



# HİDRO-PNÖMATİK SÜSPANSİYON TEST ÜNİTESİNİN TASARIMI, İMALATI VE TESTLERİ

DESIGN, MANUFACTURING AND TESTING OF HYDRO-PNEUMATIC SUSPENSION TEST UNIT

**Kahraman Küçük**  
**İlyas Genç**  
**Ferhan Fıçıcı**  
**Fatih Mehmet Botsalı**

## ÖZET

Bu çalışmanın konusu, özellikle yüksek tonajlı iş makinalarında son yıllarda yaygın olarak karşımıza çıkan Hidro-pnömatik Süspansiyon (HPS) sistemidir. Bildiride, ülkemizde ilk kez yerli sermaye ile imalatını gerçekleştirdiğimiz Hidro-pnömatik süspansiyon test ünitesinin özellikleri ve kabiliyetleri anlatılmıştır. Test ünitesi taşıt dinamiğinin en temel yapı taşı olan çeyrek taşıt modelini temel almaktadır. Test ünitesi için farklı kütlelere sahip sistemlerde en uygun süspansiyon sistem parametrelerinin çıkarılmasına yönelik ve parametrik bir altyapı oluşturulmuştur. Sistemin girdileri bir iş makinası üzerinden toplanan yol verileri ile sağlanmış olup, hem yol hem de yol dışı koşullarını temsil edecek yol verileri toplanmıştır. Elde edilen veriler ile simülasyonlar yapılmış ve sistemin sağladığı konfor değişimi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidro-pnömatik Süspansiyon, Çeyrek Araç Modeli, Tasarım, Test, Modelleme.

## ABSTRACT

The subject of this study is the Hydro-pneumatic Suspension (HPS) system, which has been commonly used especially in heavy construction machines in recent years. The features and capabilities of the hydro-pneumatic suspension test unit, produced for the first time in our country with domestic capital, are presented. The test infrastructure has been designed parametrically, and it is suitable for the extraction of the most suitable suspension system parameters for systems with different masses. The test unit was based on the quarter vehicle model, which is the basic building block of vehicle ride dynamics. Road data to represent on-road and off-road conditions are collected using an instrumented construction machine. The comfort change of the system was examined by simulations using the road data collected.

**Key Words:** Hydro-pneumatic suspension, Quarter Car Model, Design, Testing, Modeling.

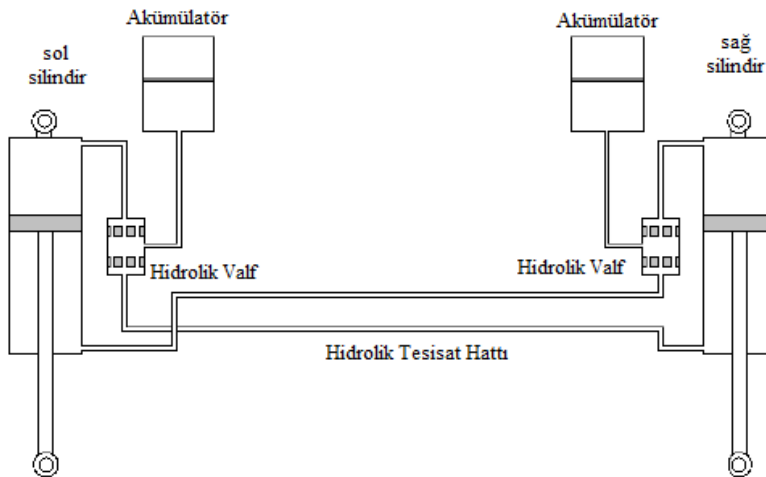
## 1. GİRİŞ

Taşıt dinamiği modellerinde süspansiyon etkilerini inceleyen çalışmalarda, çeyrek taşıt modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu model, yoldan gelen girdiler sonucu oluşan ve sürüş konforunun belirlenmesinde temel veri olan araç asılı kütlelerinin farklı yol yüzeylerinde oluşan ivmelerinin incelenmesinde kullanılmaktadır. Benzer şekilde yalpa veya yunuslama dinamiklerini içeren iki serbestlik dereceli modeller ve tüm süspansiyon sistemini içeren titreşim modelleri de aynı amaca yönelik olarak kullanılmaktadır [1].

Hidro-pnömatik süspansiyon sistemi özellikle iş makinelerinde ve askeri araçlarda daha yaygın olmakla beraber, binek araçlarda da kullanılmakta ve çeşitli araçlarda farklı yapı ve özelliklere sahip olarak karşımıza çıkmaktadır [2].

Hidro-pnömatik sistemlerde, yaylanan kütle ile süspansiyon sisteminin etkin yay sertliği artmaktadır. Bu sayede, farklı yüklerde süspansiyon sisteminin doğal frekansı çok fazla değişmemektedir. Klasik süspansiyon yapılarında ise yaylanan kütle ile doğal frekansta kayma meydana gelmektedir. Bu durum sürüş konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Hidro-pnömatik süspansiyonlarda aracın yönelim denetimini yapma imkanı da bulunmaktadır. İlave unsurlar ile süspansiyon sertliğinin ve sönümlenme katsayısının değişken hale getirilmesi de mümkündür. Bu özellikleri ile hidro-pnömatik süspansiyonlar, aktif süspansiyon sistemlerinde tercih edilir olmaktadır. Bu avantajların yanında, mekanik süspansiyonlara göre daha karmaşık yapıda olmaları, ilk maliyetlerinin çok olması gibi dezavantajları da beraberlerinde getirmektedir [2].

