



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HAREKETLİ TARTIMDA DİJİTAL FİLTRE KULLANIMI**

**Sena ZENGİN**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2023**

**KONYA**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Sena ZENGİN tarafından hazırlanan “Hareketli alanlarda dijital filtre kullanımı” adlı tez çalışması 15/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Dr.Öğr.Üyesi Hüseyin DOĞAN

#### Danışman

Doç. Dr. Bayram AKDEMİR

#### Üye

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

### İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt Uyan  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

İmza

Tarih: 15.06.2023

Sena ZENGİN

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### HAREKETLİ TARTIMDA DİJİTAL FİLTRE KULLANIMI

Sena ZENGİN

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bayram AKDEMİR

2023, 71 Sayfa

Jüri

Danışmanın Doç. Dr. Bayram AKDEMİR  
Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU  
Doç. Dr. Hüseyin DOĞAN

Tartım işlemi geçmişten günümüze hayatımızın her alanında sıklıkla kullandığımız bir yöntemdir. Kullanım koşullarına ve ihtiyaca uygun olarak tasarlanabilen tartım cihazları teknoloji ile birlikte günbegün gelişmektedir. Bu çalışmada ağırlıkları farklı olan cisimlerin tartım işlemi hareketli alanda gözlemlenmiş ve tahmin algoritması geliştirilmiştir. Tartım işlemi, sabit olmayan koşullar ve hareketli alanda ölçülmüştür. Bu durumdan kaynaklı düşük frekanslı sinyaller yani gürültü sinyalleri ölçülen sinyallere eklenip yanıltıcı sonuçlar verebilir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için Kalman filtresi kullanılarak bir tahmin algoritması geliştirilmiştir. Bu algorithmada aynı zamanda FIR filtresi ile filtreleme yapılmıştır. Filtrelenmiş veriyi KF tahmin algoritmasına sunarak daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen tahmin algoritması, gürültü içeren veri akışı üzerinde özyinelemeli çalışır. KF ile her bir adımda hata minimuma indirilip filtreleme gerçekleştirilmiş ve tahmin sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik tartım, Kalman fitresi, FIR filtresi, Tahmin algoritması.

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**USİNG DIJİTAL FİLTİR İN MOTİON WEİGHİNG**

**Sena ZENGİN**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical Electronics Engineering**

**Advisor: Doç. Dr. Bayram AKDEMİR**

**2023, 71 Pages**

**Jury**

**Advisor Doç. Dr. Bayram AKDEMİR  
Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU  
Doç. Dr. Hüseyin DOĞAN**

Weighing is a method that we frequently use in all areas of our lives from past to present. Weighing devices, which can be designed in accordance with usage conditions and needs, are developing day by day with technology. In this study, the weighing process of objects with different weights was observed in the moving area and the estimation algorithm was developed. Measured in weighing operation, unstable conditions and moving area. Due to this situation, low frequency signals, namely noise signals, can be added to the measured signals and give misleading results. In order to overcome this problem, an estimation algorithm has been developed using the Kalman filter. In this algorithm, filtering is also done with FIR filter. More accurate results were obtained by presenting the filtered data to the KF estimation algorithm. The developed prediction algorithm works recursively on the noise-containing data stream. The estimation result was obtained by minimizing the error and performing filtering at each step with KF.

**Keywords:** Dynamic weighing, Estimation algorithm, FIR filter, Kalman filter.

## ÖNSÖZ

Çalışma sürecinde olumlu tavrıyla beni cesaretlendiren, tecrübesiyle her türlü yol gösteren ve birlikte çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Doç. Dr. Bayram AKDEMİR'e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tez aşamasında benden desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU'na ve lisans dönemimde beni akademiye teşvik eden ve beni her zaman destekleyen Dr. Öğr. Üyesi Hasan KOYUNCU'ya teşekkürü borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan, maddi manevi desteklerini üzerimden esirgemeyen ve aldığım kararlarda her zaman arkamda duran Eren KARABULUT'a, aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

Sena ZENGİN

KONYA, 2023

## İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI.....	i
TEZ BİLDİRİMİ.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	i
KISALTMALAR .....	i
1.GİRİŞ .....	2
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	5
3.MATERYAL - YÖNTEM.....	14
3.1.Tartım Cihazları .....	14
3.1.1. Eşit kollu terazi .....	14
3.1.2.Dinamometre.....	16
3.1.3. Yük hücresi (Load Cell).....	17
3.2. Tartım Yöntemleri.....	21
3.2.1. Statik(Durağan) tartım .....	21
3.2.2. Dinamik (Hareketli) tartım.....	22
3.3. Gerçekleştirilen Tartım Sistemi .....	23
3.3.1.HX711 amplifier(yükselteç) .....	24
3.3.1.1. Delta- sigma ADC.....	28
3.3.2. Arduino .....	31
3.4. Filtre Çeşitleri .....	32
3.4.1. FIR Filtresi .....	33
3.4.2. Kalman filtresi.....	37
3.4.2.1. Kalman filtresinin matematiksel modeli ve basit algoritması....	37
3.4.2.2. Adaptif kalman filtresi .....	44
3.4.2.3. Genişletilmiş kalman filtresi .....	46
3.4.2.4. Koksuz kalman filtresi .....	47
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	50
KAYNAKÇA .....	59

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Kalman filtresi ile filtrelenen ölçüm verileri .....	7
Şekil 2. 2. Gerçek Akış Hızı- Tahmini Akış Hızı Grafiği.....	9
Şekil 2. 3. Renkli gürültü sinyal iyileştirme grafiği karşılaştırması.....	12
Şekil 3. 1. Eşit kollu terazi örneği .....	14
Şekil 3. 2. Eşit kollu terazi taslağı.....	15
Şekil 3. 3. Antik çağda kullanıldığı tespit edilen tartı ağırlıkları .....	15
Şekil 3. 4. Dinamometre örneği .....	16
Şekil 3. 5. Load Cell (Yük hücresi) .....	17
Şekil 3. 6. Strain gauge .....	17
Şekil 3. 7. Malzelere ilişkin gerilim deformasyon ilişkisi.....	18
Şekil 3. 8. Wheatstone köprüsü.....	19
Şekil 3. 9. Wheatstone köprüsünün genel yapısı .....	20
Şekil 3. 10. (a) Yarım köprü sıcaklık kompanzaasyonu (b) Arttırılmış çıkış gerilimi.....	20
Şekil 3. 11. Statik tartım cihazı .....	21
Şekil 3. 12. Checkweigher sistem örneği .....	22
Şekil 3. 13. WIM yöntemi.....	23
Şekil 3. 14. KF tahmin algoritması .....	24
Şekil 3. 15. HX711 yükselteci .....	25
Şekil 3. 16. HX711 yükselteç kart tasarımı .....	26
Şekil 3. 17. Uygulanan devrenin şeması .....	26
Şekil 3. 18. HX711 yükselteç entegrasyonu .....	27
Şekil 3. 19. DS-ADC Blok diyagramı.....	29
Şekil 3. 20. Dijital-Kesim filtresi .....	30
Şekil 3. 21. DS-ADC zaman domeninde gösterimi .....	30
Şekil 3. 22. Arduino Uno Kartı .....	32
Şekil 3. 23. FIR filtresinin yapısı .....	34
Şekil 3. 24. FIR filtresi örneği.....	35
Şekil 3. 25. Kalman filtresi algoritmasının gösterimi .....	38
Şekil 3. 26. KF matematiksel denklemleri .....	39
Şekil 3. 27. KF Tahmin algoritmasının grafiksel olarak gösterimi.....	41
Şekil 3. 28. KF tahmin algoritmasının akış diyagramı .....	42
Şekil 3. 29. Adaptif Kalman filtresi şeması .....	45



Şekil 4. 1. Gerçekleştirilen uygulamanın bağlantı şeması .....	50
Şekil 4. 2. Deneş şeması .....	51
Şekil 4. 3. Ölçülen değerlerin seri port ekranında gösterimi .....	51
Şekil 4. 4. Ölçülen değerlerin seri çizici ekranında gösterimi .....	52
Şekil 4. 5. Ölçüm verileri ve tahmin sonuçlarının grafiksel gösterimi .....	53
Şekil 4. 6. Ortalama değeri 12 olan grafiğin durum-kestirim sonucu.....	54
Şekil 4. 7. Orijinal ağırlığın KF ile tahmin edilmesi.....	54
Şekil 4. 8. Gürültülü verinin KF tahmin sonucu .....	55
Şekil 4. 9. FIR-KF algoritmasının sonuçları.....	56
Şekil 4. 10. KF-FIR filtresi algoritmasının sonuçları.....	56

Tablo 1. Uygulama sonuçları .....	6
Tablo 2. HX711 yükselteç pinleri ve fonksiyonları.....	27
Tablo 3. Yapılan ölçümlerin tabloda gösterimi .....	41
Tablo 4. Ölçüm verilerinin durum kestirim tablosu.....	53
Tablo 5. Filtreleme sonuçları .....	57

## KISALTMALAR

- BP: Geri yayılım (Back Propagation)
- WIM: Hareketli alanda tartım (Weigh-in-motion)
- LMS: En küçük kareler ortalaması (Least Means Squares)
- KF: Kalman filtresi
- EKF: Genişletilmiş Kalman filtresi
- ADC: Analog- Dijital Dönüştürücüler
- DS: Delta-Sigma
- IIR: Sonsuz Darbe Tepkisi (Infinite Impulse Response)
- FIR: Sonlu Darbe Tepkisi (Finite Impulse Response)
- UT: Kokusuz Dönüşüm
- UKF: Kokusuz Kalman Filtre
- AKF: Adaptif (Uyarlamalı) Kalman Filtresi
- OE: Çıktı Hatası Yöntemi
- BMS: Pil Yönetim Sistemi
- ÇMKF: Çok Modlu Kalman Filtresi
- IAE: Yenilik Tabanlı Uyarlamalı Tahmin
- MMAE: Çoklu Model Tabanlı Uyarlamalı Tahmin
- U-EZKH: Uçak Üzeri Eş Zamanlı Konumlama Ve Haritalama
- KUYS: Küresel Uydu Yönbulum Sistemi

## 1.GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar hayatımızı kolaylaştıran ve hayatımızın her alanında sıklıkla kullandığımız en önemli ürün modellerinden biri tartılardır. Tartıların çok yakın bir geçmişte geliştirilen aygıtlardan biri olduğu düşünülse de aslında kökleri çok daha eski dönemlere dayanmaktadır. Geçmişte mermer ya da taş gibi malzemelerden tartımlar gerçekleştirilirken zamanla daha kolay taşınması için daha hafif yapıya sahip olan materyaller kullanılmıştır.

Geçmişten bugüne tartı modelleri çok büyük değişimlere uğramıştır ve günümüzde en yeni teknolojiler kullanılarak çok daha pratik bir şekilde tartım işleminin yapılabileceği terazi modelleri kullanılmaktadır. Teknolojiyle birlikte analog tartı modellerinden hassas terazilere kadar geniş bir yelpazede kullanıma sunulan tartı modelleri ihtiyaca uygun olarak tasarlanmaktadır.

Tartım işlemi iki şekilde gerçekleştirilir. Biri statik (durağan) tartım iken diğeri dinamik (hareketli) tartımdır. Statik tartımda tartılacak olan cismin durağan bir sistemde tartılma işlemidir. Durağan tartım yapmak kesin sonuca ulaşmak için daha kolaydır ancak zaman kaybına yol açar. Dinamik tartım, hareketli alanlarda ya da sabit olmayan koşullarda tartım demektir. İki çeşit tartım yöntemi vardır. Bunlar; Checkweigher ve Weigh in Motion (WIM) yöntemidir. Checkweigher yöntemi bir cismin hareketli bant üzerinden geçerken tartılmasını sağlayan sistemdir. Belirli ağırlıkta olan cisimleri bir araya toplarken farklı ağırlıkta olan cisimleri ayırt edebilir. Kısaca Checkweigher ürünleri tartar, sınıflandırır ve ayırma işlemi gerçekleştirir. Weigh in Motion (WIM) yöntemi ise daha çok ulaşım sistemlerinde kullanılmakta olup araç hareket halindeyken aracın ağırlığını ölçmek için tasarlanmıştır. Bu yöntem ile araçlarda sınıflandırma yapılmakta ve aracın taşınması gereken maksimum yük kolaylıkla tespit edilmektedir. Ölçülecek olan aracın ağırlığı hareket halindeyken tartıldığı için hem süreden tasarruf edilmekte hem de trafik akış yoğunluğunu azaltmak için kullanılmaktadır.

Dinamik tartım yöntemleri hizmet, sanayi, ticaret, ulaşım gibi alanlarda ya da seri üretim yapan endüstriyel kurum ve kuruluşlarda hem süreden tasarruf etmeyi sağladığından hem de iş yükünü azalttığından daha çok tercih edilmektedir. Ölçümlerde kullanıcıya zamandan tasarruf etmesinin yanı sıra ölçmede birçok sorunları da beraberinde getirmiştir. En önemli sorunlardan biri, tartım işlemi hareketli olduğundan düşük frekanslı gürültü olarak adlandırılan titreşimlerin ağırlık ölçerken orijinal ağırlık

sinyali üzerine eklenmesiyle tartımda bozulmalar gerçekleştirmesidir. Günümüzde bu bozulmaları engellemek ve daha doğru sonuçlar elde etmek için birçok filtre denenmiştir.

Bu tezde hareketli alanlardan kaynaklı gürültü nedeniyle ölçümdeki sorunların ortadan kaldırılması için Kalman Filtresi ve FIR filtresi kullanılmıştır. KF ve FIR filtresinin bir arada kullanılan algoritmasının KF oranla hata oranını azaltarak sinyalde iyileştirmeler sağladığı tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması 5 ana başlıktan oluşmaktadır.

Kaynak araştırması bölümünde dinamik tartım sistemleriyle ilgili şu ana kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. Dinamik tartımdan kaynaklı bozulmaların önüne geçebilmek için kullanılan farklı filtre yöntemleri araştırılmıştır. Kalman filtresi ile yapılan tahmin algoritmaları incelenerek genel hatları ile anlatılmıştır.

