

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GAZ BORU HATLARININ TEKERLEKLİ KALİPER TEST DÜZENEGİ
VE FPGA İLE İÇBÜKEY VE DIŞBÜKEY DEFORMASYONLARININ
ÖLÇÜLMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ARAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Basri GÜRDAL

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GAZ BORU HATLARININ TEKERLEKLİ KALİPER TEST DÜZENEGİ
VE FPGA İLE İÇBÜKEY VE DIŞBÜKEY DEFORMASYONLARININ
ÖLÇÜLMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ARAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan Basri GÜRDAL
(504201217)**

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Tankut AKGÜL

TEMMUZ 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**AN EXPERIMENTAL RESEARCH FOR MEASURING
CONCAVE AND CONVEX DEFORMATIONS OF GAS PIPELINES
USING A WHEELED CALIPER ARM AND FPGA**

M.Sc. THESIS

**Hasan Basri GÜRDAL
(504201217)**

Department of Electronics and Communication Engineering

Electronic Engineering Programme

Thesis Advisor: Dr. Tankut AKGÜL

JULY 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504201217 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan Basri GÜRDAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GAZ BORU HATLARININ TEKERLEKLİ KALİPER TEST DÜZENEGİ VE FPGA İLE İÇBÜKEY VE DIŞBÜKEY DEFORMASYONLARININ ÖLÇÜLMESİNE YÖNELİK DENEYSEL ARAŞTIRMA" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Tankut AKGÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Müştak Erhan YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cem ÜNSALAN
Marmara Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **26 Mayıs 2023**

Savunma Tarihi : **07 Temmuz 2023**





Eşime ve Aileme,



ÖNSÖZ

Öncelikle danışmanım Dr. Tankut AKGÜL'e desteği ve anlayışı için şükranlarımı sunarım. Gerek ders döneminde gerekse tez döneminde yardımları ve yönlendirmeleri benim için çok kıymetliydi, kendisine teşekkür ederim.

Çalıştığım kuruma, TÜBİTAK RUTE ailesine, özellikle çalışmalarında desteklerini esirgemeyen kıymetli dostum Miraç Şamil YİĞİT'e, ekip arkadaşlarıma, Furkan BOLAT'a, Yunus Emre FEDAR'a, Mustafa Hakan BALAMAN'a, Yaşar YILMAZ'a, Proje Yürütücüm Yekta YEŞİLYURT'a ve Bölüm Yöneticim Yusuf Engin TETİK'e teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her adımında her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme teşekkürü bir borç bilirim. Emekleri için onlara minnettarım.

TEMMUZ 2023

Hasan Basri GÜRDAL
Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. BORU HATLARINDA OLUŞABİLECEK ANOMALİLER VE DENTLER	7
2.1 Dent Hasarları	7
3. KALİPER TEST MEKANİZMASI	17
3.1 Düzenek Kurulum ve Tanıtımı	17
4. YAZILIM VE DONANIM	25
4.1 Donanım Mimarisi	25
4.2 Yazılım Mimarisi	27
5. ÖLÇÜM VE DOĞRULAMA	39
5.1 Ölçümler ve Doğrulama Adımları	39
5.1.1 Test 1. Metal tabla üzerinde hareket 3 adet PLA Dent	40
5.1.1.1 Ölçümler	42
5.1.2 Test 2. PLA Tabla üzerinde hareket 2 adet Çukur Dent 2 adet Tümsek Dent	51
5.1.2.1 Ölçümler	54
5.1.3 Test 3. PLA Tabla üzerinde hareket 2 adet Çukur Dent 2 adet Tümsek Dent	67
5.1.3.1 Ölçümler	70
6. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79



KISALTMALAR

EMAT	: Elektromekanik Akustik Dönüştürücü
MFL	: Manyetik Akı Kaçağı
EC	: Girdap Akımı
MC	: Mekanik Temaslama
ILI	: In Line Inspection
FPGA	: Field Programmable Gate Array
SSI	: Synchronous Serial Interface
EPRG	: European Pipeline Research Group
UT	: Ultrasonik Test





SEMBOLLER

mm : Uzunluk
m/s : metre bölü saniye
t : Zaman





ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : ILI tarafından belirtilen deformasyon bilgileri [1]	9
Çizelge 2.2 : [2]'de verilen örnek göçük, çatlak ve çentik boyutları (l – w - d) ve bunların 24" boru uyarlaması	12
Çizelge 2.3 : [2]'de verilen örnek göçük, çatlak ve çentik boyutları (l – w - d) ve bunların 24" boru uyarlaması	12
Çizelge 2.4 : [1]'de verilen örnek göçük ve hasar bilgileri	13
Çizelge 2.5 : [1]'de verilen örnek göçük ve hasar bilgileri	14
Çizelge 2.6 : [3]'de yer alan yaklaşık 169 mm'lik boru için göçük bilgileri.....	14
Çizelge 2.7 : [2]'de yer alan yapay göçük bilgileri.....	14
Çizelge 2.8 : İngiliz Gazı (British Gas) göçük halkası ve patlama testi parametre aralıkları.....	15
Çizelge 2.9 : [4]'da verilen göçük uzunluk geometrisi bilgileri	16



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Kaliper Test Düzeneği [5].....	3
Şekil 1.2 : Anomalinin yokuş yukarı ve yokuş aşağı olarak ayrılması ve geometrik analizi [5]	4
Şekil 1.3 : Kaliper Test Düzeneği [6].....	6
Şekil 2.1 : Boru kesiti ve boru boyunca oluşan göçük geometrisi [7]	9
Şekil 2.2 : Hasar stresi ve göçük (dent) derinliğı ölçütü arasındaki ilişki grafiğı [8,9]	11
Şekil 2.3 : Hasar geometrisi [10]	13
Şekil 2.4 : Dent uzunluğı geometrisi [4]	15
Şekil 3.1 : Kaliper test düzeneğı ve üzerinde bulunan yapıların genel gösterimi ..	18
Şekil 3.2 : Mekanizmadaki tablayı döndüren motor ve aktarma sistemleri	19
Şekil 3.3 : Test Sistemi Kol Mekanizması	20
Şekil 3.4 : Test Sistemi Üzerindeki Dent Yerleşimleri	21
Şekil 3.5 : Mekanik Kol-Dent Geometrisi [6]	22
Şekil 3.6 : Kaliper Test Mekanizması	23
Şekil 4.1 : Test Düzeneğı Elektronik Sistem Mimarisi	25
Şekil 4.2 : Test Düzeneğı Açı Sensör Kartı	26
Şekil 4.3 : Test Düzeneğı FPGA Blok Şema Tasarımı	27
Şekil 4.4 : Clock Sihirbazı üzerinden frekans ayarlama gösterimi.....	27
Şekil 4.5 : Clock Buffer kodunun gösterimi	28
Şekil 4.6 : Sensör okumasının yapıldığı blok şemasının gösterimi	28
Şekil 4.7 : Sensör okumasının yapıldığı modülün port ve sinyallerinin gösterimi .	29
Şekil 4.8 : Medyan filtresinin uygulandığı blok şemanın gösterimi	30
Şekil 4.9 : Kabarcık sıralama algoritmasının kodda uygulanmasının gösterimi ...	31
Şekil 4.10 :Tampon sinyallerinin gösterimi.....	31
Şekil 4.11 :Medyan filtresi modülündeki port ve sinyallerinin gösterimi	32
Şekil 4.12 :Uart blok şemasının gösterimi	32
Şekil 4.13 :Kaydedilen dosya örnekleri.....	33
Şekil 4.14 :Novotechnic RFC4800-SSI mutlak enkoderi [11]	33
Şekil 4.15 :Manyetik Açı Sensörü SSI Protokolü [11]	34
Şekil 4.16 :Veri paketi şekilsel gösterimi	34
Şekil 4.17 :Sıralama algoritması uygulama adımı.....	35
Şekil 4.18 :Medyan filtresi uygulanan paket dizisine yazma işlemi simülasyon sonucu	36
Şekil 4.19 :Açı Sensörü FPGA Simülasyon Sonuçları	37
Şekil 5.1 : Test 1’de kullanılan düzenek ve dentler	40
Şekil 5.2 : Birinci dentin ölçüleri	40
Şekil 5.3 : İkinci dentin ölçüleri	41

Şekil 5.4 : Üçüncü dentin ölçüleri	41
Şekil 5.5 : 1-3-5 m/sn hızda 5N yay sabitli yayı gerdirilmemiş koldan alınan verinin grafiği.....	42
Şekil 5.6 : 1-3-5m/sn hızda 5N yay sabitli yayı gerdirilmiş koldan alınan verinin grafiği	42
Şekil 5.7 : 1-3-5m/sn hızda 10N yay sabitli yayı gerdirilmemiş koldan alınan verinin grafiği.....	43
Şekil 5.8 : 1-3-5m/sn hızda 10N yay sabitli yayı gerdirilmiş koldan alınan verinin grafiği.....	43
Şekil 5.9 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümleme olmayan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği.....	44
Şekil 5.10 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümleme olan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	45
Şekil 5.11 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve yüksek sönümleme olan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	45
Şekil 5.12 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	46
Şekil 5.13 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	47
Şekil 5.14 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümlemeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	47
Şekil 5.15 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve yüksek sönümlemeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	48
Şekil 5.16 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	48
Şekil 5.17 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	49
Şekil 5.18 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümlemeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	50
Şekil 5.19 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve yüksek sönümlemeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği	50
Şekil 5.20 : Test 2’de kullanılan test düzeneği kurulumu	51
Şekil 5.21 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri	52
Şekil 5.22 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri	52
Şekil 5.23 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri	52
Şekil 5.24 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri.....	53
Şekil 5.25 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve sonumlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği	54
Şekil 5.26 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve normal sonumlemeli koldan alınan verinin grafiği	55
Şekil 5.27 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	55

Şekil 5.28 :1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve sonumlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği	56
Şekil 5.29 :1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	56
Şekil 5.30 :1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	57
Şekil 5.31 :1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve sönümlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği	58
Şekil 5.32 :1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	58
Şekil 5.33 :1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	59
Şekil 5.34 :1-3-5 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve sönümlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği.....	60
Şekil 5.35 :1-3 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	61
Şekil 5.36 :1-3 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	62
Şekil 5.37 :1-3-5 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve sönümlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği.....	63
Şekil 5.38 :1-3 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	64
Şekil 5.39 :1-3 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	65
Şekil 5.40 :1-3 m/sn hızda 100N yay sabitli gergin olmayan ve normal sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği	66
Şekil 5.41 :Test 3’de kullanılan test düzeneği kurulumu	67
Şekil 5.42 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri.....	68
Şekil 5.43 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri	68
Şekil 5.44 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri	69
Şekil 5.45 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri.....	69
Şekil 5.46 :1-3-5m/sn hızda 100N yay sabitli koldan alınan verinin grafiği	70
Şekil 5.47 :1-3-5m/sn hızda 150N yay sabitli koldan alınan verinin grafiği	70



GAZ BORU HATLARININ TEKERLEKLİ KALİPER TEST DÜZENİĞİ VE FPGA İLE İÇBÜKEY VE DIŞBÜKEY DEFORMASYONLARININ ÖLÇÜLMESİNE YÖNELİK DENEYSSEL ARAŞTIRMA

ÖZET

Enerjinin taşınımında oldukça yoğun olarak kullanılan yöntemlerden biri de boru hatlarıdır. Diğer taşınım yollarına göre ekonomik, güvenli ve düzenliliği olan bir sistem olması bu yöntemi öne çıkarmaktadır. Fakat bu yöntemin en büyük handikaplarından birisi de boru hattında yaşanabilecek bir güvenlik sıkıntısında büyük felaketlerin oluşabilecek olmasıdır. Bu durumun önüne geçebilmek adına boru iletim hatlarının denetimi konusu ciddi bir önem arz etmektedir. Öyle ki bu öneme binaen boru hattı denetimine dair araştırma ve çalışmalar çeşitlenmiş ve gün geçtikçe artmaktadır. Bu yöntemler hat içi denetim, hidrostatik basınç testleri ve doğrudan değerlendirme yöntemleri başlıklarında incelenebilir. Özellikle hat içi denetim yöntemine değinmek istiyorum. Hat içi denetim yöntemi borunun iç çeperi ve dış çeperini sadece iç, sadece dış ve hem iç hem dış olacak şekilde ölçen yöntemdir. Bu ölçümleri yapabilmek için kullanılan teknolojilere göre kendi içinde gruplandırılabilir. Farklı sensor ve ölçüm cihazlarına göre elektromekanik akustik dönüştürücü (EMAT), manyetik akı kaçağı (MFL), ultrasonik test (UT), girdap akımı (EC), mekanik temasla (MC) şeklinde sınıflandırılabilir. Genelde boru hattındaki çatlakların tespitinde ultrasonik test ve elektromekanik akustik dönüştürücü yöntemleri kullanılmıştır. Girdap akımı ve manyetik akı kaçağı yöntemleri ise metal kayıplarının tespitinde kullanılmıştır. Bu yöntemler ayrıca dent tespitinde de kullanılmıştır. Fakat mekanik temas yöntemi yani kaliper cihazları dent tespit etme noktasında en başarılı yöntem olarak gösterilmektedir.

Kaliper cihazı üzerinde bulunan kollar sayesinde dentler üzerinden geçerken dentlerin boyutlarını ölçebilmektedir. Kolun dikeysel hareketinden dentin derinliğini, birden çok kol yapısı sayesinde dentin genişliğini, dentin üzerinden geçme zamanından ise dentin uzunluğunu tespit etmektedir. Yüksek hızlara çıktıkta kolların dentlere olan tepkileri değişebilmektedir. Buna uygun bir kol tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu kol tasarımını geliştirme aşamasında kaliper modülünü ve dentleri simule ettiğimiz kaliper test düzeneği büyük bir fayda sağlamaktadır. Yüksek hızlarda örnekleme yapabilmek adına kullanılan FPGA tasarımı da doğruluk oranını artırmaktadır.

Kaliper test düzeneğinde boru hattının içinde karşılaşılabilecek tüm durumları inceleme fırsatı yakalayabilmekteyiz. Farklı hızlar ve farklı dent boyutlarında kolun yapısının davranışı değişebilmektedir. Bu yapı sayesinde dentler üzerinden geçişlerde kolun tepkisine bakarak tasarım geliştirilmektedir. Kolun içine monte edilmiş halde bulunan açı sensörü sayesinde tekerleğin üzerinden geçtiği dentleri algılayabilmekteyiz. Açı sensörü SSI seri haberleşme protokolü ile haberleşmekte ve sürekli olarak sinyal üretmektedir. Sensörden gelen sinyalleri FPGA ile okumaktayız. FPGA sayesinde yüksek hızda veri okuyup istenilen formatta bilgisayara kaydedebilmekteyiz. Bu

sistem sayesinde istenilen dentler yüksek hızda dönen bir tabla üzerinde ölçülebilir ve gösterilebilir hale gelmektedir. Hız artırıldığında dentlerin gerçek boyutlarından sapmalar meydana gelmektedir. Bir başka inceleme alanı olarak kolun yay ile sıkıştırılması sayesinde bu sapmalar önlenmeye şayet önlenemez ise azaltılmaya çalışılmaktadır.

Bu şekilde yapılan testlerde örneğin 1 m/s hızında 3 mm boyutundaki iki dent 2.98 mm civarında, 61 mm civarında bir dent ise 60.9 mm civarında tespit edilerek yüksek seviye doğruluk elde edilmiştir.

Kaliper test mekanizmasında hız, yay sabiti, yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi gibi değişkenler ile testler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar nihai bir kaliper modülü tasarım ve geliştirme süreçlerine oldukça fayda sağlayacaktır.



AN EXPERIMENTAL RESEARCH FOR MEASURING CONCAVE AND CONVEX DEFORMATIONS OF GAS PIPELINES USING A WHEELED CALIPER ARM AND FPGA

SUMMARY

Pipelines are one of the most frequently used methods of energy transportation. The fact that it is an economical, safe and regular system compared to other modes of transport makes this method stand out. However, one of the biggest handicaps of this method is that major disasters may occur in case of a security problem in the pipeline. In order to prevent this situation, the subject of inspection of pipeline transmission lines is of great importance. So much so that, due to this importance, research and studies on pipeline inspection have diversified and are increasing day by day. These methods can be examined under the headings of in-line inspection, hydrostatic pressure tests and direct evaluation methods. In particular, I would like to mention the in-line inspection method. In-line inspection method is the method that measures the inner wall and outer wall of the pipe only inside, only outside, and both inside and outside. It can be grouped within itself according to the technologies used to make these measurements. According to different sensors and measuring devices, it can be classified as electromechanical acoustic transducer (EMAT), magnetic flux leakage (MFL), ultrasonic test (UT), eddy current (EC), mechanical contact (MC). In general, ultrasonic testing and electromechanical acoustic transducer methods were used to detect cracks in the pipeline. Eddy current and magnetic flux leakage methods were used to detect metal losses. These methods have also been used in the detection of dent. However, the mechanical contact method, namely Caliper devices, is shown as the most successful method for dent detection.

Thanks to the arms on the caliper device, it can measure the dimensions of the dents while passing over the dents. It determines the depth of the dent from the vertical movement of the arm, the width of the dent thanks to the structure of multiple arms, and the length of the dent from the time of passing over the dent. At high speeds, the reaction of the arms to the dents may change. A suitable arm design should be made for this. The caliper test setup, in which we simulate the caliper module and dents, provides a great benefit during the development of this lever design. The FPGA design used for sampling at high rates also increases the accuracy rate.

Wheeled type caliper arm is a smart pig for oil and gas pipelines. It is designed to detect deformations of the pipeline. For this purpose, a mobile device carrying a set of caliper arms on its body is sent through the pipeline. As the device moves along the pipeline, each caliper arm moves along with it touching the inner surface of the pipeline. When a caliper arm hits a dent on the pipeline surface, the arm makes an instantaneous change in position and quickly gets back to its prior position by the help of a pre-tightened spring on the arm. This instantaneous position change is detected

using angle sensors attached to the caliper arm joint. The sensor measurements are collected and processed in order to detect pipeline deformations.

In order to be able to detect even the smallest dents on the pipeline surface requires many caliper arms. Collecting sensor readings from multiple sensors in parallel makes a classical microcontroller-based software approach infeasible. Consequently, in this work, we designed a custom hardware architecture based on an FPGA, which enables capturing of measurements from multiple caliper arm sensors in parallel at real-time.

This mechanism is built on an octagonal designed and assembled sigma profile frame. In the middle of the skeleton, there is a mechanism that enables the device to be rotated. On the upper surface, there is a circular motion table on which artificially produced dents can be mounted. In order to simulate the caliper arm system, a caliper arm mechanism is placed. If desired, more than one arm mechanism can be added to the assembly. The device design is designed in such a way that it can also perform odometer tests. In the middle and side of the skeleton, there is a plexiglass box containing the electronic cards that control the system. Rotating wheels are placed in contact with the lower and upper surfaces of the table so that the measurements are not affected by the table wobble during the rotation of the turntable.

To test the hardware architecture, we setup an environment where a caliper arm is located above a circular plate underneath. Instead of moving the caliper arm mechanism, the experimental setup keeps the arm at a fixed position and rotates the plate at 1 m/s speed. Before designing the Caliper Module, the benefits of the Caliper Test Mechanism were investigated. To test the mechanism, the plate has convex and concave dents placed on it. The caliper arm has a spring with configurable pre-tightening force. There is also an angle sensor located at the caliper arm joint. The sensor readings are sent to a Spartan 7 FPGA board. The FPGA design is capable of capturing 50 angle sensor measurements in parallel. Since the experimental setup includes a single angle sensor, the sampling frequency of the angle sensor is increased by 50 times. The collected data is transferred from FPGA card to PC via serial communication protocol. The depth and length of the convex and concave dents are measured.

Afterwards, quite a lot of tests were carried out with the determined variables. The effects of velocity, spring constant, spring tension and wheel damping on dent detection were investigated in the tests.

Speed turned out to be the biggest factor in the tests. As the speed of the assembly increased, it was observed that the action-reaction force increased after the contact of the wheeled caliper arm with the dent. In this case, it increases the error in the measurement of dent.

In measurements with very low spring constant, the error rate does not change much at 1 m/s speed. However, at 3m/s and 5m/s speeds, the arm with a very small spring constant jumps quite a lot and, consequently, the error rate is very large.

When the spring constant is increased, it can be seen that the error rate caused by the speed decreases. Since the spring constant and the spring tension are the same parameters, they have the same effect.

In the experiments carried out, it was observed that the error was still high even though the spring constant and spring tension were increased at 5m/s speed. As a matter of fact, this has been the case in studies in the literature. However, it turns out that better results will be obtained when experiments are made with springs with higher coefficients.

Wheel damping is used in order to prevent the wheel caliper arm making a jump after hitting high dents and this bounce from being perceived as a dent. This damping has been tested at two different levels, normal and high. In these experiments, it was seen that normal damping provides some benefit at 1m/s and 3m/s speeds. But it had little effect at 5m/s speed. It has been observed that high damping slightly reduces wheel bounce at all speeds.

In summary, the measurement results from the developed caliper test mechanism will provide great benefit for the final design and development of a caliper module.





1. GİRİŞ

Günümüzde enerji çeşitli yöntemler ve yollar ile taşınmaktadır. Bu taşınma yollarının başında boru hatları yer almaktadır. Bu tezde boru hatlarının denetiminde kullanılan kaliper cihazlarının tasarımlarına yardımcı olacak bir deneysel test düzeneği üzerinde yapılan çalışma incelenecektir.

1.1 Tezin Amacı

Boru hatları enerji taşınımına yönelik kullanılmaktadır. Burada kastedilen enerji, doğalgaz, petrol gibi doğal kaynaklardır. Bilindiği üzere bu kaynakların yanma ve patlama tehlikesi bulunmaktadır. Bundan dolayıdır ki bu boru hatlarının güvenliği oldukça önemlidir.

Boru hatlarının güvenliği geleneksel yöntemlerden ziyade yüksek teknoloji içeren yöntemlerle sağlanmaktadır. Bu yöntemler hat içi denetim, hidrostatik basınç testi ve doğrudan değerlendirme yöntemleri başlıklarında incelenebilir [12].

Biz burada hat içi denetim yöntemlerinden kaliper akıllı geometri cihazı ile denetim başlığını inceleyeceğiz. Kaliper cihazı üzerinde bulunan kollar ile boru hatlarında oluşan anomalileri tespit etmektedir. Anomali, boru hatlarında oluşmuş hasarlara denir. Bu hasarların tespit edilmesi oldukça kritiktir.

2023 yılında ülkemizde de yaşanan depremde görüldüğü gibi doğalgaz hattındaki olası hasarların neden olacağı patlama bir felakete sebep olabilir. Bundan dolayı boru hatlarındaki bu anomaliler düzenli aralıklarla test edilmelidir ve gerekli ise hat içinde tamir ve yenileme çalışmaları yapılmalıdır. Ülkemizde bu konuda yatırımlar ve çalışmalar bulunmaktadır. TÜBİTAK'ın geliştirmekte olduğu BIDR (Boru içi denetleme robotu) ve BORAN (Boru Analiz Cihazı) bu çalışmalardandır.

Bu çalışmada ise boru hatlarının denetlenmesinde kullanılan kaliper cihazlarının geliştirilmesi süreçlerine yardımcı olacak bir test düzeneği tasarımına değineceğiz.

Kaliper test düzeneği adını verdiğimiz bu düzenek, kaliper kolunu, dönen bir tablada boru içinde hareket edermiş gibi ve belirlenen dentleri belli hızlarda ölçerek simüle etmektedir. Tezin amacı boru içinde gidecek bir kaliper cihazının belirli hızlarda dentlere geldiğinde kollarının davranışı ve ölçüm sisteminin çalışmasını önceden inceleme fırsatı sunmaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Petrol ve gaz endüstrisi, boru hattı, tanker, kamyon ve demiryolu taşımacılığı içeren hem ham hem de rafine ürünler için verimli bir küresel dağıtım açı geliştirmiştir. Boru hatları en ekonomik ulaşım yöntemidir ve kıtalar gibi uzun mesafeler boyunca hareket etmeye en uygundur [13]. Petrol ve gaz boru hattı sızıntısı, yaygın kaza türlerinden biridir ve aynı zamanda ağır kayıpların ana nedenlerinden biridir [14]. Sızıntı kazası sadece boru hattının normal çalışmasını etkilemez, aynı zamanda çevreyi ve kişisel güvenliği de tehdit eder [14]. Bu nedenle, petrol ve gaz boru hatlarında sızıntı tespiti, insan yaşam güvenliğini artırmak için önem arz etmektedir. 2015’li yıllara kadar yapılan çalışmalar genelde su boru hatlarıyla ilgili olarak yapılmış ve bunların çoğu akustik algılama ilkesine dayanmaktadır [15]. Su boru hatlarının petrol ve gaz boru hatlarına farkı şu iki temel noktada ayrılmaktadır: (1) petrol ve gaz boru hatlarının basıncı, su boru hatlarına göre çok daha yüksektir; (2) petrol ve gaz boru hatlarındaki ortam yüksek risk taşır. Bu iki özellik nedeniyle, petrol ve gaz boru hatlarının sızıntı ve anomali tespiti zordur [16].

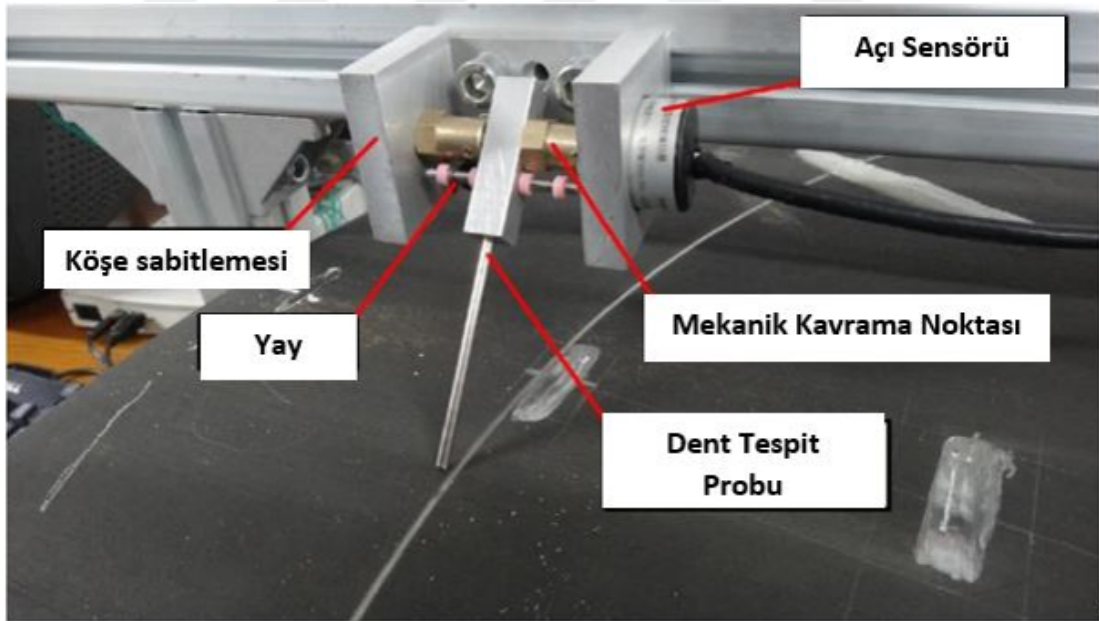
Petrol ve gaz boru hattı içi denetimi pigleme dediğimiz akıllı pig cihazı yani kaliper modülünü içeren cihazla yapmak oldukça pahalı ve hassastır. Boru hattı içinde olası blokajlara ilişkin risk göz ardı edilemez, bu nedenle konuşlandırılmaları oldukça nadirdir (genellikle yılda bir iki kez) [17]. Fakat olası kusurları ve hasarları endişe kaynağı haline gelmeden önce bulmak, hem iç hem dış boru hattı durumunu değerlendirmek için periyodik olarak tahribatsız denetimler yapılmaktadır.

Kaliper modülünün bu kadar masraflı olmasını göz önünde bulundurarak çok düşük maliyetli modüller tasarlanmıştır [17]. Bu durumlar göz önüne alınarak kaliper

modülleri tasarlanmadan önce bir ön test mekanizmasında geliştirilmesi maliyet açısından önemli hale gelmiştir.

Xiaolong Li vd. “An Experimental Evaluation Of The Probe Dynamics As A Probe Pig Inspects Internal Convex Defects In Oil And Gas Pipelines” makalelerinde prob tipi kaliper kolu tasarlamış ve performansını değerlendirmek için prob tipi kaliper kolunun hassasiyeti üzerine deneysel araştırma yapmışlardır [5].