HPS birçok farklı yapıda karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1 de görüldüğü üzere, en temel sistem hidrolik silindireler, akümülatörler ve hidrolik valflerden oluşmaktadır. Klasik süspansiyon sistemlerindeki damper ve yay etkisini hidro-pnömatik süspansiyon sisteminde sırasıyla hidrolik silindir ve akümülatörler sağlamaktadır. Aynı aks üzerinde yer alan sağ ve sol süspansiyonlar aralarında çapraz bağlantı mevcuttur. Kapalı çevrimdeki yağ miktarı azaltılıp artırılarak silindir seviyesi ayarlanabilmektedir. Süspansiyon sisteminde kullanılan silindirlerin içerisinde bulunan mesafe duyucuları sayesinde süspansiyon seviyelerinin eşit olması sağlanmaktadır. Her bir aks üzerindeki silindirler çapraz bağlanmış olup, diğer akslardaki sistemlerle paralel çalışmaktadır. Hidrolik yağın kontrolü hidrolik valflerle sağlanmaktadır. Bu valfler sayesinde, aktif durumda iken süspansiyon sisteminin kilitlemesi mümkün olmakta, böylece yaylanan kütle hareketi kısıtlanmaktadır [3, 4, 5].



**Şekil 1.** Hidro-pnömatik süspansiyon sisteminin şematik gösterimi

Literatürde birçok örneği bulunan HPS sisteminin test düzeneği için amaç, en az maliyetle sistemin karakteristiğini ortaya çıkarılması olarak belirlenmiştir. Böylece farklı ağırlıklara ve konstrüksiyona sahip sistemler için yay ve damper karakteristikleri belirlenmiş olacaktır. Ayrıca diğer ana parametrelerin yapı üzerindeki etkisini ortaya çıkartılabilecektir. Farklı yol girdilerine karşı yapının tüm özelliklerinin incelenmesini hedeflemiş olan bu çalışmada, servo silindirelerle farklı ağırlıkların sisteme otomatik olarak uygulanma imkanı sağlanmıştır. Ancak bu tip sistemler çok pahalıdır ve uygulamada kontrolü zordur [4].

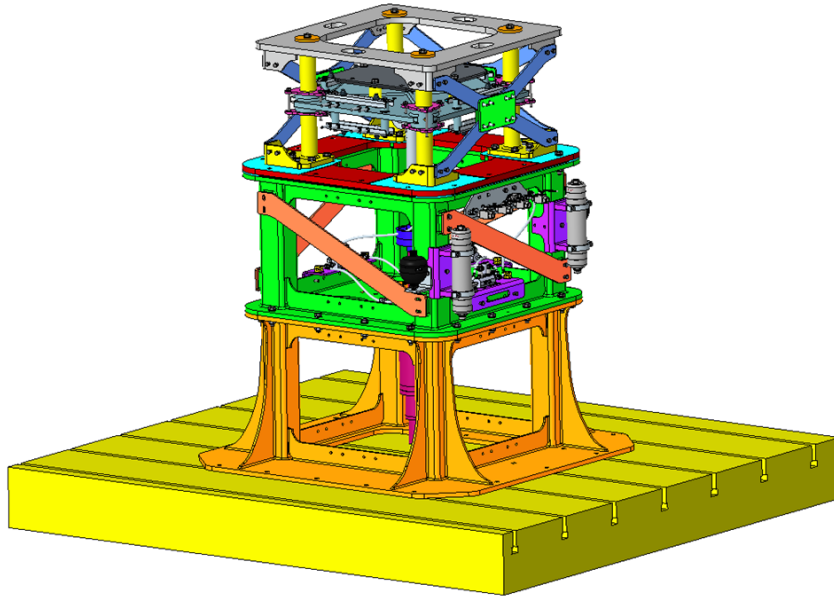
İş makineleri sektöründe yaygınlaşan hidro-pnömatik süspansiyon sistemi hakkında literatürde birçok çalışma mevcuttur. Mevcut uygulamanın yükleyici makinelerin üzerinde uygulamasında olduğu bilinmektedir. Bu tip uygulamalar doğrudan operatör konforunu yukarı çıkartmak amacıyla olduğu bilinmektedir. Farklı yol seviyeleri ve sürüş hızları için süspansiyon parametrelerinin aktif ayarını gerçekleştirmek için hidro-pnömatik süspansiyonun optimize etmişler ve parametrelerine dayalı bir bulanık kontrolör kurmuşlardır. Elde ettikleri veriler ışığında ivmenin RMS değerleri aktif hale

getirildikten sonra 46.2% oranında azalmalar görmüşlerdir. Hidro-pnömatik süspansiyon parametrelerinin bulanık kontrolünün, tekerlekli yükleyicilerin konforunu etkili bir şekilde artırabileceğini vurgulamışlardır. PSO algoritması, farklı yükleyici koşulları altında dikey ivmeyi en aza indirebilen hidro-pnömatik süspansiyon parametrelerinin elde edildiği modeli optimize etmek için kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Süspansiyon parametrelerinin farklı yol seviyeleri ve sürüş hızları altında aktif olarak ayarlanmasını gerçekleştirmek için hidro-pnömatik süspansiyonun optimize edilmiş parametrelerine dayalı olarak bulanık bir kontrolör kurmuşlardır. Son olarak, süspansiyon parametrelerinin aktif olarak ayarlanmasının farklı sürüş koşullarında dikey titreşim üzerindeki etkisini analiz etmek için sanal bir prototipleme modeli oluşturmuşlar ve ilgili çıktıları elde etmişlerdir.

Bu çalışmada ele alınan HPS sisteminin tasarımı, imalat aşaması, yol verilerinin toplanması ve HPS test ünitesinden alınan yol verisi ile deplasman çıktılarının bir kısmı sunulmuştur.

