütleyle eşittir. Mod Katılım Etkeni ve Etkin Kütle, her mod için her yönde hareket eden kütle miktarını ölçer. Bir yöndeki yüksek değer, modun o yöndeki kuvvetler tarafından uyarılacağını gösterir. Priestley vd. (1996) göre Etkin Kütle Katılım etkeni analizindeki katılım ölçütü; genellikle uyarılma yönünde en az %80 ila %90 kümülatif kütle katılımını gerektirir. Bununla birlikte Modların ayrı ayrı Etkin Kütleleri toplamı sistem kütlelerinin %1'inden %5'ne kadar aştığı durumda bu Modlar genellikle önemli olarak kabul edilir.

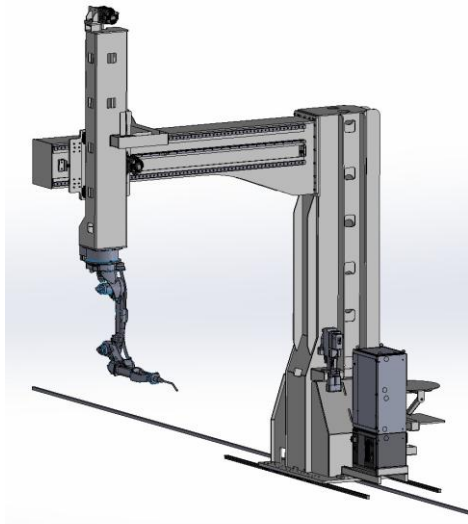
AYMAS firması imalat süreçlerinde kullanılmak üzere, kaynak robotu köprü çalışma istasyonu imalatını kendi

imkanları ile gerçekleştirmiştir. Firma tarafından imalatı yapılan bu kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun destek sütunu; 4500 mm, taşıma kolu boyu; 3750 mm ve hareketli dikey eksen kol boyu; 2710 mm ölçülerindedir. Kaynak robotu köprü çalışma istasyonu imalatı; St 37-2 (S235JRG2 – 1.0038) çelik malzemesinden yapılmış olup, malzeme mekanik özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur (İnt. Kyn. 3).

Çizelge 1. St 37-2 çelik malzeme mekanik özellikleri

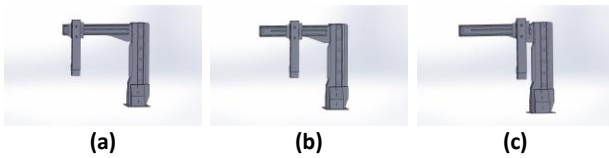
Çelik	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
St 37-2	7850	250	460

Burada yapılan çalışmada bu kaynak robotunun Şekil 2’de gösterilen üç eksenli köprü tipi çalışma istasyonunun titreşim analizi, ANSYS’de Etkin Kütle Yöntemi yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2. Kaynak robotu köprü çalışma istasyonu

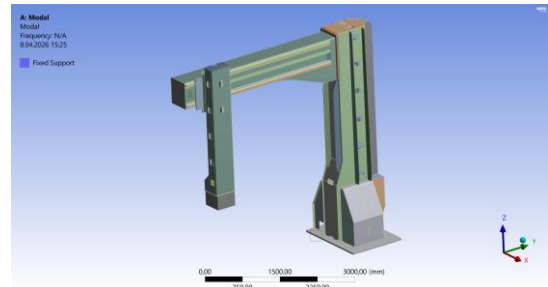
Bu amaçla kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun Şekil 3’de gösterilen baş, orta ve son konumdaki durumları için ANSYS’de ayrı ayrı Modal analizleri yapılmıştır.



Şekil 3. Köprü çalışma istasyonu dikey eksen kolu (a) baş, (b) orta ve (c) son konum

Xie vd. (2018) çalışmalarında ağ doğruluğunu değişken olarak ele alarak açık deniz platformu için kullanılan bir kaynak makinesinin çeşitli sonlu eleman modellerini oluşturmuşlardır. Analiz sonuçlarını karşılaştırmak için modal analiz aracı olarak ANSYS analiz yazılımını kullanmışlardır. Burada yapılan çalışmada söz konusu çalışmadaki sonlu eleman modeline benzer bir titreşim analizi yapılmıştır.