Kaliperin hassasiyetinin incelenmesi adına ilk olarak Şekil 1.1’de verilen deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinde kaliperin açı değişimlerini ölçmek için açısal enkoder kullanılmıştır. Döner plakanın malzemesi çelik olarak belirtilmiştir. Probun çapı 3 mm, uzunluğu 130 mm, malzemesi ise çelik olarak verilmiştir. Yapay anomali epoksi reçine ile üretilmiş, ölçüleri ise 5.5 mm yükseklik 48 mm uzunluk olarak belirtilmiştir. Yapılan deneyler iki şekilde gerçekleştirilmiştir. İlkinde yay kuvveti sabit tutularak, tablanın dönüş hızı 1 m/s ve 8 m/s arası değiştirilmiştir. İkincisinde ise dönüş hızı sabit tutulmuş, yay kuvveti 9 N ve 15 N arası değiştirilmiştir. Tüm bu değişimlerin ölçüm hassasiyetine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 1.1 : Kaliper Test Düzeneği [5]

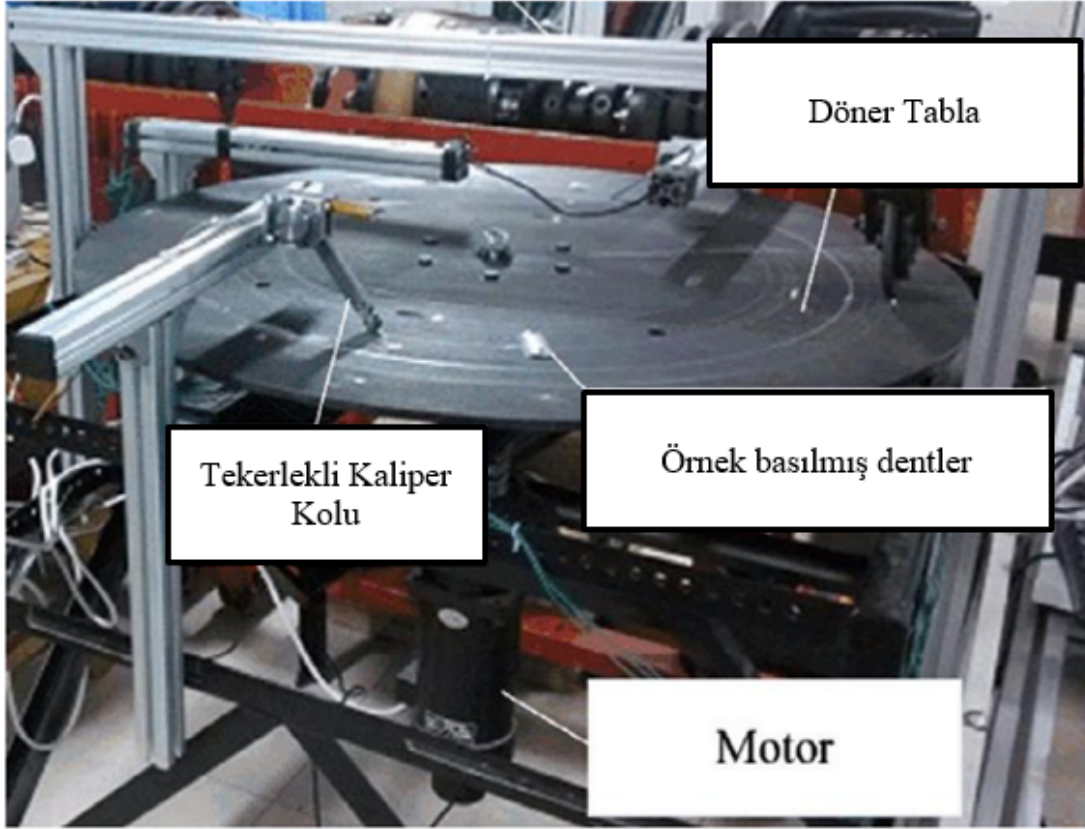
Bu çalışmada anomali yokuş aşağı ve yokuş yukarı olarak iki bölümde incelenmiş ve Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Şekil geometrik olarak incelenerek anomali yüksekliği ve

- Analitik ve deneysel sonuçlar, hız ve yay kuvvetinin kaliper hassasiyeti ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Xiaoxiao Zhu vd. ise yaptıkları çalışmada tekerlekli kaliper kolu tasarlamış ve performansını değerlendirmek için tekerlekli kaliper kolunun hassasiyeti üzerine deneysel araştırma yapmıştır [6]. Anomali boyutu, yay kuvveti (pre-tightening force) ve pigleme hızının kaliperin tutarlılığı (precision) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yüksek pigleme hızı ölçüm hatasını arttırırken düşük pigleme hızı ölçüm hatasını azaltır. Yay kuvvetinin artışı ölçüm hatasını azaltır, hatta ortadan kaldırabilir. Kaliperler kol uçlarına göre tekerlekli kol, çubuk kol ve prob kol olmak üzere üçe ayrılabilir. Bu kol uçları arasında, operasyon sonrasında boru hattı iç duvarının neredeyse hiç hasar görmemesi nedeniyle tekerlekli kol yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, tekerlekli kaliper kolu ile boru hattı arasındaki yuvarlanma hareketi, çubuk tipi ve prob tipi kaliper kolunun kayma hareketi ile karşılaştırıldığında, nispeten daha az miktarda aşınma ile sonuçlanır.

Aynı çalışmada, algılama devresi olarak kalıcı mıknatıs ve AS5045 (Manyetik Döner Pozisyon Sensörü) kullanılmıştır. Kalıcı mıknatıs, kaliper kolunun hareket ettirdiği döner bir şafta bağlıdır. Kaliper tekerinin anomaliye teması ile oluşan yükseklik değişimi, açısal değişim olarak bu şafta aktarılır. Açısal değişim AS5045 sensörü ile tespit edilerek geometrik denklemlerle yükseklik değişimine dönüştürülür. Bu deney düzeneğinde yer alan disk, step motor aracılığı ile döndürülmektedir. Bağlı hız step motor ile kontrol edilebilmektedir. Diskin üzerine alüminyum malzemeden üretilmiş yapay bir anomali tutturulmuştur. Deney sonuçları NI USB – 6001 veri toplama kartı ile toplanarak, bilgisayarda LabVIEW ile işlenmektedir. Deney çıktısı olarak, yay kuvveti ve disk hızı değiştirilerek anomalinin yüksekliği incelenmektedir.

Şekil 1.3'teki düzeneğin ilk deneyinde 10 mm yüksekliğe sahip yapay anomali kullanılmıştır. Yay kuvveti 10 N olarak ayarlanmıştır. Anomali yüksekliği ve yay kuvveti sabit tutularak hızın ölçüm hatasına olan etkisi araştırılmıştır. Çıktılara göre tekerlekli kaliper kolu yüksek hızda anomali ile karşılaştığında ciddi bir sıçrama meydana gelir. Kol, çarpışmadan kısa bir süre sonra anomali ile temasını kaybeder ve bu anda incelenen yükseklik hatalı ölçülür. Daha yüksek hızlarda, daha şiddetli



Şekil 1.3 : Kaliper Test Düzeneği [6]

çarpışma yaşanır ve denetlenen yüksekliğin ölçüm hatası daha büyük olur. İkinci deneyde de 10 mm yüksekliğe sahip yapay anomali kullanılmıştır. Bağıl hız 5 m/s olarak ayarlanmıştır. Anomali yüksekliği ve bağıl hız sabit tutularak yay kuvvetinin ölçüm hatasına olan etkisi araştırılmıştır. Çıktılara göre daha büyük yay kuvvetinin, kaliper kolu boru hattı iç duvarı ile temasını kaybettikten sonra sıçrama süresini büyük ölçüde azaltabileceğini, dolayısıyla ölçüm hatasının düşürülebileceğini gösterir. Son deneyde ise 1 m/s bağıl hız ve 30 N yay kuvveti sabit tutularak sırasıyla 5 mm, 10 mm ve 15 mm anomali yüksekliği ölçümü yapılmıştır. Aynı deney 5 m/s bağıl hız ve 30 N yay kuvveti ile tekrarlanmıştır. Deney sonucuna göre 1 m/s hızda anomali yüksekliğinin ölçüm hatasına bir etkisi olmadığı gözlenirken, 5 m/s hızda anomali yüksekliğinin artması ile ölçüm hatasının azaldığı görülmüştür.

2. BORU HATLARINDA OLUŞABİLECEK ANOMALİLER VE DENTLER

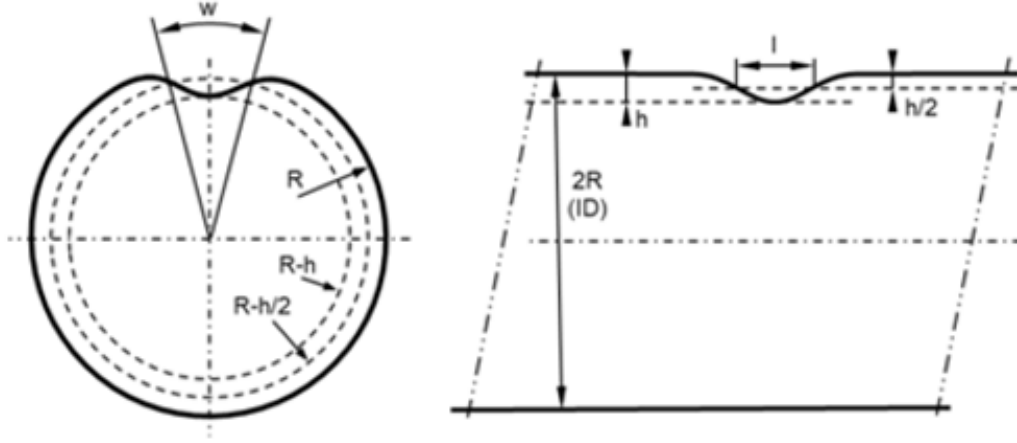
2.1 Dent Hasarları

Boru hatlarında anomali olarak nitelendirilen farklı tiplerdeki kusurlar oluşabilmektedir. Bu kusurlar boru üretimi esnasında olabileceği gibi dış kaynaklı da olabilmektedir. Bir boru hattının imalatı sırasında meydana gelen kusurlar genellikle bilinen ve kanıtlanmış kalite kontrol (işçilik) limitlerine göre değerlendirilir [8]. Dolayısıyla imalat sırasında oluşan boru kusurları belirli bir sınır içerisinde olmaktadır. Boru hattı hadiselerindeki kayıtlara göre boruda meydana gelen kazaların yaklaşık % 6'sı hasar oluşumundan kısa süre sonra (saatler veya günler içerisinde) meydana gelirken, %87'sinde kazalar uzun süre sonunda meydana gelmektedir. Bahsi geçen %87'lik ani olmayan kazalar, korozyon, gerilimli korozyon çatlağı, kayalardan kaynaklı delinmeler, yer hareketleri ve basınç dalgalanmasından kaynaklanan yıpranma gibi ikincil sorunların gelişmesinden kaynaklanmıştır. Genellikle boru hattı bütünlüğüne yönelik ana tehdit olarak görülmesi de, ani olmayan hasarların %19'u kaya eziklerinden kaynaklanmaktadır [4]. Bunlara ek olarak gömülü boru hatlarında zeminde çalışan makine çarpmaları, dolgu sırasındaki kaya çarpmaları gibi dış müdahaleler sonucunda oluşan hasarlarda mevcuttur [18]. Sonuç olarak istatistiksel sonuçlara dayanarak, boru hattı arızalarının büyük bir kısmını oluşturan "dent" adı verilen göçükleri, oyukları (ing., gouge), mekanik hasarları, boru çapında oluşan ovalite bozukluklarını tespit edebilecek araçların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Boru hattı kusurlarının değerlendirilmesi ve mevcut yöntemlerin kullanımına ilişkin bilgilerin sağlanması ve bu amaçla boru hattı kusur değerlendirme kılavuzunun (ing., pipeline defect assessment manual, PDAM [8]) geliştirilmesi için on altı uluslararası petrol ve gaz şirketinin sponsor olduğu bir proje oluşturulmuştur [8]. Literatürde bu projeye ek olarak farklı proje ve akademik yayınlar mevcuttur. Test düzeneğinde üretilecek dent hasarları bu çalışmalardaki sınırlar ve örnekler göz önünde bulundurularak belirlenecektir.

Boru hatlarında meydana gelen dent hasarları genellikle boruların dışarıdan darbe alması nedeniyle içe doğru oluşan göçükler tarzında meydana gelmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında dent olarak ifade edilen hasarlar genellikle göçük olarak tabir edilmektedir. Literatürde boru hatlarındaki göçüklerin gerinime dayalı değerlendirmesi için bazı kriterler önerilmiştir. Boru hatlarındaki göçüklerle ilgili olarak, mevcut kriterlerin çoğu, hasar ciddiyetini belirlemek için geleneksel olarak göçük derinliği ölçümünü dikkate almaktadır. Uluslararası boru hattı kodları, nominal boru çapının %6'sını aşan düz ezikleri genellikle zararlı olarak kabul etmektedir [4]. Bir başka çalışmada ise kısıtlamalara ve boru iç basıncına bağlı olarak düz tipli göçüklerin kabul edilebilir derinliğinin, boru çapının %7 ila %10'u kadar olduğu bilgisi verilmektedir [8]. Ayrıca Avrupa Boru Hattı Araştırma Grubu'na (ing., European Pipeline Research Group, EPRG) göre güvenlik payı dikkate alındığında, bir boru hattının kabul edilebilir göçük derinliği D boru çapı olmak üzere %10D'dir. Ek olarak, petrol ve gaz boru hatları iç basınçla çalıştığından, bu tür bir basıncın etkisi altında göçükler geri tepmekte ve dolayısıyla göçük derinliğini azaltmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda bir boru hattındaki göçüklerin kritik derinliğinin %7D ile sınırlı olduğu sonucuna varılabilir [8]. Boru hattında korozyon, oyuk, göçük, çatlak, metal kaybı gibi çeşitli hasarlar oluşabilmektedir. Oluşan bu hasarlar tek başına oluşabileceği gibi beraber de mevcut olabilmektedirler. Örneğin hem göçük hem de oyukların meydana geldiği oyuklu göçükler söz konusu olabilir. Bu gibi göçükler karmaşık (ing., complex) göçükler olarak nitelendirilebilmektedir. Bununla birlikte göçükler de kendi içinde yumuşak göçük, düz göçük (ing., plain dent), bükülmüş göçük (ing., kinked dent), oyuk içeren düz göçük şeklinde olabilir [8], [7]. Göçükler genel olarak bir dış kuvvetin neden olduğu iç çapın değişmesiyle sonuçlanan boru çeperinin içe doğru deformasyonu şeklinde tanımlanabilir. Daha iyi anlaşılabilmesi adına boru hattında meydana gelen bir göçük için farklı eksenlerdeki göçük geometrisi Şekil 2.1'de verilmektedir.

Göçük, mutlak derinlik veya boru hattı çapının yüzdesi olarak Denklem 2.1'deki gibi tanımlanabilir.

$$\% \frac{h}{OD} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 : Boru kesiti ve boru boyunca oluşan göçük geometrisi [7]

Eşitlikte yer alan h terimi Şekil 2.1’de belirtildiği gibidir, OD terimi ise borunun dış çapını (ing., outer diameter) temsil etmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda h ve OD terimleri yerine sırasıyla d ve D terimleri de kullanılabilir. Oyuklar, yabancı bir nesnenin müdahalesi ile boru duvarında meydana gelen ve malzemenin tahrip olduğu oyuklar veya yarıklar şeklindeki yüzey hasarıdır. ILI tarafından belirlenen deformasyon dağılımı detay bilgisi Tablo 2.1’de yer almaktadır.

Çizelge 2.1 : ILI tarafından belirtilen deformasyon bilgileri [1]

Derinlik(%OD)	Toplam Hasar Miktarı	Standart Hasar	Metal Kayıplı Hasar
1	6059	5959	100
1-2 arası	1071	1021	50
2-3 arası	172	160	12
3-5 arası	35	33	2
6	2	2	0

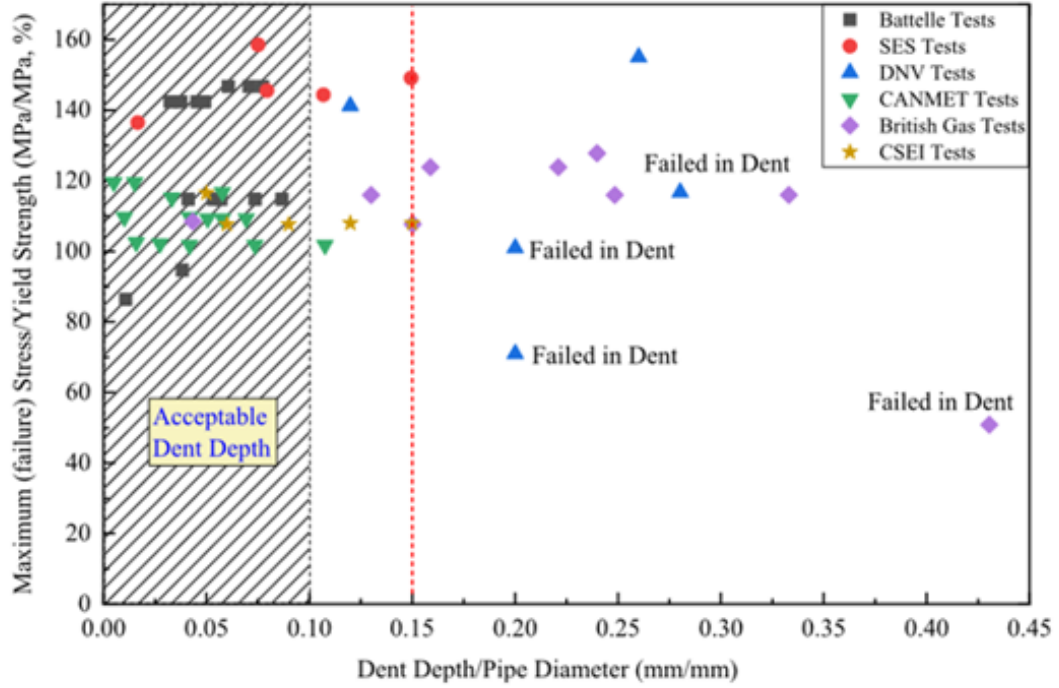
Tablodan da görüldüğü üzere metal kayıplı hasarlar toplam hasar bazında bakıldığında çok az miktardadır. Pratikte sadece hasar oluşması dolayısıyla bu durumda öncelikle metal kayıpsız hasarlara odaklanılabileceği sonucu çıkarılabilir. Oluşan hasarların (dent) hasar bilgileri için yapılan araştırmalar sonucunda literatürde çoğunlukla Denklem 2.1’de formülizasyonu verilen ve dent derinliği (d) ile boru çapı (D) oranını temsil eden kriterin kullanıldığı görülmüştür. Örneğin [19]’da borulardaki gerilme

analizi için yapılan testlerde %10 d/D'ye kadar olan göçük bilgisi kriterinin etkilerine bakılmıştır. Farklı bir çalışma olan [4]'de ise yine borulardaki gerilme analizi 60 mm, 114 mm ve 219 mm'lik iç çapa sahip borular için test edilmiş ve yapılan testlerdeki % d/OD kriteri olarak 6, 12, 18 ve 24 değerleri seçilmiştir. [20]'de 169.14 mm çapındaki boru için % d/D oranı olarak sırasıyla 0 (hasarsız), 4.26, 7.8, 11.94 ve 19.9 için testler yapılmıştır. Diğer bir çalışmada boru hatlarındaki düz göçüklerin stres konsantrasyon faktör (ing., stress concentration factor, SCF) analizi yapılmıştır. Analizler için kullanılan % d/D değeri için üst sınır olarak 12 değeri kullanılmıştır. Ayrıca problem göçük genişliği (w) ve uzunluğu (l) olarak 2.6 oranına göre iki farklı açıdan ele alınmıştır [10].

Bu çalışmada ülkemizde daha fazla miktarda olan 24" (610 mm) çapında boru hatları ele alınacaktır. Literatürdeki bir çalışmada D=24" boru hattı için dent hasarı deneyleri d/D oranı 0.0147'den 0.046'ya kadar değişkenlik göstermektedir [10]. Yani % d/D değeri yaklaşık olarak 1.5-4.6 arasında alınmış diyebiliriz. Benzer bir başka çalışmada ise 24" için %6.5 OD ve 34" için %7.3 OD örnekleri kullanılmıştır [3].

Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda göçük derinliği ile boru çapı oranı olan % d/D için minimum değer olarak (0-hasarsız boru hariç) 1 değeri, maksimum değer olarak ise 24 değeri kullanılmıştır. Fakat % d/D oranı olarak 24 seçilmesi ekstrem bir durumdur. Şekil 2.2'de hasar ölçeği d/D için hasar stresi/akış mukavemeti grafiği verilmiştir. Göçük derinliği %15 D içinde olması durumunda test boru hatlarının hiçbirinde göçükte arıza meydana gelmemiştir. Grafikten de görüleceği üzere kabul edilebilir göçük derinliğinin maksimum sınırı olarak EPGR'ye göre belirtilen 0.10 değeri kabul edilmiştir [21]. Ek olarak, petrol ve gaz boru hatlarının iç basınçla çalıştığından ve basınç etkisi ile geri tepen göçüklerde düşünüldüğünde göçük derinliği sınırı olarak %7D'nin kabul edilebileceğine değinilmiştir [9,21]. Dolayısıyla grafikte yer alan % d/D oranınının 0-45 olarak alınması problemin en uç noktalar içinde analiz edilmesi içindir ve gerçekçi değildir.

Nihai olarak ele alınacak göçük derinlik ölçütü % d/D değeri gerçekte karşılaşılan genel durum için %7, normal üst sınır için %10, ekstrem durum üst sınırı için %15 ve ekstrem durumun yükseltilmiş üst sınırı için %20 olarak düşünülebilir. Göçük hasarı



Şekil 2.2 : Hasar stresi ve göçük (dent) derinliği ölçütü arasındaki ilişki grafiği [8,9]

özellikleri için sadece derinlik bilgisi yeterli değildir aynı zamanda oluşan göçüğün genişlik (w) ve uzunluğu (l) da belirlenmelidir. Literatürde yer alan çoğu çalışmada göçüklerin derinliği hakkında bilgi veren $\% d/D$ oranına odaklanılmıştır. Bir çalışmada 168 mm çapında boru için göçük özellikleri olan l , w ve d için sırasıyla 110 mm, 80 mm ve 10 mm kullanılmıştır [22]. Dolayısıyla $\% d/D$ oranı hesaplandığında ilgili örnek için yaklaşık 5.94 olduğu görülmekte ve bu seviyenin genel $\%7$ seviyesinden az olduğu dolayısıyla makul bir değer olduğu sonucuna varılabilir. Yine aynı çalışmada 168 mm çapında boru için ayrıca çatlak ve çentik boyut örnekleri de verilmiştir. Bu örneklerle ait genel bilgiler ve bu bilgilerin 24" (610 mm) çapındaki boru için genişletilmiş halleri Tablo 2.1'de verilmektedir. Tabloda öncelikle ($l - w - d$) değerlerinin hepsi için oranlama yapılmış, ardından hasar bakımından uzunluğun zaten yeterince büyük seçildiği göz önünde bulundurularak doğrudan genişletmenin mantıklı olmayacağı düşünülmüş ve genişletme işlemi sadece w ve d için yapılmıştır.

Hem patlama hem de yıpranma testlerini içeren bir çalışmada kullanılan göçük (dent) ve oyuk (gouge) hasarlarına ait bilgiler Çizelge 2.3'de yer almaktadır [18]. Ele alınan çalışmada hasarlar oluşturulurken yıpranmış dişli ile yapılan yumuşak aşındırma ve

Çizelge 2.2 : [2]'de verilen örnek göçük, çatlak ve çentik boyutları (l – w - d) ve bunların 24” boru uyarlaması

	Göçük	Çatlak	Çentik
D=168 mm	110 - 80 - 10	44 - 0.31 - 0.70	44 - 9.5 - 3
D=610 mm	399.4 - 290 - 36	160 - 1.13 - 2.54	160 - 34.5 - 10.9
D=610 mm (1 hariç)	110 - 290 - 36	44 - 1.13 - 2.54	44 - 34.5 - 10.9

yeni ve keskin bir dişli ile yapılan yüksek aşındırma olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Verilen tabloda her iki aşındırma türü için elde edilen örnek hasar bilgileri verilmektedir. Hasar oluşumu için kullanılan borular X52 ve X70 tipi boru hatları olup boru dış çapları 24” değerindedir.

ILI tarafından belirtilen 200 adet taranan göçük için gerinim hesaplaması yapılmıştır [1]. Bu 200 adet göçükten 14 tanesi %5-6 arası, 4 tanesi %6’yı aşan gerinim değerine sahiptir. Dolayısıyla %5 gerinim değerini aşan toplam 18 adet göçük için hasar bilgileri Çizelge 2.3’te listelenmiştir.

Çizelge 2.3 : [2]'de verilen örnek göçük, çatlak ve çentik boyutları (l – w - d) ve bunların 24” boru uyarlaması

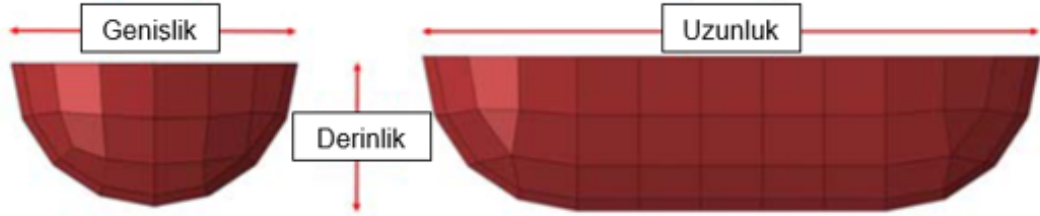
	Göçük Derinliği(%)	Oyuk Derinliği(%)	Oyuk Uzunluğu (mm)
Yumuşak Aşındırma	1.1	26.5	135
	1.6	6.3	150
	1.3	11.3	135
	2.6	34.2	115
	2.5	46.8	105
	1.5	22.2	175
	1.6	18.9	200
Yüksek Aşındırma	5.3	27.8	331
	5.9	29.1	375
	6.1	20.1	321
	4.7	20.0	331
	5.2	16.7	353
	5.3	21.1	319

Göçük yıpranma analizi için Şekil 2.3’da tanımlanan hasar geometrisi için yumuşak geçişli ve keskin olmak üzere iki farklı göçük çeşidi Çizelge 2.4’da belirtildiği gibi 8”

Çizelge 2.4 : [1]'de verilen örnek göçük ve hasar bilgileri

Derinlik(%)	Uzunluk(mm)	Genişlik(mm)	Uzunluk(in.)	Genişlik (in)	Hasar Yönü (saat)
3.9	408.94	439.42	16.1	17.3	5:44
3.2	340.36	538.48	13.4	21.2	6:23
5.0	624.84	751.84	24.6	29.6	6:39
3.8	441.96	530.86	17.4	20.9	5:58
2.3	373.38	365.76	14.7	14.4	5:38
2.9	327.66	698.5	12.9	27.5	6:03
2.3	274.32	444.5	10.8	17.5	5:53
1.5	187.96	345.44	7.4	13.6	2:23
2.2	226.06	386.08	8.9	15.2	6:04
1.0	157.48	259.08	6.2	10.2	11:47
2.6	335.28	345.44	13.2	13.6	5:12
2.0	279.4	325.12	11.0	12.8	6:31
1.1	147.32	398.78	5.8	15.7	0:32
2.3	368.3	558.8	14.5	22.0	6:32
2.3	340.36	411.48	13.4	16.2	6:22
2.1	254	251.46	10.0	9.9	5:53
1.8	335.28	287.02	13.2	11.3	11:22
3.3	650.24	530.86	25.6	20.9	6:21

ve 16” borular için oluşturulmuştur [23]. Tabloda yer alan 24” çapındaki borular için ise tablodakine benzer şekilde genişletilerek elde edilmiştir.



Şekil 2.3 : Hasar geometrisi [10]

Bükülmeye maruz kalan boruların nihai dayanımına dair yapılan nümerik bir çalışmada yer alan yapay hasar boyutları Çizelge 2.5’de yer almaktadır [22]. Tabloda yer alan t boru et kalınlığını ifade etmektedir. Ayrıca tabloda yer alan değerler 610 mm için genişletilerek tabloya eklenmiştir.

Çizelge 2.5 : [1]'de verilen örnek göçük ve hasar bilgileri

Hasar tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)	% d/D
8" Keskin	50.8	25.4	12.7	%6.25
8" Yumuşak	101.6	50.8	25.4	%12.5
16" Keskin	101.6	50.8	25.4	%6.25
16" Yumuşak	203.2	101.6	50.8	%12.5
32" Keskin	152.4	76.2	38.1	%6.25
32" Yumuşak	304.8	152.4	76.2	%12.5

Çizelge 2.6 : [3]'de yer alan yaklaşık 169 mm'lik boru için göçük bilgileri

D	t	Göçük(l-w-d)	Göçük Açısı	% d/D
169.21	8.25	89-68-10.3	90	%6.087
168.23	8.13	100-75-10.3	90	%6.123
169.38	7.90	130-60-10.3	45	%6.081
168.74	8.15	110-85-10.3	90	%6.104
610	-	320.8-245.1-37.1	-	%6.082
610	-	398.9-634.5-37.3	-	%6.122
610	-	468.2-216.0-37.1	-	%6.082
610	-	397.6-307.3-37.2	-	%6.098

Bir başka çalışmada yatak koşulları sert veya esnek deniz yatağı olan zemine düşen cisimlerin yüklerine karşı boru hatlarının tepkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [2]. Bu amaçla 63 mm çapa sahip boru için deneysel olarak oluşturulan hasar bilgileri aşağıda verilmektedir.