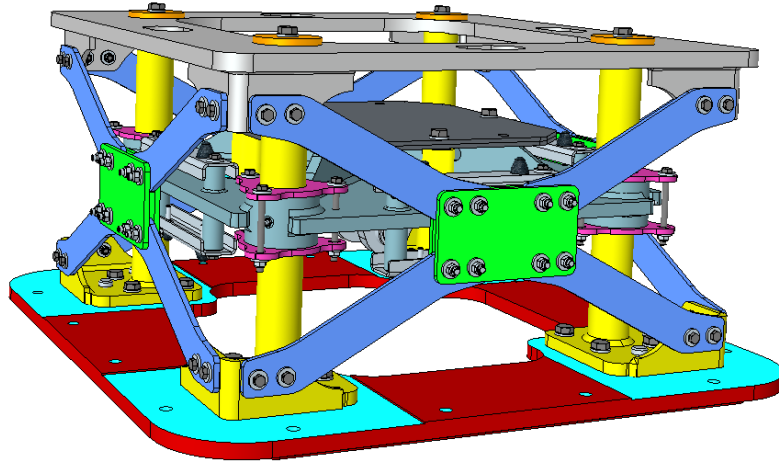
## 2. HPS SİSTEMİNİN TASARIMI VE İMALATI

HPS test sisteminin tasarlanmasında, araç sürüş konforuyla ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılan çeyrek araç modeli temel alınmıştır. Test sisteminin yapısal tasarımı ticari bir CAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, yapının doğal frekanslarının testlerde kullanılacak yol girdilerin frekans aralığı dışında kalması tasarım parametrelerinin belirlenmesinde önemli kriter olarak göz önüne alınmıştır. Bunun sağlanması için yapıda kesitler ve konstrüksiyon ile yapısal analiz çıktılarına göre değiştirilmiştir. Tasarım aşamasında yapılan yapısal analizler sonucu beklenen tasarım kriterlerini sağlayan sistem oluşturulmuş ve üretimine karar verilmiştir. HPS test sisteminin yapısal CAD modeli Şekil 2 de gösterilmiştir.



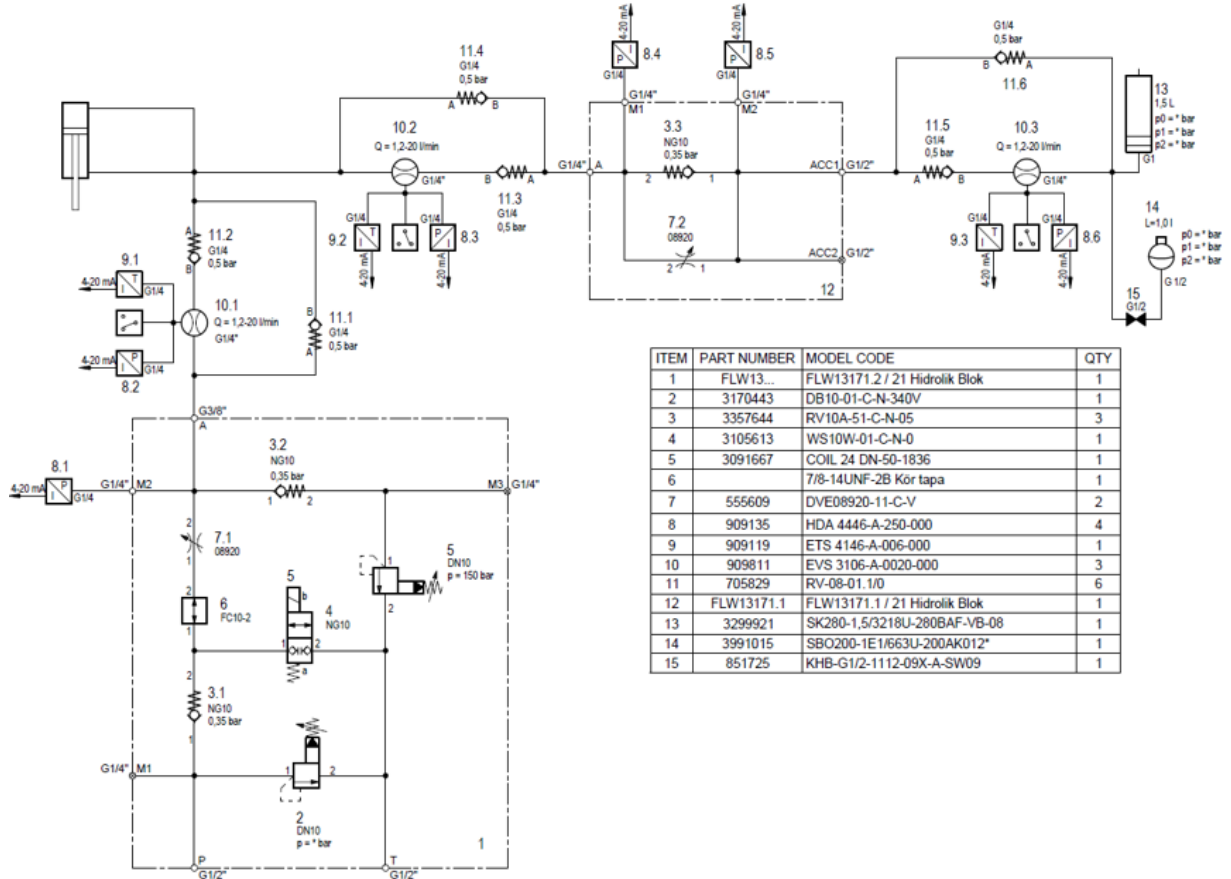
Şekil 2. Test ünitesi yapısal tasarımının CAD modeli

Tasarımda önemli parametrelerden biri de yol girdilerinin uygulanacağı silindirlerin çalışma alanıdır. Genellikle iş makinelerinde silindir strok uzunluğu 250 mm olduğu için çalışma alanı  $\pm 125$  mm olarak alınmıştır. Bu kısmın modellenmesi tasarımın en kritik kısmı olup detayı Şekil 3 te verilmiştir. Yapıdaki piston çapının etkisini görmek için üç farklı silindir imal edilmiş, tasarım parametrik olarak incelenmiş ve en uygun çözüm ile yapı tasarımı tamamlanmıştır.