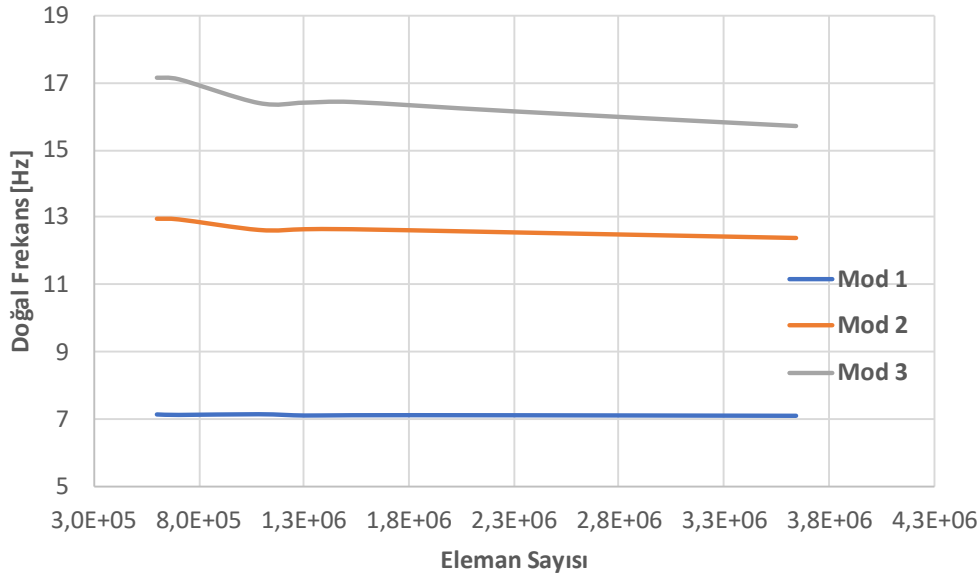
İlk olarak kaynak robotu köprü sisteminin Solidworks’te hazırlanmış üç boyutlu katı modeli basitleştirilmiş ve ANSYS çalışma ortamına aktarılmıştır. Analiz sistemi olarak Modal analiz seçilmiştir. Ayrıca titreşim analizinde sönümlenme olmadığı kabul edilmiştir. Basitlik için kaynak robotu köprü çalışma istasyonu parçaları arasındaki tüm temas noktaları "Bağlı (Bonded)" olarak bırakılmıştır. Kaynak robotu köprü sisteminin yerdeki hareket rayları ile olan bağlantısı "Sabit Destek (Fixed Support)" olarak alınmıştır. AYMAS firması bu sistemde kaynak robotu olarak Yaskawa AR2010 kaynak robotunu kullanmıştır (İnt. Kyn. 4). Bu kaynak robotunun kütlesi 260 kg’dır. Solazzi ve Zrnic (2025) yaptıkları çalışmada yükleyici vinç tarafından oluşturulan kuvvetlerin modelde benzetimini uygulamak için taşıyıcı köprü tipi vincin üzerine bir "blok" uygulayarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada da benzer şekilde kaynak robotu kütlesinin sisteme uyguladığı kuvvetin benzetimini yapmak için dikey eksenin en alt noktasına blok şeklinde tek parça sabit kütle olarak eklenmiştir. Şekil 4’te bu sabit kütle ve ANSYS’de yapılan Modal analizin sınır şartları görülmektedir.



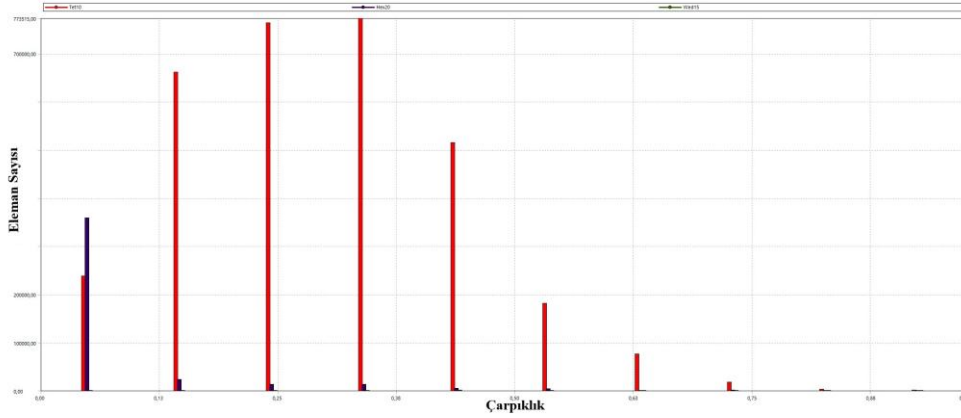
Şekil 4. ANSYS modeli sınır şartları

Bu çalışmada Ağ oluşturma yöntemi "Otomatik (Automatic)" olarak seçilmiş ve Eleman Sırası için "Genel Ayar (Global Setting)" kullanılmıştır. Ayrıca "Yumuşatma (Smoothing)" ayarı "Yüksek (High)" olarak belirlenmiştir. Uygun ağ boyutunu belirlemek için, eleman sayısı 6,0E5 ile 3,6E6 arasında değiştirilerek Modal analizde ilk üç modun doğal frekansları elde edilmiştir. Şekil 5’de bu doğal frekansların eleman sayısına göre değişimi gösterilmiş ve yakınsama için yaklaşık 1,3E6 elemanın yeterli olduğuna karar verilmiştir.