Çizelge 2.7 : [2]'de yer alan yapay göçük bilgileri

Örnek no	1	2	3	4	5
Derinlik (mm)	5.18	8.66	10.78	9.27	7.21
Genişlik (mm)	38.97	42.41	46.82	44.45	40.79
Uzunluk (mm)	51.23	72.36	123.22	105.68	85.56

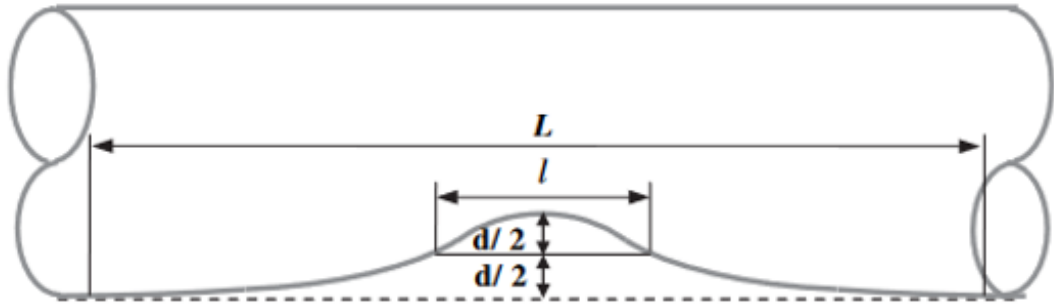
Çeşitli şirketlerin boru hattı testlerinde kullandıkları anomali boyutlarına ilişkin bazı değerler Çizelge 2.8'de listelenmiştir [9]. Tablolarda da görüleceği üzere patlama

testi gibi testler için yapılan deneylerde kullanılan borulara ait boru çapı, boru et kalınlığı, göçük ve oyuk derinliği, oluşan hasarların uzunluk ve derinlik bilgilerine ilişkin aralıklar verilmiştir.

Çizelge 2.8 : İngiliz Gazı (British Gas) göçük halkası ve patlama testi parametre aralıkları

	Boru Çapı (mm)	Et Kalınlığı (mm)	Göçük Derinliği (mm)	Oyuk Derinliği (mm)
En az	323.9	6.6	1.9	0.2
En çok	1066.8	16.4	77.7	7.9

Şekil 2.4'te verilen görsel çalışma [4]'den alınmıştır ve göçük (dent) için uzunluk geometrisini temsil etmektedir.



Şekil 2.4 : Dent uzunluğu geometrisi [4]

Göçük geometrisinden görüldüğü gibi göçük derinliği olan d teriminin yarı değerine düştüğü kısım l , derinliğin d olduğu kısım ise L olmaktadır.

Bu durum için [4]'de yer alan göçük uzunluk geometrisi bilgisi aşağıdaki tabloda listelenmektedir.

Çizelge 2.9 : [4]'da verilen göçük uzunluk geometrisi bilgileri

D	% d/D	L(mm)	l(mm)
60	6	739	158
60	12	1366	182
60	18	1635	237
60	24	1749	294
114	6	802	184
114	12	1401	198
114	18	1654	255
114	24	1760	313
219	6	879	237
219	12	1441	226
219	18	1678	281
219	24	1773	337

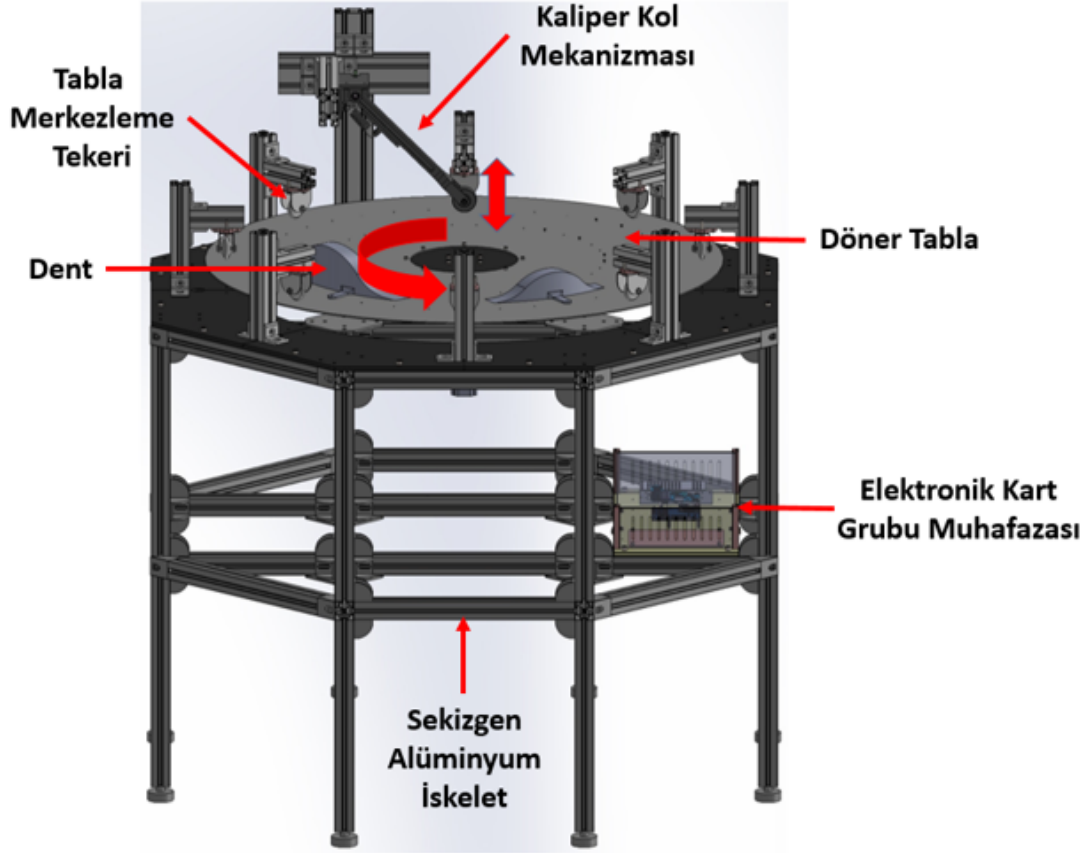
3. KALİPER TEST MEKANİZMASI

3.1 Düzenek Kurulum ve Tanıtımı

Kaliper modülünü tasarlamadan önce test mekanizması tasarlayıp üretmek bir çok açıdan faydalı görülmektedir. Bu tasarlanan ve üretilen test düzeneği ile kaliper kol mekanizması çalışmaları, odometre kol mekanizması çalışmaları, sinyal işleme çalışmaları, simülasyon sonuçlarının deneysel olarak doğrulanması gibi denemeler bu düzenek ile yapılmaktadır. Bu mekanizma sekizgen şekilde tasarlanmış ve montajlanmış sigma profil iskeleti üzerine kurulmuştur. İskeletin tam ortasında düzeneğin döndürülmesini sağlayan bir mekanizma bulunmaktadır. Üst yüzeyinde ise yapay olarak üretilmiş dentlerin montajlanabildiği dairesel hareket yapan bir tabla bulunmaktadır. Kaliper kol sistemini simüle edebilmek için ise bir adet kaliper kol mekanizması yerleştirilmiştir. İstenildiği takdirde birden fazla kol mekanizması düzeneğe eklenebilecektir. Düzenek tasarımı odometre testlerini de yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. İskeletin orta ve yan kısmında ise sistemi kontrol eden elektronik kartların bulunduğu plexiglass kutu bulunmaktadır. Döner tablanın dönmesi esnasında ölçümlerin tabla yalpalamasından etkilenmemesi için tablanın alt ve üst yüzeyine temas eden döner tekerlekler yerleştirilmiştir. Kaliper test mekanizmasının katı model programında tasarlanarak oluşturulmuş 3D modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Test Mekanizması hafif ve dayanıklı olması açısından Alüminyum sigma profillerden imal edilmiştir. Bu sistemde sigma profil kullanılmasının temel sebeplerinden biri de sigma profillerin ölçüsel olarak ayar yapabilme esnekliği sağlamasıdır. Bağlantı noktaları değiştirilerek sistem kolayca revize edilebilir. Dikeyde ve yatayda birçok profil kullanılarak düzenek sağlamlık ve montaj açısından esneklik kazanmıştır. İskelet inşa edildikten sonra üzerine sekiz adet aynı ölçülerde plakalar monte edilmiştir. Bu plakaların üzerine profiller yerleştirilebilecek ve istenildiğinde bağlantı noktaları

değiştirilebilecektir. Bu plakaların üzerine takılacak dikey profiller sayesinde aynı anda ve çok sayıda test yapılabilir.

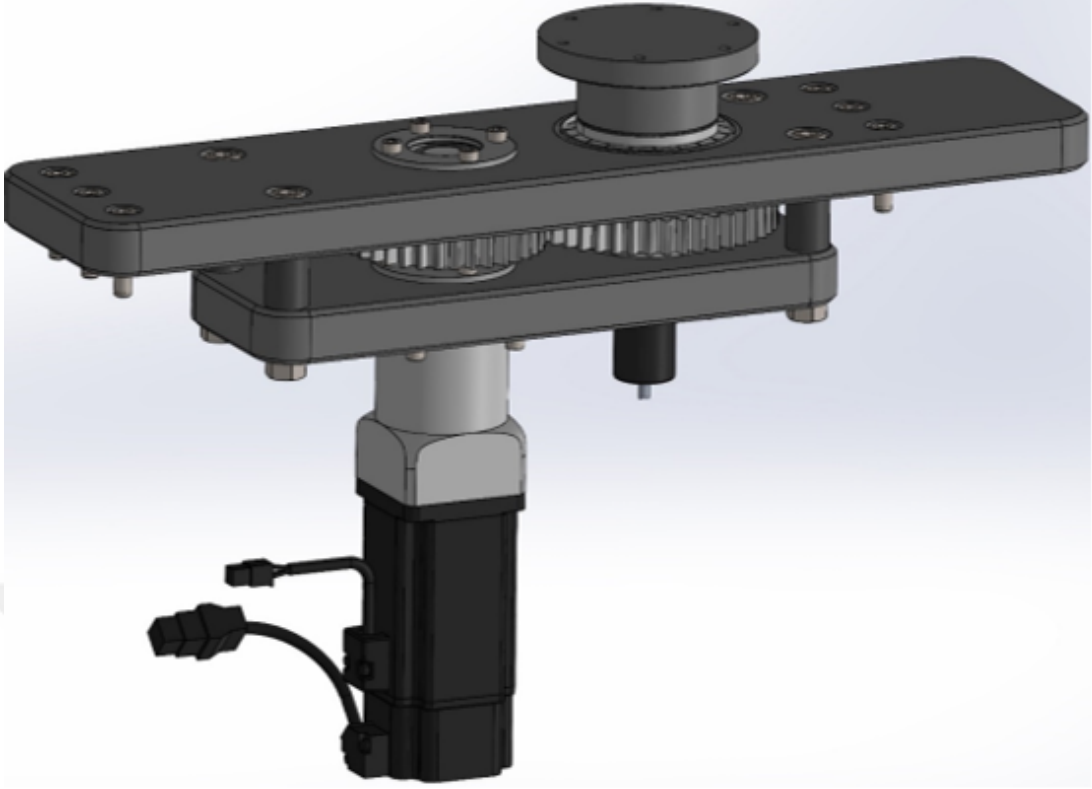


Şekil 3.1 : Kaliper test düzeneği ve üzerinde bulunan yapıların genel gösterimi

Şekil 3.1'deki test düzeneğinin bazı genel bilgileri aşağıdaki gibidir:

- Düzenek Boyutları: En 1450 mm – Sekizgen
- Düzenek Yüksekliği: 1400 mm
- Tablanın Dönme Hızı: 1 - 3 - 5 m/s
- Karkas Malzemesi: Alüminyum Profil
- Mekanik Kısım: Servo motor tahrikli dişli çark mekanizması

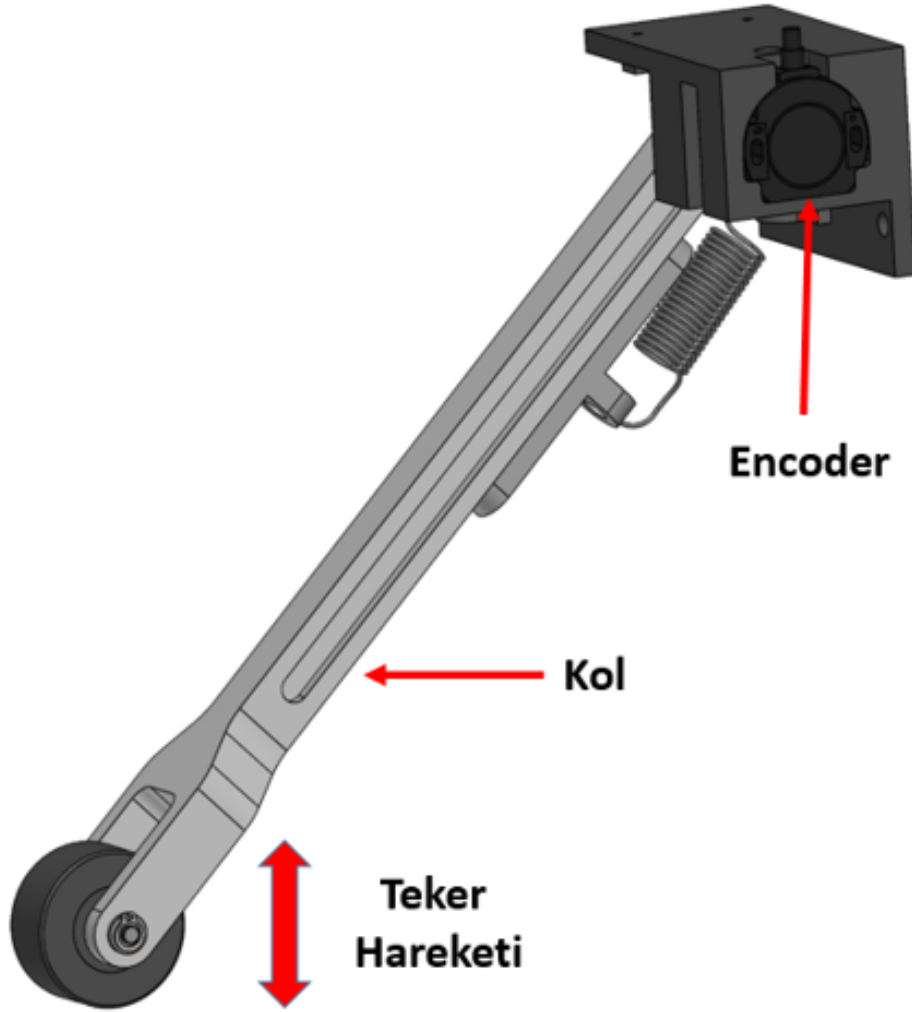
Şekil 3.2'deki mekanizmada tablayı tutan dişli silindirik rulmanla yataklanırken diğer dişli sabit bilyalı rulmanla yataklanmıştır. Dişli, motor, redüktör gibi parçalar



Şekil 3.2 : Mekanizmadaki tablayı döndüren motor ve aktarma sistemleri

alüminyumdan yapılmış kalın bir parçaya monte edilmiş bu parça da çeşitli cıvata ve somunlarla iskelete sabitlenmiştir. Böylelikle mekanizmanın çalışması ve tablanın dönmesi esnasında oluşabilecek titreşimlere karşı rijit bir sistem elde edilmiştir.

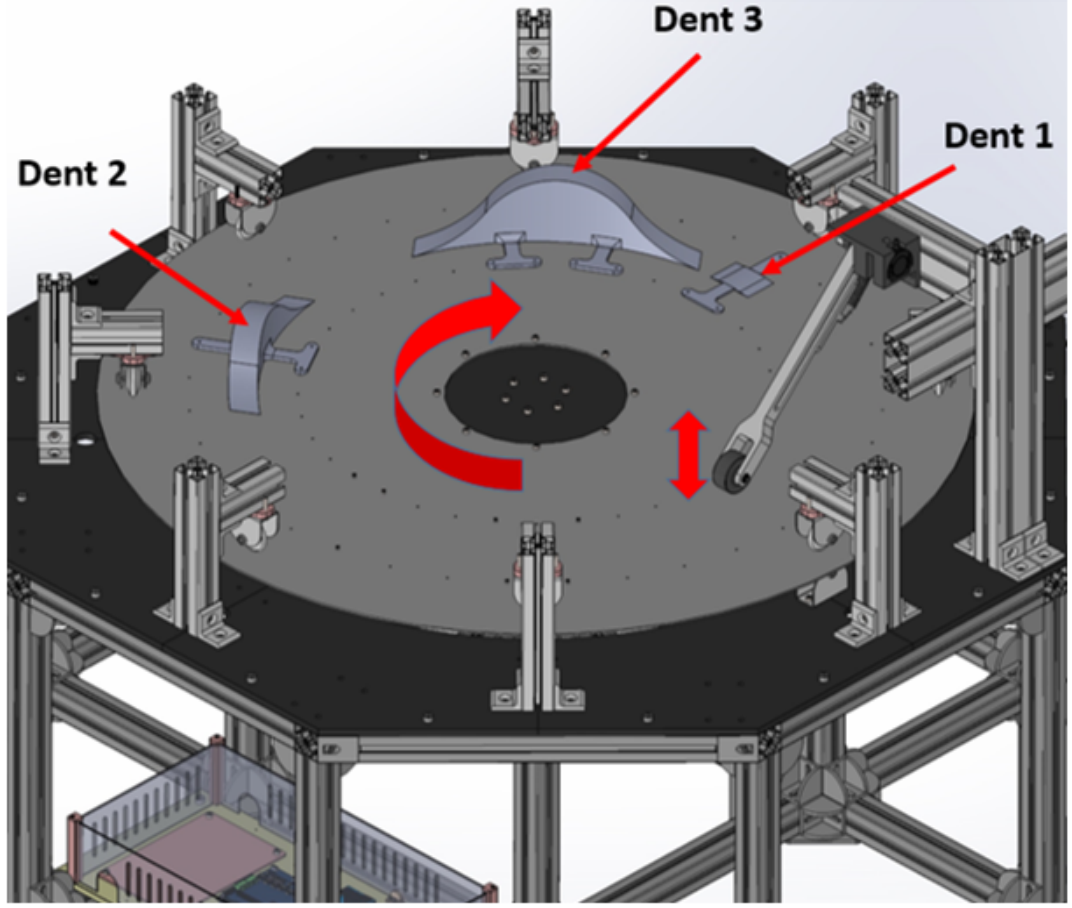
Kol mekanizmasının çalışma prensibi aşağıdaki gibidir; Tabla yüzeyinde yuvarlanan tekerler tümseğe veya çukura denk geldiği zaman düşey yönde Şekil 3.3 de gösterildiği gibi hareket ederler. Bu sayede kol, açısız olarak mekanizma gövdesi etrafında dönme hareketi yapacaktır. Tekerlerin daima döner tabla yüzeyine temas etmesini sağlayan kol üzerine monte edilmiş bir adet çekme yayı bulunmaktadır. Bu yay bir ön gerilme kuvvetine sahip olduğundan tekerler tümseklerden veya çukurlardan geçtikten sonra kolu döner tabla yüzeyine doğru bastırır. Kolun düşey yönde hareket etmesiyle kola sabitlenmiş olarak merkezinde konumlandırılmış mil de kolla birlikte aynı derecede olacak şekilde açısız olarak hareket edecektir. Bu milin arkasına monte edilmiş bir mıknatıs da mil ile aynı açısız dönmeye maruz kalacaktır. Mıknatısın yüzeyine bitişik şekilde konumlandırılan bir encoder de bu açısız yer değiştirmeyi algılamaktadır. Kol



Şekil 3.3 : Test Sistemi Kul Mekanizması

uzunluğu düzenek üzerindeki açısı belli olduğundan encoder bu açısal yer değiştirmeyi grafiğe dökerek bize tabla üzerindeki dentlerin şekilleri hakkında bilgi vermektedir. Tek kul mekanizması ile dentin derinliğini ve uzunluğunu hesaplayabilecekken bir kaç kul mekanizması ile dentlerin genişliği hakkında da fikir sahibi olunabilir. Bu sayede kaliper modülü tasarımı netleştirelmeden önce test mekanizmasında bazı senaryolar denenme ve gözlemlenme şansı elde edilebilecektir.

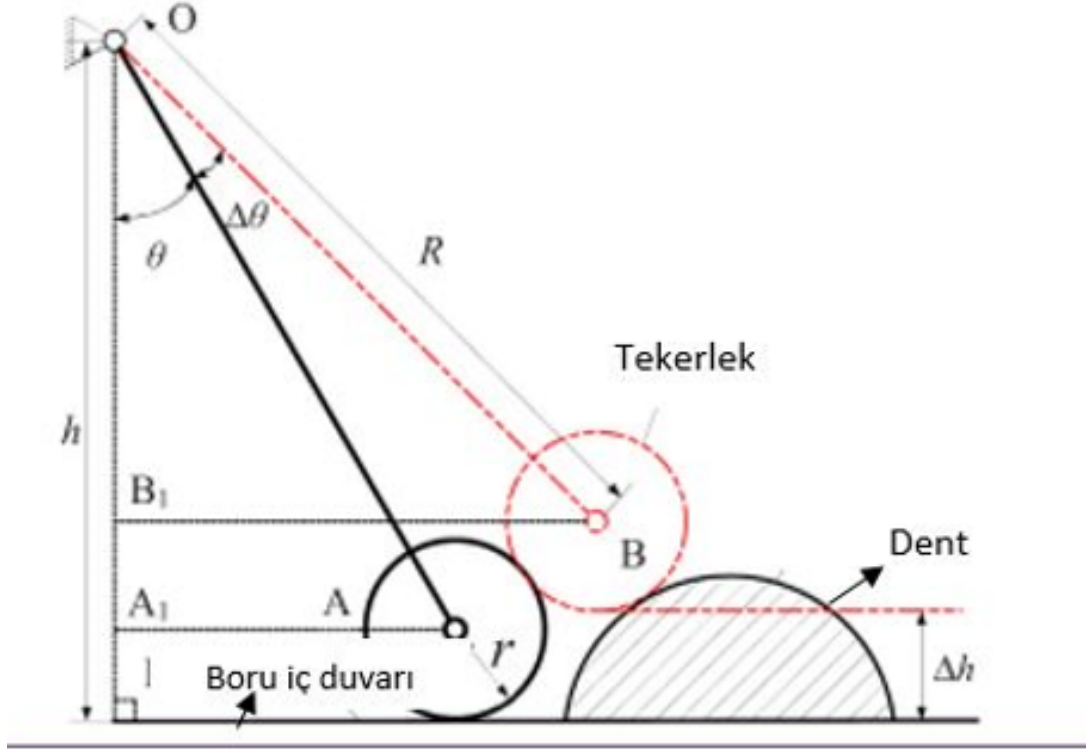
Şekil 3.4'teki gibi tekerlekli bir kaliper kolu tasarlanmıştır. Bu kulun seçilmesinin en önemli sebeplerinden biri operasyon sonrasında boru hattı iç duvarının neredeyse hiç hasar görmemesidir. Ek olarak, tekerlekli kaliper kolu, boru hattı ile kul arasındaki yuvarlanma hareketinde az miktarda aşınmaya uğrar. Algılayıcı olarak



Şekil 3.4 : Test Sistemi Üzerindeki Dent Yerleşimleri

kol içine sabitlenmiş bir miknats ve RFC4080 (Manyetik Açı Sensörü) kullanılmıştır. Sabitlenmiş miknats, kaliper kolunun hareket ettirdiği döner bir şafta bağlıdır. Kaliper tekerinin anomaliye teması ile oluşan yükseklik değişimi, açısal değişim olarak bu şafta aktarılır. Açısal değişim RFC4080 sensörü ile tespit edilerek geometrik denklemlerle yükseklik değişimine dönüştürülür. Anomalinin olmadığı durumda dikey eksen ve kol arasındaki açı teta, kolun anomali üzerinden geçerken hali ve anomali olmadığı durumdaki hali arasındaki açı Delta teta, kaliper kolunun uzunluğu R, tekerleğin yarıçapı r, duvar iç yüzeyi ve pig merkezi arasındaki dikey mesafe h ve anomalinin yüksekliği Delta h olmak üzere Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'e göre boru hattında oluşan anomalinin yüksekliği hesaplanabilir. Ek olarak, odometri yardımıyla anomalinin aksenal büyüklüğü de tespit edilebilir. Bu deney düzeneğinde yer alan disk, step motor aracılığı ile döndürülmektedir. Bağlı hız step motor ile kontrol edilebilmektedir.

Disk üzerine PLA malzemeden üretilmiş yapay bir anomali sabitlenmiştir. Deney çıktısı olarak, yay kuvveti, disk hızı ve tekerlek sönümlemesi dediğimiz tekerlek yapısı değiştirilerek anomalinin yüksekliği incelenmektedir. Anomali boyutu, yay kuvveti (pre-tightening force), pıgleme hızı ve tekerlek cinsi değiştirilerek kaliperin tutarlılığı (precision) üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.5 : Mekanik Kol-Dent Geometrisi [6]

$$h = R \cdot \cos(\Theta) + r \quad (3.1)$$

$$\Delta h = R \cdot \cos(\Theta) - R \cdot \cos(\Theta + \Delta\Theta) \quad (3.2)$$

Şekil 3.5'te gösterilen geometriye göre Denklem 3.1 ve 3.2 hesaplandığında manyetik açı sensöründen gelen veriler derinliğe dönüştürülmektedir. Eşitliklerde yer alan R , r ve h terimleri Şekil 3.5'te de görüldüğü üzere sırasıyla mekanik kol uzunluğunu, tekerin yarıçapını ve kol mekanizmasının tablaya olan dik uzaklığını temsil etmektedir. Kaliper test düzeneğinde yaklaşık olarak R=356 mm , r=27.5 mm ve h=272 mm olarak alınmıştır. Bilinen bu terimler aracılığıyla teta hesabı kolaylıkla yapılabilmektedir.

Denklem 3.2’de kullanılan delta teta değeri ise elde edilen açı değerindeki değişimden hesaplanmaktadır. Bu bilgiler ışığında mekanik koldan elde edilen aı değerlerinden mm’lik yükseklik bilgileri elde edilerek aşağıdaki grafikler çizdirilmiştir.



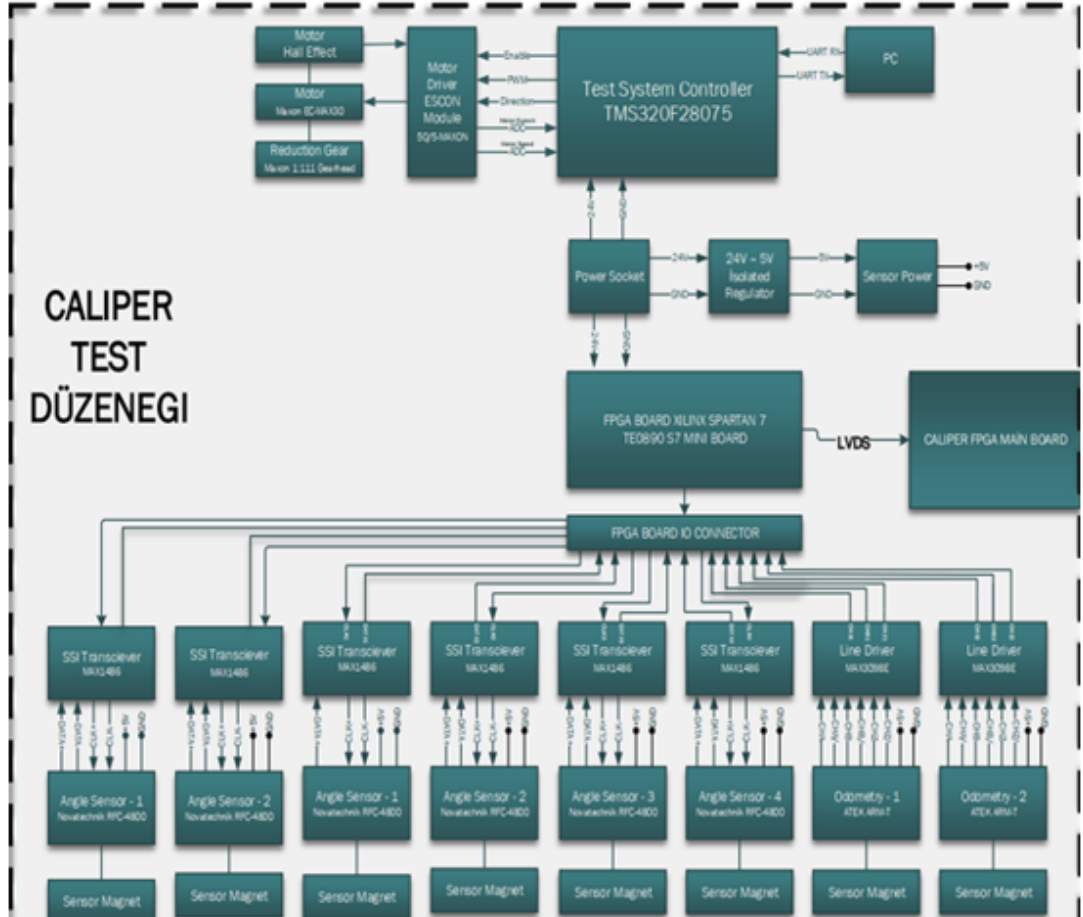
şekil 3.6 : Kaliper Test Mekanizması

Kaliper test mekanizması tasarım, üretim ve montaj aşamalarından sonraki ilk hali şekil 3.6’daki gibidir.