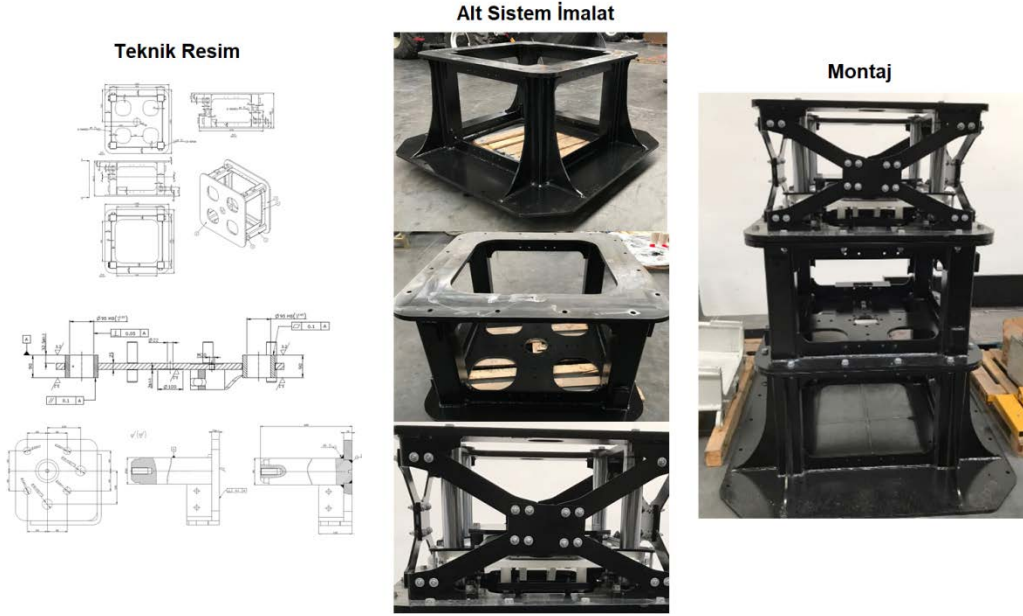
Şekil 3. Hareketli kütle bağlantısı

Hidrolik sistem tasarımı da yapının kontrol edilebilir olması göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Sistemin hidrolik yapı anlamında en önemli parametrelerinden birisi akümülatörün performansı olduğundan dolayı bu yapı hızlı test sonuçları alınması ve değiştirilebilir olması kapsamında küresel vanalar ile desteklenmiştir. Devrenin son hali aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. Hidrolik şema

Hidrolik ekipmanların tedariki ve konstrüksiyonun imalat süreçleri titizlikle yürütülüp toleranslar dahilinde üretilip montajlanması yapılmıştır. İmalat sürecini anlatan görseller Şekil 5 de sunulmuştur. Çelik konstrüksiyon imalatı gerçekleştirdikten sonra sistemin hidrolik bağlantıları yapılarak montajlama tamamlanmıştır.



**Şekil 5.** Üretim aşaması ve nihai çelik konstrüksiyon görseli

HPS test ünitesinin montajlanmış en son durumu Şekil 6 da gösterilmiştir. Bu sisteme silindir montajlanarak yol girdileri uygulanmıştır. Sisteme montajlanan silindir 50 Hz e kadar cevap verebilmektedir.



**Şekil 6.** Montajlanmış HPS sistemi

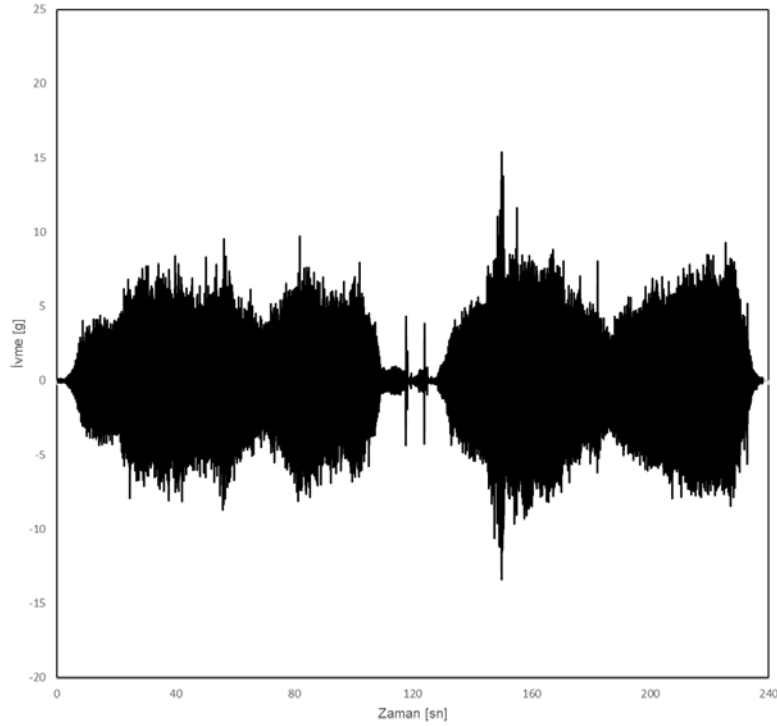
### 3. YOL VERİLERİNİN TOPLANMASI VE TEST SİSTEMİNİN YERLEŞİMİ

HPS test sisteminin montajlanması tamamlanmasıyla, sistem üzerine uygulanacak yol verisi toplanmıştır. Bu aşamada verilerin doğru toplandığından emin olmak için tüm parçalar kalibre edilmiş ve raporlanmıştır. Yol verileri bir iş makinası üzerinden ön ve arka aksların ortasına yerleştirilen ivme ölçer ile toplanmıştır. Bu veriler HPS test ünitesine uygulanarak sistemin cevapları alınmıştır. Lastikli yükleyici üzerine montajlanan ivme ölçerin aks üzerindeki konumu Şekil 7 de verilmiştir. Ayrıca GPS anteni ile aracın hızı da anlık olarak kayıt edilmiştir.