Daha sonra çok bölgeli ağ yapısı oluşturmak için, kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun taşıma kolu ve dikey eksen kolu hareket rayları parçalarının ağ boyutu 9 mm, kalan parçaların ise 16 mm seçilmiştir. ANSYS’te "Ağ Ölçütü (Mesh Metrics)"; "Çarpıklık (Skewness)" olarak ayarlanmıştır. "Ağ Kalitesi (Mesh Quality)" değeri; Çarpıklığın en büyük değeri olan 0,948 olarak bulunmuştur. Şekil 6’da Eleman Sayısına göre Çarpıklık dağılım grafiği verilmiştir. Modelin ağ yapısı 1.304.709 adet eleman ve 3.032.391 adet düğümden oluşmaktadır.



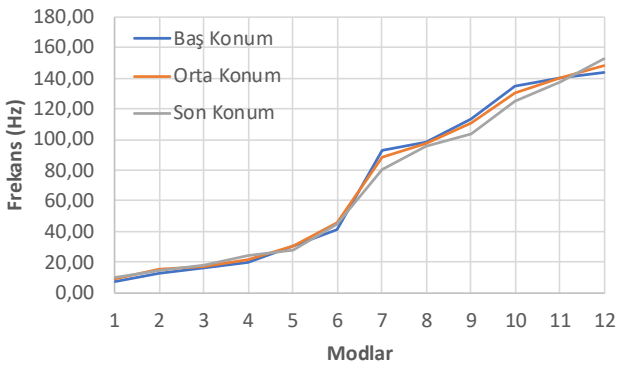
Şekil 5. Ağ yapısı yakınsama (bağımsızlık) analizi



Şekil 6. Ağ Kalitesi (Eleman Sayısı-Çarpıklık) dağılım grafiği

3. Bulgular

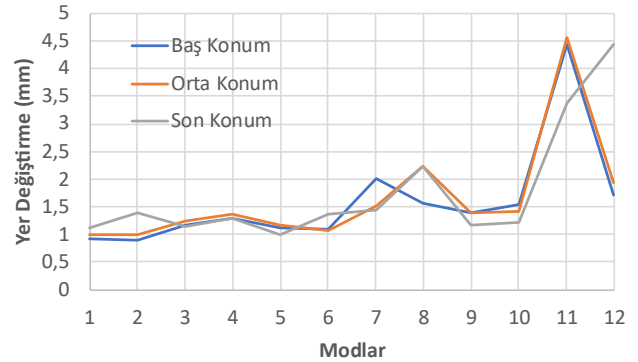
ANSYS modelinde kaynak robotu köprü sisteminin dikey eksen kolunun baş, orta ve son konumu için Modal analizler yapıldıktan sonra 12 mod için bulunan doğal frekans değerleri Şekil 7'de ve yer değiştirme değerleri Şekil 8'de bir arada gösterilmiştir.



Şekil 7. Analizler sonucu bulunan doğal frekanslar

Şekil 7 incelendiğinde Mod 1 ile 6 arasında doğal frekanslar 7 Hz'den 45 Hz'e kadar artış göstermektedir. Mod 6'dan sonra frekans değerleri hızlı bir şekilde