4. YAZILIM VE DONANIM

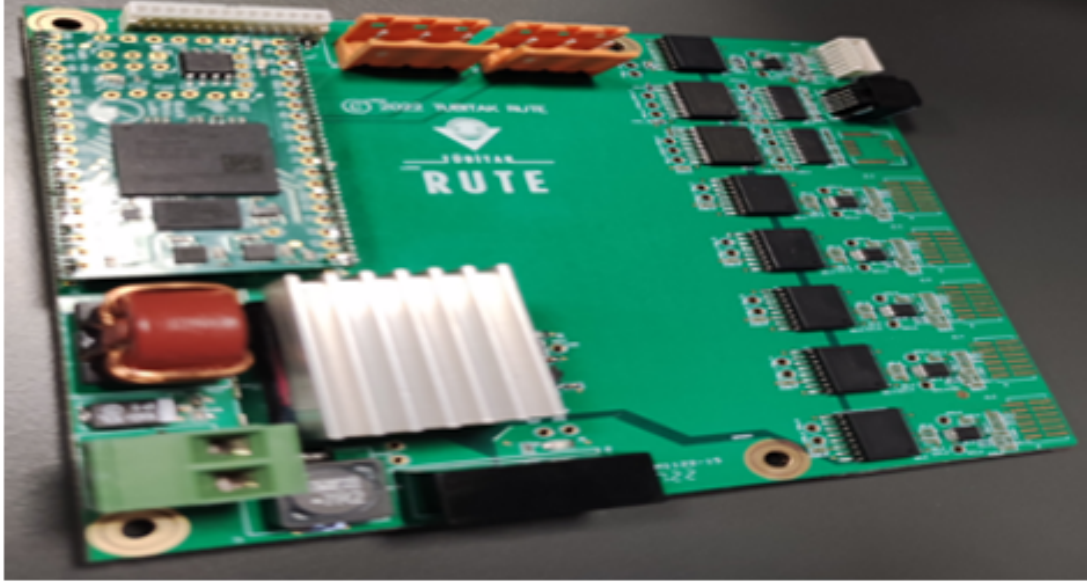
4.1 Donanım Mimarisi



Şekil 4.1 : Test Düzeneği Elektronik Sistem Mimarisi

Test düzeneği elektronik mimarisinde motoru kontrol eden bir işlemci bulunmaktadır. Bu işlemci ile motor hareketi istenildiği şekilde sağlanacaktır. 1 adet Main FPGA board bulunmakta ve buna bağlı bir slave FPGA board bulunmaktadır. Sensör okumaları slave FPGA üzerinden yapılacağından dolayı açı sensörleri ve odometri sensörlerinin bağlantısı da onun üzerinden gözükmetedir. Slave FPGA kartının üzerine Spartan 7 FPGA modülü takılabilir konumdadır. Sistemimizde henüz tek kol

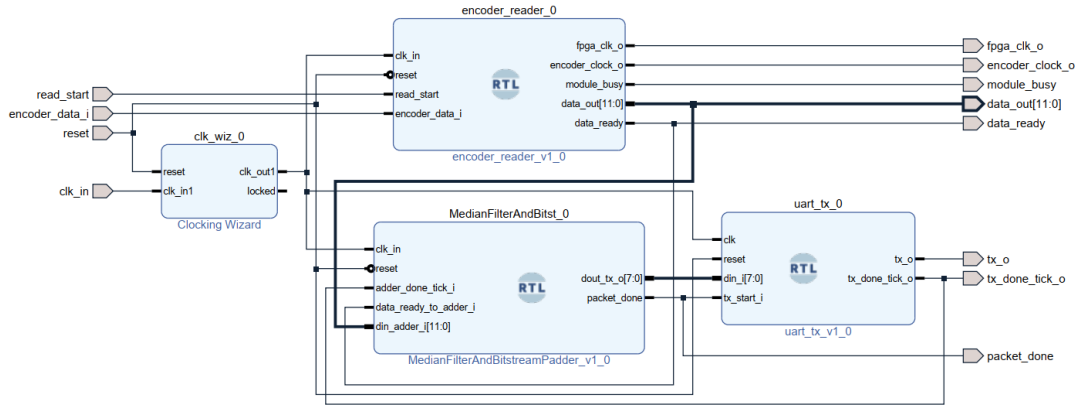
olduğundan dolayı tek bir FPGA ile RFC manyetik açılı sensöründen SSI haberleşme ile veriler okunmaktadır. Okunan veriler FPGA'den bilgisayara UART ile aktarılmaktadır. Şekil 4.1'de gösterilen elemanlar kaliper test düzeneğinden kaliper modülüne geçiş amaçlı bu şekilde genel tasarlanmıştır.



Şekil 4.2 : Test Düzeneği Açılı Sensör Kartı

Test düzeneği açılı sensörü kartı Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Kart üzerinde 6 adet açılı sensörü girişi, 2 adet odometri girişi ve 1 adet Spartan 7 FPGA bulunmaktadır. Tek sensörü bu karta takarak Spartan 7 üzerinden yapılan tasarım ile veriler alınmaktadır.

4.2 Yazılım Mimarisi



Şekil 4.3 : Test Düzenegi FPGA Blok Şema Tasarımı

Test düzenegi için tasarlanan FPGA Blok şema tasarımı şekil 4.3'te gösterilmektedir.

The screenshot shows the Clocking Wizard (6.0) interface. The **Output Clocks** tab is selected, displaying a table of output clock configurations. The `clk_out1` output is selected, and its frequency is set to 5 MHz. The **USE CLOCK SEQUENCING** checkbox is unchecked. The **Clocking Feedback** section is also visible.

Output Clock	Port Name	Output Freq (MHz)	Requested	Actual
<input checked="" type="checkbox"/>	clk_out1	5	5.00000	5.00000
<input type="checkbox"/>	clk_out2	100.000	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	clk_out3	100.000	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	clk_out4	100.000	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	clk_out5	100.000	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	clk_out6	100.000	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	clk_out7	100.000	N/A	N/A

Şekil 4.4 : Clock Sihirbazı üzerinden frekans ayarlama gösterimi

Şekil 4.3'te gösterilen blok şemasındaki clock sihirbazı IP'sinin içi Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Sensörümüzün en yüksek hızda çalışma frekansı 1 Mhz olduğu için FPGA frekansımız Clock sihirbazı üzerinden 5 MHz'e seviyesine indirilebilmektedir. Clock sihirbazı frekansımızı 1 Mhz seviyesine indirmemize izin vermemektedir.

```

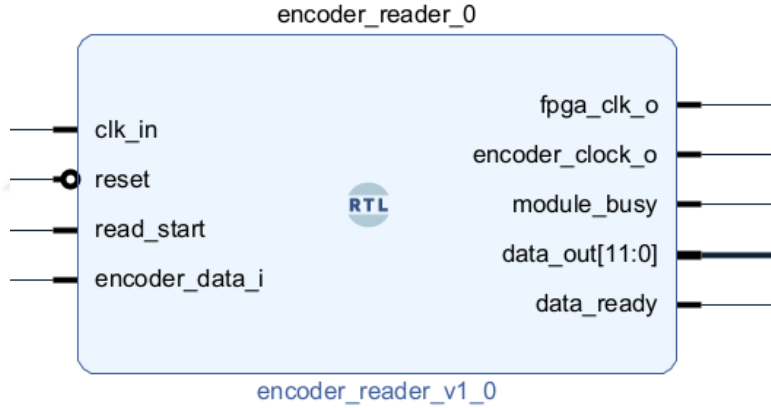
BUFR_inst : BUFR
generic map (
  BUFR_DIVIDE => "5", -- Values: "BYPASS, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8"
  SIM_DEVICE => "7SERIES" -- Must be set to "7SERIES"
)
port map (
  O => clk_out, -- 1-bit output: Clock output port
  CE => '1', -- 1-bit input: Active high, clock enable (Divided modes only)
  CLR => '0', -- 1-bit input: Active high, asynchronous clear (Divided modes only)
  I => clk_in -- 1-bit input: Clock buffer input driven by an IBUF, MMCM or local interconnect
);

```

Şekil 4.5 : Clock Buffer kodunun gösterimi

Şekil 4.5'te gösterildiği gibi kod üzerinden bir clock buffer ile 5'e bölerek 1 Mhz hızda frekans elde edilmektedir.

Bu şekilde process bloklarında kullanacağımız bütün sinyaller aynı clock üzerinden senkron bir şekilde çalışmaktadır. Birçok modül tanımlamış olsak da hepsini aynı sihirbaz üzerindeki clock' a bağlamamızdan dolayı senkronizasyon hataları elimine edilecektir. Clock sihirbazı kullanımı bu noktada oldukça önemlidir.



Şekil 4.6 : Sensör okumasının yapıldığı blok şemasının gösterimi

Sensör okumasını Şekil 4.6'daki blok şeması verilen 'encoder-reader' modülünde gerçekleştirilmektedir. Clock sihirbazından gelen sinyal clk-in girişinden alınmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi clock buffer ile 1 Mhz frekansa ayarlanmaktadır. Ardından Şekil 4.15'deki protokole uygun bir giriş sinyali üretilerek sensörden veriler okunmaktadır.

```

entity encoder_reader {
  + clk_in : std_logic
  + reset : std_logic
  + read_start : std_logic
  + encoder_data_i : std_logic
  + fpga_clk_o : std_logic
  + encoder_clock_o : std_logic
  + module_busy : std_logic
  + data_out : std_logic_vector(11 downto 0)
  + data_ready : std_logic
}

architecture Behavioral of encoder_reader {
  - counter : integer = 0
  - read_busy : std_logic = '0'
  - encoder_clock_out : std_logic = '1'
  - rx_data : std_logic_vector(11 downto 0) = (others => '0')
  - graytobin_data : std_logic_vector(11 downto 0) = (others => '0')
  - clk_out : std_logic
  - read_start_counter_5_Khz : integer = 0
  - sgnl_read_start : std_logic
}

```

Şekil 4.7 : Sensör okumasının yapıldığı modülün port ve sinyallerinin gösterimi

Şekil 4.7’de sensör okuması yaptığımız modüldeki port ve sinyaller gösterilmektedir.

Giriş Portları:

- 'clk-in': Giriş saat sinyali.
- 'reset': Asenkron sıfırlama sinyali.
- 'read-start': Okuma işleminin başladığını gösteren sinyal.
- 'encoder-data-i': Encoder'dan gelen giriş sinyali.

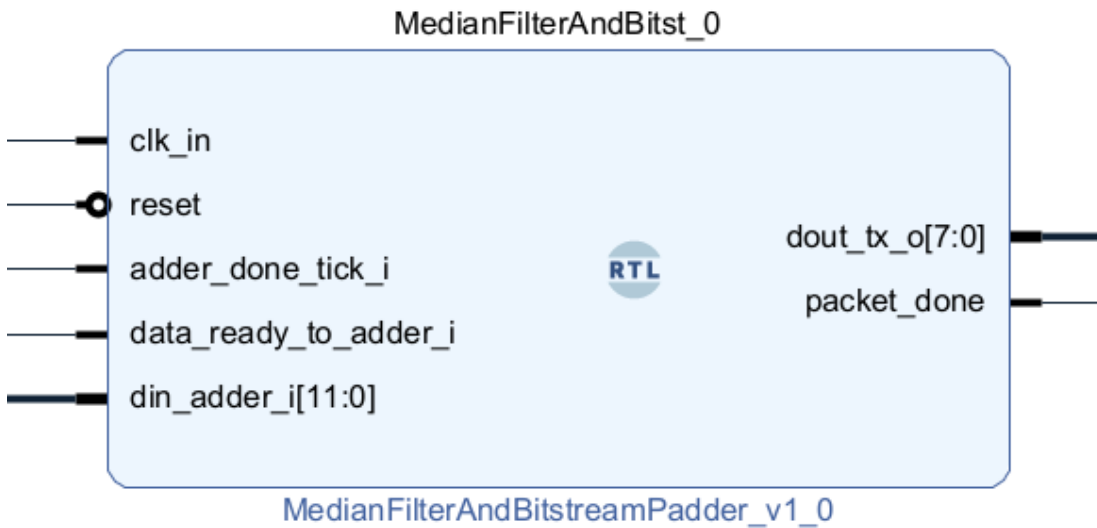
Çıkış Portları:

- 'fpga-clk-o': FPGA için çıkış saat sinyali.
- 'encoder-clock-o': Encoder için çıkış saat sinyali.
- 'module-busy': Modülün meşgul olup olmadığını gösteren sinyal.
- 'data-out': Çıkış veri sinyali (12-bit veri).
- 'data-ready': Verinin okunmaya hazır olduğunu gösteren sinyal.

Sinyaller:

- 'read-busy': Okuma işleminin meşgul olup olmadığını gösteren bir sinyal.
- 'encoder-clock-out': Çıkış encoder saatini oluşturmak için kullanılan bir sinyal.
- 'rx-data': Gelen encoder verisini depolamak için kullanılan bir sinyal.
- 'graytobin-data': Gray kodundan dönüştürülmüş ikili veriyi depolamak için kullanılan bir sinyal.
- 'sgnl-read-start': Okuma işleminin başladığını gösteren bir sinyal.

Kod, üç süreç içerir: İlk süreç, read-start sinyali etkilendiğinde read-busy sinyalini '1' olarak ayarlar ve sensör protokolünde belirtilen saat döngüsünden sonra '0' olarak sıfırlar. İkinci süreç, veriyi encoder'dan okur ve Gray kodundan ikiliye dönüştürür. Bu süreç, read-busy sinyali ve counter değişkenini kullanarak veri okuma ve dönüştürme işlemi kontrol eder. Sonuçta oluşan ikili veri, graytobin-data sinyalinde saklanır. Üçüncü süreç, modül meşgul olduğunda counter'ı artırır ve encoder için saat darbeleri oluşturur (encoder-clock-out), modül meşgul olmadığında counter'ı sıfırlar ve encoder-clock-out'u '1' olarak ayarlar.



Şekil 4.8 : Medyan filtresinin uygulandığı blok şemanın gösterimi

Şekil 4.8’de medyan filtresinin blok diagramı gösterilmektedir. Tüm sistemin senkron bir şekilde çalışmasını sağlamak için saat sihirbazından gelen saat sinyali bu modüldeki saat girişine girmektedir. Ardından oluşturulan saat bölücü ile saatimiz istenilen hıza ayarlanmıştır. Veri tamponlaması ve sıralama aşamasında, BUFFER-SIZE (3 öge) kapasiteli basit bir veri tamponu uygular. 'data-ready-to-adder-i' sinyali yüksek olduğunda, gelen veri 'din-adder-i' tampona depolanır. Tampon dolu olduğunda, verileri küçükten büyüğe sıralamak için kabarcık sıralama algoritmasını kullanarak ortanca değeri bulur. Ortanca değeri median-val sinyalinde saklar.

```
sorted_buffer <= out_buffer;
if sorted_buffer(0) > sorted_buffer(1) then
  sorted_buffer(0) <= out_buffer(1);
  sorted_buffer(1) <= out_buffer(0);
end if;
if sorted_buffer(1) > sorted_buffer(2) then
  sorted_buffer(1) <= out_buffer(2);
  sorted_buffer(2) <= out_buffer(1);
end if;
if sorted_buffer(0) < sorted_buffer(1) and sorted_buffer(1) < sorted_buffer(2) then
  median_val <= sorted_buffer(1);
end if;
```

Şekil 4.9 : Kabarcık sıralama algoritmasının kodda uygulanmasının gösterimi

Depolanan veriler tampon dolduğunda Şekil 4.9’daki gibi sıralanır. Tampon boyutumuz 3 olarak ayarlanmıştır. 2 if sorgusu ile 3 boyutlu bir dizide medyan değeri elde edilmektedir.

```
constant BUFFER_SIZE      : integer := 3;
type buffer_type is array (0 to BUFFER_SIZE - 1) of STD_LOGIC_VECTOR(11 downto 0);
signal data_buffer        : buffer_type;
signal out_buffer         : buffer_type;
signal sorted_buffer      : buffer_type;
signal buffer_count       : integer range 0 to BUFFER_SIZE - 1 := 0;
signal buffer_empty       : boolean := true;
signal buffer_full        : std_logic;
```

Şekil 4.10 : Tampon sinyallerinin gösterimi

Sensör okuma modülünden 'data-ready' sinyali geldiğinde tampon dolmaya başlar her 'data-ready' sinyali geldiğinde tampon bölgesinde veri depolama devam eder. Tamponun tam dolu olduğu durumda 'buffer-full' bayrağı kalkar. Bu durumda sıralama algoritması devreye girer, tampon sıralanır ve medyan değeri bulunur. Bu işlemlerden sonra 'packet-done' sinyali ile birlikte veriler aktarılmaya başlar. Tampon sinyallerinin tanımlarını Şekil 4.10’da gösterilmektedir.

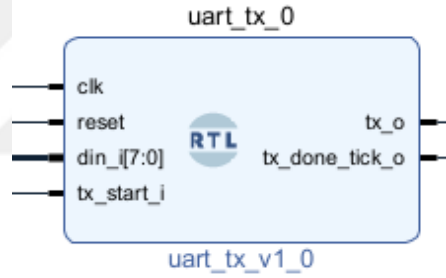
Şekil 4.11’de medyan filtresinin port ve sinyallerinin tanımlamalarını gösterilmektedir.

```

+-----+
| MedianFilterAndBitstreamPadder |
+-----+
|          Port          |
+-----+
| clk_in      : std_logic |
| reset      : std_logic |
| adder_done_tick_i : std_logic |
| data_ready_to_adder_i : std_logic |
| din_adder_i : std_logic_vector(11 downto 0) |
| dout_tx_o   : std_logic_vector(7 downto 0) |
| packet_done : std_logic |
+-----+
|          Signal        |
+-----+
| data_added : std_logic_vector(15 downto 0) |
| packet_cnt : integer := 0 |
| clk_out_uart_adder : std_logic |
| clk_out_uart_adder_2 : std_logic |
| uart_packet_start_flag : integer := 1 |
| beforeFiltered_data_i : std_logic_vector(11 downto 0) |
| median_val : std_logic_vector(11 downto 0) |
| filtered_data_o : std_logic_vector(11 downto 0) |
| sorted_arr : std_logic_vector(11 downto 0) |
| uart_packet_start_byte_A5 : std_logic_vector(7 downto 0) := "10100101"
| uart_packet_start_byte_AB : std_logic_vector(7 downto 0) := "10101011"
| BUFFER_SIZE : integer := 3 |
| buffer_type : TYPE |
| data_buffer : buffer_type |
| out_buffer : buffer_type |
| sorted_buffer : buffer_type |
| buffer_count : integer range 0 to BUFFER_SIZE - 1 := 0 |
| buffer_empty : boolean := true |
| buffer_full : std_logic |
+-----+

```

Şekil 4.11 : Medyan filtresi modülündeki port ve sinyallerinin gösterimi



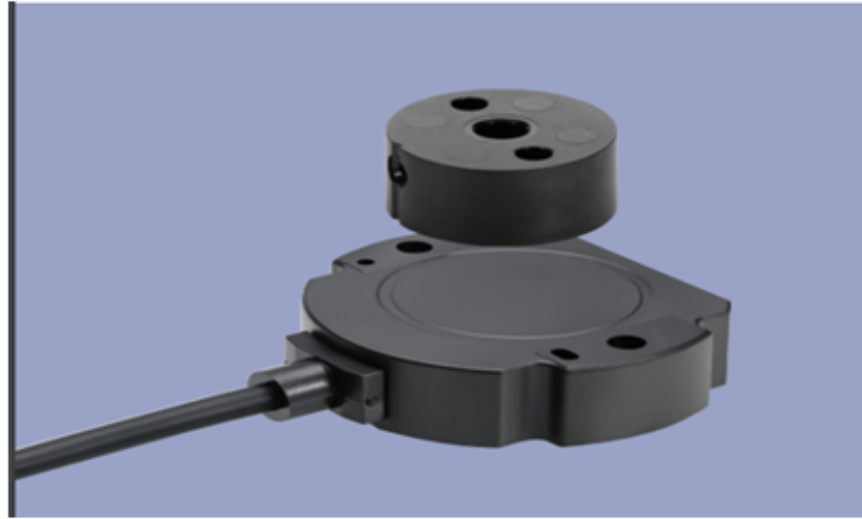
Şekil 4.12 : Uart blok şemasının gösterimi

Medyan filtresi uygulanan veriler uart modülüne aktarılmaktadır. Ardından paketlerimiz hazır olduğunda hazır bayrağından gelen sinyal ile 'uarttx' modülüne girmektedir. 'Uarttx' modülünde baudrate 19200 Hz olarak belirlenmiştir. 250 kHz ile çalışan sistemimiz 5 kHz üstünde bir örnekleme sahiptir. Sensörden okunan veriler Şekil 4.12'deki modülde gözüktüğü üzere tx-o sinyali ile bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

data_2023_02_17_15_29_36	17.02.2023 15:29	Dosya klasörü
data_2023_02_17_15_39_26	17.02.2023 15:39	Dosya klasörü
data_2023_02_17_16_14_25	17.02.2023 16:14	Dosya klasörü
data_2023_02_17_16_15_00	17.02.2023 16:15	Dosya klasörü
data_2023_02_17_16_15_38	17.02.2023 16:15	Dosya klasörü
data_2023_02_21_09_55_52	21.02.2023 09:55	Dosya klasörü
data_2023_02_21_09_56_28	21.02.2023 09:56	Dosya klasörü
data_2023_02_21_10_14_40	21.02.2023 10:14	Dosya klasörü
data_2023_02_21_10_17_41	21.02.2023 10:17	Dosya klasörü
data_2023_02_23_13_53_23	23.02.2023 13:53	Dosya klasörü
data_2023_02_23_13_55_14	23.02.2023 13:55	Dosya klasörü
data_2023_02_23_13_56_21	23.02.2023 13:56	Dosya klasörü
data_2023_02_27_16_36_02	27.02.2023 16:36	Dosya klasörü
data_2023_02_28_08_41_54	28.02.2023 08:41	Dosya klasörü
data_2023_02_28_08_42_53	28.02.2023 08:42	Dosya klasörü
data_2023_02_28_08_43_43	28.02.2023 08:43	Dosya klasörü

Şekil 4.13 : Kaydedilen dosya örnekleri

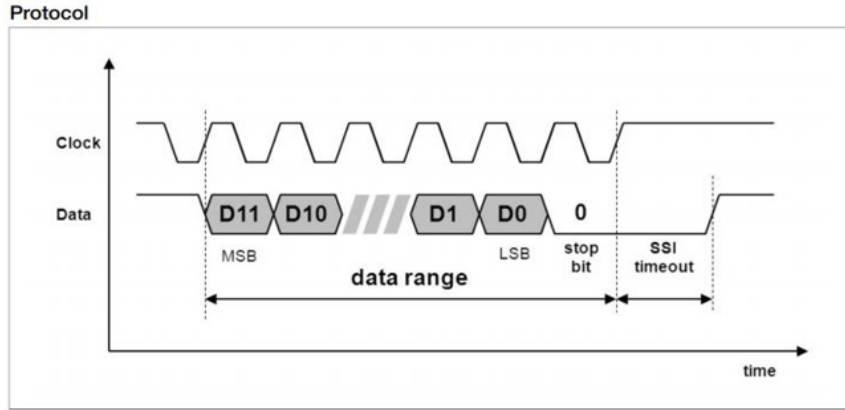
Bilgisayar ortamına aktarılan sensör verilerinin seri port üzerinden okunması için bir yazılım gerekmektedir. Bu yazılım Python dilinde geliştirilmiştir. Seri porttan okunan veriler şekil 4.13'deki gibi dosyalara tarihli olarak kaydedilmektedir.



Şekil 4.14 : Novotechnic RFC4800-SSI mutlak enkoderi [11]

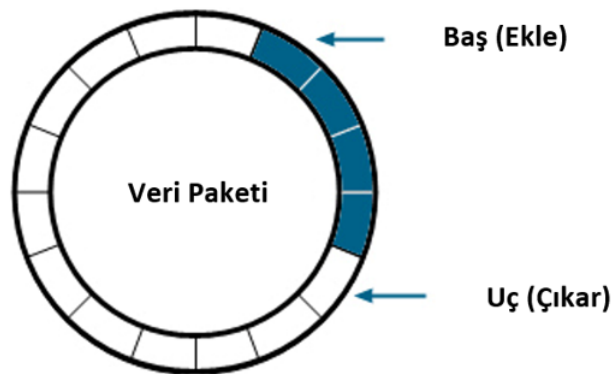
Novotechnic firmasının geliştirmiş olduğu Şekil 4.14'teki RFC4800 manyetik açığı sensörünün diğer açığı sensörlerinden farkı temassız olarak veri okuması yapmasıdır. Bu sayede boru hattı içinde olası zone oluşması durumlarını önlemektedir. Boru hatlarında

temassız işlem yapılması güvenlik açısından oldukça önemlidir. Bu tür projelerde özellikle ATEX denilen patlayıcı ortamlarda kullanılan işyerleri ve ekipmanlar için minimum güvenlik gereklilikleri zorunlu tutulmaktadır.



Şekil 4.15 : Manyetik Açık Sensörü SSI Protokolü [11]

Sensör SSI protokolü ile haberleşmektedir. Protokolde görüldüğü üzere bir clock ve bir data sinyali bulunmaktadır. Clock sinyali input data sinyali output olarak tanımlanmıştır. FPGA kartımızdan sensörün çalışma aralığında olup bizim için yeterli olan hızda bir clock sinyali üretilmiştir. Bu sinyal sensöre gönderilmektedir. Bu sinyalin kristal clock sinyali gibi olmadığı, şekil 4.15'deki clock sinyalinin karakteristiğinde olduğunu belirtmek gerekir. Aynı şekilde sensörde bize veri sinyalini çıktı olarak vermektedir. Veri 12 bitlik bir veri formatında gelmektedir. Gray coding yöntemi ile gelen veriyi binary formata çevirdikten sonra işlememiz gerekmektedir.



Şekil 4.16 : Veri paketi şekilsel gösterimi

Veriler toplandıktan sonra sinyal işleme adımı olarak 1 boyutlu medyan filtresi uygulanmaktadır. Median filtresi sinyallerden gürültüyü etkin bir şekilde çıkaran

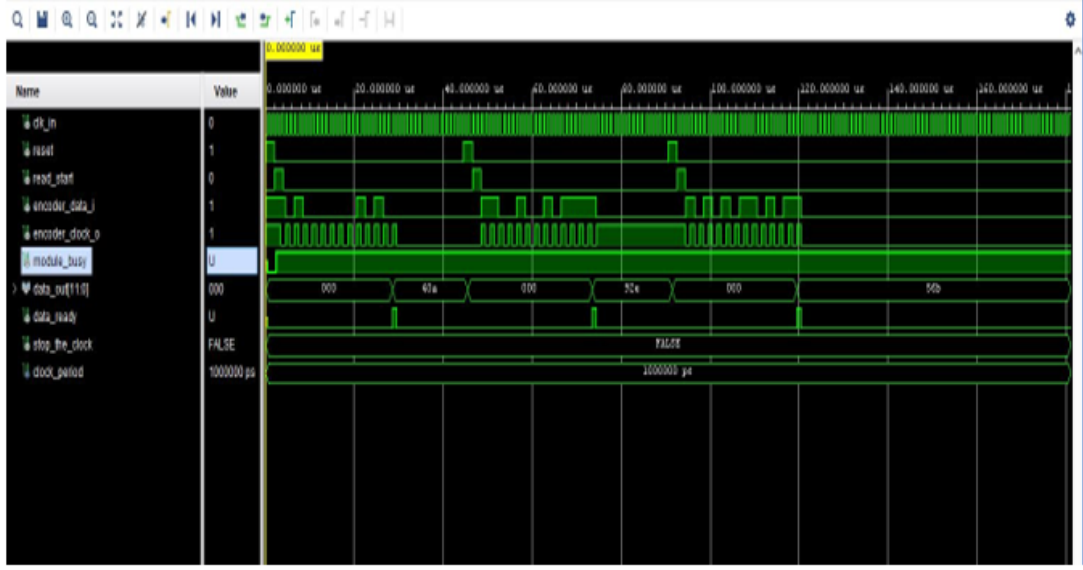
yaygın olarak kullanılan bir sinyal işleme tekniğidir. Ana fikir, giriş sinyalinin her elemanının komşu elemanlarının medyan değeri ile değiştirildiği kayan bir dizi yaklaşımı kullanarak giriş sinyaline medyan filtresi uygulamaktır. Medyan filtresi uygulama adımında sinyallerimizin biriktirildiği bir paket oluşturmak gerekmektedir. Bu pakete 12 bitlik veriler alınır ve şekil 4.16'deki gibi dairesel bir şekilde arabellekte saklanır.