Materyal- Yöntem bölümünde ağırlık tartım konusunun tarihçesi ve günümüze ulaşan ve geliştirilmekte olan tartım cihazlarının modellerinden bahsedilmiştir. Tartım yöntemleri, bu yöntemlerin özellikleri ve çeşitleri anlatılmıştır. Kullanılan HX711 yükseltecinin özelliklerinden ve çalışma yapısından bahsedilmiştir. Load cell çalışma prensibi anlatılmıştır. Filtre çeşitlerinden kısaca bahsedilmiş ve sayısal filtrenin analog filtrelerle göre avantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca ağırlıkları farklı birçok cismin tartım işlemi gerçekleştirilirken hareketli alandan kaynaklı sinyal bozulmalarının önüne geçmek için tasarladığımız Kalman filtresi algoritması anlatılmıştır. Kalman filtresinin tarihçesi, genel yapısı anlatılarak örneklerle açıklanmıştır. Geliştirilen Kalman filtresi tahmin algoritmasının matematiksel modelinden bahsedilmiştir. Ayrıca FIR filtresi'nin yapısı, matematiksel denklemi, tasarım metodları ve bu filtrenin özelliklerinden bahsedilmiştir.

Araştırma sonuçları bölümünde load cell'den aldığımız değişken ağırlık sinyalleri KF algoritmasına tabi tutularak tahmin sonuçları elde edilmiştir. Gürültülü sinyale FIR filtresi uygulanmış ve sinyalde iyileştirmeler sağlanmıştır. KF ve FIR filtresi aynı anda sinyale uygulanmış ve sonuçlar grafiklerle desteklenerek açıklanmıştır.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde ise gürültülü sinyale sırasıyla KF, FIR-KF, KF-FIR algoritmaları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle karşılaştırılarak anlatılmıştır. İleriki aşamalarda yapılması muhtemel olan algoritma önerilerinden bahsedilmiştir.



## 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Geçmişten günümüze tartım işlemi teknoloji ile birlikte gelişmekte ve uygulama alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Dinamik tartım sistemleri ticaret, ulaşım, sanayi, hizmet gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. İhtiyaca yönelik tasarlanan dinamik tartım sistemleri sürekli gelişim göstermekte ve devamlı araştırma yapılmaktadır. Farklı sektörlerde kullanılan bu tartım işlemi genel hatları ile incelendiğinde hareketli ağırlık ölçüm (weigh-in-motion) (WIM) ve otomatik kontrol terazisi (checkweigher) olarak ikiye ayrılmaktadır. Hareketli tartım yaparken oluşacak olan düşük frekanslı sinyaller (gürültü) tartım yapılacak olan maddenin ölçümdeki doğruluk oranını olumsuz etkilediğinden çeşitli filtreler ile bu gürültü elimine edilmeye çalışılmıştır. Tartımda doğruluk oranlarının artırılması amaçlanarak birçok filtre araştırması yapılmıştır. (Yanık, 2017)

Literatürde dinamik sistemde gerçekleştirilen tartım işlemleri ve kullanılan filtreleme yöntemleri;

Balachandran ve ark (2002) tarafından yayınlanan makalede dinamik tartım için tahmin algoritması gerçekleştirilmiştir. Tartım işleminin hassasiyetini artırmak ve hareketli tartım sisteminden gelen sinyalin değerini tahmin etmek için Bulanık mantık tahmini yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem geleneksel filtreleme yöntemlerine bir alternatif olarak sunulmuştur. Sonuç olarak bu yöntemin dinamik tartım hassasiyetini arttırdığı ve ölçüm verilerini iyileştirdiği belirtilmiştir. (Balanchandran, Halimic, & Enab, 2002)

Meixedo ve ark (2015) tarafından yapılan çalışmada hareketli alan için bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistem tren rayları üzerine yerleştirilmiştir ve trenlerin hareket halindeyken raya uyguladıkları ağırlık ölçülmüştür. Süreklilik arz ettiğinde rayların bu ağırlığa ne kadar süre dayanabileceği tespit edilmiştir. Raylar hasar görmeden(deformasyon-kırılma vb.) ve herhangi bir kaza oluşumuna sebep olmadan rayların bakım-onarım işleminin yapılması için alarm sistemi kurmuşlardır. Bu sayede güvenli bir ulaşım ve bakım maliyetlerini azaltmayı sağlamışlardır. (Meixedo, et al., 2015)

Yanık (2017) tarafından “Dinamik ağırlık ölçümü için filtre tasarımı” adlı tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yumurtalar hareketli bir mekanizma

üzerinde ağırlık ünitesine getirilmekte ve hareket halindeyken ağırlıkları tartılmaktadır. Ağırlık tartımları için yük Load cell kullanılmış ve dinamik tartım sistemlerinden alınan gürültülü ağırlık sinyallerini filtreleyebilmek için 12 adet yumurtadan elde edilen sinyallere; en küçük kareler ortalaması (LMS), Hamming, Blackman, Von Hann ve Rectangular filtreleri uygulanmıştır.

**Tablo 1.** Uygulama sonuçları

Yumurta Numarası	Statik Ağırlık Değeri	LMS	Blackman	Hamming	Von Hann	Rectangular
1	51,9	51,8	51,7	51,7	51,7	51,8
2	52,7	52,7	52,6	52,5	52,5	52,6
3	54,6	54,8	54,6	54,6	54,6	54,8
4	56,1	56,1	57,2	56,8	56,8	56,5
5	58,4	58,3	58,3	58,3	58,3	58,4
6	60,7	60,6	60,8	60,7	60,7	60,7
7	61,2	61,2	61,5	61,4	61,4	61,4
8	64,7	65,0	64,3	64,1	65,1	65,0
9	67,8	67,7	67,8	67,8	67,8	67,8
10	68,1	68,1	68,4	67,9	68,3	68,1
11	70,0	70,0	70,3	70,1	69,9	70,1
12	74,5	74,5	74,6	74,7	74,7	74,7

Tablo 1’de deney sonuçları gösterilmektedir ve LMS filtresinin diğer filtrelere oranla daha başarılı bir tartım gerçekleştirdiği belirtilmiştir. (Yanık, 2017)

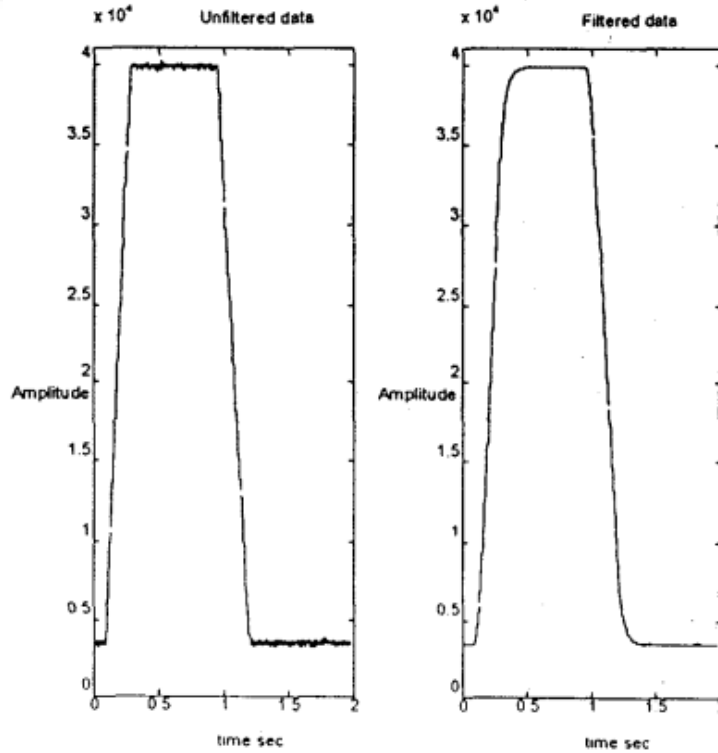
Gülbaş (2022) tarafından yayınlanan tezde dinamik tartımda ağırlığın doğruluğunu artırmak ve gürültüleri filtrelemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kademeli zamanla değişen düşük geçişli sonsuz darbe yanıtı(IIR) filtresi kullanılarak 3 farklı ürün, farklı hızlarda load cell aracılığıyla tartılmıştır. Kullanılan IIR filtresinin diğer filtreleme yöntemlerine göre daha hızlı ve yüksek doğruluk oranına sahip olduğu belirtilmiştir. (Gülbaş, 2022)

Li (2013) ve ark tarafından yayınlanan konferans bildirisinde otoyollarda araç yükünün ölçümünü daha hassas ve hızlı yapılmasını sağlamak amacıyla Geri yayılım (BP) algoritması kullanılmıştır. BP algoritması kendi kendine öğrenme, öz adaptasyon ve genelleme özelliğinden dolayı tercih edilmiştir. Verileri eğitmek için BP sinir ağı kullanılmış ve tahmin edip doğrulamak için yirmi grup eğitim örneği kullanılmıştır. BP

sinir ağı WIM sisteminin öğrenme ve ölçüm doğruluğunu artırarak hata oranının %2 olduğu belirtilmiştir. (Li, Chen, Nan, & Jia, 2013)

Literatürde Kalman filtresi kullanarak geliştirilen tahmin algoritmaları çalışmaları;

M. Halimic ve ark (1995) tarafından "Dinamik Tartım için Kalman Filtresi" adında bir makale yayınlanmıştır. Bu makalede ürünler Load Cell tabanlı dinamik tartım yöntemi kullanılarak tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartılacak ürünün ağırlığı yük hücresinden gelen sinyalin filtrelenmesiyle tahmin edilmiştir. Bu çalışmada KF algoritması önerilmiştir. Matematiksel modeller, önerilen KF yaklaşımının uygunluğunu incelemek için kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile load cell tabanlı dinamik tartım sisteminin tam modeli türetilmiş ve incelenmiştir. Modelin parametre değerleri tartım cihazına gelen ürünlerin farklı ağırlıklarda olmasından kaynaklı değişiklik gösterir ve sistemde doğrusal olmayan dalgalanmalara sebep olur. Bu sorunun çözümü için KF yaklaşımı uygulanarak düşük frekanslı gürültüler elimine edilmiştir. Filtrelemedeki iyileştirme sayesinde tartım hızı ve ölçüm doğruluğunun arttığı belirtilmiştir. (Halimic & Balachandran, 1995)



Şekil 2. 1. Kalman filtresi ile filtrelenen ölçüm verileri



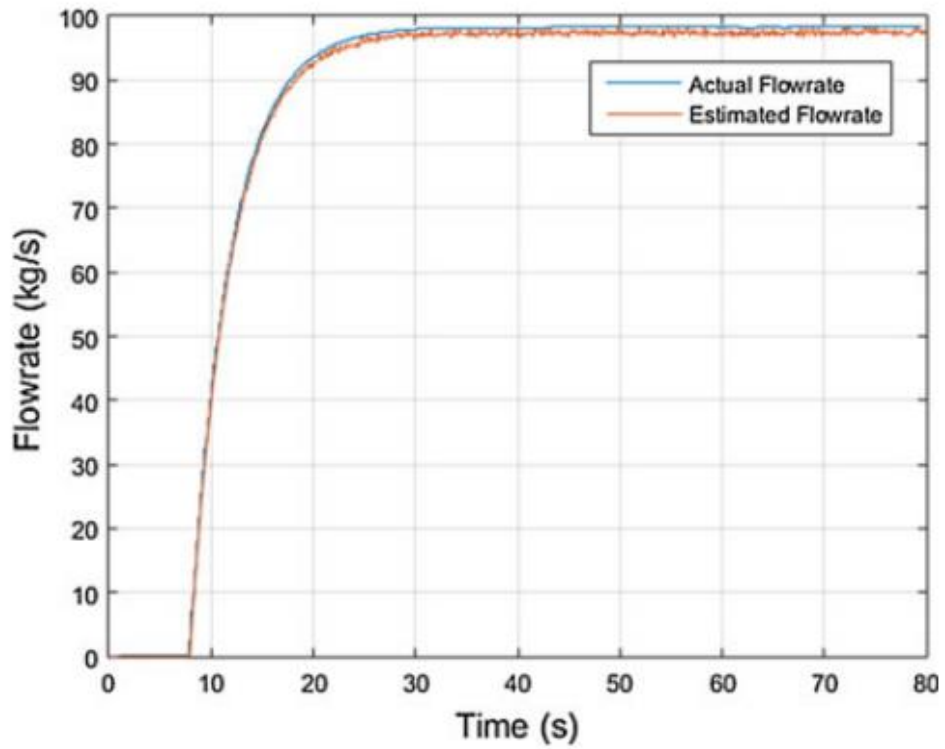
Şekil 2.1’de görüldüğü üzere filtresiz ve Kalman filtre kullanılmış ölçüm verilerini içeren grafik gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi Kalman filtresi yardımıyla Load Cell tabanlı tartım sisteminde düşük frekanslı sinyaller(gürültüler) elimine edilmiştir.