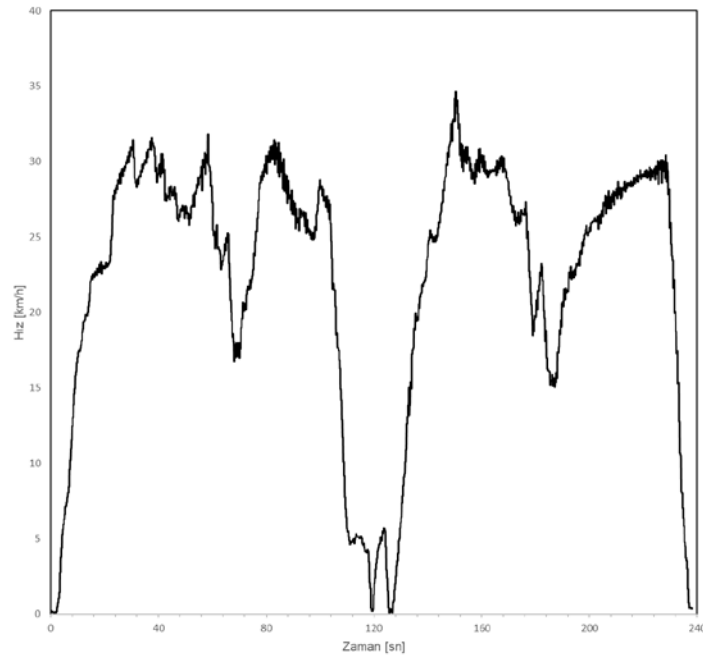


Şekil 7. Makine üzerindeki ivme ölçerin konumu

Önceden belirlenen parkurda iş makinası üzerinden alınan ivme ve hız verileri Şekil 8 ve 9 da gösterilmiştir. Üç eksen de ivme verileri toplanmış, ancak imalatını gerçekleştirdiğimiz test sistemine sadece düşey yöndeki ivme değerleri uygulanmış ve sonuçlar bu girdiler üzerinden değerlendirilmiştir.

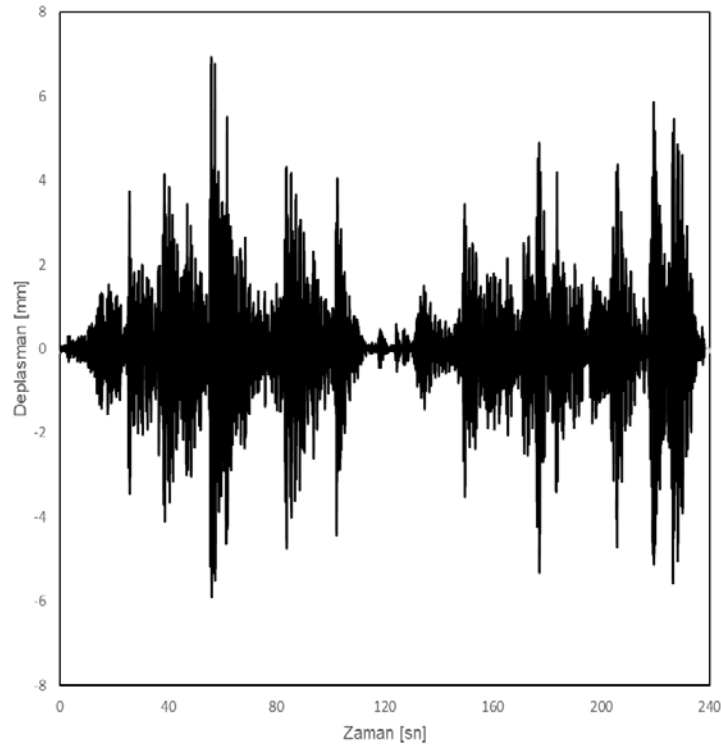


Şekil 8. İş makinesi üzerinden toplanan ivme değerleri



**Şekil 9.** İş makinesi üzerinden toplanan hız değerleri

Bu veriler HPS test ünitesine girdi olmak üzere deplasman haline dönüştürülmüştür. Elde edilen deplasman çıktısı aşağıdaki gibidir.

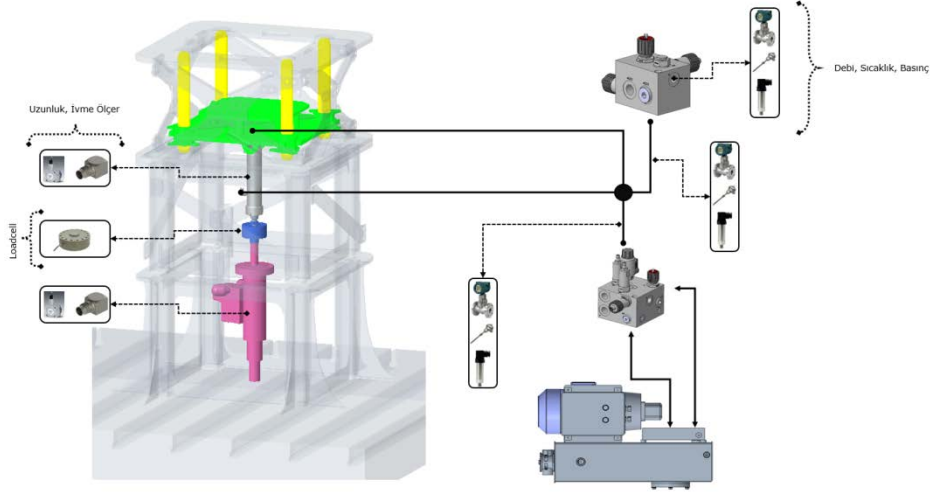


**Şekil 10.** Yol koşullarını temsil eden deplasman verisi

Deneyel tasarım faktöriyel yöntemle göre planlanmış olup, tüm parametrelerin sisteme olan etkisinin en az sayıda test ile elde edilmesi hedeflenmiştir. Önceden planlanan test prosedürüne göre 100 e yakın test verisi toplanmıştır. Her bir durum için 13 farklı sensörden veri alınmıştır. Ana blok

çıkışındaki debi ölçerden sadece sıcaklık verisi alınmıştır. Konfor verilerinin işlenmesi ve yorumlanması adına dışardan ivme ölçer montajlanarak ekstra bir veri daha alınmıştır.