Şekil 4.17 : Sıralama algoritması uygulama adımı

Paket boyutu belirlenen sayıya ulaştığında Şekil 4.17'deki gibi bir sıralama işlemi uygulanır. Sıralama işlemi üçerli olarak yapılmaktadır. Üç verinin sıralaması yapılır. Sıralamanın ardından ortadaki eleman medyan olarak belirlenir. Bu şekilde medyanı alınan veriler gürültüden arındırılmış olur. Sistemimizde dizi boyutu 3 olarak alındığında gürültüler giderilmiş olmaktadır. Ancak dizi boyutunun yeterli olmadığı durumlarda boyut artırılabilir. Bu durumda dizi şuna dikkat edilmelidir. Medyan bulma aşamasında çift sayıda bir boyut var ise ortadaki iki elemanın ortalaması medyanı vermektedir. Tek sayıda dizi boyutunda aynı adımlar izlenebilir.

FPGA tasarımında gerçekleştirme işlemi yapmadan önce simülasyon adımları yapılmıştır. Donanımlara ihtiyaç duyulmadan yapılan bu işlem oldukça verimli ve önemlidir. Simülasyon ortamı için ilk önce proje dosyamız yani asıl tasarımımızın da hazır olması gerekmektedir. Test edilecek olan da asıl tasarım dosyamızdır. Bu dosyanın testi için ilk olarak bir testbench kodu yazılmıştır. Bu testbench kodunda test edilecek tasarımımızda bulunan giriş çıkışlar ve sinyallerin tanımlanmaları ve ilgili bağlantı şemaları yapılmıştır. Ardından bir test ortamı oluşturulmuştur.



Şekil 4.19 : Açık Sensörü FPGA Simülasyon Sonuçları

Simülasyon sonucunda şekil 4.19’da gösterildiği üzere 16 bitlik bir veri alınmış ve Uart üzerinden iletilmiştir. Gerçekte yapılmak istenen işlem simülasyon üzerinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bunun ardından tasarımı gerçek ortamda test edilmeye hazır hale gelmiştir. Donanımlar üzerinde yapmayı düşündüğümüz bütün testleri simülasyon ortamında denedikten sonra yapmakta fayda bulunmaktadır. Bu tasarımda da birçok senaryo ile yapılan simülasyon testlerinin ardından donanımlar üzerinde denemeler yapılmıştır.



5. ÖLÇÜM VE DOĞRULAMA

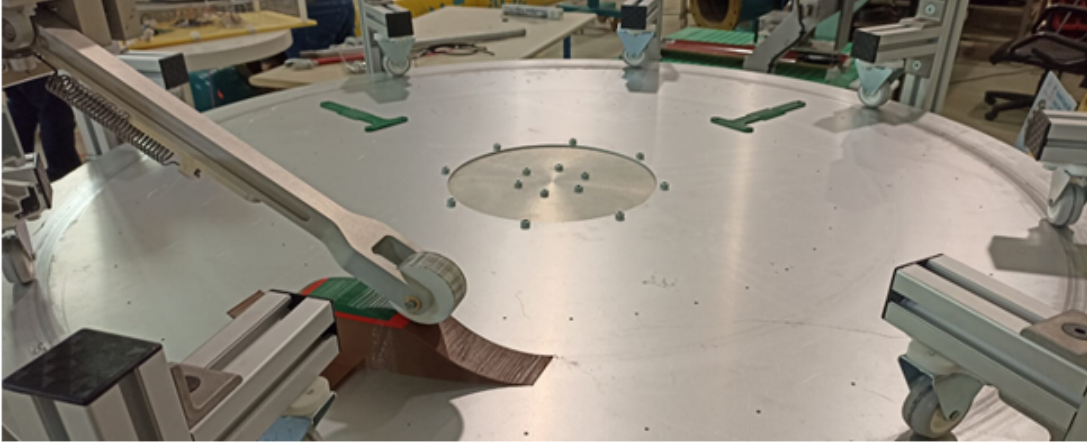
5.1 Ölçümler ve Doğrulama Adımları

Bu bölümde mekanizmamızdaki kol tasarımının farklı dönüş hızları ve dent yükseklikleri ile test sonuçları verilmiştir. Ayrıca, yayların değiştirilmesi sonucu belirli kuvvetlerde oluşan tepkiler incelenmiştir. Yine tekerlek cinsinin değiştirilmesi sonucu tekerleğe bağlı oluşan etkiler analiz edilmiştir. Tüm bu değişimleri karşılaştırmalı olarak inceledikten sonra elde edilen sonuçlar bize en uygun tasarım için yol gösterici olacaktır.

Sistemimiz çalışır halde iken kol mekanizmamız dentlerin üzerinden geçmektedir. Cihazın hızının mekanik koldan ölçülen açı bilgileri üzerindeki etkisini incelemek adına tabla dent bölgesindeki hız sırasıyla 1 m/sn, 3 m/sn ve 5 m/sn hızlarında olacak şekilde döndürülmektedir. Grafikler incelendiğinde mekanik kol düz zeminde ilerlerken yaklaşık 312 derecelik açı değeri üretildiği görülmektedir ve dent üzerine geldiğinde dent derinliğine bağlı olarak alınan açı değeri azalmaktadır. Grafiklerde açıkça görüldüğü üzere manyetik etkiye bakılarak ölçülen açı değerlerinde ani sıçramalar yani gürültüler olabilmektedir.

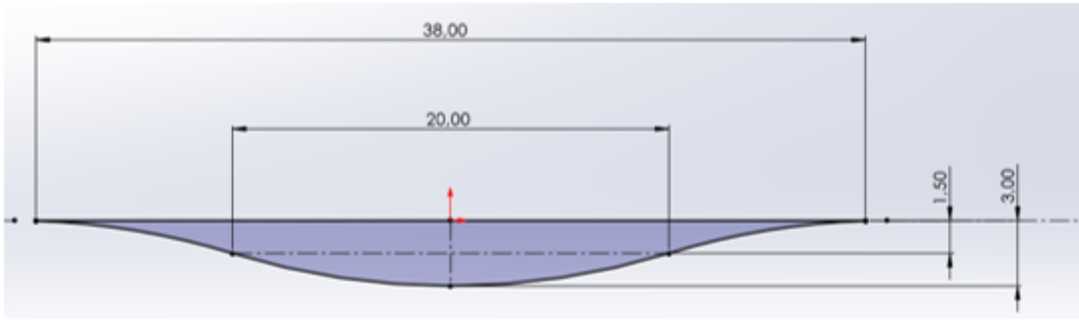
Bu durum motorun düzenele temasında iletken maddelerin kullanılmasından kaynaklıdır. Motor düzeneği etkileyerek düzeneğin sensöre bakan kısmında yüksek seviyeli bir gürültü oluşturmuştur. Bu durumu sinyal spektogramından inceleyerek tespit etmemizin ardından motor düzeneği yalıtkan kestamit malzeme ile aktarım sağlayacak şekilde değiştirilmiştir. Yüksek seviye gürültüler bu şekilde temizlenmiştir fakat manyetik bir sensör olması dolayısıyla düşük seviyeli gürültüler önlenememiştir. Nihai sensör ve kart tasarımlarının ardından bu gürültüler de en az seviyeye indirilecektir.

5.1.1 Test 1. Metal tabla üzerinde hareket 3 adet PLA Dent



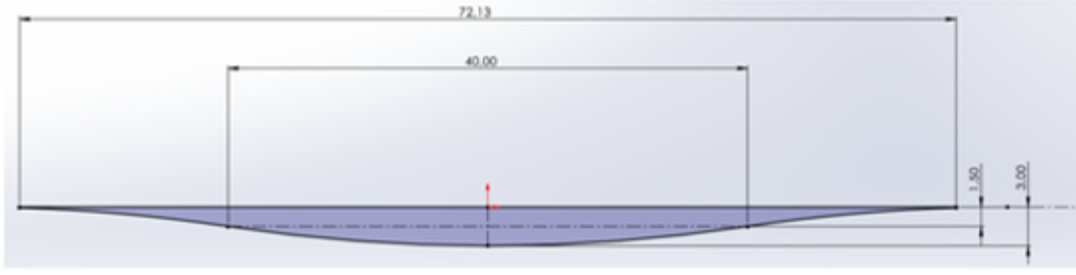
Şekil 5.1 : Test 1’de kullanılan düzenek ve dentler

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere tablanın üzerinde 3 farklı boyutta dent bulunmaktadır. Kol bu dentlerin üzerinden şekildeki dönme yönünde geçer. Kol dentler üzerinden geçerken kola gömülü mıknatıs dent yüksekliğinin etki ettiği miktarda yer değiştirecek ve bunu manyetik açı sensörü ölçerek dentin derinliği bulunacaktır.



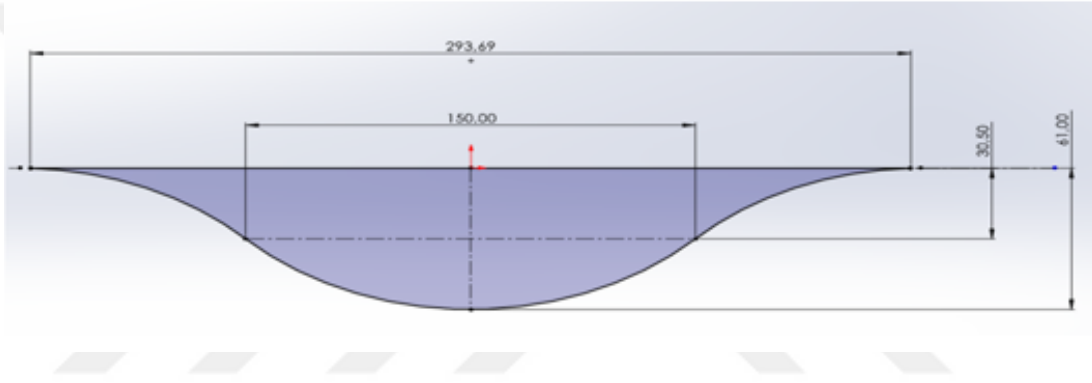
Şekil 5.2 : Birinci dentin ölçüleri

Birinci dentin ölçüleri şekil 5.2’de verilmiştir. Bu ölçü karşımıza çıkabilecek en az derinlikli dentlerdendir.



Şekil 5.3 : İkinci dentin ölçüleri

İkinci dentin ölçüleri şekil 5.3’de verilmiştir. Bu ölçü karşımıza çıkabilecek en az derinlikli dentlerdendir.



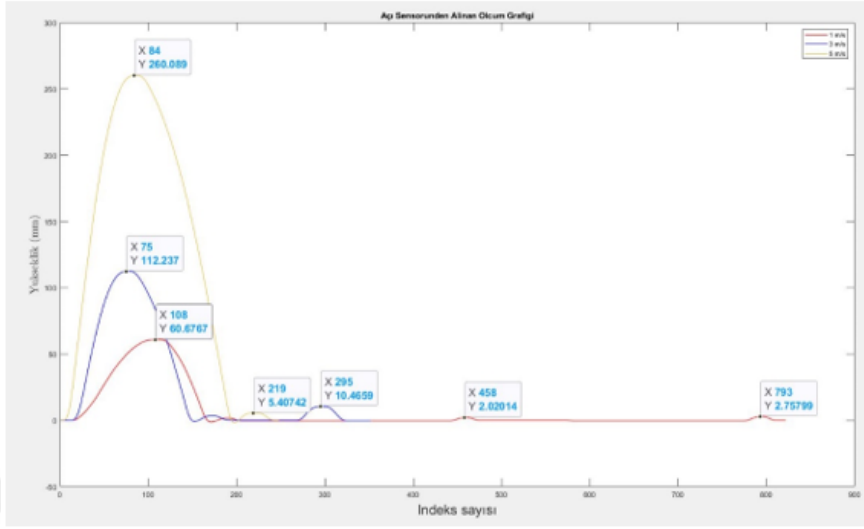
Şekil 5.4 : Üçüncü dentin ölçüleri

Üçüncü dentin ölçüleri şekil 5.4’de verilmiştir. Bu ölçü karşımıza çıkabilecek en fazla derinlikli dentlerdendir.

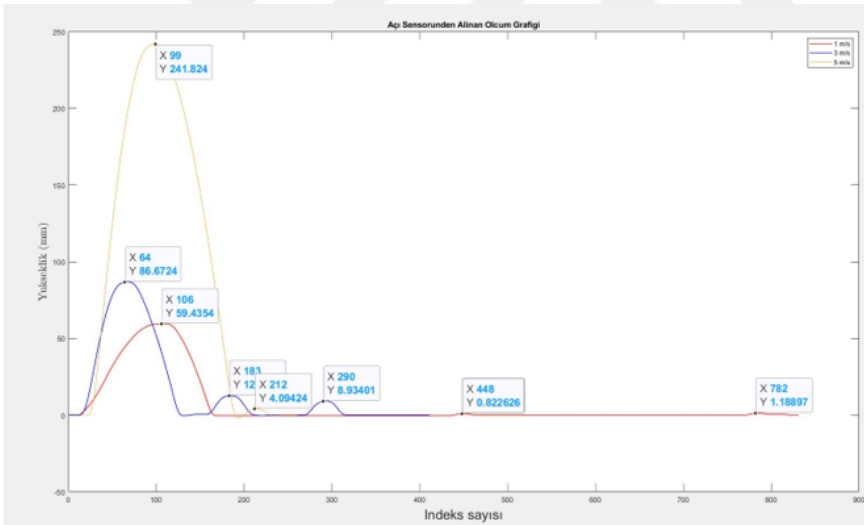
Şu parametreler değiştirilerek ölçümler alınacak ve karşılaştırmalar yapılacaktır;

1. Hız (1m/s , 3m/s, 5m/s)
2. Yay Katsayısı (5N, 10N, 40N, 60N, 80N)
3. Yay gerilimi (100N, 150N)
4. Tekerlek Sönümlenmesi(Normal Sönümlenme, Yüksek Sönümlenme)

5.1.1.1 Ölçümler



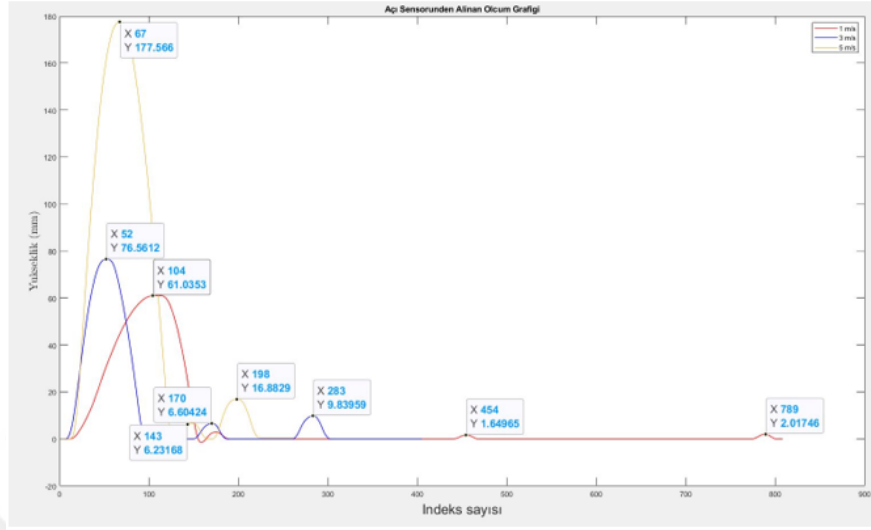
Şekil 5.5 : 1-3-5 m/sn hızda 5N yay sabitli yayı gerdirilmemiş koldan alınan verinin grafiği



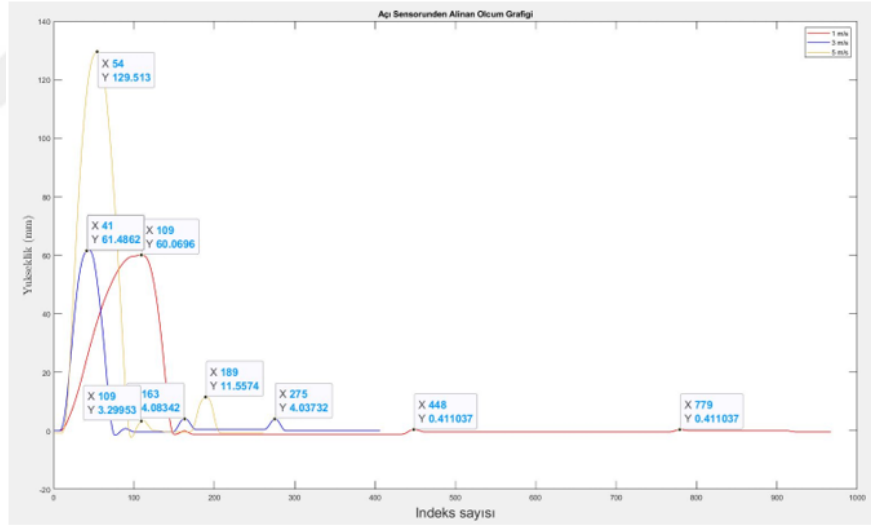
Şekil 5.6 : 1-3-5m/sn hızda 5N yay sabitli yayı gerdirilmiş koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki ilk deneyde 3 mm yüksekliğe sahip 2 adet ve 61 mm yüksekliğe sahip 1 adet PLA anomali kullanılmıştır. Yay kuvveti 5N, 10N, 40N, 60N, 80N olarak ayarlanmıştır. 5N yay sabiti ile yapılan ilk deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 3 mm'lik 2 anomalinin de yüksek hatalı ölçüldüğü gözlemlenirken 61 mm'lik anomalinin hem yay gergin

değilken hem de gerginken ölçüm hatasının düşük olduğu gözlemlenmektedir. 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginleştirildikten sonra ölçüm hatasının azaldığı gözlemlense de hatanın yüksek olduğu gözükmektedir.



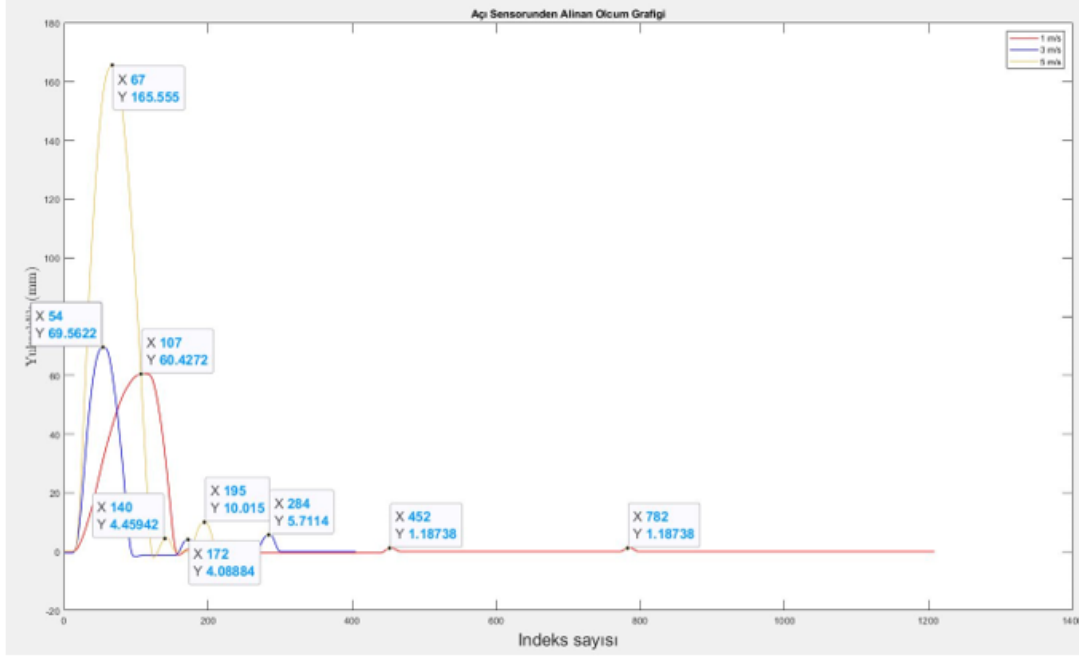
Şekil 5.7 : 1-3-5m/sn hızda 10N yay sabitli yayı gerdirilmemiş koldan alınan verinin grafiği



Şekil 5.8 : 1-3-5m/sn hızda 10N yay sabitli yayı gerdirilmiş koldan alınan verinin grafiği

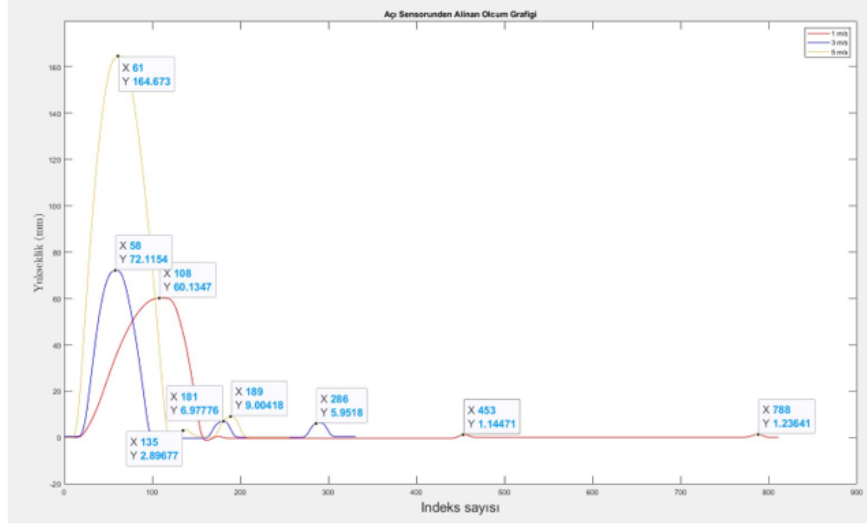
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki 10N yay sabiti ile yapılan ikinci deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 3 mm'lik anomali hataları yay gergin değilken oldukça düşükken yay gerdirildikten sonra artmaktadır, 61 mm'lik anomali de ise hem yay gergin değilken hem de yay gerginken hata oranı

oldukça düşüktür. 3 m/s hızda yay gergin değilken 3 anomalide de ölçüm hatası oldukça yüksektir. Yine aynı hızda yay gerginken 3 anomalide de ölçüm hatası oldukça düşüktür. 5 m/s hızda ise 3 anomali içinde ölçüm hatası oldukça yüksektir.



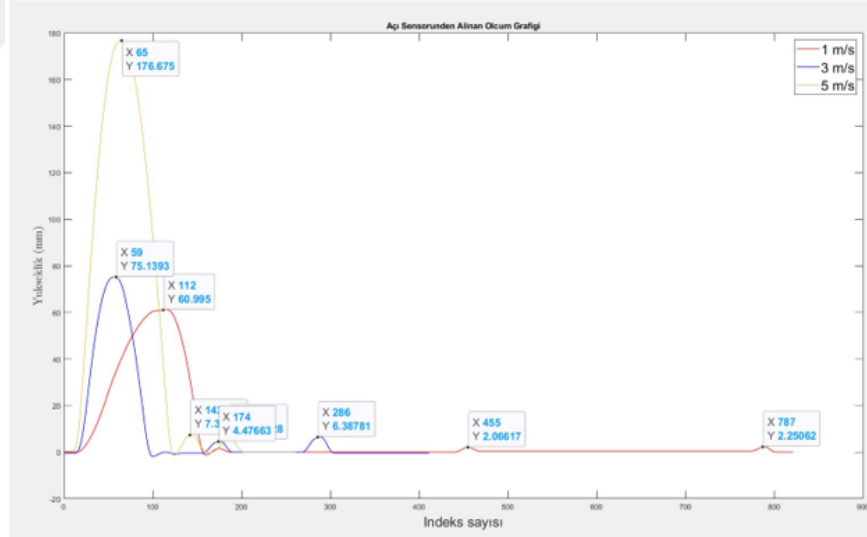
Şekil 5.9 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümleme olmayan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.9'da 40N yay sabiti ile yapılan üçüncü deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümde 3 mm'lik anomaliler 1 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61 mm'lik anomali 60.43 mm ölçülmüştür. Aynı ortam koşullarında 3 m/s hızda 3mm'lik anomaliler 1-2 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61mm'lik anomali 69.56mm ölçülmüştür. 5 m/s de ise ölçüm hatası yüksektir.



Şekil 5.10 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümleme olan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

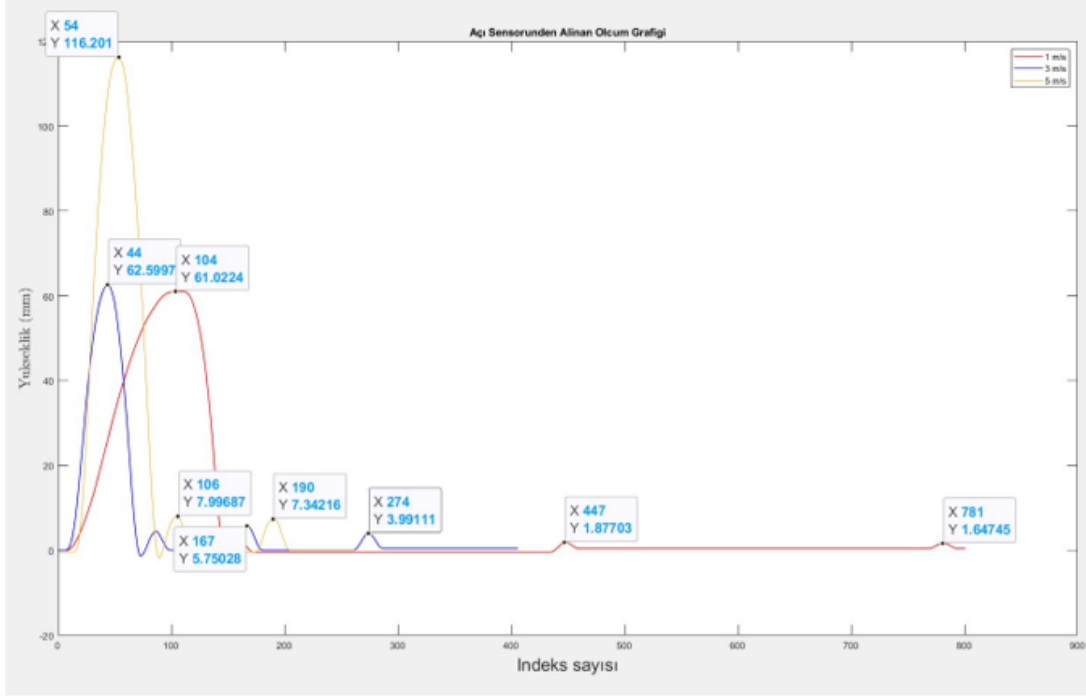
Şekil 5.10'da 40N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlerde sönümleme olmayan ölçümlere benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sönümlemenin etkisiyle 61 mm'lik dentin ardından sıçramanın etkisinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.11 : 1-3-5m/sn hızda 40N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve yüksek sönümleme olan tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

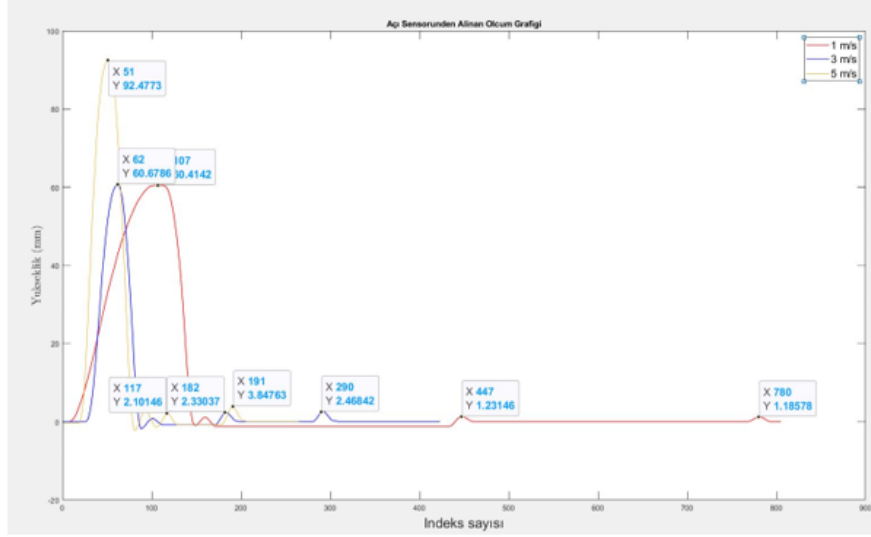
Şekil 5.11'de 40N yay sabiti ile yapılan son deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olmayan ve tekerlek sönümlemesi yüksek olan koldan alınan ölçümlerde sönümleme olmayan ve normal sönümleme olan ölçümlere göre özellikle 61 mm'lik

anomali için ölçüm hatasının bir miktar arttığı gözlenirken 3 mm'lik anomalilerde ölçüm hatasının sönümlenmenin etkisiyle bir miktar azaldığı gözlenmektedir.