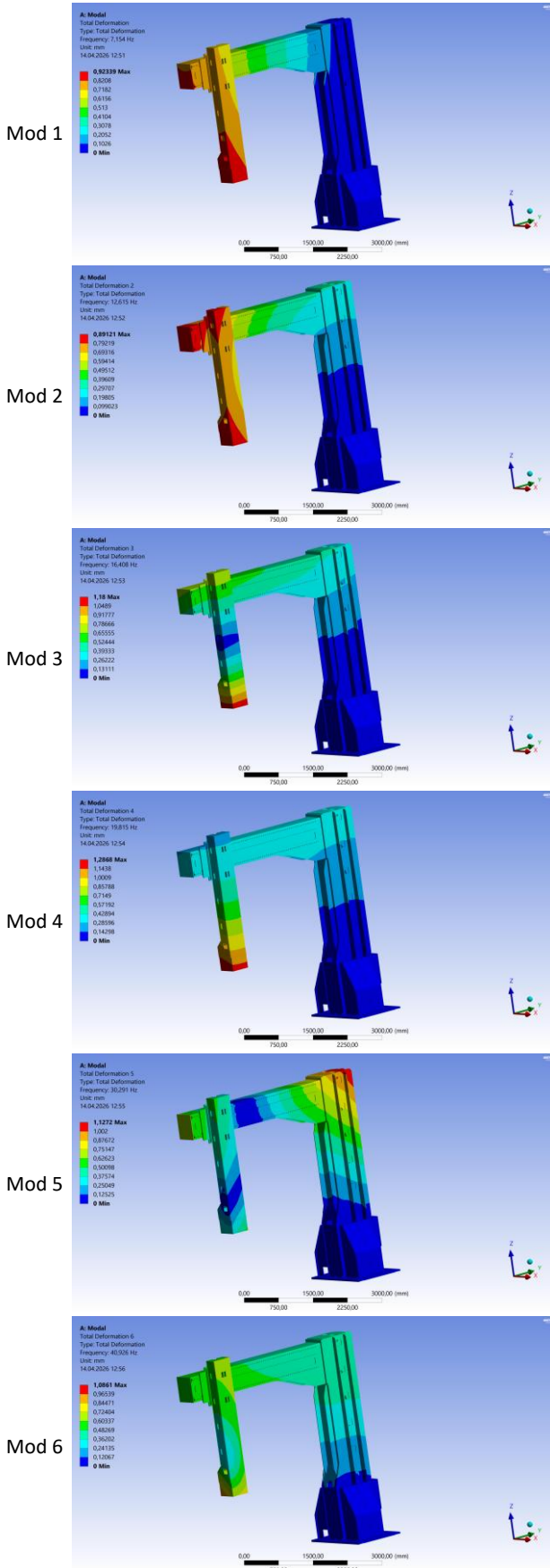
artmakta, Mod değeri arttıkça 90 Hz'den 150 Hz'e kadar çıkmaktadır. Şekil 8 incelendiğinde Mod 1 ile 6 arasında yer değiştirme değerleri 0,90 mm ile 1,40 mm arasında değişmektedir. Mod 6'dan Mod 12'ye kadar olan modlarda değerler artmakta, daha sonra Mod 11 ve 12'de ani bir artış göstermektedir.



Şekil 8. Analizler sonucu bulunan yer değiştirme değerleri

Analiz sonucunda yeterli sayıda frekans elde etmek için yapılan analizlerde 12 mod için sonuçlar çıkarılmıştır. Örnek olarak Şekil 9'da ANSYS modelinde kaynak robotu köprü sisteminin dikey hareket kolunun baş konumunda

Mod 1-6 için Mod Şekilleri görülmektedir. Ayrıca Çizelge 2’de bu Mod Şekillerinin özellikleri açıklanmıştır.



Şekil 9. Baş konumu Mod 1-6 için Mod Şekilleri

Çizelge 2. Baş konumu Mod 1-6 için Mod Şekilleri özellikleri

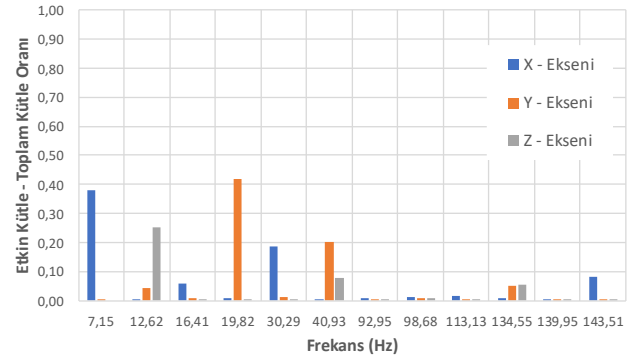
Mod	Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	Titreşim Hareketi
1	7,15	0,92	+X eksen yönünde eğilme
2	12,62	0,89	-Z eksen yönünde eğilme
3	16,41	1,18	Y eksen etrafında burulma
4	19,82	1,29	+Y eksen yönünde eğilme
5	30,29	1,13	Y eksen etrafında burulma
6	40,93	1,09	-Y eksen yönünde eğilme

Solazzi ve Zrnic’in (2025) yaptıkları çalışmada önerdikleri Denklem 10’a göre; en büyük yer değiştirme (δ) değerinin, köprü çalışma istasyonu elemanlarının uzunluğuna göre belirli bir değerden daha düşük olması gerekir.

$$\delta \leq \frac{L}{250} \quad (10)$$

Buradaki çalışma istasyonu taşıma kolu (3750 mm) için bu değer; 15 mm ve hareketli dikey eksen kolu (2710 mm) için; 10,84 mm olmaktadır. Şekil 8’de verilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde en yüksek yer değiştirme değerinin bu sınırların altında kaldığı ve çalışma istasyonunun güvenli olduğu görülmektedir.