M. Niedzwiecki ve ark.(1996) tarafından “Araçların dinamik tartımına uyarlamalı filtrelemenin uygulanması” adında bir makale yayınlanmıştır. Deneyde önce kamyonların statik tartımları gerçekleştirilip sonra hızları artırılarak dinamik tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Statik tartımda ağırlık nettir ancak dinamik tartımda dalgalanmalar mevcuttur. Aracın hızı arttıkça gürültü miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu duruma paralel olarak sinyaldeki dalgalanmalarda artmıştır. Dinamik tartım sonucundaki hata oranını azaltmak amacıyla 4 farklı filtre kullanılmıştır. Bu filtreler: Maksimum değer saptama algoritması (MS), En küçük kareler yöntemi (LMS), Çıktı hatası yöntemi (OE) ve Kalman filtresi algoritması (EKF)’dir. Bu filtreler kullanılarak gürültüler azaltılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak EKF ve LMS diğerlerine oranla daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. (Niedzwiecki & Wasilewski, 1996)

Guo ve ark (2014) tarafından “Skolastik kısa vadeli trafik akış hızı tahmini ve belirsizlik ölçümü için uyarlanabilir Kalman filtresi yaklaşımı” adında bir makale yayınlanmıştır. Kısa vadeli trafik akışı yoğunluğu seviyesinin tahmin edilmesi, yani bir sonraki zaman aralığında kaç aracın geleceğini tahmin etmeyi ve tahmin aralığının oluşturulması, trafik akış tahmini, proaktif trafik kontrol ve yönetim sistemlerini geliştirmek için uyarlamalı Kalman filtresi algoritmasını uygulanmıştır. 15 dakikalık aralıklarla toplanan gerçek dünya trafik akışı verilerini kullanılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda uyarlanabilir Kalman filtresi yaklaşımının uygulanabilir seviye tahminleri ve tahmin aralıkları üretebileceği belirtilmiştir. (Guo, Huang, & Williams, 2014)

Sinchai ve ark (2014) tarafından yayınlanan makalede dikey dolumlarda ya da monte edilmeyen tartım sistemlerinde kullanılmasını amaçlayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Makinenin titreşimi, maddenin akışı gibi olumsuz faktörden kaynaklanan durumlarda dolum tartım sistemindeki ölçümün doğruluğunu artırmak için KF ile bir tahmin algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritmanın geleneksel istatistiksel yöntemle karşılaştırıldığında doğruluğu ve hızı önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. (Sinchai, Saechia, Limpiti, Koseeyaporn, & Wardkein, 2014)

Rehman ve ark (2016) tarafından “Konveyör bant tartım sisteminde hassas kütle akış tahmini için Kalman filtreleme” adlı bir makale yayınlanmıştır. Endüstriyel alanlarda takometre cihazı gürültüye duyarlı olduğu için konveyör bant hız ölçümünü olumsuz etkilemektedir. Konveyör bant hızının doğru tahmin edilmesi ve takometrenin ömrünün uzatılması için KF algoritması tasarlanmıştır. KF'nin hareketli konveyör bant sisteminde optimum filtreleme ve hassas kütle akış tahmini yaptığı sonucuna varılmıştır ve sonuçlar Şekil 2.2'de grafiklerle desteklenerek açıklanmıştır. %1'den daha da az hata ile kesin kütle akış tahmini yaptığı belirlenmiştir. (Rehman, Tahir, & Lim, 2016)



Şekil 2. 2. Gerçek Akış Hızı- Tahmini Akış Hızı Grafiği

Vural (2022) tarafından yapılan “Adaptif Kalman filtresi kullanımı ile gerçek zamanlı yaya takibi” adlı tez çalışmasında insanların hareketlerini algılayarak bir sonraki hamlesini tahmin etmek için KF'ne dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmadaki amaç, sürücüyü önceden uyararak mümkün olan en kısa süre içinde yayanın hareketini tahmin eden bir sistem ile kazaların önüne geçmektir. Bu çalışma tekli ve çoklu yayalar üzerinde gerçekleştirilmiş olup toplam 1678 yaya örneğinin 1418 tanesi doğru sınıflandırılmış ve %84.5 başarı oranı elde edilmiştir. (Vural, 2022)

Mohammed ve ark (2018) tarafından yayınlanan “İvmeye dayalı hareket halinde köprü tartımı” adlı makalede köprüde otoyol hızında geçen araçların ağırlıklarını

belirlemek için ölçüm yapılmıştır. Tasarladıkları sistemde hareket halindeki araçların ağırlıklarını tahmin etmek için KF algoritması kullanılmıştır. Bu tahmin algoritmasında sınırlı ölçülen ivme yanıtı kullanılmış ve durum vektörünü tahmin edebilmek için geliştirilmiştir. Gürültü oranı düşük ve ivmenin bilinmesi ile oluşturulmuş sonuçlarda hata oranı %2,5 ila %7 arasında iken gürültü oranı yüksek bir ortamda KF uygulanarak yapılan tahmin algoritmasının hata oranı en fazla %5 olduğu tespit edilmiştir. (Mohammed & Uddin, 2018)

İçöz (2022) tarafından kimyasal ve elektromanyetik depolamayı sağlayan Lityum-iyon piller üzerine tez hazırlanmıştır. Lityum-iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu, sağlam performans özellikleri ve yüksek galvanik potansiyeli bakımından üstünlüğünden dolayı tercih edilmiştir. Bu çalışmada şarj ve deşarj sırasında voltaj, akım ve sıcaklık gibi temel fonksiyonları kontrol etmek için Pil Yönetim Sistemi(BMS) tasarlanmıştır. 4 farklı çalışma modu tanımlanmıştır. Şarj durumu modunda doğrudan ölçülemeyen pil durumlarını tahmin edebilmesi için Dual Polarizasyon Modeli incelenmiş ve EKF modeli kullanılmıştır. Açık devre gerilimine göre ölçülen OCV değeri referans alınarak State of Charge (SoC) değeri ekrana yansıtılmıştır. Tasarlanan BMS ile kullanılan EKF tahmin yönteminin, SoC'nin hesaplanması için kullanılan diğer yöntemlere göre daha doğru tahmin ettiği ispatlanmıştır. Ayrıca modelin pil performansını ve ömrünü iyileştirmeye yardımcı olabileceği de belirtilmiştir. (İçöz, 2022)

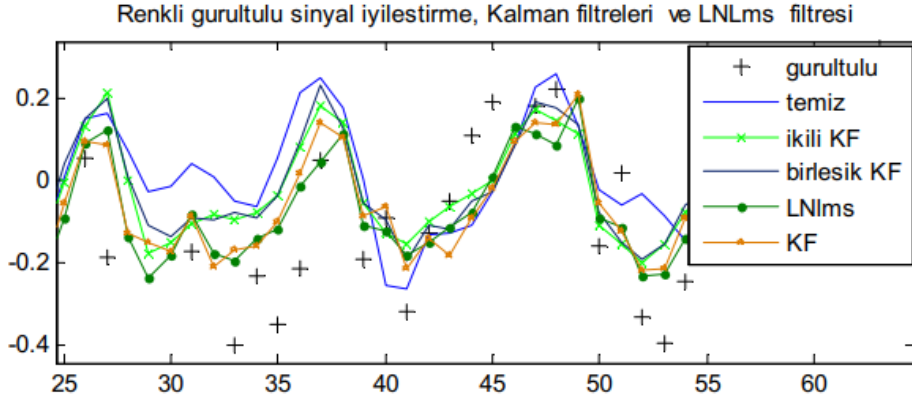
Matthies ve ark (1989) tarafından yayınlanan makalede robot görüşü için en önemli sorunlardan biri olan görüntü derinliğinin net olmaması sorunu ele alınmıştır. Gerçekleştirilen projede kameradan gelen görüntü derinliğinin çevrimiçi ve artımlı şekilde iyileştirerek tahmin etmesi için KF'ne dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile ölçülen derinlikte büyük farklılıklara sahip görüntülerde iyi bir performans gösterdiği belirtilmiştir. (Matthies & Kanade, 1989)

Pitawala (2020) tarafından "Kalman filtresi kullanılarak dinamik tartım için durum tahmini" adlı makale yayınlanmıştır. Bu makalede farklı ağırlıkta olan meyveler load cell tabanlı bir dinamik tartım mekanizması üzerinde tartılmıştır. Ağırlık sinyalinin optimal durumunu tahmin etmek için 1-B KF algoritmasından yararlanılmıştır. KF'nin deterministik türetmede ortalama hata küçültücü olarak veri izleme ve tahmin problemlerinde en uygun çözüm olduğu belirtilmiştir. (Pitawala, 2020)

Aldawoodı (2022) tarafından “Kalman filtresine dayalı güç sistemi tahmini ve yapay sinir ağıları” adında tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Güç sistemleri doğrusal olmadığından KF yaklaşımı ile durum tahmin edici tasarlanmıştır. Bu tez çalışmasında amaç durum tahmini yaparak güç sistemlerinde oluşabilecek olan hasarı önceden belirleyebilmektir. KF’ne dayalı olarak geliştirilen tahmin algoritması ile güç kesintisi yaşanmadan önlem alınmış ve acil durumlarda erken müdahale edilmesine olanak sağladığı için insan-sistem güvenliğini arttırdığı belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanılarak hata oranları hesaplanmış ve tatmin edici sonuçlar grafiklerle desteklenmiştir. (Aldawoodı, 2022)

Güney ve ark (2016) tarafından yayınlanan “Mobil robot navigasyonu için kestirim algoritmalarının karşılaştırılması” adlı makalesinde farklı manevralar yapan (sabit-lineer hız, manevralı hareket vs) bir robotun farklı kestirim algoritmalarıyla takibi yapılmıştır. Bu kestirim algoritmaları; KF, AKF, EKF ve lineer-nonlinear modellerin birleşmesi ile oluşan çoklu model Kalman filtresi (ÇMKF)’dir. Gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlara göre ÇMKF’nin diğer tahmin algoritmalarına oranla daha az hata yaptığı gözlemlenmiştir. (Güney & Bilen, 2016)

Ankışhan ve ark (2010) tarafından yayınlanan “Renkli gürültülü ses sinyali iyileştirilmesinde ikili Kalman filtre yaklaşımı” adlı makalede yayınlanmıştır. Bu çalışmada hem parametre hem durum modellerinin aynı anda iyileştirilmeme sorunu ele alınmış ve çözüm araştırılmıştır. Renkli gürültülü ses sinyallerinin iyileştirilmesi KF modeli ile gerçekleştirilmiştir. Bu model iki filtreden oluşmaktadır; biri durum iyileştirmesi yaparken diğeri parametre iyileştirmesi yapmaktadır. Deneyde iki insan sesi kullanılmış; biri gürültü olarak tanımlanmış diğeri ise asıl ses olarak tanımlanmıştır. Ses sinyali tekli, birleşik ve ikili Kalman filtreleri ile iyileştirilmiştir. LMS tabanlı sızıntılı en küçük kareler ortalaması (LNİms) ile karşılaştırılarak grafiklerle desteklenmiştir.



Şekil 2. 3. Renkli gürültü sinyal iyileştirme grafiği karşılaştırması

Şekil 2.3'teki grafikte de görüldüğü üzere İkili KF, birleşik KF ve KF' ne göre daha iyi bir performans göstermiş ve daha az ortalama kare hatası verdiği belirtilmiştir. (Ankışhan, Efe, & Özbek, 2010)

Oğuz ve ark (2013) tarafından “Genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) tabanlı Uçak Üzeri Eş Zamanlı Konumlama ve Haritalama (U-EZKH)” adlı makale yayınlanmıştır. İnsansız Hava Aracı (İHA) seyrüsefer yapabilmek için hava aracının konum bilgisinin bilinmesi gerekir ve genellikle kullanılan Küresel Uydu Yön Bulum Sistemleri (KUYS) kullanılır. Bu çalışmanın amacı KUYS' un erişim sağlayamadığı ortamlarda konumun doğru şekilde belirlenebilmesi için GKF tabanlı U-EZKH algoritması uygulanarak durum ve gözlem modelleri oluşturmaktır. Yapılan deneyler neticesinde GKF tabanlı U-EZKH algoritmasının KUYS olmadığı durumlarda kullanılabilir bir alternatif olduğu belirtilmiştir. (Oğuz & Temeltaş, 2013)

Bulut ve ark (2020) tarafından “Kalman Filtresi Kullanılarak Sistem Gürültüsünün Kaynağının Tespiti” adlı makale yayınlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, korelasyon yaklaşımı kullanılarak proses gürültüsünün mekânsal dağılımını ve gürültü kovaryans matrislerini KF ile tahmin etmektir. Çıktı ölçümlerinden gürültü kovaryans matrislerini tahmin edebilmek için klasik yenilik korelasyon yöntemi gözden geçirilmiştir. Bu yöntem; sistemin doğrusal zamanla değişmez olduğunu, sistemin ölçüm gürültüsünü, ölçülmemiş Gauss durağan sürecine tabi olduğunu ve karşılıklı ilişkide olduğunu varsayar. Yapılan deneyler neticesinde yöntemin proses gürültüsünün kaynak lokalizasyonu ve gürültü kovaryans matrisinin tahmininde alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. (Bulut & Ünal, 2020)

Kutlu ve ark (2012) tarafından ‘‘Spektral ıkarma tabanlı Kalman filtresi ile ses sinyallerinin iyileştirilmesi’’ adlı makalede KF ile spektral çıkarma birleştirilerek ses iyileştirme yöntemi tasarlanmıştır. Birleştirilmiş filtreleme yöntemi Wiener filtresine ve spektral çıkarma yöntemlerine oranla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlarda birleştirilen KF’nin diğer filtrelemeye oranla daha iyi bir sinyal gürültü oranında (SNR) artış sağladığı kanıtlanmıştır. (Kutlu & Arserim, 2012)



### 3.MATERYAL - YÖNTEM

#### 3.1.Tartım Cihazları

Terazi veya baskül olarak da bilinen ağırlık ölçme cihazları bir maddenin üzerindeki yerçekimi etkisinden yararlanarak o maddenin ağırlığının belirlenmesi temeline dayanır. Geçmişten bugüne hayatımızın her alanında sıklıkla karşımıza çıkan tartım sistemlerini teknolojiyle paralel olarak değişim ve gelişim göstermiştir. Bu sistemler kullanım alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Tartım cihazları; eşit kollu terazi, dinamometre ve load cell olarak üç başlıkta incelenir.

##### 3.1.1. Eşit kollu terazi

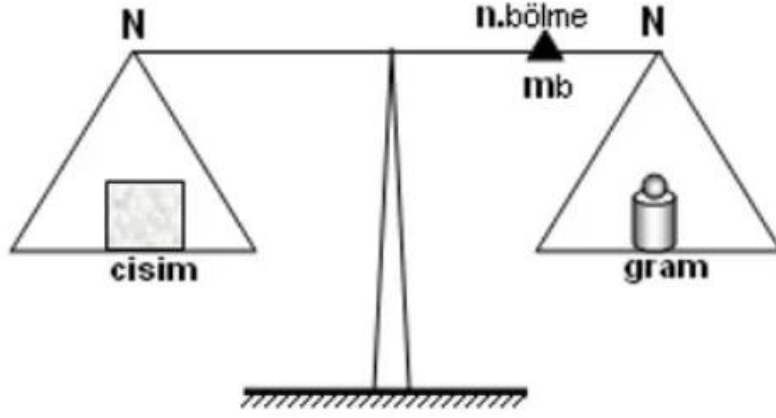
Tunç Çağı'ndan beri antik çağlarda ve günümüzde ticaret hayatımızda kullandığımız terazilerin ilk tipi eşit kollu terazidir. Bir cismin ağırlığının belirlenmesinde kullanılan ve eski bir yöntem olan eşit kollu teraziler denge prensibine göre çalışır. (G., 2011) Şekil 3.1'de de gösterildiği gibi eşit kollu terazinin sağ ve sol olmak üzere iki adet kefi bulunmaktadı.



Şekil 3. 1. Eşit kollu terazi örneği

Eşit kollu terazilerde hassas ölçümlerin yapılabilmesi için hareketli özelliğe sahip binici kullanılmaktadır. Bu terazilerin duyarlılığı ise binicinin bir bölme yer

değiştirmesine karşılık gelen ağırlığıdır. Binicinin hareket etmesiyle duyarlılık değiştirilir.