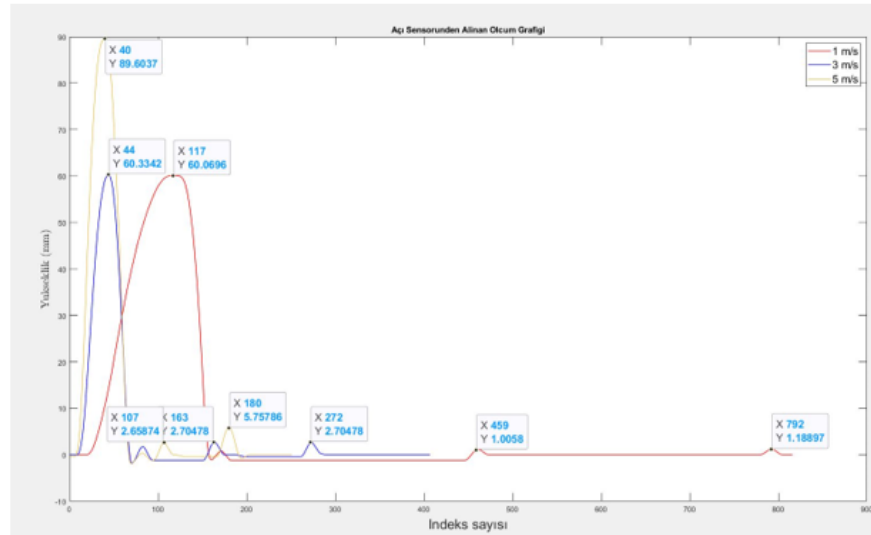
Şekil 5.12 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve sönümlenmiş tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.12'de 60N yay sabiti ile yapılan üçüncü deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda yay gerginliği ve tekerlek sönümlenmesi olmayan koldan alınan ölçümde 3 mm'lik anomaliler 1 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61 mm'lik anomali 61.02 mm ölçülmüştür. Aynı ortam koşullarında 3 m/s hızda 3mm'lik anomaliler 1-2 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61mm'lik anomali 62.59 mm ölçülmüştür. 5 m/s de ise ölçüm hatası 5N, 10N ve 40N yay sabitlerine göre düşük olsa da 1 m/s ve 3 m/s hızlara göre yüksektir.



Şekil 5.13 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

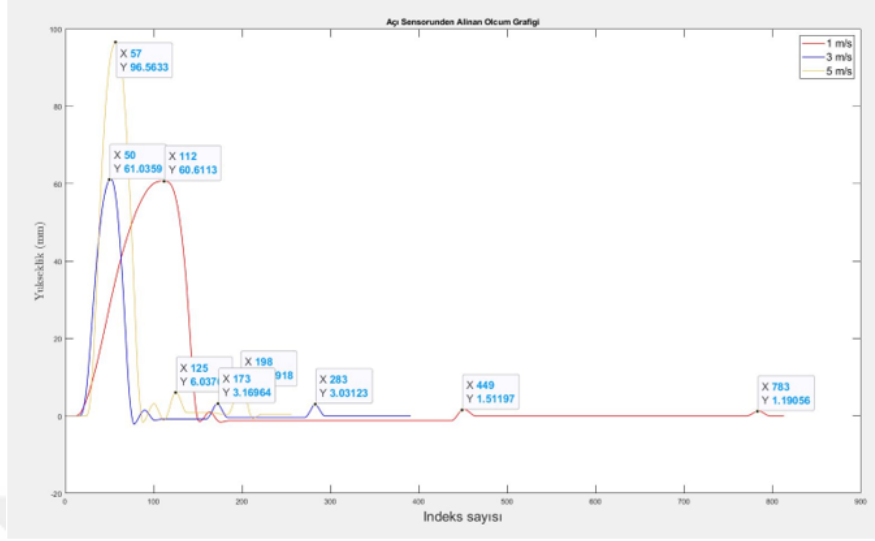
Şekil 5.13'de 60N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümlerde 3 mm'lik anomaliler 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda gerçek ölçülerine oldukça yakın ölçülmüştür. 61 mm'lik anomali ise 1 m/s hızda 60.41 mm, 3 m/s hızda 60.77 mm ölçülürken 5 m/s hızda 92.48 mm ölçülmüştür.



Şekil 5.14 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümlemeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

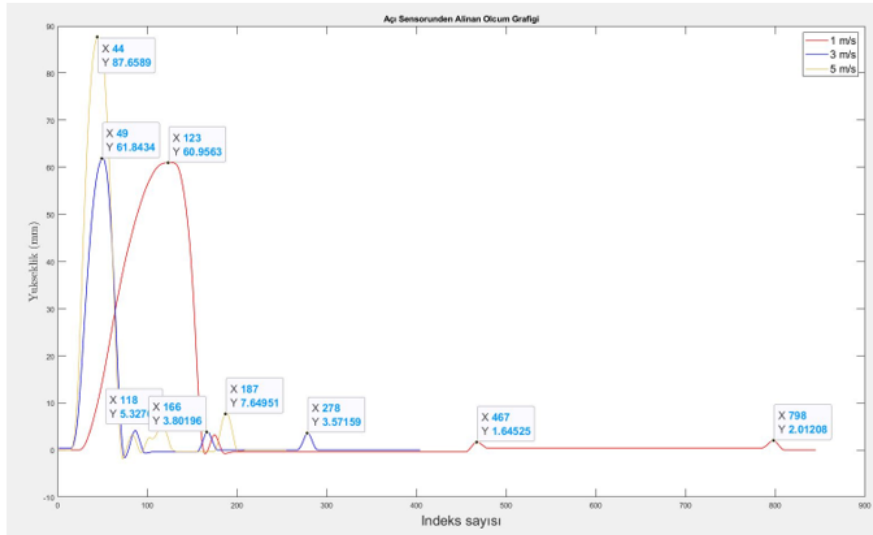
Şekil 5.14'de 60N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s ve 3 m/s hızda bir önceki

deneydekine benzer sonuçlar alınırken 5 m/s hızda 3 mm'lik anomalilerdeki ölçüm hatasının arttığı gözlenmektedir.



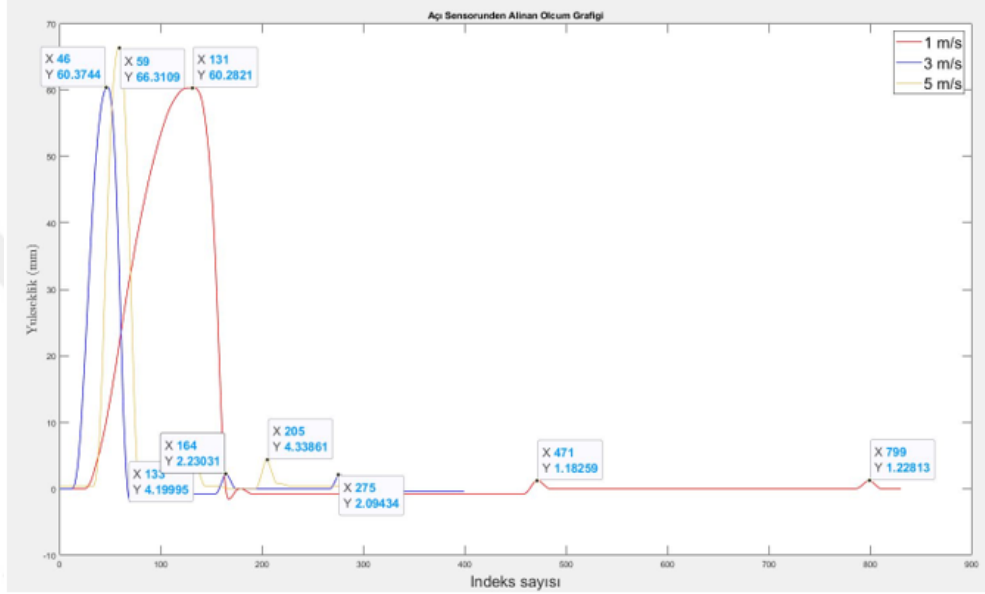
Şekil 5.15 : 1-3-5m/sn hızda 60N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve yüksek sönümlü tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.15'de 60N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlümesi yüksek olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s ve 3 m/s hızda bir önceki deneydekine benzer sonuçlar alınırken 5 m/s hızda 1. 3 mm'lik anomalinin ölçüm hatası azalırken 2. 3 mm'lik anomalinin ölçüm hatasının arttığı gözlenmektedir.



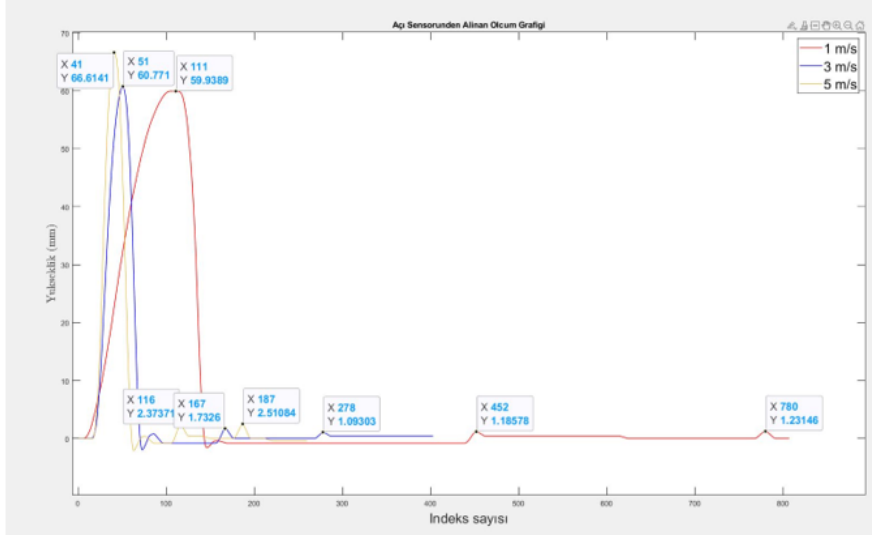
Şekil 5.16 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmemiş ve sönümlümsüz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.16'da 80N yay sabiti ile yapılan üçüncü deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümde 3 mm'lik anomaliler 1 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61 mm'lik anomali 60.96 mm ölçülmüştür. Aynı ortam koşullarında 3 m/s hızda 3mm'lik anomaliler 0-1 mm'lik kabul edilebilir bir hata ile ölçülürken 61mm'lik anomali 61.84 mm ölçülmüştür. 5 m/s de ise ölçüm hatası 5N, 10N ve 40N yay sabitlerine göre düşük olsa da 60 N yay sabitindeki ölçüm hatasına benzerdir.



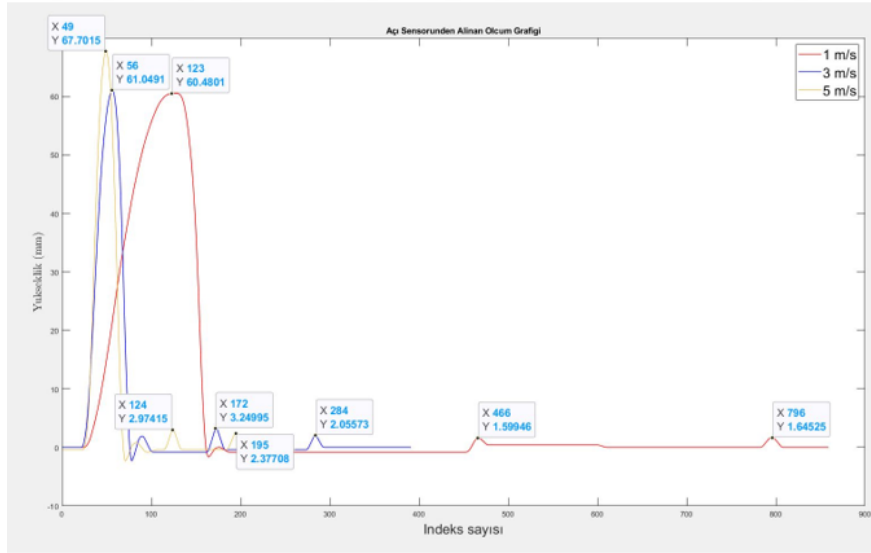
Şekil 5.17 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve sönümlemesiz tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.17'de 80N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümlerde 3 mm'lik anomaliler 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda gerçek ölçülerine oldukça yakın ölçülmüştür. 61 mm'lik anomali ise 1 m/s hızda 60.28 mm, 3 m/s hızda 60.37 mm ölçülürken 5 m/s hızda 66.31 mm ölçülmüştür. 5 m/s hızda 61 mm'lik dent ilk defa bu ölçümde ölçüm hatası kabul edilebilir seviyede ölçülmüştür.



Şekil 5.18 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve normal sönümlmeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.18’de 80N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda 3 mm’lik anomalilerdeki ölçüm hatasının oldukça düşük ve birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. 61 mm’lik anomalide ise bir önceki ölçüme benzer sonuçlar alınmıştır.

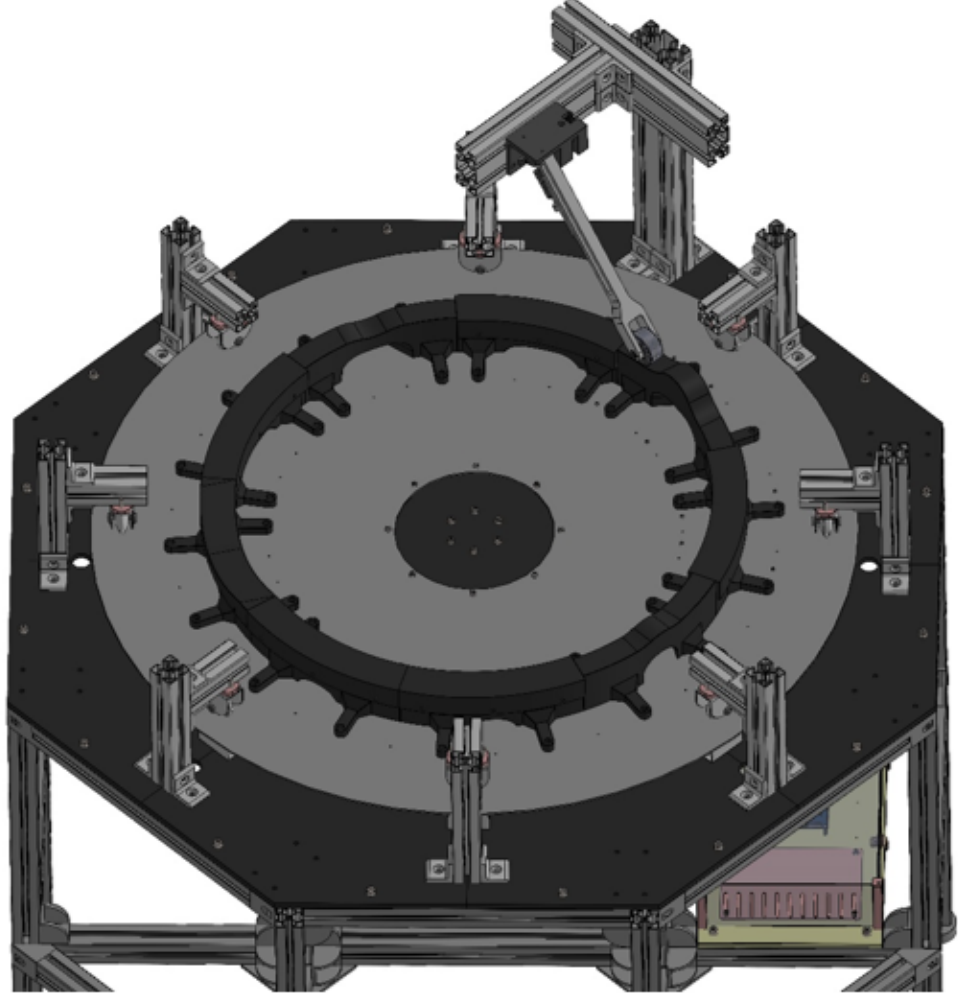


Şekil 5.19 : 1-3-5m/sn hızda 80N yay sabitli yayı gerdirilmiş ve yüksek sönümlmeli tekerlekli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.19’da 80N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi yüksek olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s

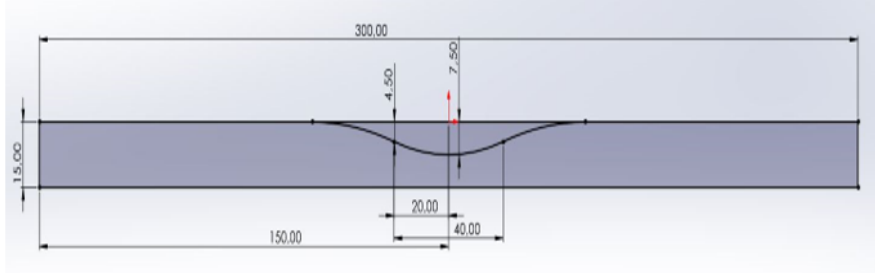
hızlarda bir önceki deneydekine benzer sonuçlar alınırken 61 mm'lik dentin ardından meydana gelen sıçramanın bir miktar azaldığı gözlenmektedir.

5.1.2 Test 2. PLA Tabla üzerinde hareket 2 adet Çukur Dent 2 adet Tümsek Dent



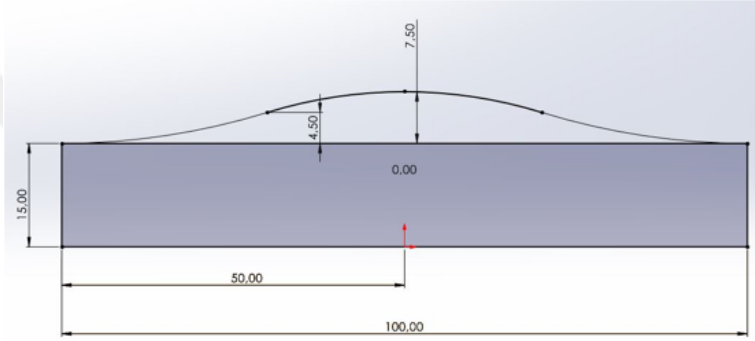
Şekil 5.20 : Test 2'de kullanılan test düzeneği kurulumu

Şekil 5.20'de 2. Test düzeneğinin tümü gözükmektedir.



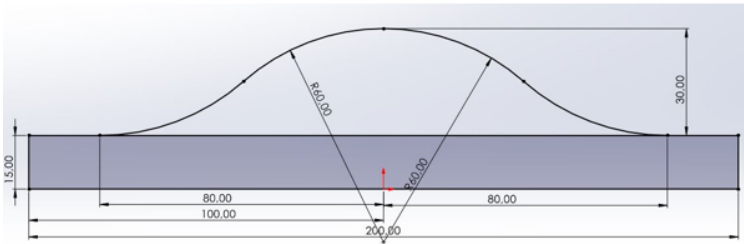
Şekil 5.21 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri

Şekil 5.21’de 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri gösterilmektedir.



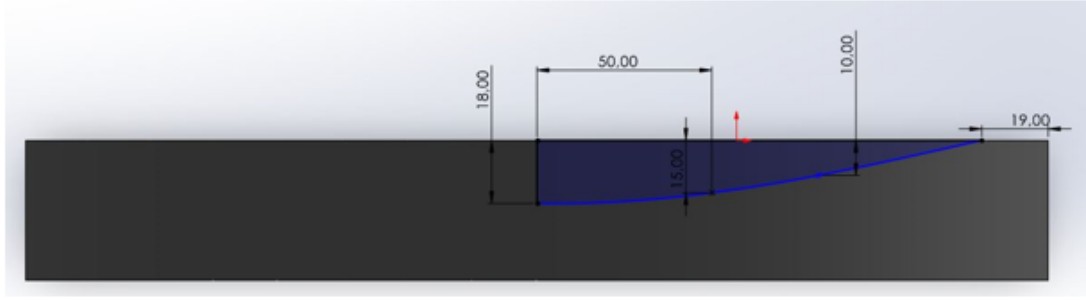
Şekil 5.22 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri

Şekil 5.22’de 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 7.5 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.23 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri

Şekil 5.23’te 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri gösterilmektedir.



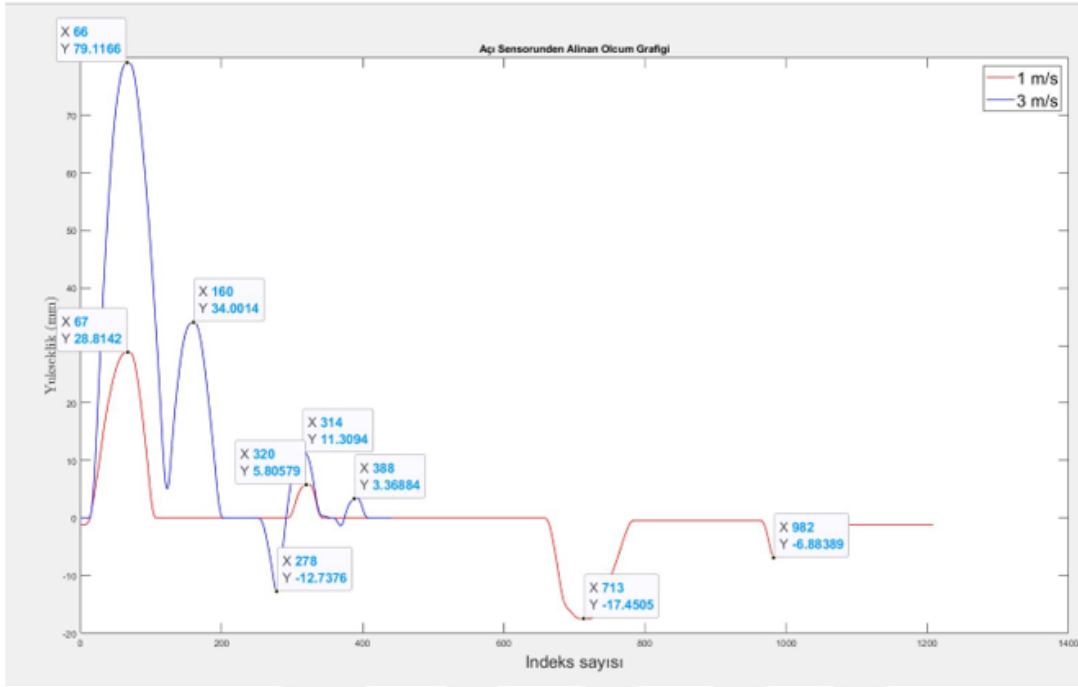
Şekil 5.24 : 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri

Şekil 5.24’de 2 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri gösterilmektedir.

Şu parametreler değiştirilerek ölçümler alınacak ve karşılaştırmalar yapılacaktır;

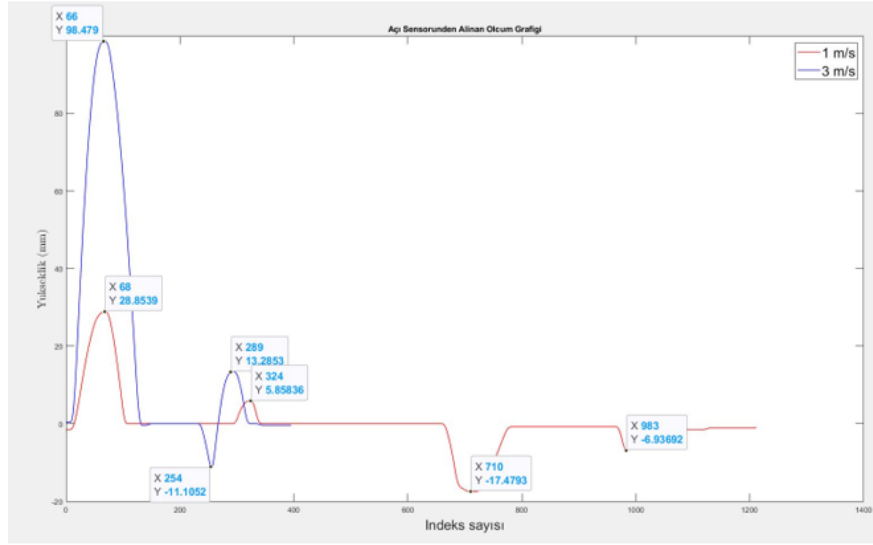
1. Hız (1m/s , 3m/s, 5m/s)
2. Yay Katsayısı (5N, 10N, 40N, 60N, 80N, 100N, 150N)
3. Tekerlek Sönümlemesi(Normal Sönümleme, Yüksek Sönümleme)

5.1.2.1 Ölçümler

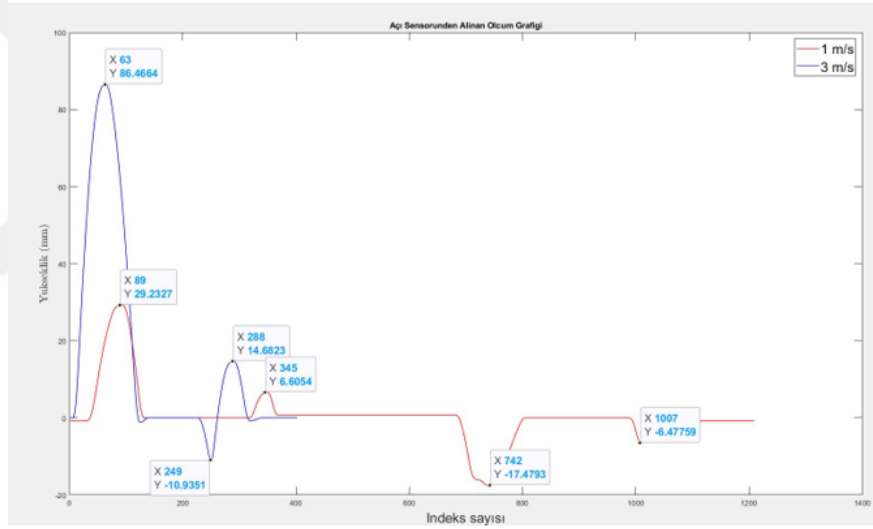


Şekil 5.25 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve sonumlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği

PLA üzerinde yapılan ilk deneyde 7.5 mm derinliğe sahip 1 adet tümsek 1 adet çukur, 30 mm derinliğe sahip 1 adet tümsek ve 18 mm derinliğe sahip 1 adet çukur anomali kullanılmıştır. Yay kuvveti 5N ,10N, 40N, 60N, 80N, 100N ve 150N olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.25’da 5N yay sabiti ile yapılan ilk deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 7.5 mm’lik tümsek 5.8 mm, 7.5 mm’lik çukur 6.8 mm, 18 mm’lik çukur 17.4 mm, 30 mm’lik tümsek ise 29 mm ölçülmektedir. 3 m/s hızda ise ölçüm hatalarının arttığı görülmektedir.

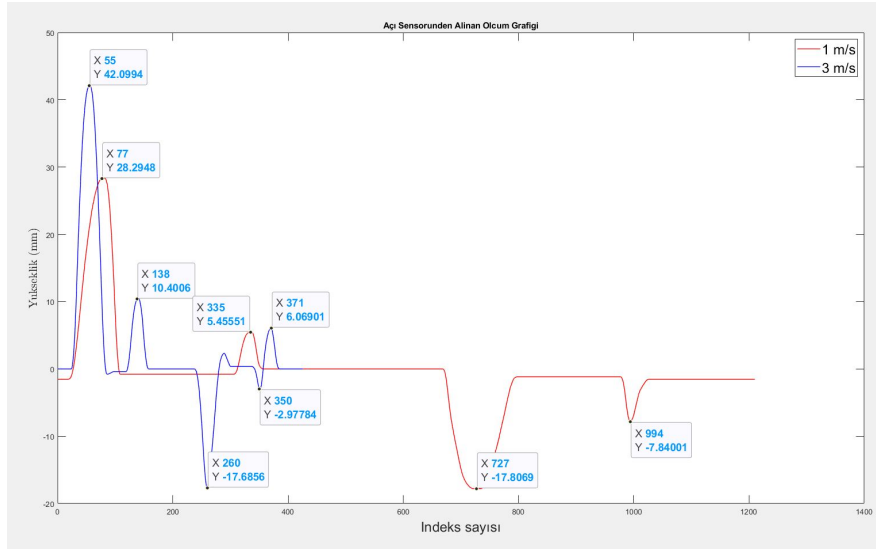


Şekil 5.26 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve normal sonumlemeli koldan alınan verinin grafiği



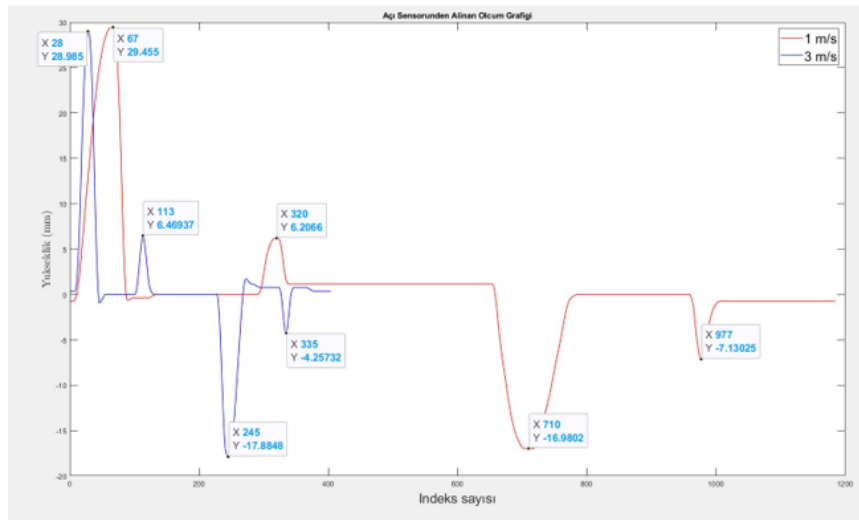
Şekil 5.27 : 1-3 m/sn hızda 5N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlemeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de 5N yay sabiti ile yapılan diğer deneylerde normal ve yüksek sönümlemeli tekerlek kullanılmıştır. Bu durum 3 m/s hızda sönümleme olmayan kola göre normal ve yüksek sönümlemeli tekerleğin 30 mm'lik tümsek anomaliden sonra sıçrama yapmasını önlemiştir. Diğer ölçümler önceki deney sonuçlarına benzerdir.