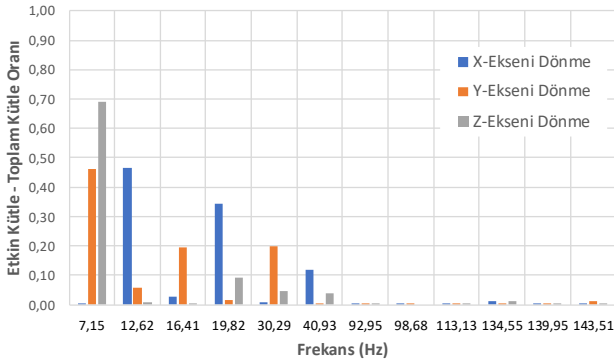
Kaynak robotu köprü çalışma istasyonun dikey eksen kolunun baş, orta ve son konumları için bulunan 12 Mod’dan hangilerinin en fazla öneme sahip olduğunu görmek için ANSYS tarafından tablo olarak verilen Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları bir araya getirilmiştir (İnt. Kyn. 5). Bu amaç ile baş konumu için X, Y ve Z eksenleri yönlerindeki Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Baş konumu için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları

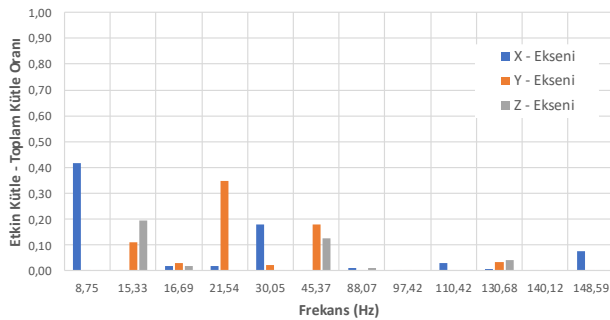
Şekil 10 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonun dikey eksen kolunun baş konumunda iken X-eksen yönünde Mod 1 (7,15 Hz) ve Mod 5 (30,29 Hz)’in etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-eksen yönünde Mod 4 (19,82 Hz) ve Mod 6 (40,93 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-eksen yönünde Mod 2 (12,62 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle bu Modlar söz konusu eksen yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir. Ayrıca kaynak robot kolunun köprü çalışma istasyonun dikey eksen kolunun baş konumu için X, Y ve Z eksenleri

etrafında dönme hareketi için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Baş konumu için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları

Şekil 11 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun baş konumunda iken X-ekseni etrafında dönmesi için Mod 2 (12,62 Hz), Mod 4 (19,82 Hz) ve Mod 6 (40,93 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-ekseni dönme yönünde Mod 1 (7,15 Hz), Mod 3 (16,41 Hz) ve Mod 5 (30,29 Hz)’in etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-ekseni etrafında dönme yönünde Mod 1 (7,15 Hz) ve Mod 4 (19,82 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Bu Modlar söz konusu eksen etrafında dönme yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir.



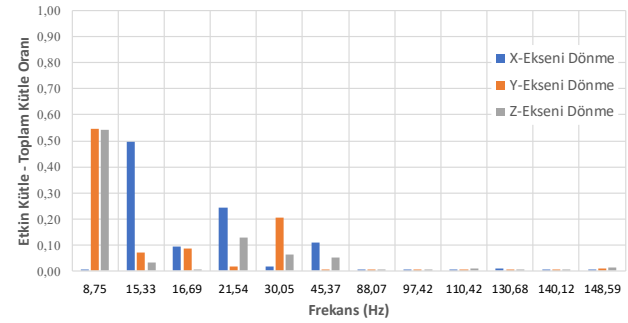
Şekil 12. Orta konum için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları

Orta konum için X, Y ve Z eksenleri yönlerindeki Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 12’de verilmiştir. Yine orta konum için X, Y ve Z eksenleri etrafında dönme hareketi için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 13’de gösterilmiştir.

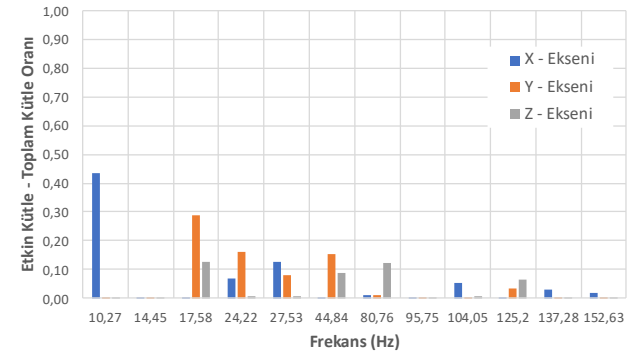
Şekil 12 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun orta konumunda iken X-ekseni yönünde Mod 1 (8,75 Hz) ve Mod 5 (30,05 Hz)’in etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-ekseni yönünde Mod 4 (21,54 Hz) ve Mod 6 (45,37 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-ekseni yönünde Mod 2 (15,33 Hz) ve Mod 6 (45,37 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Bu Modlar söz konusu eksen yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir.