şekil 3. 2. Eşit kolları terazi taslağı

N: Koldaki toplam bölme sayısı

n: Binicinin bulunduğu bölme

mb: Binicinin kütlesi

Bu terazilerde tartım yapılırken ağırlığı belli olan metal veya taştan yapılmış cisimler kullanılmıştır. Eski dönemlerde kullanılan ağırlığı belli olan kütlelerin resmi şekil 3.3'te verilmiştir. Zamanla bu ağır maddeler kullanımını daha pratik ve taşınabilir cihazlara dönüşmüştür.



şekil 3. 3. Antik çağda kullanıldığı tespit edilen tartı ağırlıkları



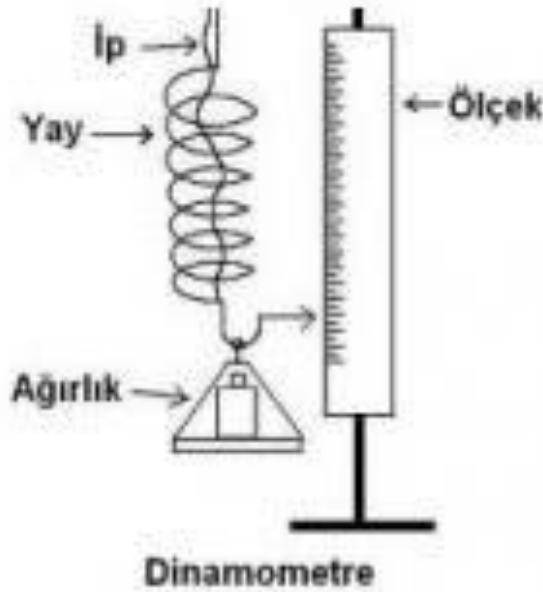
Ağırlığından emin olunan kütleler terazinin bir kefesine, ölçümü yapılacak olan cisim ise diğer kefesine konulur. Terazinin kolları yatay şekilde dengeye ulaşana kadar ağırlıklar eklenir ve denge konumuna ulaşması sağlanır. Böylece ağırlığı bilinmeyen cismin tartım işlemi gerçekleştirilmiş olur.

$$\text{Kuvvet} \times \text{Kuvvet kolu} = \text{Yük} \times \text{Yük kolu} \quad (3.1)$$

Eşit kollu terazinin ölçümünde kullanılan denklem 3.1’de gösterilmiştir.

### 3.1.2.Dinamometre

Herhangi bir cisme etki eden kuvvetin şiddetini ve cismin ağırlığını ölçmek için kullanılan alete dinamometre denir. Bir aracın motor gücünü ölçmede kullanılabilir. Şekil 3.4’te bir dinamometre örneği verilmiştir.

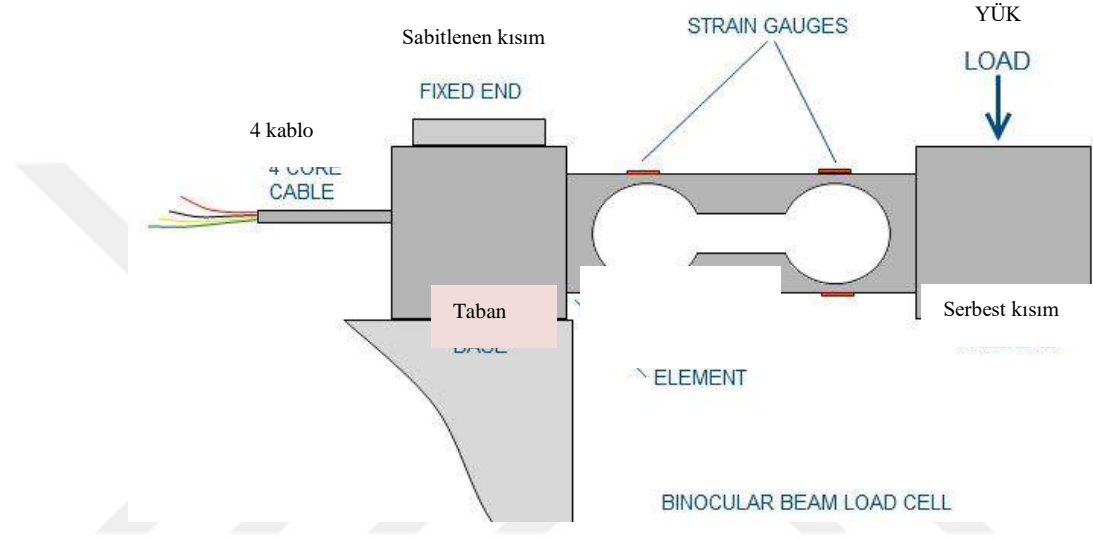


Şekil 3. 4. Dinamometre örneği

Yayların esneklik özelliğinden faydalanılarak yapılmış olan dinamometreler laboratuvarlarda ve deneylerde kuvvet ölçmek için sıklıkla kullanılan bir ölçü aletidir. Yaya uygulanan kuvvet sonucunda yay gerilmesi ile birlikte kuvvet sonucuna ulaşılır. Yay ne kadar gerginse cismin uyguladığı kuvvet o kadar büyüktür. Uygulanan kuvvet değeri dinamometre üzerindeki ölçeklendirilmiş göstergeden okunur. El kantarı dinamometreye örnek olarak verilebilir. Dinamometreler ihtiyaca uygun olarak tasarlanmış olup en sık kullanılan dinamometre çeşitleri; akselerasyon dinamometresi, kondansatörlü dinamometre, yol dinamometresi, motor dinamometresi ve yük dinamometresidir. Birimi Newton(N)’dur.(1N= 1/9,81 kg) (Anonim, Hürriyet, 2022)

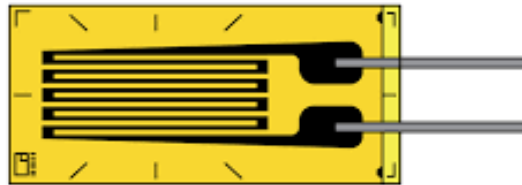
### 3.1.3. Yük hücresi (Load Cell)

Uygulanan kuvveti ölçülebilir elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılan bir dönüştürücüdür. Bu sinyal, yük hücresi ve devrenin türüne bağlı olarak akım değişimi, frekans değişimi ve voltaj değişimi olabilir. Yük hücresine bir kuvvet uygulandığında yüke göre mv cinsinden çıkış vererek hassas ölçümler gerçekleştirebilir. Gerinim ölçer yük hücresi üzerinde yük varken voltaj düzensizlikleri gönderen gerinim ölçerler içerir ve bu voltaj düzensizliklerinin derecesi ağırlık olarak sinyalde gözlemlenebilir.



Şekil 3. 5. Load Cell (Yük hücresi)

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi bir load cell yapısı yay elemanı olarak adlandırılan metal şase ve strain gauge'lerle kurulmuş bir Wheatstone köprüsünden oluşur. Şekil 3.6'da gösterilen strain gauge (gerinim ölçer), harici bir kuvvetin neden olduğu uzunluktaki değişikliği ölçebilir



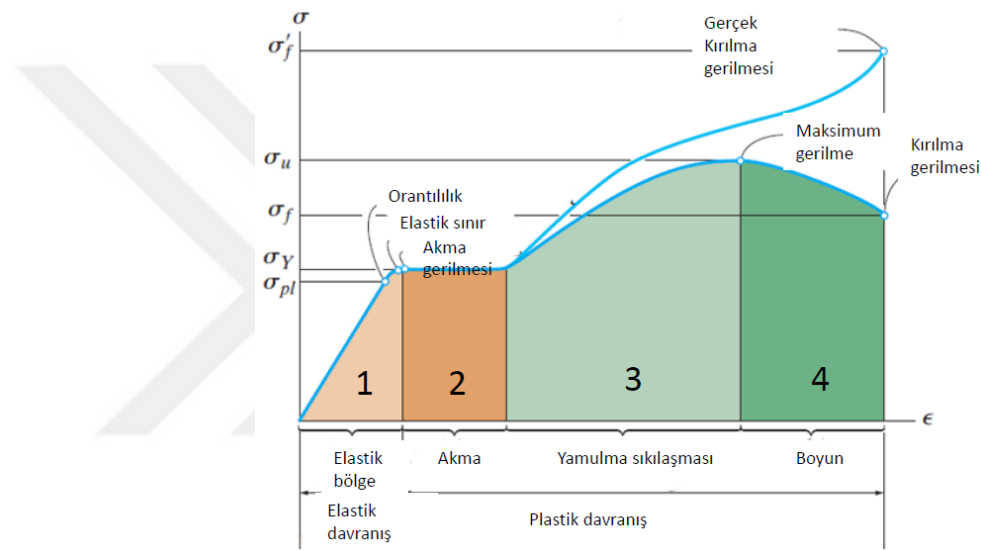
Şekil 3. 6. Strain gauge

$$R = \rho \left( \frac{L}{A} \right) \quad (3.2)$$

. Gerinim olarak adlandırılan özellik, bir nesnenin orijinal gerilimsiz uzunluğuna kıyasla uzunluktaki değişim oranı olarak kabul edilir. Bir gerinim ölçer sensörü

gerilirken veya sıkıştırılırken dirençte değişiklik meydana gelir. Bir iletken gerildiğinde direnci artar. Sıkıştırıldığında direnci azalır. Mekanik olarak bir tel ısıtılarak veya kuvvet uygulanarak uzar. Uzama miktarının belirgin olması için tel boyunun uzun olması hedeflenir. Yatayda uygulanan kuvvet sensör olarak kullanılan telin uzamasını sağlarken dikeyde uygulanan kuvvet yalnızca teller arasındaki açının artmasına neden olur ve fiziksel uzamada belirgin bir fark oluşturmaz.

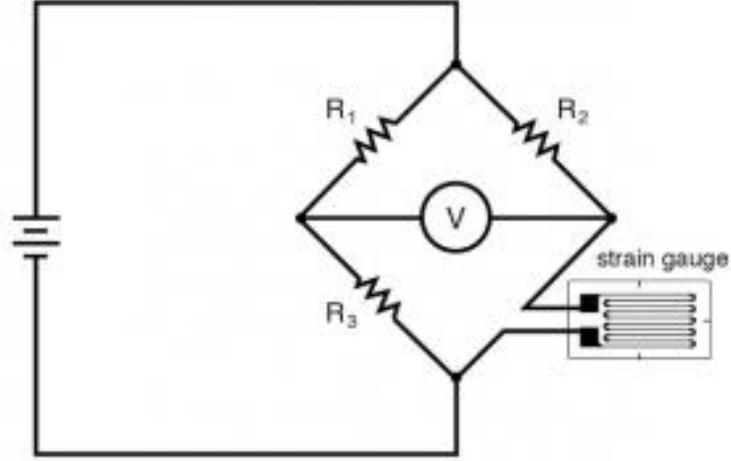
Yataydaki uzama miktarını elastikiyet bölgesi belirler. Bir metale ilişkin uzama elastikiyet bölgesinde ise malzeme deforme olmaz. Şekil 3.7 metal bir malzemeye ilişkin kuvvet davranışını göstermektedir.



Şekil 3. 7. Malzelere ilişkin gerilim deformasyon ilişkisi

Strain gauge olarak kullanılan malzeme 1. Bölge de çalışır. Bu bölgede gerilmeye maruz kalan metal, gerilme bittiğinde eski haline gelir ve bu bölge lineerdir. Gerilme ikinci bölgeye veya daha yukarı çıkarsa sensör onarılamaz şekilde bozulmuş olur. Malzemedeki uzama bize saf direnç olarak yansır. Formül 3.2'deki  $l$  uzunluğu  $\Delta l$  kadar uzarsa  $R$  de  $\Delta R$  kadar artar ve  $R_T = R + \Delta R$  olur.

Kısaca, dirençteki bir değişiklik vasıtasıyla gerilimi ölçer. Uzunluk ve direnç arasındaki değişiklik 3.2'deki denklemde verilmiştir. Dirençteki bu değişiklik bir Wheatstone köprüsü kullanılarak ölçülebilir. Şekil 3.8'de Wheatstone köprüsü örneği verilmiştir.



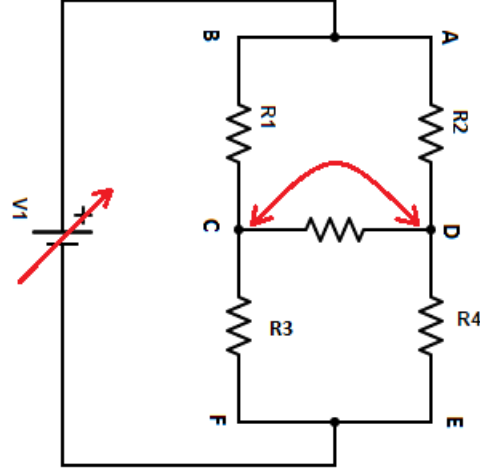
Şekil 3. 8. Wheatstone köprüsü

$$R_X = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (3.3)$$

3.3'te belirtilen denklem bilinmeyen ve/veya değişen ağırlığın bulunması için gereken formülü içermektedir. Wheatstone köprüsü ile yapılan ölçümlerde hata oranı ortalama %0,1 olarak belirtilmiştir. (Admin, Wheatstone Köprüsü)

Yay elemanına bir kuvvet uygulandığında Wheatstone köprüsü üzerinden bir elektrik sinyali oluşur. Elde edilen bu sinyal kuvvetlendirilir ve mikroişlemci tabanlı gösterge tarafından işlenip kuvvet ya da ağırlık bilgisi olarak sonuç verir. Yük hücreleri kullanım alanlarının ihtiyacına göre imal edilirler bu yüzden çeşitli yük hücrelerine rastlanabilir. Günümüzden 50-100 gr dan 1000-2000 tona kadar geniş bir kapasite aralığında load cell imal edilmektedir. (Admin, ESİT) Kullanım yerleri; elektronik terazi, kantarlar, bantlı kontrol kantarları, akış kantarları ve torbalama cihazlarıdır.