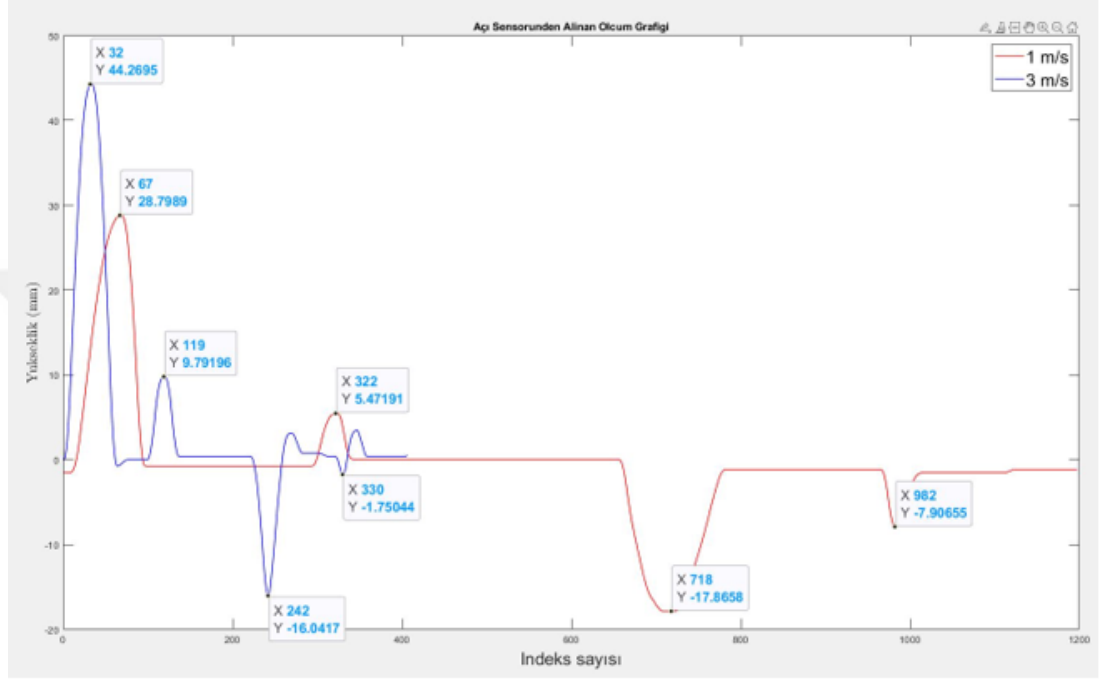
Şekil 5.28 : 1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve sonumlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.28’de 10N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlenmesi olmayan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 7.5 mm’lik tümsek 5.45 mm, 7.5 mm’lik çukur 7.84 mm, 18 mm’lik çukur 17.80 mm, 30 mm’lik tümsek ise 28.29 mm ölçülmektedir. 3 m/s hızda ise 7.5 mm’lik tümsek 10.40 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 2.98 mm, 18 mm’lik çukur 17.88 mm, 30 mm’lik tümsek 28.98 mm ölçülerek hız artışına bağlı dentlerdeki ölçüm hatalarının arttığı görülmektedir.



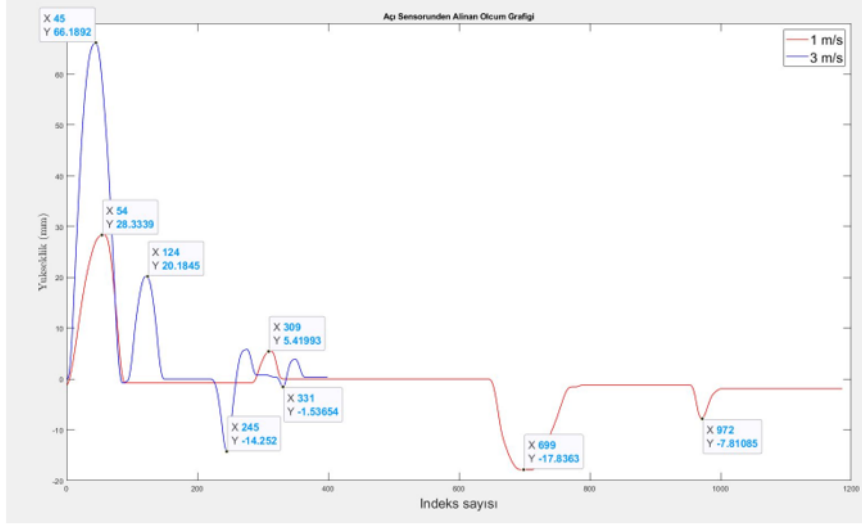
Şekil 5.29 : 1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlenmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.29'de 10N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 7.5 mm'lik tümsek 6.2 mm, 7.5 mm'lik çukur 7.13 mm, 18 mm'lik çukur 16.98 mm, 30 mm'lik tümsek ise 29.45 mm ölçülmektedir. 3 m/s hızda ise 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.47 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 4.26 mm, 18 mm'lik çukur 17.88 mm, 30 mm'lik tümsek 28.98 mm ölçüldüğü gözlemlenmiştir.



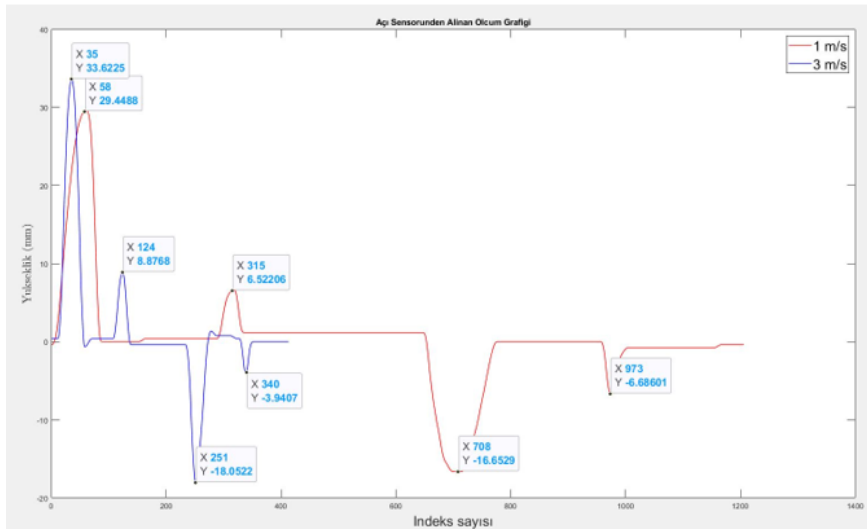
Şekil 5.30 : 1-3 m/sn hızda 10N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.30'te 10N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızdaki ölçümde 7.5 mm'lik tümsek 5.47 mm, 7.5 mm'lik çukur 7.9 mm, 18 mm'lik çukur 17.87 mm, 30 mm'lik tümsek ise 28.80 mm ölçülmektedir. 3 m/s hızda ise 7.5 mm'lik tümsek anomali 9.80 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 1.75 mm, 18 mm'lik çukur 16.04 mm, 30 mm'lik tümsek 44.27 mm ölçüldüğü gözlemlenmiştir. 3 m/s hızda ölçüm hatasının arttığı gözlemlenmiştir.



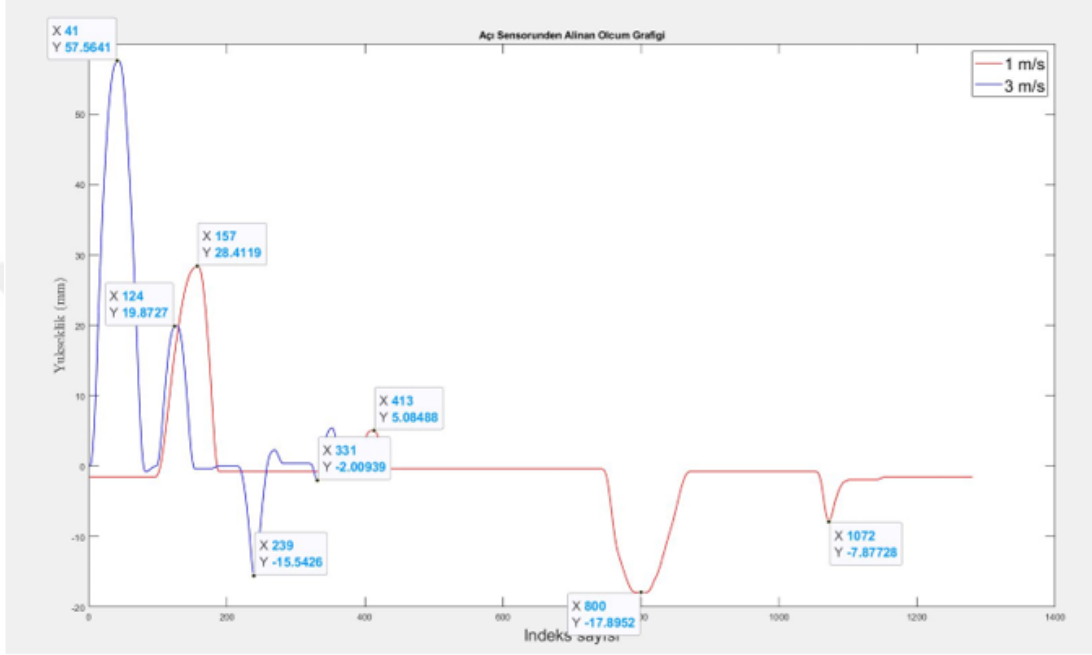
Şekil 5.31 : 1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve sönümlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.31'te 40N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda alınan ölçümde 7.5 mm'lik tümsek anomali dışındaki 3 anomalide de ölçüm hatasının oldukça az olduğu gözlenmiştir, 7.5 mm'lik tümsek anomalide de 1-2 mm'lik tolere edilebilir bir ölçüm hatası gözlenmiştir. 3 m/s hızda ise 7.5 mm tümsek 20.18 mm, 7.5 mm'lik çukur 1.54 mm, 18 mm'lik çukur anomali 14.25 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 66.19 mm ölçülmüştür.



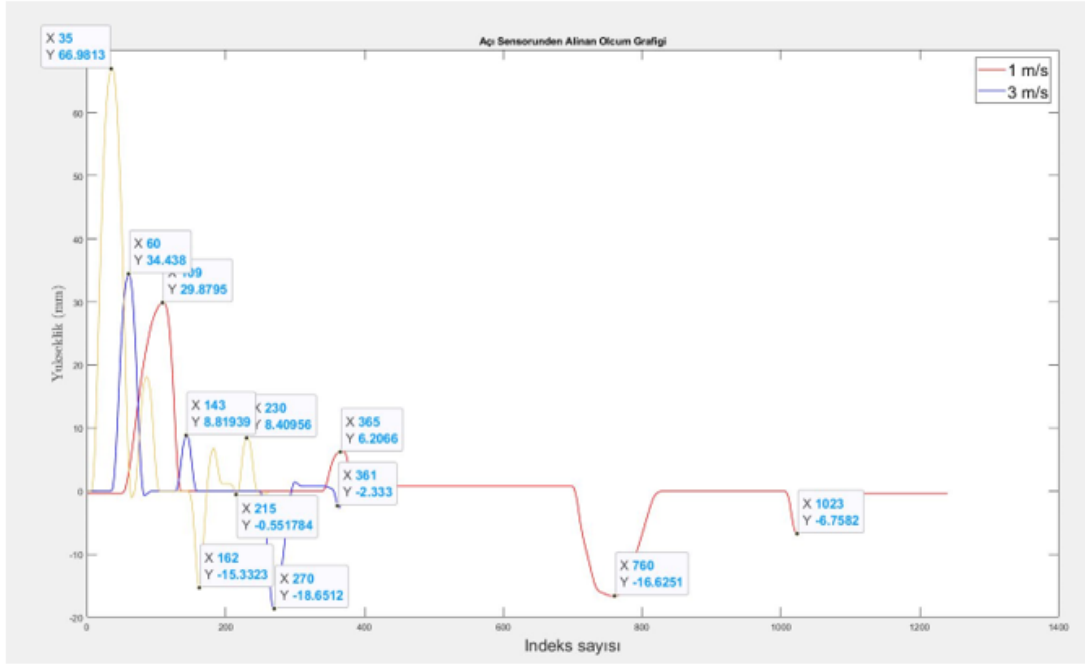
Şekil 5.32 : 1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlenmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.32’de 40N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlenmesi olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda alınan ölçümde 7.5 mm’lik tümsek anomali 6.52 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 6.68 mm, 18 mm’lik çukur anomali 16.65 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 29.45 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda ise 7.5 mm tümsek 8.88 mm, 7.5 mm’lik çukur 3.94 mm, 18 mm’lik çukur anomali 18.05 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 33.62 mm ölçülmüştür.



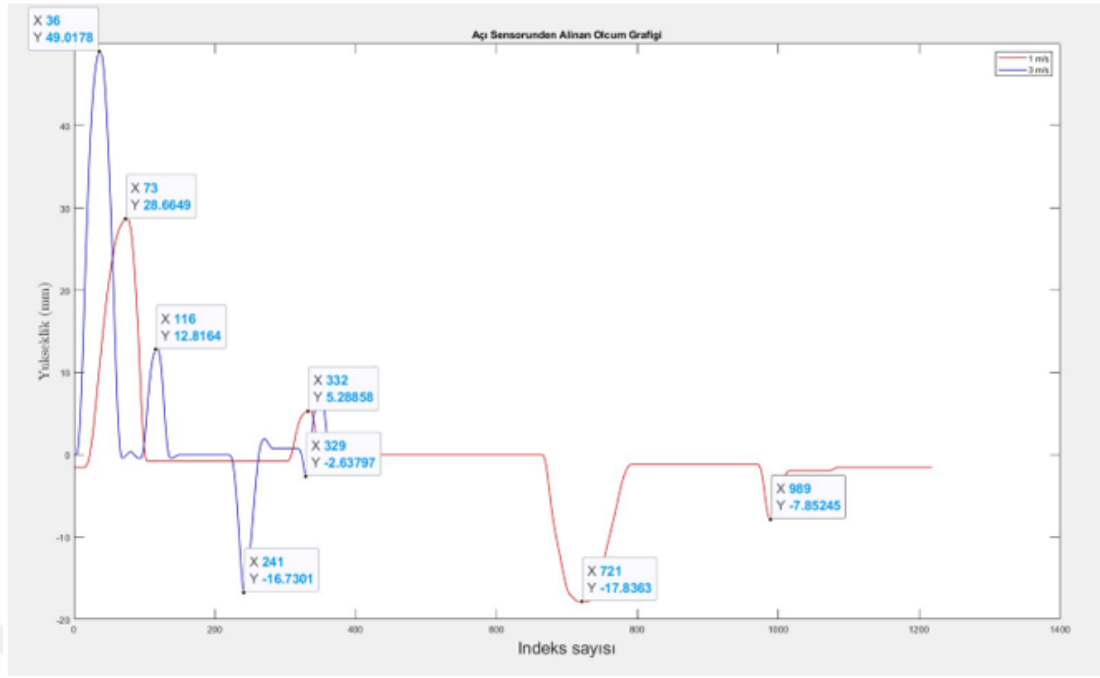
Şekil 5.33 : 1-3 m/sn hızda 40N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlenmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.33’de 40N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlenmesi yüksek olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda alınan ölçümde 7.5 mm’lik tümsek anomali 5.08 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 7.88 mm, 18 mm’lik çukur anomali 17.90 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 28.41 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda ise 7.5 mm tümsek 19.87 mm, 7.5 mm’lik çukur 2.00 mm, 18 mm’lik çukur anomali 15.54 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 57.56 mm ölçülmüştür. 40N yay sabitli ölçümlerde normal tekerlek sönümlenmesi olan ölçüm sonuçlarının tekerlek sönümlenmesi olmayan ve tekerlek sönümlenmesi yüksek olan ölçüm sonuçlarına göre ölçüm hatasının az olduğu görülmektedir.



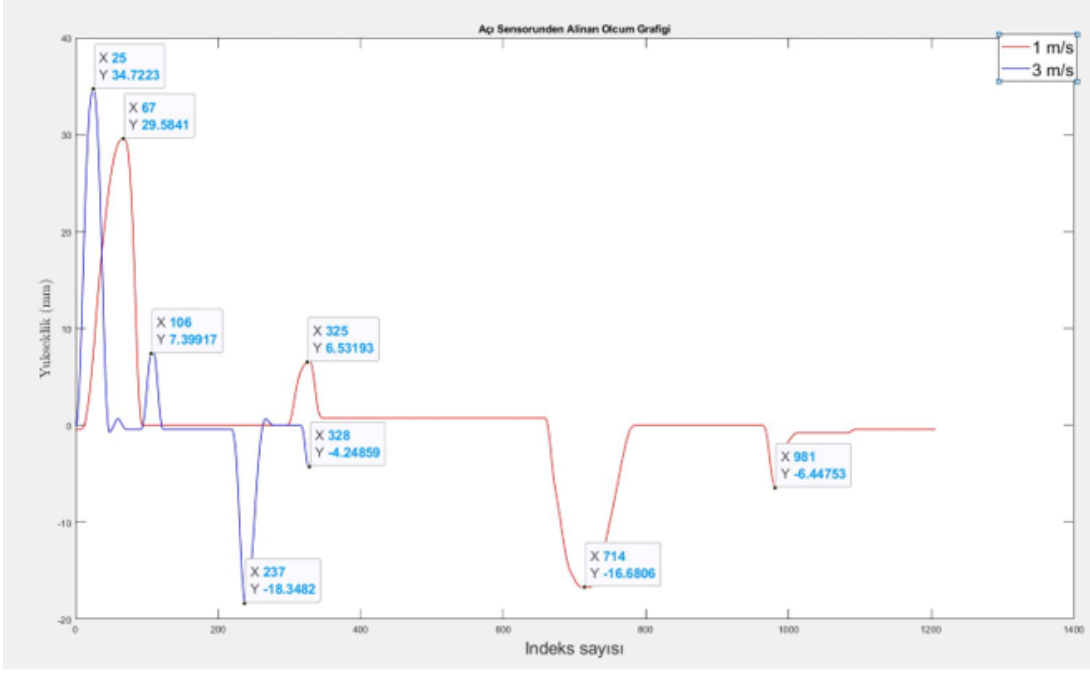
Şekil 5.34 : 1-3-5 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve sönümlenmesi olmayan koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.34’de 80N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlenmesi olmayan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 6.2 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 6.75 mm, 18 mm’lik çukur anomali 16.62 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 29.88 mm ölçülmüştür. Aynı ortam koşullarında 3 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 8.8 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 2.33 mm, 18 mm’lik çukur anomali 18.65 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 34.44 mm ölçülmüştür. 5 m/s de ise 7.5 mm’lik tümsek anomali 18.8 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 0.55 mm, 18 mm’lik çukur anomali 15.33 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 66.98 mm ölçülmüştür.



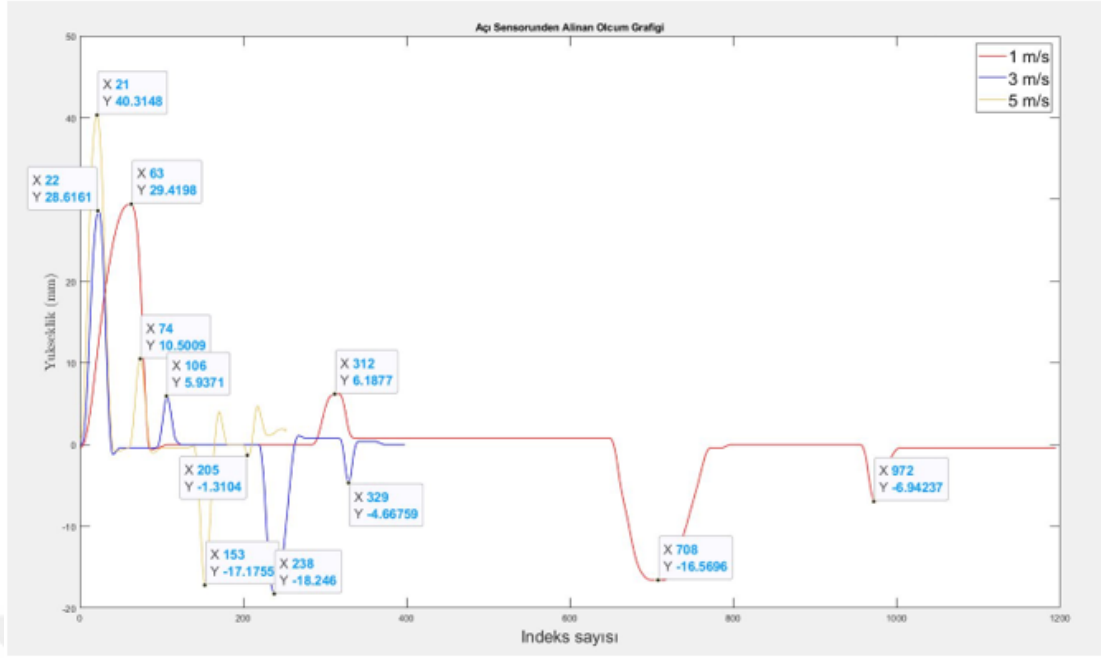
Şekil 5.35 : 1-3 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.35’da 80N yay sabiti ile 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 5.28 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 7.85 mm, 18 mm’lik çukur anomali 17.83 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 28.66 mm ölçülmüştür. Aynı ortam koşullarında 3 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 12.81 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 2.63 mm, 18 mm’lik çukur anomali 16.73 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 49.01 mm ölçülmüştür.



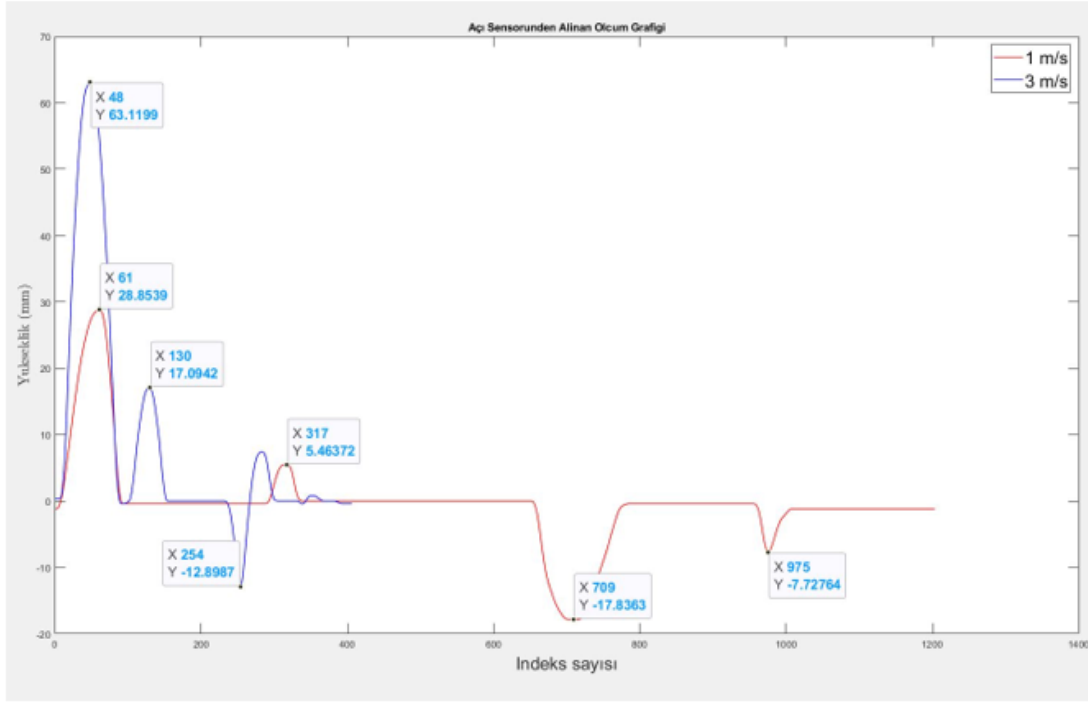
Şekil 5.36 : 1-3 m/sn hızda 80N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.36'da 80N yay sabiti ile 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi yüksek olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s hızda 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.53 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 6.44 mm, 18 mm'lik çukur anomali 16.68 mm ve 30 mm'lik tümsek anomali 29.58 mm ölçülmektedir. 3 m/s hızda ise 7.5 mm'lik tümsek anomali 7.39 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 4.25 mm, 18 mm'lik çukur anomali 18.35 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 34.72 mm olarak ölçülmektedir. Sönümlenme olmayan ve normal sönümlmeli tekerlek ölçümlerine göre ölçüm hatasının azaldığını gözlenmektedir.,



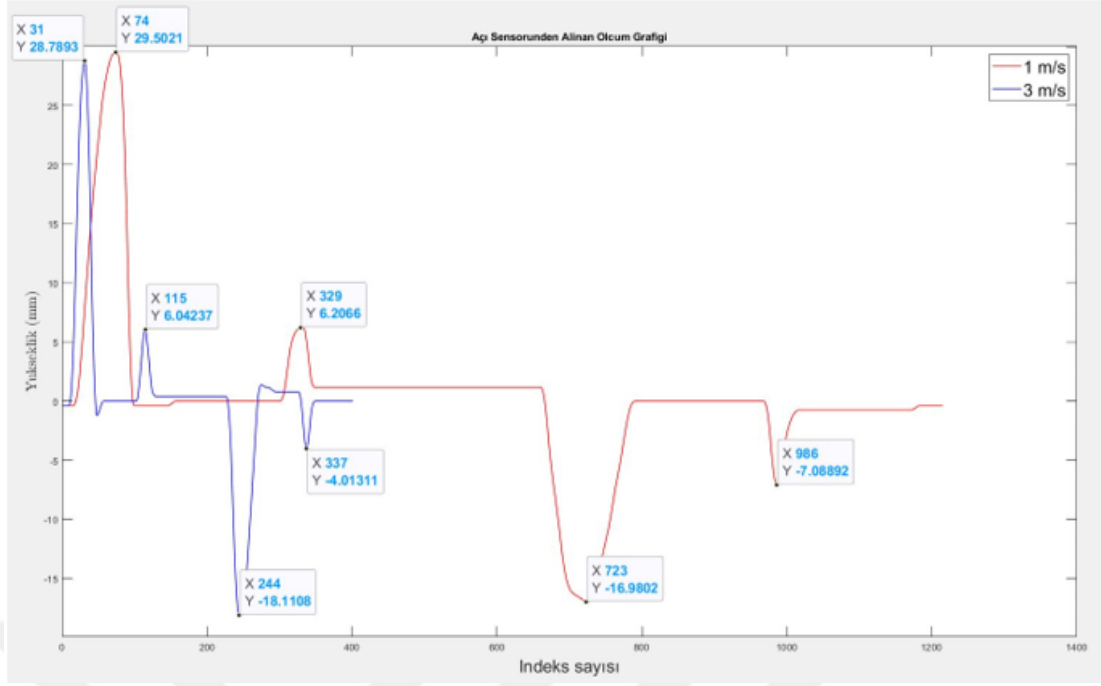
Şekil 5.37 : 1-3-5 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve sönümlemesi olmayan koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.37’de 150N yay sabiti ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi olmayan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 6.19 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 6.94 mm, 18 mm’lik çukur anomali 16.57 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 29.42 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 5.94 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 4.67 mm, 18 mm’lik çukur anomali 18.25 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 28.62 mm ölçülmüştür. 5 m/s hızda ise 7.5 mm’lik tümsek anomali 10.5 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 1.31 mm, 18 mm’lik çukur anomali 17.18 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 40.32 mm ölçülmüştür. Yay sabiti artırılması ölçüm hatasını azaltmıştır. Ancak ölçümlerden anlaşılan dent tipleri de ölçüm hatalarını etkilemektedir. 18 mm’lik çukur anomali hız ve yay katsayısı değişse de oldukça doğru ölçülmüştür.