Şekil 13 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun orta konumunda iken X-

ekseni etrafında dönmesi için Mod 2 (15,33 Hz) ve Mod 4 (21,54 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-ekseni dönme yönünde Mod 1 (8,75 Hz), Mod 5 (30,05 Hz)’in etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-ekseni etrafında dönme yönünde Mod 1 (8,75 Hz) ve Mod 4 (21,54 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Bu Modlar söz konusu eksen etrafında dönme yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir. Son konum için X, Y ve Z eksenleri yönlerindeki Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 14’de verilmiştir.

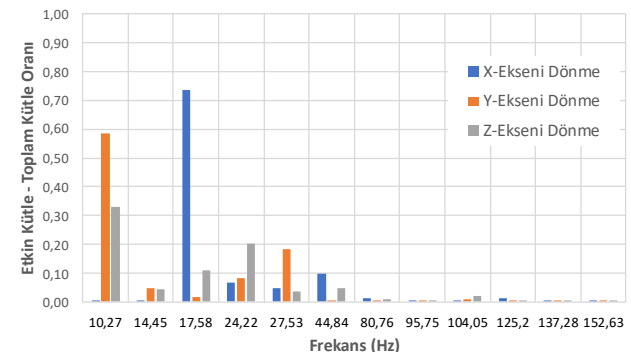


Şekil 13. Orta konum için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları



Şekil 14. Son konum için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları

Şekil 14 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun son konumunda iken X-ekseni yönünde Mod 1 (10,27 Hz) ve Mod 5 (27,53 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-ekseni yönünde Mod 3 (17,58 Hz), Mod 4 (24,22 Hz) ve Mod 6 (44,84)’nin etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-ekseni yönünde Mod 3 (17,58 Hz), Mod 6 (44,84 Hz) ve Mod 7 (80,76 Hz)’nin etkili olduğu görülmektedir. Bu Modlar söz konusu eksen yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkıyı vermektedir.



Şekil 15. Son konum için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları

Yine orta konum için X, Y ve Z eksenleri etrafında dönme hareketi için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranı değerleri Şekil 15’de gösterilmiştir.

Şekil 15 incelendiğinde kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun son konumunda iken X-ekseni etrafında dönmesi için Mod 3 (17,58 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Y-ekseni dönme yönünde Mod 1 (10,27 Hz) ve Mod 5 (27,53 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Diğer yandan Z-ekseni etrafında dönme yönünde Mod 1 (10,27 Hz) ve Mod 4 (24,22 Hz)’ün etkili olduğu görülmektedir. Bu Modlar söz konusu eksen etrafında dönme yönündeki şekil değiştirmeye en yüksek katkısı vermektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan çalışma ile bir sayısal yöntemin, kaynak robotu köprü çalışma istasyonu gibi modal analiz açısından karmaşık bir taşıyıcı yapının yapısal davranışına ilişkin imalat öncesinde güvenilir bir genel tahmin verebileceği gösterilmiştir. Bu makaledeki çalışma, taşıyıcı yapıların dinamik davranışlarını araştırmak için kullanılacak yöntemlerin seçilmesinde faydalı olabilir.

Bu çalışmada AYMAS firması tarafından imalatı yapılan kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun baş, orta ve son konumu için ANSYS modelinde Modal analizleri yapıldıktan sonra 12 mod için X, Y ve Z-eksenleri yönlerindeki Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları Şekil 10, 12, 14’de ve her üç konum için X, Y ve Z-eksenleri etrafında dönme için Etkin Kütle-Toplam Kütle Oranları Şekil 11, 13, 15’te gösterilmiştir.