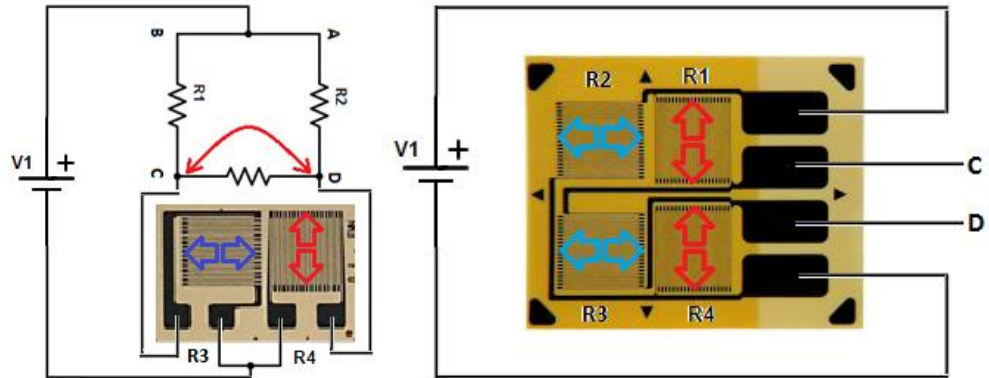
Wheatstone köprüsü yapısı sensör ölçümlerinde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Yapısı gereği doğasından kaynaklanan avantajlar sunar. Şekil 3.9'da Wheatstone köprüsünün dengede olduğunu kabul edildiğinde Vc ve Vd gerilimleri birbirlerine eşittir.



Şekil 3. 9. Wheatstone köprüsünün genel yapısı

Besleme kaynağı olan  $V_1$  geriliminin dalgalandığı ve  $\Delta V$  kadar değiştiği varsayıldığında  $V_c$  ve  $V_d$  noktalarındaki denge yine aynıdır. Sistem çalışmasını rahatlıkla sürdürebilir. Sistem dengede olmasa bile gerilim dalgalanmalarından etkilenmez. Wheatstone köprüsünün en büyük avantajlarından biri budur.

Sistemi oluşturan parçalardan  $R_1...R_4$  değerleri sıcaklıktan etkilenip değerleri  $\Delta R$  kadar değiştiğinde sistem yine dengede kalır. Dengede değilse de sağlıklı ölçümünü sürdürebilir. Şekil 3.8 de çalışan bir sistemde bir tane strain gauge varken 3 tane direnç vardır. Farklı yapıları olduğuna göre sıcaklıktan farklı etkileneceklerinden ölçüm hatası ortaya çıkacaktır. Bunun önüne geçebilmek için tüm sistemi yada yarısını aynı türden yaparak sıcaklık kompanzasyonu sağlanabilir. Şekil 3.10 iki tür sensör kombinasyonunu göstermektedir.



Şekil 3. 10. (a) Yarım köprü sıcaklık kompanzasyonu (b) Arttırılmış çıkış gerilimi

Şekil 3.10 (a) sıcaklık kompanzasyonunu göstermektedir. Strain gaugelerden biri gerilme yönünde iken diğeri sisteme 90 derece dik olarak konumlandırılır. Sıcaklık

değişiminde hem uzayan sensör hemde uzamayan sensör  $\Delta R$  kadar değiştiğinden köprü dengede kalır veya bir fark gerilimi üretiyorsa bu gerilim, sistemi etkilemez.

Burada Şekil 3.10 (b) modeli, (a) modelinin daha geliştirilmiş bir versiyonudur. Sıcaklık kompanzasyonu Şekil 3.10(a)'daki gibi yapılabilir. Şekil 3.10(b) ise köprü yapısının tamamının aynı sensörlerden yapılması ile elde edilir. Burada sinyal üreten aktif strain gaugeler R2 ve R3 olup R1 ve R4 sisteme dik olarak konumlandırıldıklarından bir değişim oluşturmazlar. Ancak değişime neden olan strain gauge lardan biri  $\Delta V$  kadar VC gerilimini azaltırken diğeri ise VD gerilimin  $\Delta V$  kadar artırır. Böylece toplam elde edilen değişim  $\Delta V$  değil  $2\Delta V$  olur. Değişimin az olduğu yerlerde sistemin tamamı Şekil 3.10(b)'deki gibi dizayn edildiğinde daha yüksek bir çözünürlük elde edilir.

### 3.2. Tartım Yöntemleri

Tartım cihazları ağırlığın uygulanış biçimine göre statik (durağan) tartım ve dinamik (hareketli) tartım olarak ikiye ayrılır.

#### 3.2.1. Statik(Durağan) tartım

Geçmişte kullanılmaya başlayan en eski ürünler statik tartı ürünleri kategorisinde yer almaktadır. Tartılacak olan madde durağan halde iken tartım cihazı üzerine konulup net ölçüm amaçlanarak tasarlanmıştır. (Admin, Geçmişten Bugüne Tartı Kullanımı, 2020) Şekil 3.11'de statik tartıma örnek verilmiştir. Günümüzde hala tercih edilen bir tartım yöntemidir. Ağırlığın kesin bir şekilde ölçülmesi ve hata oranının çok az olması en önemli avantaj iken hem süreden kaynaklı hem de iş yükünün olması gibi dezavantajları da vardır.

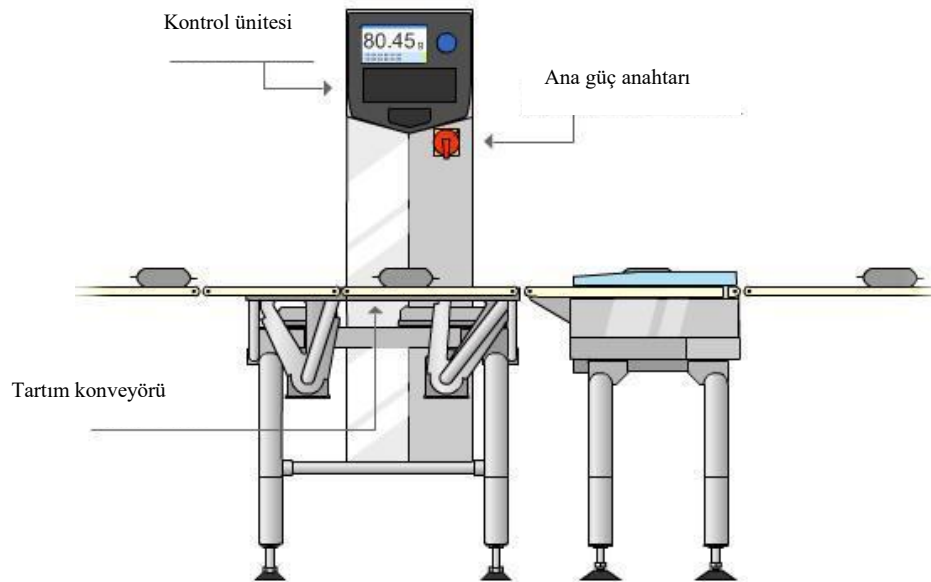


Şekil 3. 11. Statik tartım cihazı

### 3.2.2. Dinamik (Hareketli) tartım

Dinamik tartım işlemi hareket halindeki bir cismin tartılması ya da ortamdan kaynaklı tartıma olumsuz etki eden koşullar altında tartımın yapılması işlemine denir. Hizmet, sanayi, ticaret, ulaşım gibi alanlarda ya da seri üretim yapan endüstriyel olarak seri üretim yapan kurum ve kuruluşlarda süreden tasarruf etmeyi sağladığı için daha çok bu tartım yöntemi tercih edilmiştir. Ölçüm yaparken zamandan tasarruf etmesi ve iş yükünü önemli ölçüde azaltıyor olması en önemli avantajlarındandır. Dinamik tartım cihazları hızlı ve ekonomik ölçüm yaparken birçok sorunu da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlardan biri, tartım hareketli olduğunda ya da tartılacak cismin ortamı ölçmeye elverişsiz olduğunda düşük frekanslı titreşimler orijinal ağırlık sinyali üzerine eklenir ve sinyalde bozulmalara yol açar. Bu sorunu giderebilmek için farklı filtre uygulamaları kullanılmaktadır.

Dinamik tartım da kullanılan iki farklı yöntem mevcuttur. Biri Check Weigher diğeri ise Weigh in Motion'dır. Checkweigher yöntemi bir cismin hareketli bant üzerinden geçerken tartılmasını sağlayan sistemdir. Şekil 3.12 Checkweigher sistemine örnek olarak verilmiştir. Bu sistemde hareketli konveyör bant üzerinden gelen cisimlerin tartım işlemi yapılmakta ve bir sonraki cisim ile işlemler devam etmektedir.



Şekil 3. 12. Checkweigher sistem örneği

Bir Checkweigher sistemi farklı ağırlıktaki cisimleri sınıflandırabilir Kullanım yerlerine göre fonksiyon farklılığı gösterir ve ihtiyaca uygun olarak tasarlanır. Bu sistem birçok alanda kullanılmaya devam etmektedir.



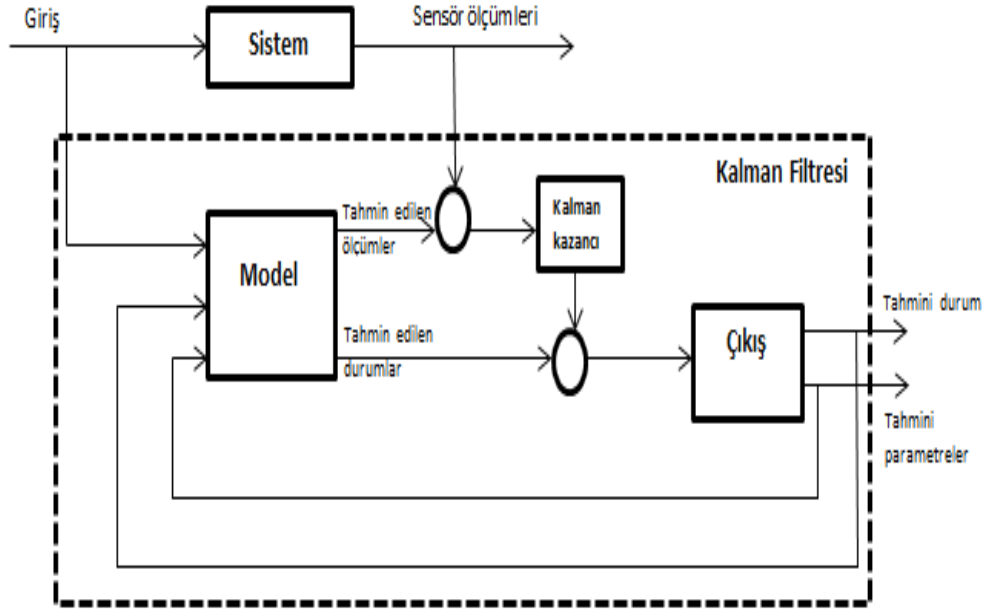
Şekil 3. 13. WIM yöntemi

Weigh in Motion(WIM) yöntemi ise daha çok ulaşım sistemlerinde kullanılmakta olup araç hareket halindeyken aracın ağırlığını ölçmek için tasarlanmıştır. Şekil 3.13'te WIM yöntemine ait bir örnek verilmiştir. Ağırlığı ölçmek için kullanılan tartım cihazı, ölçümü yapılacak olan yola ve ölçülecek olan araç tipine göre farklılık göstermektedir. Bu yöntem ile araçlarda sınıflandırma yapılmakta ve aracın taşınması gereken maksimum yükü kolaylıkla tespit edilmektedir. Ölçülen ağırlık kontrol panellerinde kayıt altına alınmaktadır. Ölçülecek olan aracın ağırlığı hareket halindeyken tartıldığı için hem süreden tasarruf edilmekte hem de trafik akış yoğunluğunu azaltmak için kullanılmaktadır.

### 3.3. Gerçekleştirilen Tartım Sistemi

Bu tez çalışmasında ağırlıkları farklı olan cisimlerin bir sonraki ağırlığını tahmin edebilmek için Kalman filtresi tabanlı bir tahmin algoritması geliştirilmiştir. Tahmin algoritmasının doğruluğunu artırmak için FIR filtresi kullanılmıştır. Bu sayede gürültüden kaynaklı dalgalanmaların önüne geçilmiş ve %2.21 oranında hata oranı azaltılmıştır. Ağırlık ölçümü için load cell kullanılmıştır. Load cell üzerinden aldığımız ağırlık verileri KF algoritmasına tabii tutulmuştur ve önceki ağırlıktan durum güncelleme yapıp bir sonraki ağırlık tahmin edilmiştir. Ağırlık sinyallerini HX711 yükseltici kullanılarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen KF tahmin algoritması Şekil 3.14'te verilmiştir.





Şekil 3. 14. KF tahmin algoritması

KF tahmin algoritmasının çalışma sistemi incelendiğinde;

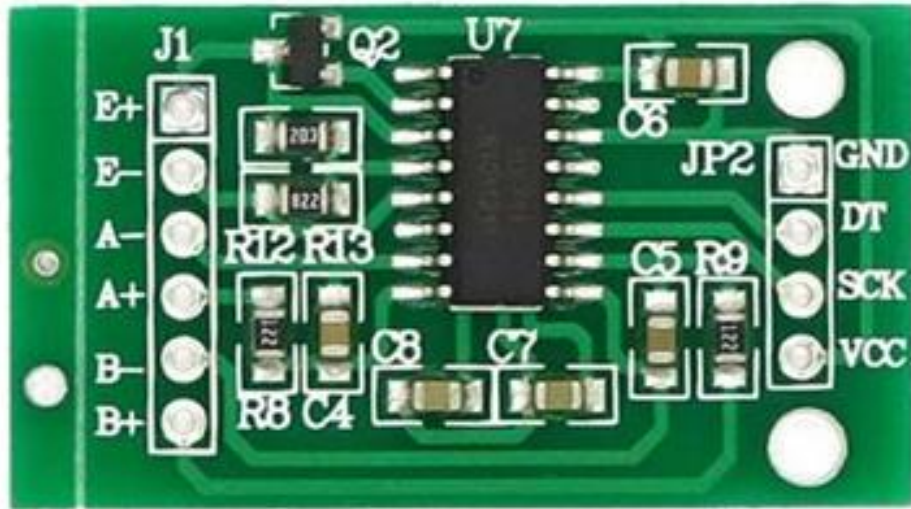
- Sistem olarak tanımlanan kısım, HX711 yükselteç ve load cell ile kurduğumuz ağırlık ölçüm sistemidir. Ağırlıkları arduino üzerinden alarak sensör ölçümleri alınmıştır ve MATLAB’da işlenmiştir.
- Geliştirilen modelde ölçülen değer ile önceki tahmin parametrelerini giriş olarak kullanır. Her bir adımda yeniden Kalman kazancı ile ölçeklendirilip yeni tahmin sonucu üretmesini sağlar.
- KF olarak belirtilen kısımda tahmin algoritması gerçekleştirilen kısımdır. KF döngü olarak devamlı çalışır. Belirlenen bir ağırlığı ölçmede kullanılırken her ölçümde yeniden kalman kazancını hesaplayarak hatayı sifira kadar düşürerek başarılı bir ölçüm gerçekleştirir.