Hidrolik sistemin şematik gösterimi ve planlanan verilerin toplandığı konumlar Şekil 11 de verilmiştir. Bu aşamada, kullanılan data toplama cihazı ile iletişimi sağlayan bağlantılar ve sensörlerin kalibrasyonları yapılarak test verilerini toplanmasına geçilmiştir.

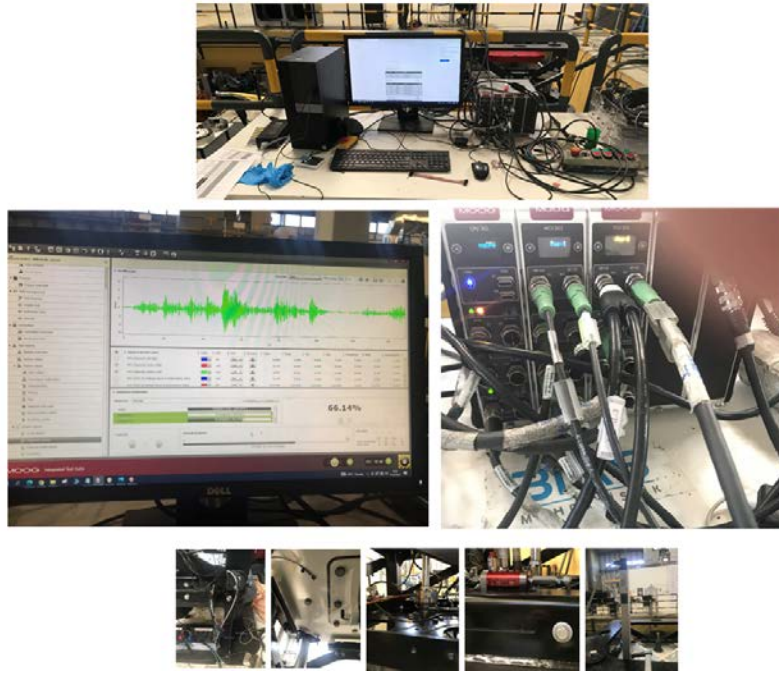


Şekil 11. Sensör ve hidrolik bağlantı şematik gösterimi

HPS test sistemi ve test verilerinin toplanmasını gösteren görseller Şekil 12 ve 13 de sunulmuştur. Deney esnasında verilerin sağlıklı alınması için MOOG silindirin kontrolçüsü kalibre edilerek veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. HPS test ünitesinin son hali