Şekil 10-15 incelendiğinde köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun her üç konumu için benzer şekilde Mod 1 ile Mod 6 arasındaki modların etkin olduğu görülmektedir. Diğer yandan Mod 7 ile Mod 12 arasındaki modların bu sistemde her üç konum için genel olarak etkin olmadığı görülmektedir. Ayrıca kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun dikey eksen kolunun baş ve orta konumlarında genel olarak aynı Mod’lar etkin iken son konumunda etkin olan Mod’lar değişmektedir. Kaynak robotu kütlelerinin dikey eksen kolunun ucunda “blok” halinde sabit kütle olarak alınması, köprü çalışma istasyonunun titreşim davranışının bir ucu sabit bir ucu serbest olan ve bir kütle bulunan bir kirişe benzetmektedir. Dikey eksen kolunun baş konumunda (serbest en uç nokta) olması yapının katılık değerini düşürmekte en düşük doğal frekans değerleri bulunmaktadır. Dikey eksen kolunun orta ve son konumda olması katılık değerini arttırmakta ve daha yüksek doğal frekanslar gözlemlenmektedir. En yüksek doğal frekanslar, dikey eksen kolunun son konumunda bulunmaktadır. Diğer yandan Şekil 7 incelendiğinde her üç konum için bulunan doğal frekanslar arasındaki fark düşüktür. Bu duruma Şekil 2’de görülen yatay eksen

taşıma kolunun yan ve alt tarafında bulunan destek saçları sağlamaktadır. Bu saçlar yapının katılığını artırarak baş konumda bulunun sabit kütle etkisini azaltarak dikey eksen kolunun her üç konumu için yakın doğal frekanslar bulunmasını sağlamaktadır.

Uygun malzeme ve geometrik parametreler seçilerek, doğal frekanslar çalışma frekansından uzak tutulabilir ve böylece yapıların hasar görmesine neden olabilecek rezonans gibi durumlar önlenabilir (Maraş ve Bolat 2025).

Kaynak robotu köprü çalışma istasyonunun X, Y ve Z-eksen hareketlerinde Yaskawa SGM7G tipi 4,4 kW, 1500 dev/dk, 25 Hz özelliklerine sahip 3 adet elektrik motoru kullanılmıştır. Şekil 10-15 incelendiğinde etkin olan Mod’lardan herhangi birinde 25 Hz frekans değeri yoktur. En yakın değer olarak, Mod 4 (son konumda; 24,22 Hz) ve Mod 5 (baş ve orta konumda; 30 Hz, son konumda 27,53 Hz) görülmektedir. Şekil 10-15 incelendiğinde bu modların mod katılım değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Fakat yine de sistemin çalışması sırasında olası etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 16. Çalışma İstasyonu montaj çalışmaları

Diğer yandan köprü çalışma istasyonuna bağlı Yaskawa AR2010 kaynak robotu; S, L, U, R, B, T eksenlerinde olmak üzere 6 eksen hareketi yapmaktadır (İnt. Kyn. 4). Bu eksenlerdeki en büyük hareket hızları sırası ile; 210 °/s (0,5834 Hz), 210 °/s (0,5834 Hz), 220 °/s (0,6112 Hz), 435 °/s (1,2084 Hz), 435 °/s (1,2084 Hz) ve 700 °/s (1,9446 Hz)’dir. Şekil 10-15 incelendiğinde etkin olan Mod’lardan

herhangi birinde bu frekans değerleri bulunmamaktadır. Yaskawa AR2010 kaynak robotu eksen hareketlerinin neden olduğu herhangi bir rezonans sorunu görülmemektedir.

Köprü Çalışma istasyonunun imalat ve montaj çalışmaları AYMAS firması fabrikasında devam etmektedir. Destek sütunu ve taşıma kolu kaynaklı ve talaşlı imalatları tamamlanmış olup astar ve son boyaları yapılmıştır. Şekil 16'da görüldüğü gibi imalatları tamamlanan parçaların montaj çalışmaları devam etmektedir. Tüm imalatlar ve kaynak robotu ve eksen hareket motorları montajları tamamlandıktan sonra yazılım ve test çalışmalarına geçilecektir. Gelecekte yapılacak harmonik analiz ve zorlanmış titreşim analizi çalışmalarının bu test çalışmaları ile karşılaştırılması düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Analiz, Görselleştirme, Yazma, Denetleme.

Yazar 2: Metodoloji, Araştırma, Analiz, Görselleştirme, Yazma, Doğrulama.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir. Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

5. Kaynaklar

Ahmad, M. S., Jamil, M., Iqbal, J., Khan, M. N., Malik, M. H. and Butt, S. I., 2016. Modal analysis of ship's mast structure using effective mass participation factor. *Indian Journal of Science and Technology*, **9**, 1-5. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i21/94830>

Arena, R., Giuliano, M., Girault, N. and Roy, N., 2018. *Estimation of effective masses and interface loads by complementary vibration test*. Proceedings of the 15th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET 2018), Noordwijk, Netherlands.