Ağırlık sinyalinin üzerine eklenen beyaz gürültüyü azaltmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için KF, KF-FIR algoritması ve FIR-KF algoritması kullanılmıştır.

### 3.3.1.HX711 amplifier(yükselteç)

Ağırlık sensörü olarak bilinen HX711 yükselteç, tartım terazileri ve endüstriyel kontrol uygulamaları için doğrudan bir köprü sensörüyle arayüz oluşturmak üzere tasarlanmış oldukça hassas bir karttır. Ağırlık ölçümü, süreç kontrol ve ağırlık algılama gibi projelerde kullanılır. 24 bit yüksek çözünürlüklü HX711 ADC (analogdan dijital)

çevirici) entegresini kullanmaktadır. Giriş çoklayıcı, düşük gürültülü programlanabilir kazanç amplifikatörüne (PGA) Kanal A veya B diferansiyel girişini seçer. Kanal A, AVDD analog güç kaynağı pinine 5V'luk bir besleme bağlandığında, sırasıyla  $\pm 20\text{mV}$  veya  $\pm 40\text{mV}$ 'lik tam ölçekli diferansiyel giriş voltajına karşılık gelen 128 veya 64'lük bir kazançla programlanabilir. Kanal B'nin sabit kazancı 32'dir. 128 veya 64'lük programlanabilir kazanç (gain) ayarı bulunur. Güç kaynağı regülatörü, ADC ve sensör için analog güç sağlamak üzere harici bir besleme regülatörüne olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Saat girişi esnekler. On-chip power-on-reset devresi, dijital arayüz başlatmayı kolaylaştırır. HX711 yükselteciye giden tüm kontroller pinler aracılığıyla yapıldığından dâhili kayıtlar için herhangi bir programlamaya gerek yoktur. (Admin, HX711) Gerçekleştirilen deneylerde kullanılan HX711 yükselteci Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

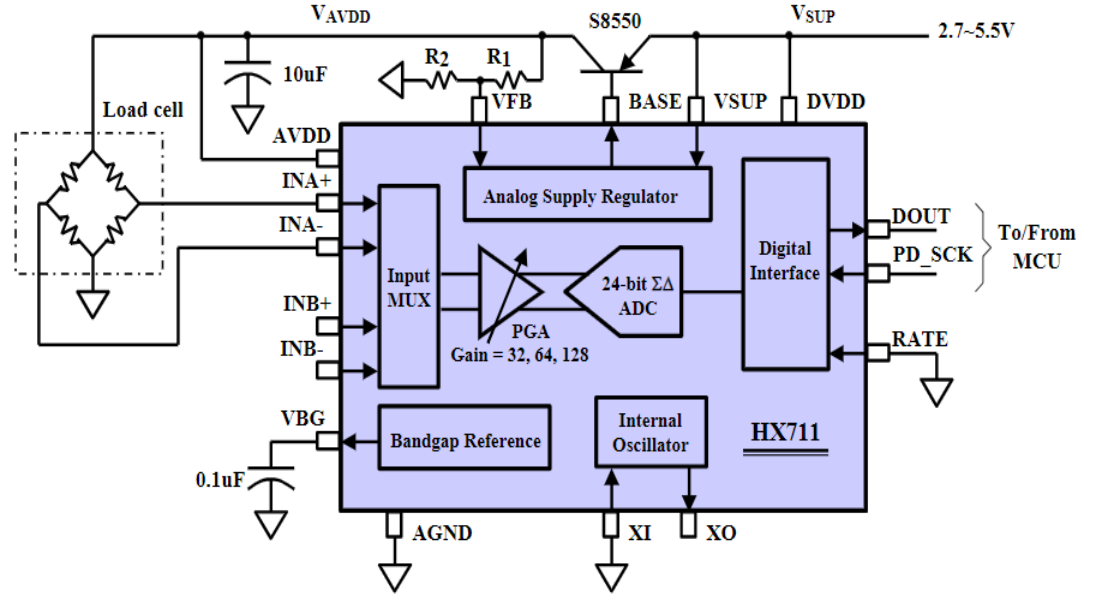


Şekil 3. 15. HX711 yükselteci

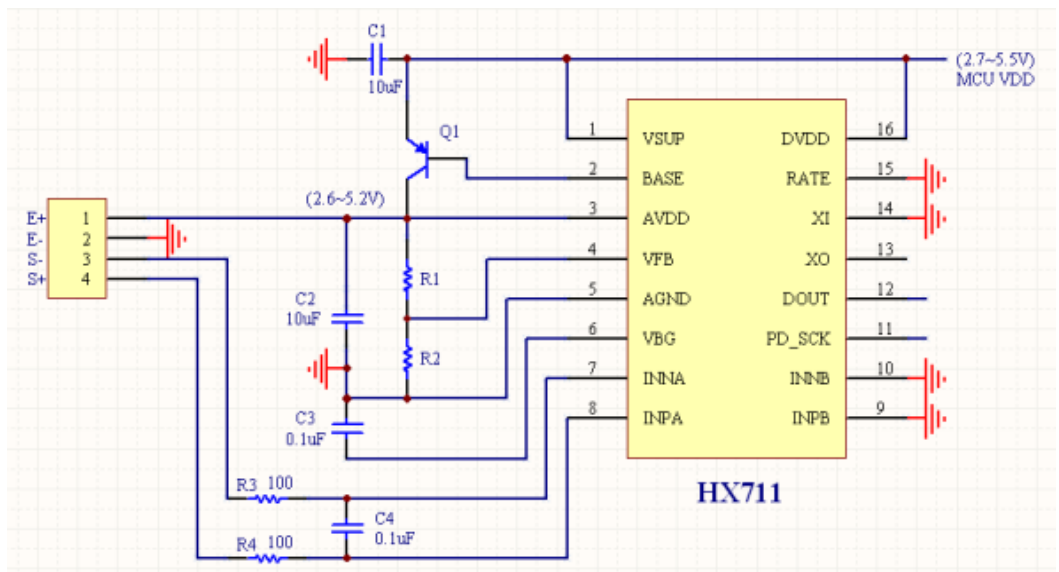
Teknik özellikleri;

- ✓ Seçilebilir 32, 64 ve 128 kazançlı cip üzerinde aktif düşük gürültülü PGA
- ✓ Load cell ve ADC analog güç kaynağı için cip üzerinde güç kaynağı regülatörü
- ✓ İsteğe bağlı harici ile harici bileşen gerektirmeyen cip üzerinde osilatör kristal
- ✓ Sıfırlamada cip üzerinde güç
- ✓ Basit dijital kontrol ve seri arabirim: pimle çalıştırılan kontroller, programlama gerektirmez
- ✓ Seçilebilir 10SPS veya 80SPS çıkış veri hızı

- ✓ Eşzamanlı 50 ve 60Hz besleme reddi
- ✓ Çip üzerinde analog güç dâhil akım tüketimi besleme regülatörü: normal çalışma < 1,5mA, güç kapatma < 1uA
- ✓ Çalışma besleme voltajı aralığı: 2,6 ~ 5,5V
- ✓ Çalışma sıcaklığı aralığı: -40 ~ +85°C
- ✓ 16 pimli SOP-16 paketi

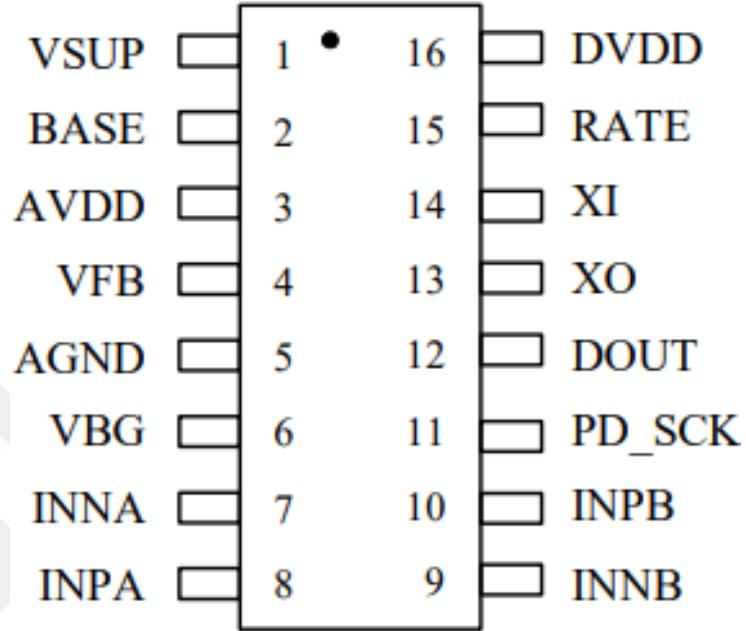


Şekil 3. 16. HX711 yükseleç kart tasarımı



Şekil 3. 17. Uygulanan devrenin şeması

Load cell tarafından alınan verinin pinler aracılığıyla yükseltece girişi ve yükseltecin içinde olan bileşenler Şekil 3.16’da verilmiştir. 3.17’de ise uygulanan devrenin şeması mevcuttur. Yükselteç içinde bulunan entegrenin pinleri 3.18’de verilmiş ve bu pinlerin işlevleri Tablo 1’de anlatılmıştır.



Şekil 3. 18. HX711 yükselteç entegresi

Tablo 2. HX711 yükselteç pinleri ve fonksiyonları

Pin Numarası	İsim	İşlev	Tanım
1	VSUB	Power	Regülatör beslemesi: 2.7V ~ 5.5V
2	BASE	Analog Çıkış	Regülatör kontrol çıkışı
3	AVDD	Power	Analog beslemesi: 2.6V ~ 5.5V
4	VFB	Analog Giriş	Regülatör kontrol girişi
5	AGND	Toprak	Analog Toprak
6	VBG	Analog Çıkış	Referans baypas çıkışı
7	INA-	Analog Giriş	Kanal A negatif girişi
8	INA+	Analog Giriş	Kanal A pozitif girişi
9	INB-	Analog Giriş	Kanal B negatif girişi
10	INB+	Analog Giriş	Kanal B pozitif girişi
11	PD_SCK	Dijital Giriş	Güç kapatma kontrolü ve seri clock girişi
12	DOUT	Dijital Çıkış	Seri data çıkışı
13	XO	Dijital I/O	Kristal I/O
14	XI	Dijital Giriş	Kristal I/O – harici clock girişi
15	RATE	Dijital Giriş	Çıkış veri hızı kontrolü: 0:10Hz – 1:80Hz
16	DVDD	Power	Dijital beslemesi: 2.6V ~ 5.5V

Analog Giriş: Kanal A ve Kanal B olmak üzere 2 tane analog giriş mevcuttur. Kanal A girişi, bir köprü sensörünün diferansiyel çıkışıyla doğrudan arayüz oluşturmak üzere tasarlanmıştır. 128 veya 64'lük kazançla programlanabilir. Sensörden gelen küçük çıkış sinyalini karşılamak için büyük kazançlara ihtiyacı vardır. AVDD pinine 5V besleme sağlandığında 128'lik kazançta  $\pm 20\text{mV}$  aralığında, 64'lük kazançta ise  $\pm 40\text{mV}$ 'luk tam ölçekli diferansiyel giriş voltajına karşılık gelir. Kanal B girişinin sabit 32 kazancı vardır. AVDD pinine 5V besleme sağlandığında tam ölçekli giriş voltajı  $\pm 80\text{mV}$  aralığındadır.

Güç kaynağı seçenekleri: Dijital giriş güç kaynağı olan DVDD, MCU güç kaynağı ile aynı olmalıdır. Dâhili analog regülatörü kullanılırken, regülatörün düşme gerilimi kullanılan transistöre bağlıdır.

$$V_{AVDD} = V_{BG} * \left( \frac{R1+R2}{R2} \right) \quad (3.4)$$

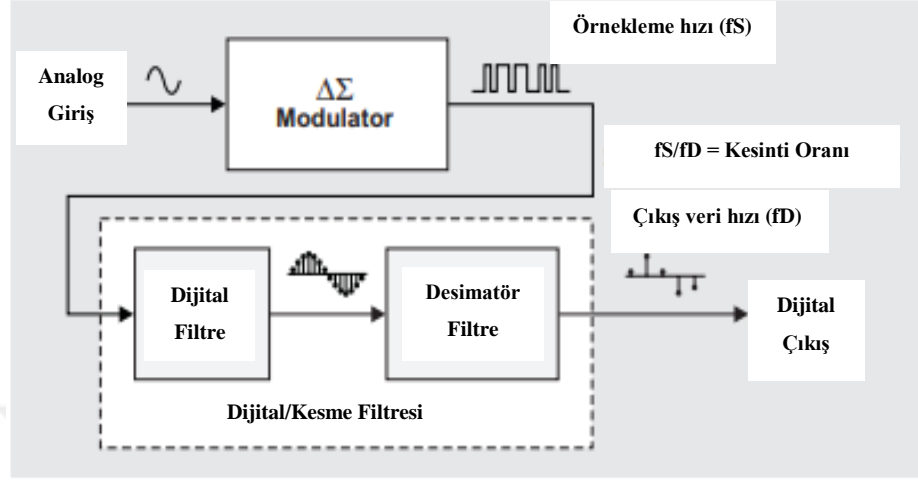
Çıkış voltaj denklemi 3.4'te verilmiştir. Bu voltaj, VSUP voltajının minimum 100mV altında olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Seri Arayüz: PD\_SCK ve DOUT pinleri veri alma, giriş seçimi, güç kapatma kontrolleri ve kazanç seçimi için kullanılır. Seri clock girişi PD\_SCK düşük olmalıdır. DOUT düşük seviyeye geldiğinde verilerin alınmaya hazır olduğunu gösterir. Çıkış verileri alınmaya hazır olmadığında dijital çıkış pini olan DOUT yüksektir. PD\_SCK pininde 25~27 pozitif clock darbesi uygulanarak veriler DOUT çıkış pinine kaydırılır. Her PD\_SCK darbesi, önce MSB bitinden başlayarak 24 bitin tamamı kaydırılana kadar bir bit dışarı kaydırır. PD\_SCK girişindeki 25. Darbe DOUT pinini tekrar yükseğe çekecektir. Giriş ve kazanç seçimi, giriş PD\_SCK darbelerinin sayısı ile kontrol edilir. PD\_SCK clock darbeleri bir dönüşüm periyodu içinde 25 ila 27 arasında olmak zorundadır. Aksi takdirde seri iletişim hatasına neden olur.