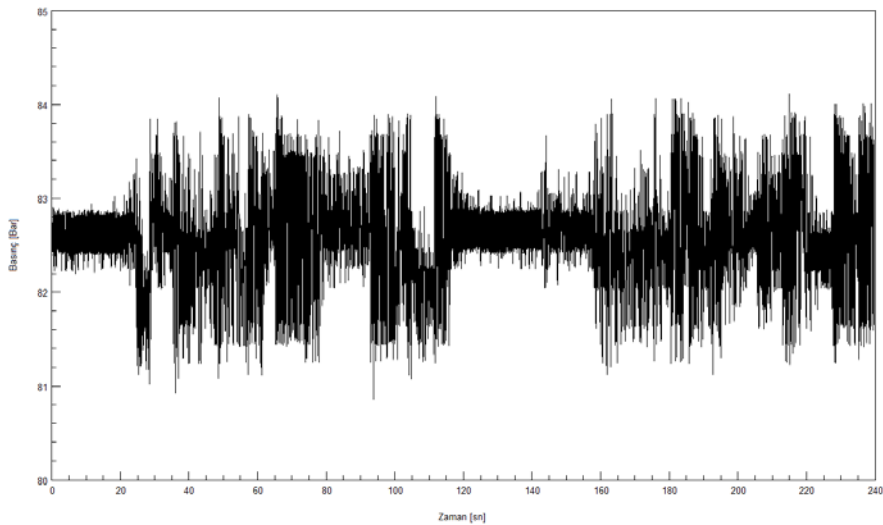


Şekil 13. HPS test ünitesi detayları

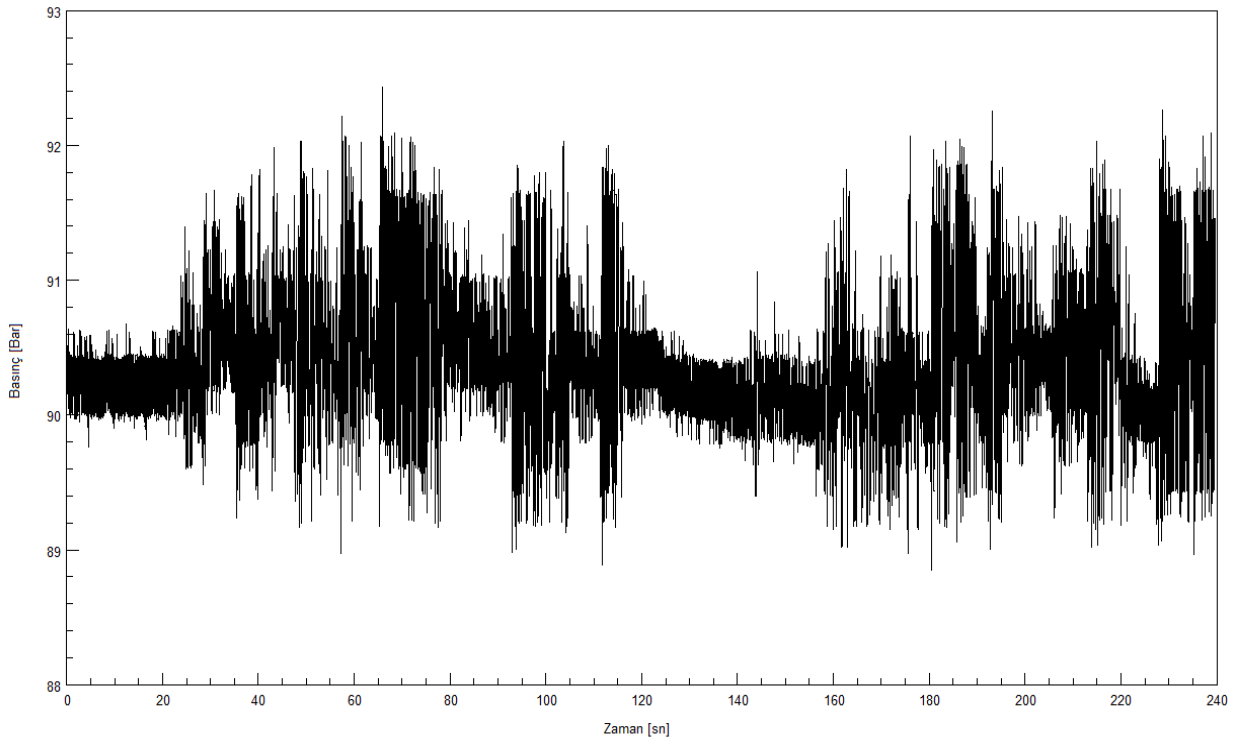
HPS test ünitesinden alınan ölçümlerin incelenmesi ile birçok parametrenin etkisini gözlemlemek mümkündür. Bu aşamada sadece farklı kütleye sahip sistemlerin davranışı incelenmiştir. HPS sisteminden Tablo 1 de verilen örnek bir deney seti kullanılarak elde edilen çıktılar Şekil 14, 15, 16 ve 17 de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Deney seti ve parametreler

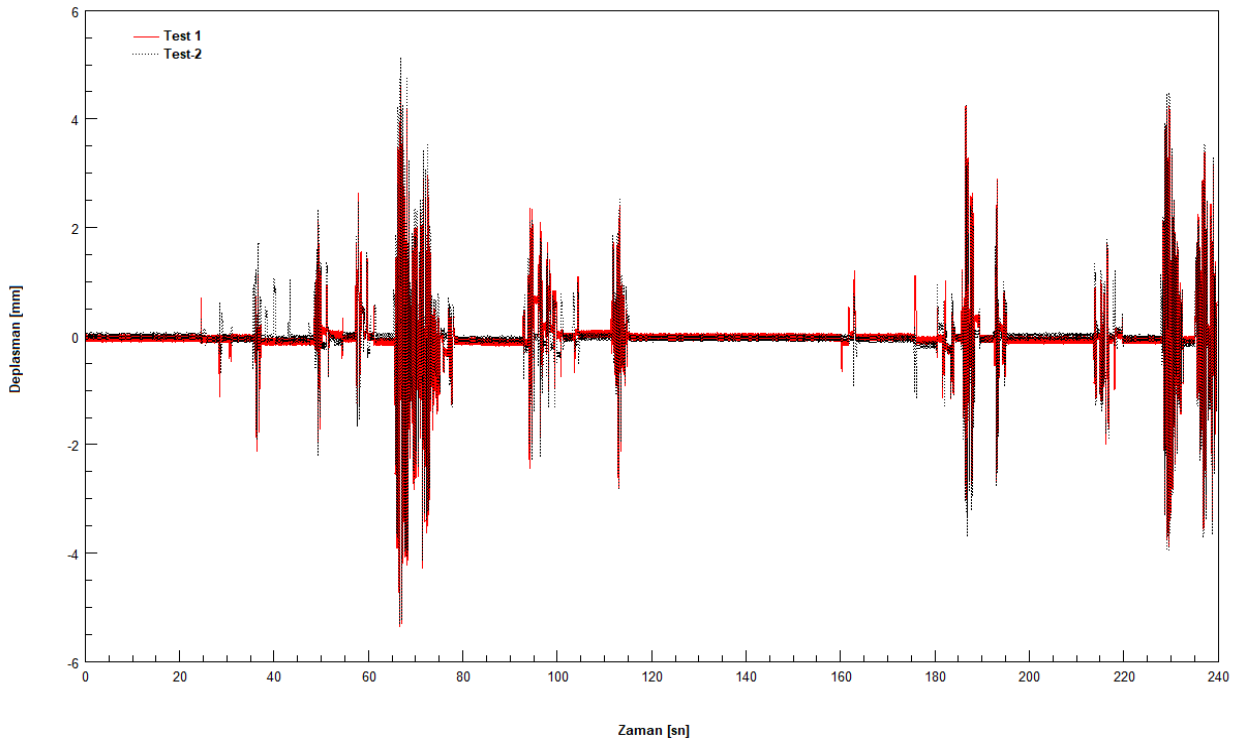
Test	Yol Verisi	Piston Çapı [mm]	Ağırlık [kg]	Akümülatör	Kısıcıcı Durumu
1	Yol	80	260	Pistonlu-Tek	En Açık Durum-1
2	Yol	80	420	Pistonlu-Tek	En Açık Durum-1