Fang, C., Xu, J., Le, Y. and Wang, Z., 2025. *Research on Vibration Suppression Control Strategy of a Gantry-type Nine-axis Redundant Degree of Freedom Manipulator*. 8th International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation, Nanjing, China, 1-13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3019/1/012049>

Georgiev, Z., 2025. *Model vibration study of Macpherson type suspension using effective mass factor*. 24th

International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings, Jelgava, Latvia, 319-324.

<https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF070>

Gök, G. V. ve Afyon, Ç., 1999. *Kaynak uygulamalarında robot teknolojisi*. Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, Ankara, Türkiye, 221-230.

Heo, Y. H., Sun, J.O., Kim, G. H. and Choo, Y., 2023. Definition and calculation method of modal effective mass of asymmetric fluid-structure interaction system for seismic analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, **55**, 4307-4316. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.08.010>

Kelly, S. G., 1993. *Fundamentals of Mechanical Vibrations*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York.

Maraş, S., and Bolat, Ç., 2025. Free vibration analysis of 3D-printed ABS, PET-G and PLA curved beam: effects of opening angle, curvature radius, and part thickness. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, **25**, 206-214. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1519102>

Mayes, R. L., Schoenherr, T. F., Blecke, J. and Rohe, D. P., 2013. *Efficient Method of Measuring Effective Mass of a System*. Topics in Experimental Dynamic Substructuring, Volume 2. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, New York, USA, 311-320. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6540-9_25

Miao, L., Liao, C., Zhang, D., Liang, H. and Wang, J., 2024. *Structural Design and Optimization of Small Gantry CNC Milling Machine*. 3rd International Conference on Aerospace, Aerodynamics and Mechatronics Engineering, Nanjing, China, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2820/1/012114>

Nieto, M. G., ElSayed, M. S. A. and Walch, D., 2018. *Modal participation factors and their potential applications in aerospace: a review*. Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress, Toronto, Canada, 1-6. <http://doi.org/10.25071/10315/35254>

Patkar, R. and Joladarashi, S., 2025. Modal and random vibration analysis of pneumatic actuator of wastegate turbocharger using finite element method. *Materials Research Proceedings*, **49**, 263-272. <https://doi.org/10.21741/9781644903438-26>

Priestley, M. J., Seible, F. and Calvi, G. M., 1996. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley & Sons, Inc., New York. <https://doi.org/10.1002/9780470172858>

- Solazzi, L. and Zrnić, N., 2025. Modal analysis of gantry crane and superstructure made by steel and aluminium alloy. *FME Transactions*, **53**, 225–232. <https://doi.org/10.5937/fme2502225S>
- Vasiljević, R. R., 2022. Comparison of the Continuous Model and the Finite Element Model of the Gantry Crane Carrying Structure for Modal Analysis. *Vojnotehnički Glasnik*, **70**, 696–719. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36051>
- Vysoký, R., 2017. Current capabilities of modal analysis of aircraft propeller in ANSYS mechanical environment. *Advances in Military Technology*, **12(1)**, 33–47. <https://doi.org/10.3849/aimt.01160>
- Wylie, M. and Barilaro, L., 2023. The application of modal effective mass for PCB friction lock compliance against spacecraft launch random vibration spectrum. *Materials Research Proceedings*, **37**, 601–605. <https://doi.org/10.21741/9781644902813-131>
- Xie, J., Sun, D., Xu, C. and Wu, J., 2018. The influence of finite element meshing accuracy on a welding machine for offshore platform's modal analysis. *Polish Maritime Research*, **25**, 147–153. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0124>
- Yumurtacı, S. ve Mert, T., 2009. Ark kaynak robotunun sahip olması gereken özellikler ve robotik ark kaynak hücresinin elemanları. *Mühendis ve Makina Dergisi*, **50**, 2–7.

İnternet Kaynakları

- 1-Magmaweld Firması Kaynak Robotları internet sayfası, <https://www.magmaweld.com.tr/panasonic-g4-kaynak-robotlari-r-66>, (17.01.2026)
- 2-AYMAS Geri Dönüşüm Makineleri Firması internet sitesi, <http://www.aymasmakina.com>, (20.01.2026)
- 3-SteelNumber: European Steel and Alloy Grades, https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_e_u.php?name_id=848, (21.01.2026)
- 4-Yaskawa AR2010 Kaynak Robotu internet sayfası, https://www.yaskawa.com.tr/robots/robot/kaynak-robotlari/productdetail/product/ar2010_736, (20.01.2026)
- 5-ANSYS Innovation Courses, Modal Analysis, Mode Participation Factor and Effective Mass, <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/modal-analysis/lessons/mode-participation-factor-and-effective-mass-lesson-4>, (15.01.2026)