### 3.3.1.1. Delta- sigma ADC

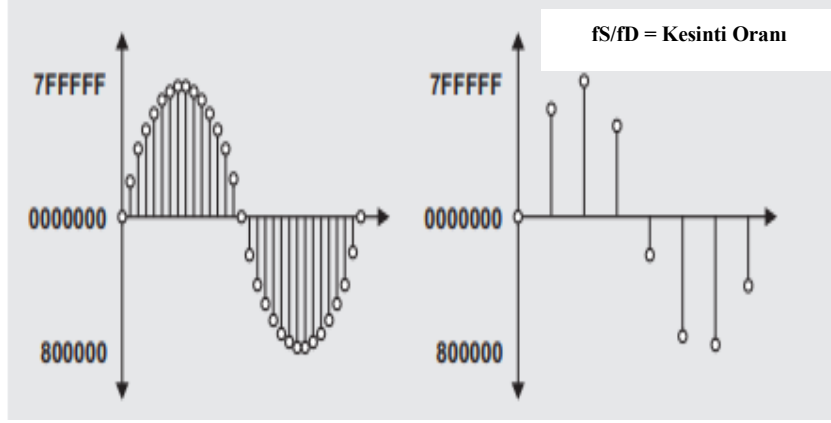
Delta-sigma (DS) analogdan dijital dönüşürücüler(ADC'ler) temel olarak yüksek çözünürlüklü bir veri akış çıkışı üreten bir dijital/kesme filtresi tarafından takip edilen bir yüksek hızda örnekleme modülatöründen oluştuğu Şekil 3.19'da gösterilmiştir. DS dönüştürücü, 1 bitlik bir örnekleme sistemidir. Örnekleme hızı, çıkış bağlantı noktalarındaki dijital sonuçlardan yüzlerce kat daha hızlıdır. Her bir numune zaman içinde toplanır ve dijital/kesme filtresi aracılığıyla diğer giriş sinyali

numuneleriyle ortalaması alınır. Ortalama alma filtresi, DS dönüştürücülerde kullanılan en yaygın filtre tekniğidir. Hemen hemen tüm DS ADC'ler, adını frekans yanıtlarından alan, sinc filtreleri adı verilen bir ortalama alma filtreleri sınıfı içerir.



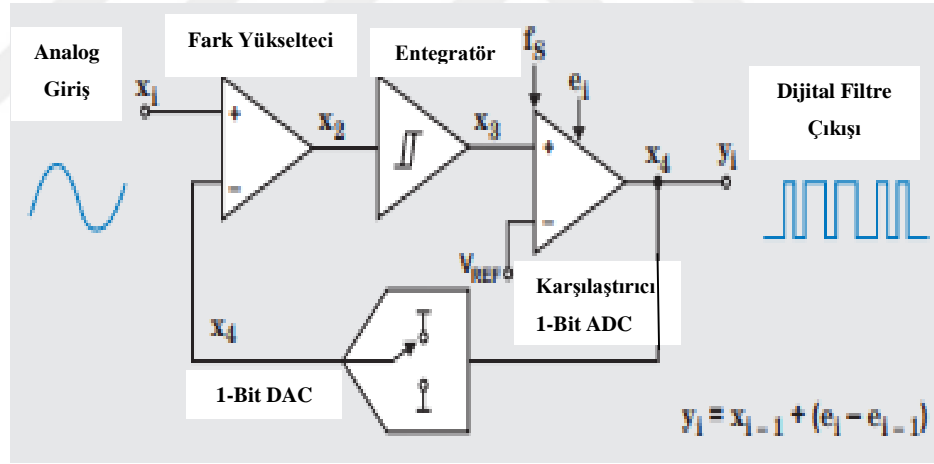
Şekil 3. 19. DS-ADC Blok diyagramı

DS modülatörü, giriş sinyalini çok yüksek bir oranda 1 bitlik bir akışa kabaca örnekler. Modülatör, analog giriş sinyalini yüksek hızlı, tek bitlik, modüle edilmiş bir darbe dalgasına dönüştürür. Dijital/kesme filtresi daha sonra bu örneklenmiş verileri alır ve yüksek çözünürlüklü daha yavaş bir dijital koda dönüştürür. Çoğu dönüştürücünün bir örnekleme hızı varken DS dönüştürücünün iki örnekleme hızı vardır: giriş örnekleme hızı ( $f_S$ ) ve çıkış veri hızı ( $f_D$ ). Bu iki değişken arasındaki oran desimasyon-kesinti oranıdır (DR). DR veri çıkışı başına modülatör örneklerinin sayısına eşittir. DS modülatörü, DS ADC'nin kalbidir. Analog giriş sinyalinin sayısallaştırılmasından ve düşük frekanslarda gürültünün azaltılmasından sorumludur ve çıktı veri hızını yavaşlatmak için bir desimatör filtre işlevi kullanılır. Şekil 3.20'de Dijital/kesim filtresi örneği verilmiştir. Dijital filtre işlevi, önce 1 bitlik kodun modülatör akışını örnekleyerek bir alçak geçiren filtre uygular. Dijital/kesim filtresinin ikinci işlevi, kırıcıdır. (Baker, How delta-sigma ADCs work, Part 1, 2011)



Şekil 3. 20. Dijital-Kesim filtresi

Dijital/kesme filtresi söz konusu olduğunda, dijital filtre örneklerinin "kesilmesi" gerekir. Kırpma devresinde, dijital sinyalin çıkış hızı, çıkış verilerinin bazı kısımlarını atarak veya "öldürerek" azaltılır. Dijital/kesme filtresi yüksek frekanslı gürültüyü azaltır ve giriş sinyalini düşük bir veri hızında dönüştürücünün çıkışına iletir. Bu iki bileşenin kombinasyonu, yüksek çözünürlüklü bir ADC sağlar. Şekil 3.21’de DS-ADC’nin zaman domeminde gösterimi verilmiştir.



Şekil 3. 21. DS-ADC zaman domeminde gösterimi

Bir DS ADC temel olarak bir modülasyon ve bir dijital/kesim filtresi içerir. Modülasyon topolojisi, düşük frekanslı ölçme gürültüsünü daha yüksek frekanslara yönlendiren bir gürültü şekillendirme işlevi uygular. Düşük geçişli dijital/kesme filtresi, modülasyon aşaması tarafından şekillendirilen yüksek frekanslı gürültüyü atar ve cihazın veri çıkış hızını kullanılabilir bir frekansa düşürür. Çıktı veri hızı ile dönüştürücünün çözünürlüğü arasında güçlü bir ilişki vardır. Örnekleme hızı sabit tutulursa daha düşük

veri hızları, dönüştürücünün çıkışında yüksek etkili çözünürlük sağlar. (Baker, How delta-sigma ADCs work, Part 2, 2011)

### 3.3.2. Arduino

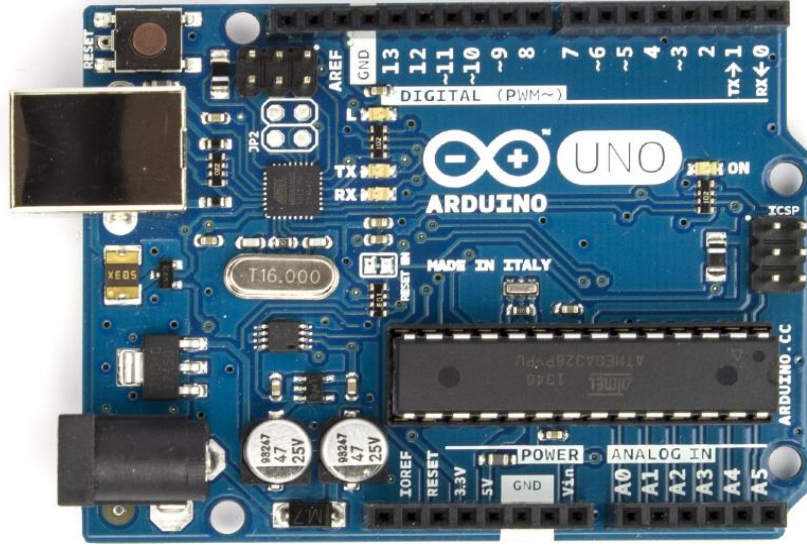
Arduino açık kaynaklı bir geliştirme kartıdır. Bu kartın dilinin kolay olması, açık kaynak erişimi olması ve arduino kütüphaneleri sayesinde kolaylıkla programlanabilir. Arduino kartlarının donanımında bir adet Atmel AVR mikrodenetleyici (ATmega328, ATmega2560, ATmega32u4 vs.) ve diğer elemanlara bağlantı için gerekli yan elemanlar bulunur. Şekil 3.22'de kullanılan arduino kartı verilmiştir. Kullanılan Arduino ATmega328 tabanlı bir mikrodenetleyici kartıdır. 14 dijital giriş/çıkış pini (6 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir), 6 analog girişe, 16 MHz seramik rezonatöre, güç girişine, ICSP başlığına, sıfırlama düğmesine ve USB bağlantısına sahiptir.

Teknik özellikleri:

- ✓ Mikrodenetleyici : ATmega328
- ✓ Çalışma gerilimi : +5 V
- ✓ Tavsiye edilen besleme gerilimi : 7 - 12 V
- ✓ Besleme gerilimi limitleri : 6 - 20 V
- ✓ Dijital giriş / çıkış pinleri : 14 tane (6 tanesi PWM çıkışını destekler)
- ✓ Analog giriş pinleri : 6 tane
- ✓ Giriş / çıkış pini başına düşen DC akım : 40 Ma
- ✓ 3,3 V pini için akım : 50 mA
- ✓ Flash hafıza : 32 KB (0.5 KB bootloader için kullanılır)
- ✓ SRAM : 2 KB
- ✓ EEPROM : 1 KB
- ✓ Clock frekansı : 16 MHz

Arduino'nun temel bileşenleri: Arduino kütüphaneleri, Arduino bootloader, AVR Dude (mikrodenetleyiciyi programlayan yazılım, derleyiciler (AVR-GCC) ve Arduino geliştirme ortamı (IDE) 'dir.



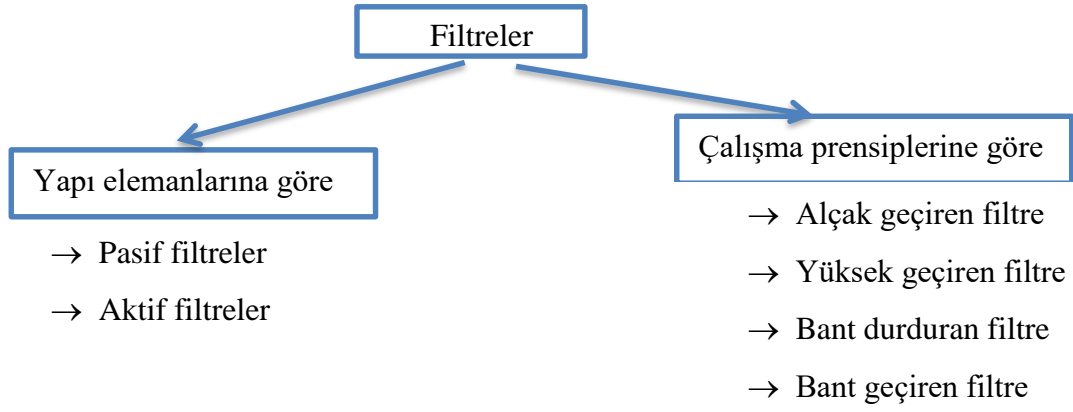


Şekil 3. 22. Arduino Uno Kartı

Arduino’da 14 dijital pin, 6 analog pin ve güç pinleri bulunur. 14 Dijital pinin 6 tanesi (3,5,6,9,10,11 numaralı pinler) PWM çıkışını destekler(8 bitlik). Dijital pinlerden 0:RX verileri almak için kullanılırken 1:(TX) verileri iletmek için kullanılır. Harici kesiciler olarak bilinen 2 ve 3 numaralı pinler, düşük değerde yükselen ya da düşen kenarda veya değer değişikliğinde bir kesmeyi tetikleyecek şekilde yapılandırılabilir. SPI pinleri 10(SS) master-slave bağlantısındaki slave seçimi için, 11(MOSI) master çıkış pini, 12(MISO) master giriş pini, 13(SCK) haberleşmede kullanılan 2 cihazın çalışma hızlarını eşitleyerek senkronizasyon sağlayan pindir. Bu pinler SPI haberleşmesini destekler. 6 tane analog pin mevcuttur. Bu pinler A0, A1,A2, A3, A4, A5 analog voltaj okuyabilirler. (Varmış, 2021)

### 3.4. Filtre Çeşitleri

Elektronik filtreler farklı frekans aralığına sahip sinyallerin istenmeyen kısmın elimine edilmesiyle istenen frekans aralığı elde edilmiş olur. Filtre kullanımının başlıca amacı karışmış sinyalleri birbirinden ayırmak, sinyaldeki gürültüyü elimine ederek sinyalin kalitesini artırmaktır. Filtreler çalışma prensipleri ve yapı elemanlarına göre ikiye ayrılır.



Filtre çeşitleri: aktif-pasif, analog – dijital, doğrusal – doğrusal olmayan, ayrık zamanlı- sürekli zamanlı ve sonlu dürtü yanıtı-sonsuz dürtü yanıtı gibi özelliklere dayalı olarak kategorize edilebilir.

Genel anlamda filtreler analog ve dijital(sayısal) filtre olarak ikiye ayrılır. Sayısal filtreler analog filtrelere oranla daha fazla avantaja sahip olduğundan sayısal filtre kullanımı daha yaygındır. Sayısal filtre, sayısallaştırılmış analog sinyaller üzerinde çalışan giriş sinyalini istenen çıkış sinyaline dönüştüren algoritmadır. (Dağ, 2013) Sayısal filtrelerin avantajları;

1. Sayısal filtreler bilgisayar ortamında çalıştırılıp test edilmesi kolaydır.
2. Sayısal filtreler DSP kullanılarak tasarlandığından dolayı filtre karakteristikleri entegre programlanarak filtre tasarımı yapılır.
3. Bilgisayarda filtre değiştirilmek istendiğinde sadece yazılım kısmında değişiklik yapılarak kullanıcının işini kolaylaştırır.
4. Sayısal filtreler çalışma ortamının sıcaklık değişimlerinden analog filtre kadar etkilenmezler ve daha kararlıdır.
5. Sayısal filtreler sinyal işleme yönüyle analog filtreye göre daha fazla yöntemle sahiptir.
6. Sayısal filtreler düşük frekanslı sinyallerde daha az hata oranı ile çalışır. (Batık, 2011)

#### 3.4.1. FIR Filtresi

FIR (Finite Impulse Response) filtresi, dijital bir sinyali işlemek için kullanılan bir filtreleme yöntemidir. Adından da anlaşıldığı gibi sonlu darbe yanıt filtresi belirli bir süre boyunca yanıt verir.