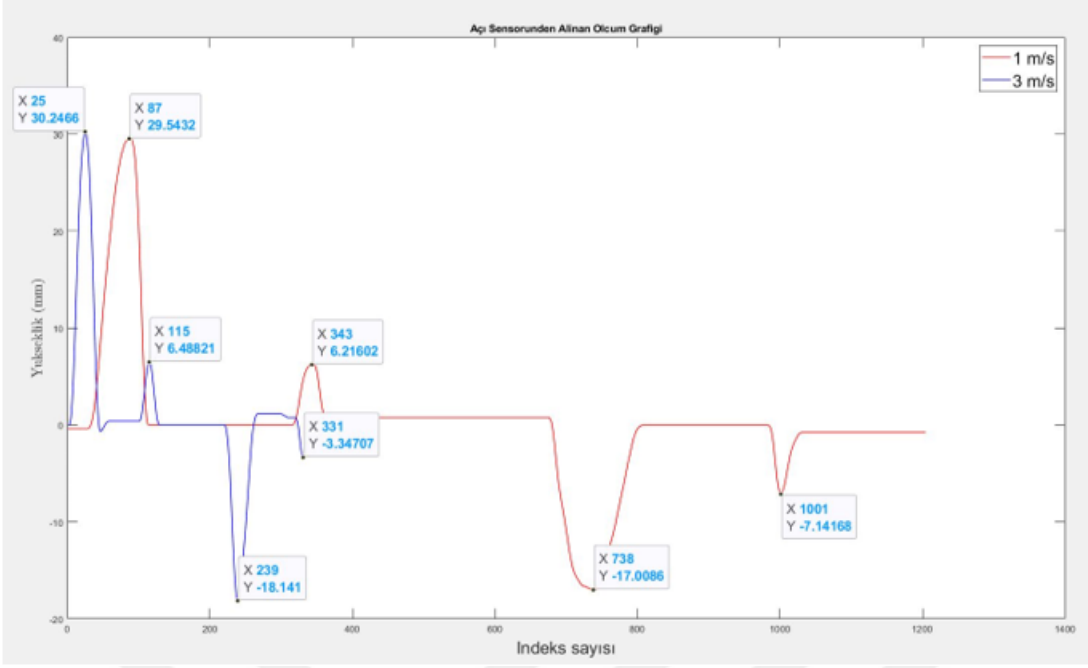
Şekil 5.38 : 1-3 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve normal sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.38’de 150N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 5.46 mm, 7.5 mm’lik çukur anomali 7.72 mm, 18 mm’lik çukur anomali 17.84 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 28.85 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda 7.5 mm’lik tümsek anomali 17.09 mm, 18 mm’lik çukur anomali 12.89 mm, 30 mm’lik tümsek anomali 63.12 mm ölçülmüştür. Yay katsayısı fazla olmasına rağmen 3 m/s hızda oldukça yüksek ölçüm hatası gözlenmiştir.



Şekil 5.39 : 1-3 m/sn hızda 150N yay sabitli gergin olan ve yüksek sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

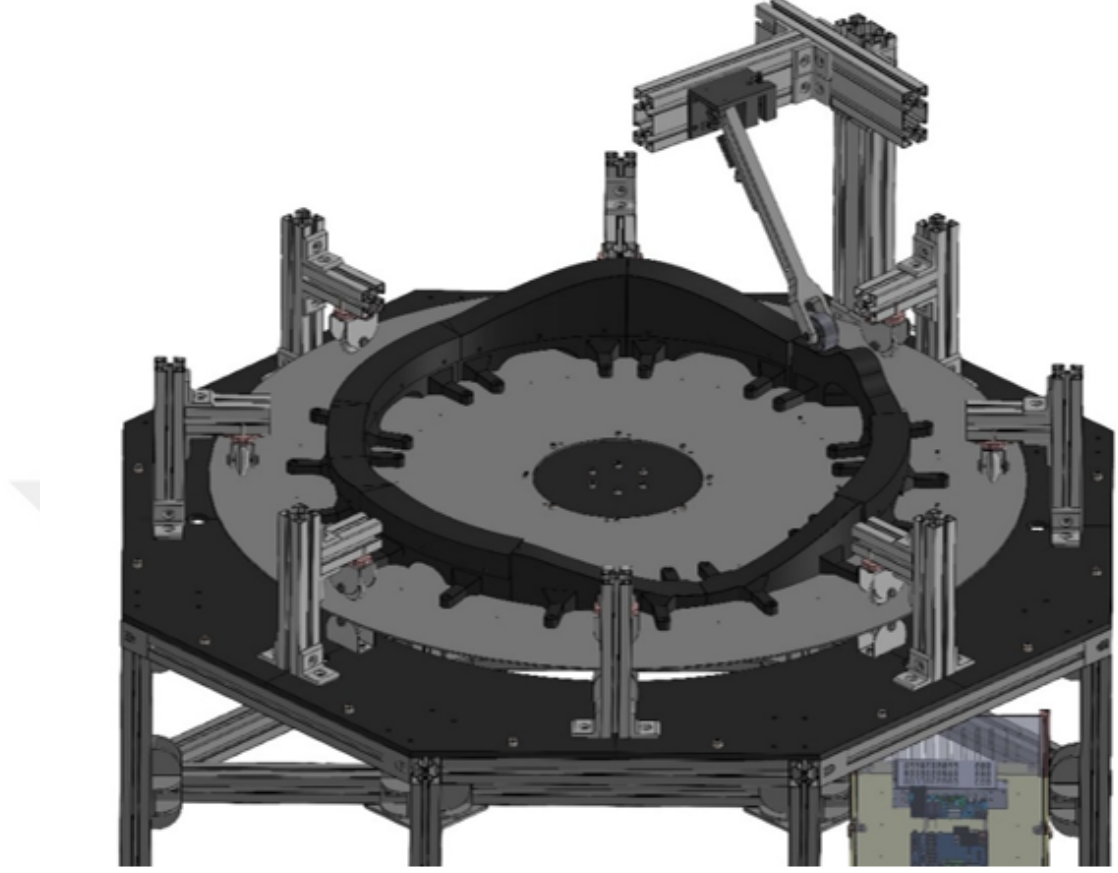
Şekil 5.39'te 150N yay sabiti ile yapılan deneyde 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olan ve tekerlek sönümlemesi yüksek olan koldan alınan ölçümlere bakıldığında 1 m/s hızda 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.21 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 7.1 mm, 18 mm'lik çukur anomali 16.98 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 29.5 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.04 mm, 18 mm'lik çukur anomali 18.11 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 28.79 mm ölçülmüştür.



Şekil 5.40 : 1-3 m/sn hızda 100N yay sabitli gergin olmayan ve normal sönümlmeli koldan alınan verinin grafiği

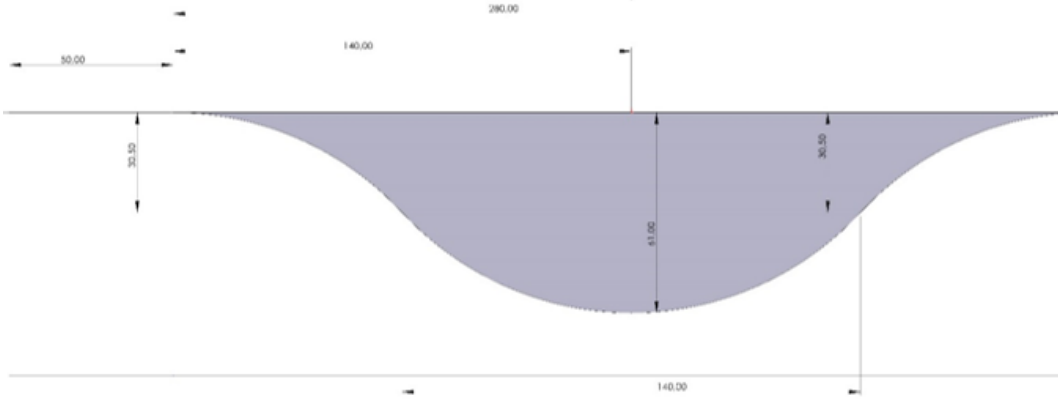
Şekil 5.40'te 100N yay sabiti ile 1 m/s ve 3 m/s hızlarda yay gerginliği olmayan ve tekerlek sönümlemesi olan koldan alınan ölçümlerde 1 m/s hızda 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.21 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 7.14 mm, 18 mm'lik çukur anomali 17.01 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 29.54 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda 7.5 mm'lik tümsek anomali 6.49 mm, 7.5 mm'lik çukur anomali 3.35 mm, 18 mm'lik çukur anomali 18.14 mm, 30 mm'lik tümsek anomali 30.25 mm ölçülmüştür.

5.1.3 Test 3. PLA Tabla üzerinde hareket 2 adet Çukur Dent 2 adet Tümsek Dent



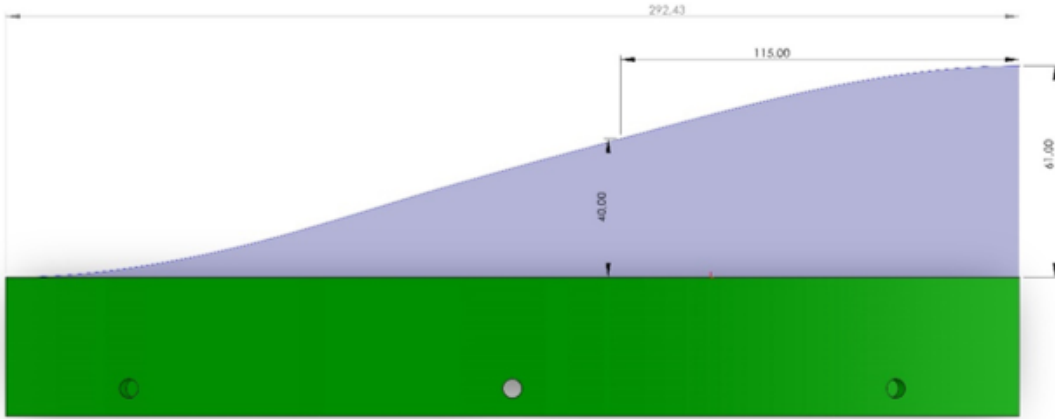
Şekil 5.41 : Test 3’de kullanılan test düzeneği kurulumu

Şekil 5.41’te Test 3’de kullanılan test düzeneği kurulumu gösterilmektedir.



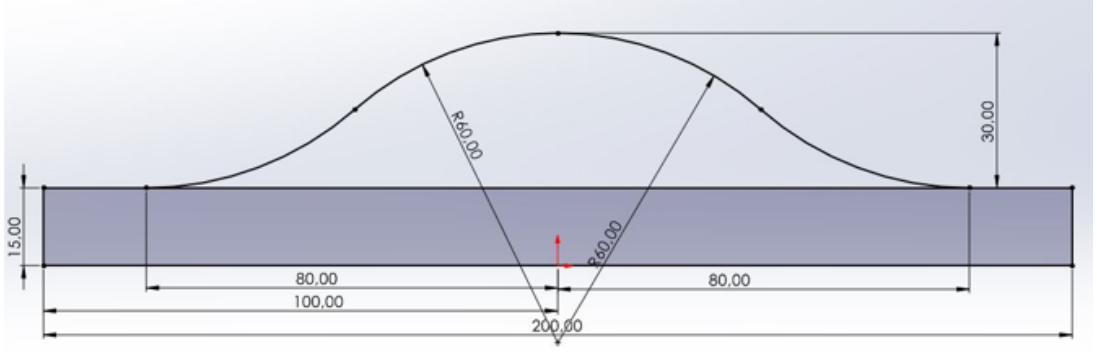
Şekil 5.42 : 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri

Şekil 5.42’de 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri gösterilmektedir.



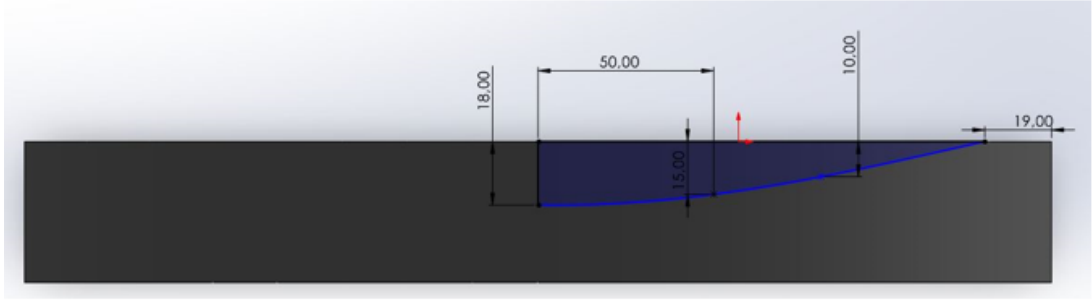
Şekil 5.43 : 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri

Şekil 5.43’de 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 61 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.44 : 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri

Şekil 5.44’de 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 30 mm derinliğindeki tümsek dentin ölçüleri gösterilmektedir.



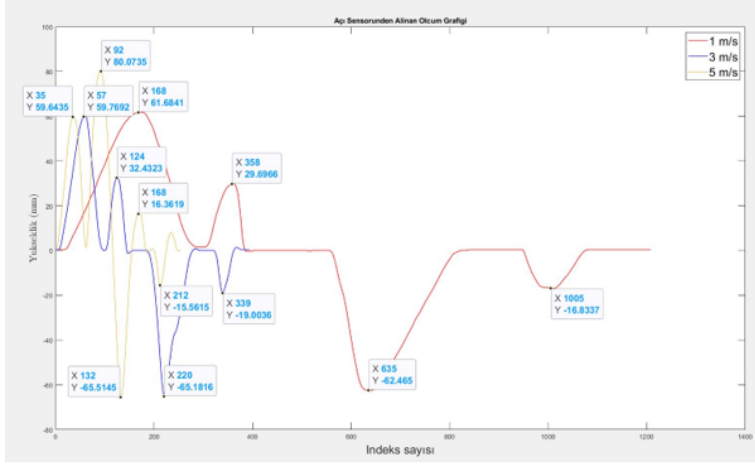
Şekil 5.45 : 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri

Şekil 5.45’da 3 Numaralı Test düzeneğinde kullanılan dentlerden 18 mm derinliğindeki çukur dentin ölçüleri gösterilmektedir.

Şu parametreler değiştirilerek ölçümler alınacak ve karşılaştırmalar yapılacaktır;

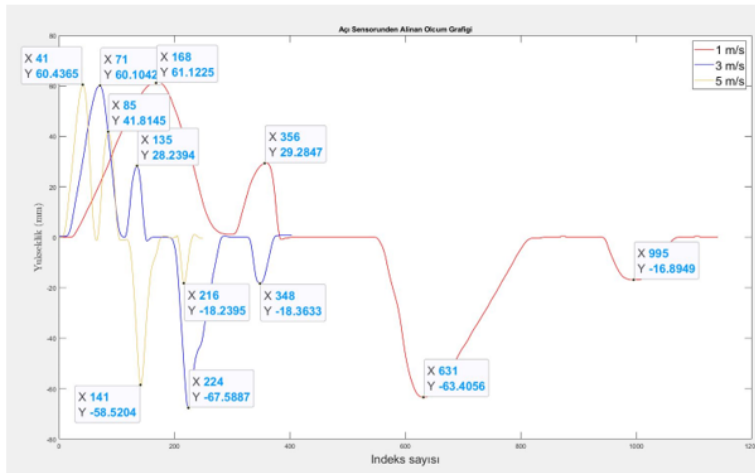
1. Hız (1m/s , 3m/s, 5m/s)
2. Yay Katsayısı (100N, 150N)

5.1.3.1 Ölçümler



Şekil 5.46 : 1-3-5m/sn hızda 100N yay sabitli koldan alınan verinin grafiği

3. test düzeneğinde yapılan ilk ölçümde Şekil 5.46'de 100N yay sabiti ile 1 m/s hızda koldan alınan ölçümlere bakıldığında 30 mm'lik tümsek anomali 29.70 mm, 18 mm'lik çukur anomali 16.83 mm, 61 mm'lik çukur anomali 62.47 mm, 61 mm'lik tümsek anomali 61.68 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda ise 30 mm'lik tümsek anomali 32.43 mm, 18 mm'lik çukur anomali 19.00 mm, 61 mm'lik çukur anomali 65.18 mm, 61 mm'lik tümsek anomali 59.77 mm ölçülmüştür. 5 m/s hızda ise 30 mm'lik tümsek anomali 80.07 mm, 18 mm'lik çukur anomali 15.56 mm, 61 mm'lik çukur anomali 65.52 mm, 61 mm'lik tümsek anomali 59.64 mm ölçülmüştür.



Şekil 5.47 : 1-3-5m/sn hızda 150N yay sabitli koldan alınan verinin grafiği

Şekil 5.47’de 150N yay sabiti ile 1 m/s hızda koldan alınan ölçümlere bakıldığında 30 mm’lik tümsek anomali 29.29 mm, 18 mm’lik çukur anomali 16.90 mm, 61 mm’lik çukur anomali 63.41 mm, 61 mm’lik tümsek anomali 61.12 mm ölçülmüştür. 3 m/s hızda ise 30 mm’lik tümsek anomali 28.24 mm, 18 mm’lik çukur anomali 18.36 mm, 61 mm’lik çukur anomali 67.59 mm, 61 mm’lik tümsek anomali 60.11 mm ölçülmüştür. 5 m/s hızda ise 30 mm’lik tümsek anomali 41.81 mm, 18 mm’lik çukur anomali 18.24 mm, 61 mm’lik çukur anomali 58.52 mm, 61 mm’lik tümsek anomali 60.44 mm ölçülmüştür.

Son olarak yapılan 3. Test düzeneğinde 1 adet 30 mm ve 1 adet 61 mm derinliğinde tümsek anomali, 1 adet 18 mm ve 1 adet 61 mm derinliğinde çukur anomali bulunmaktadır. 100N ve 150N olmak üzere iki farklı yay katsayısı ile 1 m/s, 3 m/s ve 5 m/s hızlarda tekerlek sönümlemesi olmadan ölçümler yapılmıştır. İlk 2 deneyde düşük katsayılı yayların ölçüm hatasını artırdığı anlaşıldığından dolayı son deneyde sadece yüksek katsayılı yaylar kullanılmıştır.

Sonuç olarak:

5N ve 10N yay sabitinin deney düzeneği için oldukça yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. 40N ve 60N yay sabitlerinin 5 m/s hızı için yeterli olmadığı gözlenmiştir. 80N yay sabitinin 5 m/s hızında ölçüm alabilmek için yeterli bir kuvvet olduğu anlaşılmaktadır.

Anomali yüksekliği, yay kuvveti ve tekerlek sönümlemesi sabit tutularak hızın ölçüm hatasına olan etkisi araştırılmıştır. Çıktılara göre tekerlekli kaliper kolu yüksek hızda anomali ile karşılaştığında ciddi bir sıçrama meydana gelir. Kol, çarpışmadan kısa bir süre sonra anomali ile temasını kaybeder ve bu anda incelenen yükseklik hatalı ölçülür. Daha yüksek hızlarda, daha şiddetli çarpışma yaşanır ve denetlenen yüksekliğin ölçüm hatası daha büyük olur.

Anomali yüksekliği, bağıl hız ve tekerlek sönümlemesi sabit tutularak yay kuvvetinin ölçüm hatasına olan etkisi araştırılmıştır. Çıktılara göre daha büyük yay kuvvetinin, kaliper kolu boru hattı iç duvarı ile temasını kaybettikten sonra sıçrama süresini büyük ölçüde azalttığı gözlenmiştir, dolayısıyla ölçüm hatasının düştüğü gözükmektedir. Anomali yüksekliği, bağıl hız ve yay katsayısı sabit tutularak tekerlek sönümlemesinin ölçüm hatasına olan etkisi araştırılmıştır. Çıktılara göre daha fazla sönümleme olan

tekerlek, kaliper kolu boru hattı iç duvarı ile temasını kaybettikten sonra ikinci bir sıçramanın büyük ölçüde azaldığı gözlenmiştir, dolayısıyla ölçüm hatasının düştüğü gözükmektedir.

Ayrıca bazı ölçümlerden anlaşılan dent tipleri de ölçüm hatalarını etkilemektedir. Örneğin 2. Test düzeneğindeki 18 mm'lik çukur anomali hız, yay katsayısı ve tekerlek sönümlemesi değişse de her koşulda oldukça doğru ölçülmüştür.

Bu deneyde alınan sonuçlara göre 1 m/s, 3m/s ve 5 m/s hızlarında ölçüm hatasının oldukça az olduğu gözlenmektedir. Bu da yay katsayısının ve anomali yapısının ölçümleri doğrudan ve yüksek oranda etkilediği göstermektedir.



6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında kaliper test mekanizmasının kaliper modülü tasarlamadan önce bize ne gibi faydalar sağlayacağı araştırılmıştır. Daha sonra belirlenen değişkenler ile oldukça çok test yapılmıştır. Testlerde hız, yay sabiti, yay gerginliği ve teker sönümlemesinin dent tespitinde etkisi incelenmiştir. Hızın testlerde en büyük etken olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer etkenlerin hız artışına rağmen dent tespit doğruluğunu artırması hedeflenmiştir. Düzeneğin hızı arttıkça tekerlekli kaliper kolunun dentlere temasından sonra etki-tepki kuvvetinde artış olduğu gözlenmiştir. Bu durum dentin ölçümündeki hatayı artırmaktadır. Yay sabiti çok düşük olan ölçümlerde 1 m/s hız hata oranını pek değiştirmemektedir. Fakat 3m/s ve 5m/s hızlarda yay sabiti çok düşük olan kol oldukça zıplamakta ve hata oranı çok büyük çıkmaktadır. Yay sabiti arttırıldığında görülmektedir ki hızın oluşturduğu hata oranı bir miktar düşmektedir. Yay sabiti ile yay gerginliği aynı parametreler olduğundan aynı etkiyi göstermektedir. Yapılan deneylerde 5m/s hızda yay sabiti ve yay gerginliği artırılmasına rağmen hatanın hala yüksek olduğu görülmüştür. Nitekim literatürdeki çalışmalarda da bu şekilde olmuştur. Ancak daha yüksek katsayılı yaylar ile denemeler yapıldığında daha iyi sonuçlar alınmıştır. Tekerlekli kaliper kolunun yüksek dentlere çarpmasının ardından bir zıplama gerçekleştirdiği ve bu zıplamanın bir dent gibi algılanmasını önlemek adına tekerlek sönümlemesi kullanılmıştır. Bu sönümleme normal ve yüksek olarak iki farklı seviyede denenmiştir. Bu deneylerde normal sönümlemenin 1m/s ve 3m/s hızlarda bir miktar fayda sağladığı görülmüştür. Fakat 5m/s hızda etkisi az olmuştur. Yüksek sönümlemenin ise tekerlek zıplamasını bütün hızlarda bir miktar azalttığı görülmüştür. Çukur dentlerde yapılan testler ile alınan sonuçlar incelendiğinde derinliği fazla olan çukur dentlerin tespitinde doğruluk oranının oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. Yüksek hızlarda derinliği az olan çukur dentlerin tespitinde hatalar meydana gelmiştir. Bu durumun sebebi olarak kolun henüz çukura inmeden doğrudan yol üzerinde devam etmesi söylenebilir. Burada derinliği fazla olan çukur dentlerin tespit edilmesine rağmen derinliği az olanların tespit edilememesi ani

değişimlerden kaynaklanmaktadır. Literatürde ise oluşan dentlerin yapısının keskin olmasından ziyade yumuşak geçişli dentler olduğu gözükmektedir. Bundan dolayı deneylerde ekstrem durumlar için hazırlanmış ani geçişli keskin dentlerden alınan hatalı sonuçlar bir miktar tolere edilebilir. Yumuşak geçişli dentlerde doğruluk oranını artırmaya yönelik çalışmalara odaklanmak gerektiği görülmektedir. PLA yapı üzerinde yapılan 2 deneyde zıplamaların azaldığı gözükmektedir. Bu durum tekerlek yapısının değişiminin etkisini göstermektedir. Elastik katsayısı yüksek teker seçilmesi durumunda, tekerlek zıplaması sönümlenmektedir. Bu da kaliper tasarımı için önemli bir noktadır. Yay katsayısının oldukça yüksek olduğu testlerde 5 m/s hızlarda dahi oldukça yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. PLA yapı üzerinde yapılan 2. deneyde sadece yay katsayısı yüksek olan veriler incelenmiştir. Sonuç olarak incelenen adımlar ve deneyler gösteriyor ki yay katsayısı, tekerlek yapısı gibi parametreler ile değişken hızlarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum da nihai bir kaliper tasarımı için bir çok noktada yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Tinacos, K., Cazenave, P., Gao, M., Krishnamurthy, R., Seman, D. ve Jones, C.** (2012). ILI Based Dent Screening and Strain Based Analysis, *International Pipeline Conference*, cilt45134, American Society of Mechanical Engineers, s.727–734.
- [2] **Pinheiro, B., Soares, C.G. ve Pasqualino, I.** (2019). Generalized expressions for stress concentration factors of pipeline plain dents under cyclic internal pressure, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 170, 82–91.
- [3] **Arumugam, U., Tinacos, K., Gao, M., Wang, R. ve Kania, R.** (2014). Parameters Affecting Dent Strain Using 3D Laser Scan Profile, *International Pipeline Conference*, cilt46117, American Society of Mechanical Engineers, s.V002T06A033.
- [4] **Noronha Jr, D.B., Martins, R.R., Jacob, B.P. ve de Souza, E.** (2010). Procedures for the strain based assessment of pipeline dents, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87(5), 254–265.
- [5] **Li, X., Zhang, S., Liu, S., Jiao, Q. ve Dai, L.** (2015). An experimental evaluation of the probe dynamics as a probe pig inspects internal convex defects in oil and gas pipelines, *Measurement*, 63, 49–60.
- [6] **Zhu, X., Jiao, Q., Li, X., Zhang, S. ve Liu, S.** (2018). Experimental research on the precision of wheeled caliper arm for measuring pipeline deformation, *Measurement*, 127, 15–20.
- [7] **Beller, M., Uzelac, N.I. ve Barbian, A.** (2006). Combined quantitative in-line inspection of pipelines for metal loss and cracks, *International Pipeline Conference*, cilt42622, s.857–864.
- [8] **Cosham, A. ve Hopkins, P.** (2004). The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual, *International journal of pressure vessels and piping*, 81(2), 127–139.
- [9] **Wang, J., Shuai, Y., Feng, C., Zhang, P., Wang, T., Lin, N. ve Liu, Z.** (2021). Multi-dimensional mechanical response of multiple longitudinally aligned dents on pipelines and its effect on pipe integrity, *Thin-Walled Structures*, 166, 108020.
- [10] **Cunha, S.B., Pasqualino, I.P. ve Pinheiro, B.C.** (2014). Pipeline plain dent fatigue: A comparison of assessment methodologies, *International*

Pipeline Conference, cilt46117, American Society of Mechanical Engineers, s.V002T06A041.

- [11] **Group, N.S.** (2010). RFC-4800 User Manual, Wiley, New York, 1. sürüm.
- [12] **Broere, W.** (2016). Urban underground space: Solving the problems of today's cities, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 245–248.
- [13] **Trench, C.J.** (2001). How pipelines make the oil market work—their networks, operation and regulation, *Allegro Energy Group, New York*.
- [14] **Lu, H., Behbahani, S., Azimi, M., Matthews, J.C., Han, S. ve Iseley, T.** (2020). Trenchless construction technologies for oil and gas pipelines: State-of-the-art review, *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(6), 03120001.
- [15] **Liu, Z. ve Kleiner, Y.** (2013). State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes, *Measurement*, 46(1), 1–15.
- [16] **Yuhua, D. ve Datao, Y.** (2005). Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis, *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(2), 83–88.
- [17] **Canavese, G., Scaltrito, L., Ferrero, S., Pirri, C., Cocuzza, M., Pirola, M., Corbellini, S., Ghione, G., Ramella, C., Verga, F. ve diğerleri** (2015). A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection—Part A: Design and laboratory characterization, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127, 311–317.
- [18] **Zarea, M., Batisse, R., Leis, B., Cardin, P. ve Vignal, G.** (2012). Full scale experimental database of dent and gouge defects to improve burst and fatigue strength models of pipelines, *International Pipeline Conference*, cilt45134, American Society of Mechanical Engineers, s.845–861.
- [19] **Huang, Y. ve Zhang, P.** (2021). Strain response analysis of API 5L X80 pipelines with a constrained dent subjected to internal pressure, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 193, 104472.
- [20] **Wang, J., Shuai, Y., He, R., Dou, X., Zhang, P. ve Feng, C.** (2021). Ultimate strain capacity assessment of local buckling of pipelines with kinked dents subjected to bending loads, *Thin-Walled Structures*, 169, 108369.
- [21] **Roovers, P., Galli, M., Bood, R., Marewski, U., Steiner, M. ve Zarea, M.** (1999). Eprg methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage. Pt. 1, *3R. Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport*, 38.
- [22] **Cai, J., Jiang, X., Lodewijks, G., Pei, Z. ve Wu, W.** (2018). Residual ultimate strength of damaged seamless metallic pipelines with combined dent and metal loss, *Marine Structures*, 61, 188–201.

- [23] **Turnquist, M. ve Parsons, A.** (2018). Improving the Accuracy of Traditional Dent Fatigue Analysis: A Method for Quantifying the Initial Damage Caused by Dent Formation, *International Pipeline Conference*, cilt51869, American Society of Mechanical Engineers, s.V001T03A074.
- [24] **Cai, J., Jiang, X. ve Lodewijks, G.** (2018). Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending, *Ships and Offshore Structures*, 13(5), 519–531.
- [25] **Jiang, F., Dong, S., Zhao, Y., Xie, Z. ve Soares, C.G.** (2019). Investigation on the deformation response of submarine pipelines subjected to impact loads by dropped objects, *Ocean Engineering*, 194, 106638.
- [26] **Lyons, C., Race, J., Wetenhall, B., Chang, E., Hopkins, H. ve Barnett, J.** (2019). Assessment of the applicability of failure frequency models for dense phase carbon dioxide pipelines, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 112–120.
- [27] **Lim, J.S.** (1990). Two-dimensional signal and image processing, *Englewood Cliffs*.



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Hasan Basri GÜRDAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2020, Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2020 – Halen: Gömülü Yazılım Mühendisi – Robotik ve Akıllı Sistemler Grubu TÜBİTAK RUTE.

DiĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- 2023 - Sunum - 2nd International Graduate Research Symposium, Istanbul, TÜRKİYE