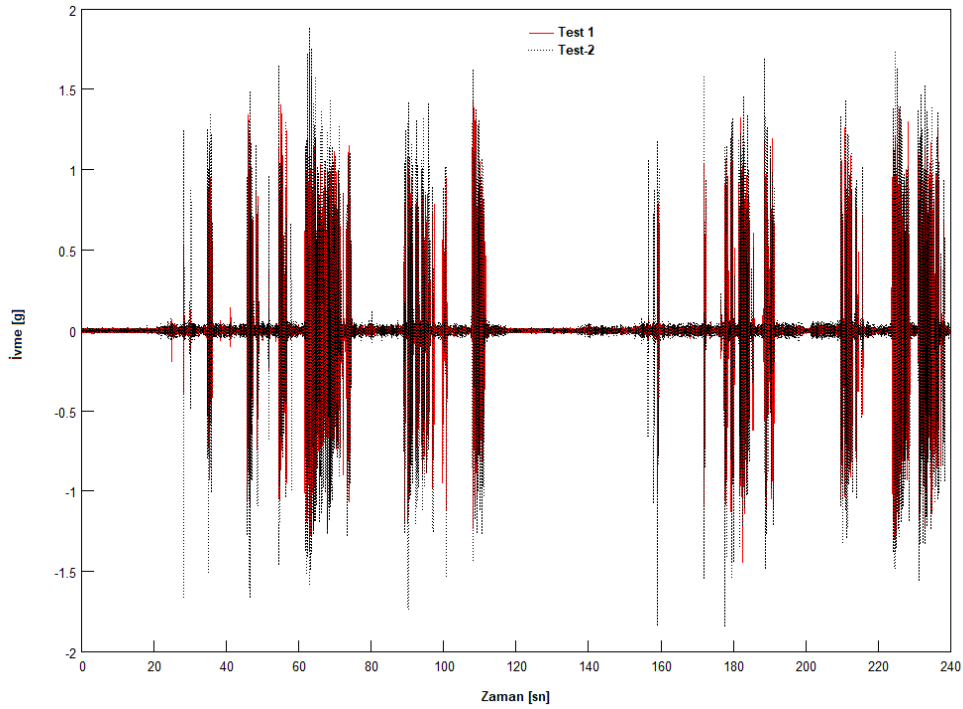
Şekil 14. Test-1 Basınç çıktısı



Şekil 15. Test-2 Basınç çıktısı



Şekil 16. Test-1-2 Deplasman



Şekil 17. Test-1-2 İvme

## SONUÇ

Bu çalışmada HPS test ünitesinin tasarımı, imalatı ve örnek bir deney seti kullanılarak elde edilen bazı test çıktıları paylaşılmıştır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, HPS sisteminin dinamik modellerinin geliştirilmesi ve bu modellerin test ünitesi kullanılarak doğrulanması öngörülmektedir. Elde edilecek modeller, öncelikle farklı asılı kütleler için yapılacak simülasyonlarla HPS sistemlerinin optimizasyonunda kullanılacaktır. Çalışmanın sonucunda, söz konusu modellerin farklı araçlar için HPS sistemlerinin tasarlanmasında önemli düzeyde kolaylık sağlaması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] JAZAR, R. N., "Vehicle dynamics theory and application, Springer Science+Business Media", 2008.
- [2] BAUER, W., "Hydropneumatic Suspension Systems, Springer", 2011.
- [3] KÜÇÜK, K., "8x8 Ağır Ticari Taşıtın Süspansiyon Sisteminin Modellenmesi ve Taşıt Dinamiğine Etkilerinin Optimizasyonu" Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2014.
- [4] SAĞLAM, F., ÜNLÜSOY, Y. S., "Birbirine Bağlı Hidro-Pnömatik Süspansiyon Sistemlerinin Araç Performansına Etkisi", Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 2015.
- [5] SAĞLAM, F., ÜNLÜSOY, Y.S., "Hidro-Pnömatik Süspansiyon Sistemlerinin Modellenmesi", VI. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, İzmir, 2011.
- [6] WANG, S., LU, Z., LIU, X., CAO, Y. and LI, X., "Active control of hydropneumatic suspension parameters of wheel loaders based on road condition identification", International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018.



## ÖZGEÇMİŞ

### **Kahraman Küçük**

1988 yılı Rize doğumludur. 2011 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2014 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almış ve 2017 yılında Doktora eğitimine başlamıştır. Profesyonel iş hayatına 2011 yılında Hidrokon da başlamış, 2019-2022 yılları arasında Hidromek'te devam etmiş ve şu anda Türk Traktörde çalışmaktadır.

### **İlyas Genç**

1983 yılı İnegöl doğumludur. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden Makina Mühendisliği Mekanik Anabilim dalından 2007 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. 2008-2011 yılları arasında Hidromek A.Ş. de Tasarım Mühendisi olarak görev yapmıştır. 2011-2016 yılında kurucu ortağı olduğu Akatem Mühendislik Ltd. Şti.'de Proje yöneticisi olarak görev yapmıştır. 2016-2022 yıllarında Hidromek A.Ş.'de Yapısal Tasarım Takım Lideri olarak çalışmıştır. Halen NSK Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de Hidrolik Silindir Üretim Müdürü olarak görev yapmaktadır.

### **Ferhan Fıçıcı**

1979 yılında Bandırma'da doğdu. İlk, ortaokul ve lise eğitimlerini Balıkesir'de tamamladı. 2002 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Hidromek A.Ş. de AR-GE Mühendisi olarak göreve başladı ve 2005 yılında AR-GE Takım Liderliği görevine getirildi. 2007 yılında ODTÜ Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamlayan Fıçıcı, 2012 yılından bu yana Hidromek'te Kazıcı Yükleyici ve Lastikli Yükleyici Mühendislik Müdürü olarak görev yapmaktadır.

### **Fatih M. Botsalı**

1955 yılı Konya doğumludur. 1977 yılında ODTÜ Makina Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1982 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almış. 1993 yılında Doktor ünvanını Selçuk Üniversitesinden almıştır. Konya Teknik Üniversitesinden Makine Teorisi Ve Dinamiği Anabilim Dalı'ndan 2022 yılında profesör ünvanı ile emekli olmuştur. Konya Sanayi Odasının önderliğinde Konya Organize Sanayi Bölgesi içinde kurulan InnoPark adlı Teknoloji Geliştirme Bölgesinin Genel Müdürlüğü görevini yürütmektedir..