FIR filtreleri, giriş sinyalinin spektrumunu uygun şekilde değiştirmek için özel olarak tasarlanmış dürtü yanıt fonksiyonlarına sahip sistemlerdir. Standart evrişim kullanılarak uygulanırlar. Doğrusal faz özelliklerine sahiptirler.

FIR filtresinin matematiksel denklemi 3.5'te verilmiştir. Bu denklem  $b(k)$  sonlu darbe cevabı ile giriş sinyali  $x(k)$ 'nin konvolüsyon toplamı filtre çıkışı olan  $y$ 'yi vermektedir.

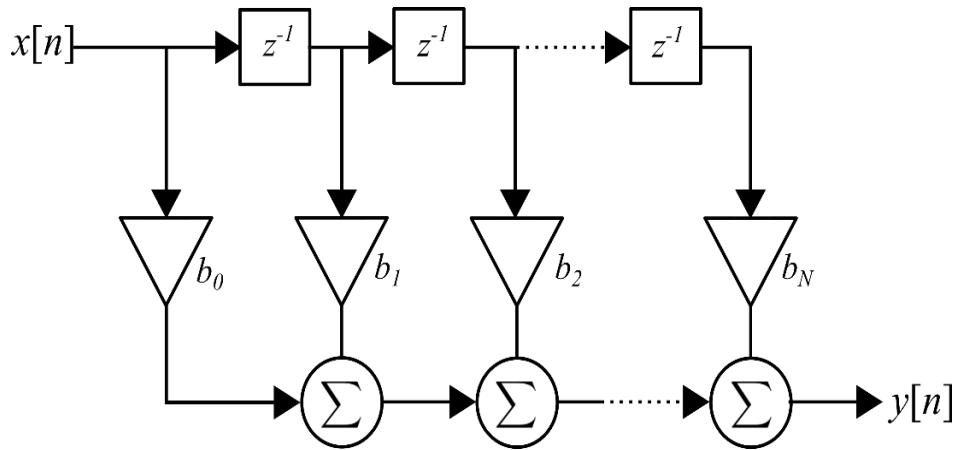
$$y(n) = \sum_{k=0}^N b(k)x(n - k) \quad (3.5)$$

$y(n)$ : Çıkış sinyalinin  $n$ 'inci örneği

$x(n)$ : Giriş sinyalinin  $n$ 'inci örneği

$b(k)$ : FIR filtresinin katsayısı

FIR filtresinin yapısı Şekil 3.23'te gösterilmiştir. FIR filtre kademeleli gecikme hatlı filtre olarak bilinmektedir.  $z^{-1}$  birim gecikme elemanı olarak ifade edilir. FIR filtrelerde sayısallaştırılmış sinyal geciktirme elemanından geçirilmektedir.  $N$  ile verilen birim gecikme eleman sayısıdır.  $x[n]$  sinyaline birim gecikme uygulandığında  $x(n-1)$  olur.  $x(n-1)$  filtre ağırlık katsayısı ile çarpılır ve her bir çarpımın sonucu tek tek toplanarak filtre çıkışını oluşturur.



Şekil 3. 23. FIR filtresinin yapısı

FIR filtresi ile her bir giriş sinyali tüm geciktirici elemanlardan geçmektedir bu sayede FIR filtresinin en önemli özelliğinden biri olan doğrusal fazlı olma ilkesi kazandırılmış olur. FIR filtresinde bütün sinyaller aynı gecikmeye maruz kalmaktadır. Sinyalde grup gecikmesi söz konusudur.

Giriş sinyaline FIR filtre uygulandıktan sonra sinyalinin çıkışa ulaşması için geçen zaman aralığına delta gecikmesi denir. Kısaca FIR filtresinin çıkışındaki gecikme süresini ifade eder. Delta gecikmesi, filtre katsayısına bağlıdır. Filtre katsayısı arttıkça delta gecikmesi de artar. Gecikme süresi sistem tepkisini analiz etmek için önemli bir faktördür.

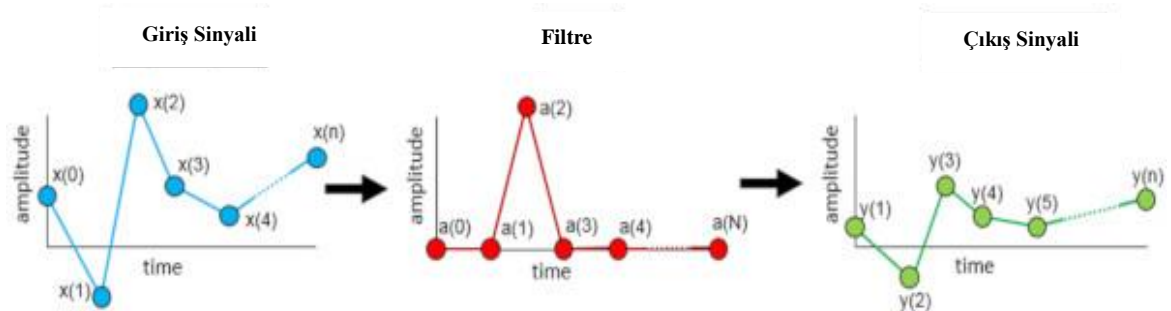
FIR filtresinde yerleşme zamanı, çıkış sinyalinin istenen değere yaklaşması için geçen süreyi ifade etmektedir. Yerleşme zamanı, FIR filtresinin kararlılığını ve dinamik tepkisini analiz etmek için önemli bir faktördür. Yüksek yerleşme zamanı, filtre tepkisinin yavaş olduğunu ve delta gecikme zamanının fazla olduğunu gösterir, düşük yerleşme zamanı daha hızlı ve hassas bir tepki sağlamaktadır.

FIR filtresi tasarlanırken kullanılan birçok metotlar aşağıda verilmiştir.

- 1) Pencereleme yöntemi
- 2) Frekans örnekleme yöntemi
- 3) Kutup yaklaşımı yöntemi

Bu tezde kullanılan yöntem Frekans örnekleme yöntemidir. Bu yöntem ile istenilen frekans tepkisi belirlenerek karakteristik oluşturulur. FIR filtre karakteristiğini belirlerken frekans domenine geçilir. İlk olarak istenen frekans tepkisine uygun bir FIR karakteristiği belirlenir. Frekans tepkisi, hangi frekans sinyalinin hangi oranda geçeceğini belirlenmesi işlemidir. Geçiş bandı ve durdurma bandı frekansları belirlenir ve filtre katsayısı oluşturulur. Tasarlanan katsayılar kullanılarak gürültülü veriye FIR filtresi uygulanır ve gürültüsü azaltılmış veri elde edilir.

Şekil 3.24'te gürültülü bir giriş sinyaline FIR filtresi uygulanmış ve çıkış sinyali elde edilmiştir.



Şekil 3. 24. FIR filtresi örneği

### FIR filtresinin özellikleri:

- ✓ Sonlu İmpuls Yanıtı: FIR filtrelerinin çıkışı, girişe uygulanan sonlu bir darbenin yanıtıdır. Bu nedenle, FIR filtrelerinin yanıtı sonlu bir süreye sahiptir ve bu süre filtre sırasına bağlıdır.
- ✓ Lineer Filtreleme: FIR filtreleri lineer sistemlerdir. Bu, giriş sinyalinin filtre üzerinden geçerken, çıkış sinyalinin giriş sinyalinin lineer bir kombinasyonu olduğu anlamına gelir.
- ✓ Lineerlik özelliği, filtre tepkisini matematiksel olarak modellendirme ve analiz etme kolaylığı sağlar.
- ✓ Ayırık Zamanlı İşleme: FIR filtreleri, giriş sinyalini örnekleme noktalarında işler. Giriş sinyali ve filtre katsayılarından hesaplanan çıktı, aynı zamanda örnekleme noktalarında elde edilir. Bu nedenle, FIR filtreleri ayırık zamanlı işleme için uygundur.
- ✓ Geri Beslemesiz Yapı: FIR filtrelerinde geri besleme (feedback) yoktur. Bu, bir FIR filtresinin mevcut çıktısının sadece geçmiş ve mevcut giriş örnekleriyle belirlendiği anlamına gelir.
- ✓ Tasarım Esnekliği: FIR filtrelerinin tasarımı, filtre katsayılarının doğrudan belirlenebilmesi nedeniyle oldukça esneklerdir. Tasarım parametreleri ve katsayılar, filtre sırası, geçiş bölgesi genişliği, kesme frekansı, yan geçiş azalması vb. gibi filtre gereksinimlerine göre ayarlanabilir.
- ✓ Geniş Bant Genlik Tepkisi: FIR filtreleri, genellikle geniş bant genlik tepkisi sağlar. Bu, FIR filtrelerinin geniş frekans aralığında etkin bir şekilde filtreleme yapabilmesi anlamına gelir.
- ✓ Faz Tepkisi: FIR filtreleri, genellikle faz tepkisi açısından doğrusaldır. Bu, FIR filtrelerinin filtrelenen sinyal üzerinde girdiyle aynı oranda gecikme sağladığı anlamına gelir. Bu özellik, FIR filtrelerinin uygulamalarda istenmeyen faz kaymaları veya sinyal bozulmaları olmadan kullanılabilmesini sağlar. Bu özellikler, FIR filtrelerinin birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

FIR filtreleri, ses işleme, görüntü işleme, iletişim sistemleri, biyomedikal sinyal işleme ve daha birçok alanda gürültü azaltma, sinyal düzeltme, frekans seçimi gibi işlemler için kullanılır.

### 3.4.2. Kalman filtresi

Birçok modern sistem, bir dizi ölçüme dayalı olarak bilinmeyen değişkenlerin tahminini sağlayan çok sayıda sensör ile donatılmıştır. Bu bilinmeyen değişkenlerin tahmin edilebilmesini sağlayan algoritmalarından biri Kalman filtresidir. Kalman filtresi (KF) bir durum tahmin algoritmasıdır. KF, en ünlü Bayes filtre teorilerinden biri olarak bilinen doğrusal bir optimal durum tahmin yöntemidir. (Woods & Radewan, 1977) Belirsiz ya da yanlış ölçümlere dayalı olarak gizli değişkenlerin tahminlerini üretir. Ayrıca bu filtre geçmiş tahminlere dayalı olarak gelecekteki sistem durumu hakkında tahmin sağlar. Kalman filtresi adını Matematiksel Sistem Teoristi olan Rudolf Kalman'dan 1960 yılında almıştır. Kalman, kesikli veri doğrusal filtreleme problemine özinelemeli bir çözüm açıklayarak makalesinde yayınlamıştır. (Çalışkan, 2020)

Kalman filtresi belirli bir düzen içerisinde veri akışının olduğu bir sistemde bir sonraki verinin tahmin edilmesini sağlar bunu yaparken bir önceki veriyi girdi olarak kabul ederek durum güncelleme denkleminde (3.6) yararlanır ve anlık tahmin üretir. (Vural, 2022).

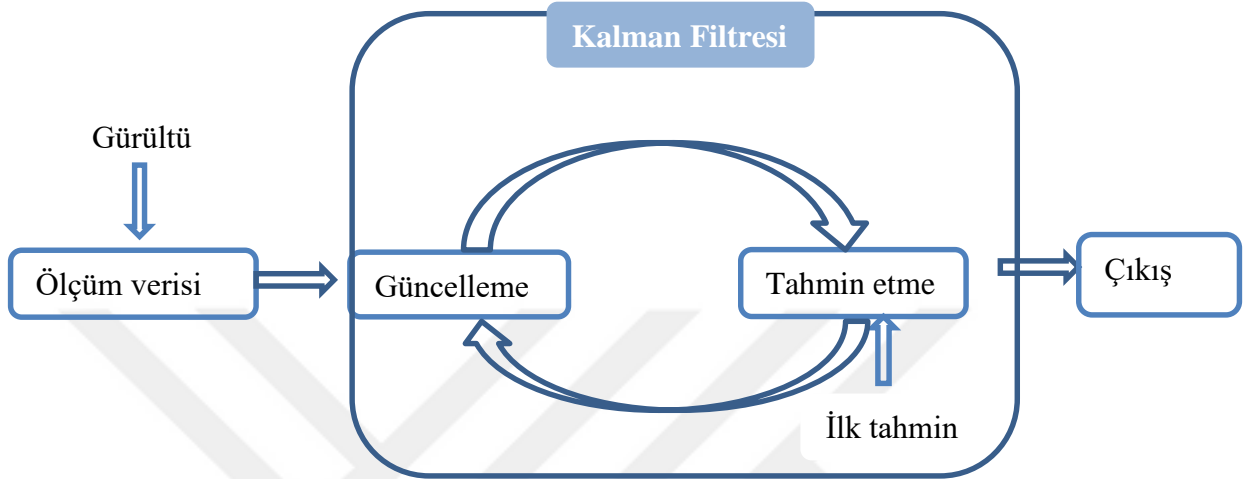
Dinamik sistemlerde direkt olarak ölçemediğimiz veya doğruluğu kesin olmayan bir veriyi Kalman filtresi yardımıyla gerçeğe yakın bir sonuç elde etmek için kullanılabilir.

KF 1960 yılından günümüze araç navigasyonu (konum izleme) başta olmak üzere hedef izleme (Radar), kontrol sistemleri, havacılık gibi çeşitli alanlarda kullanılmıştır. Örneğin bir GPS modeli oluşturulmuştur. Bu modelden bir sonraki GPS konumunun tahmin etmesi beklenmektedir. Kalman filtresi yardımıyla GPS sinyalinde oluşan parazitler ve gürültüler ortadan kaldırılmış ve konum tahmini yapılmıştır. Bu konu gibi birçok konu araştırılmaya devam edilmektedir. (Bayramlı, 2016)

#### 3.4.2.1. Kalman filtresinin matematiksel modeli ve basit algoritması

KF, en küçük kareler yönteminin verimli bir hesaplamalı (yinelemeli) çözümünü sağlayan bir dizi matematiksel denklemdir. Filtre birçok yönden güçlüdür. Geçmiş ve şimdiki hatta gelecekteki durumların tahminlerini destekler. (Welch & Bishop, 1997) KF çok çeşitli süreçlerin değişkenlerini tahmin edebilen bir araçtır ve doğrusal (lineer) bir sistemin durumlarını tahmin etmek için KF kullanılırken doğrusal olmayan (non-linear) sistem durumlarını tahmin etmek için EKF kullanılmaktadır. (Simon, 2001)

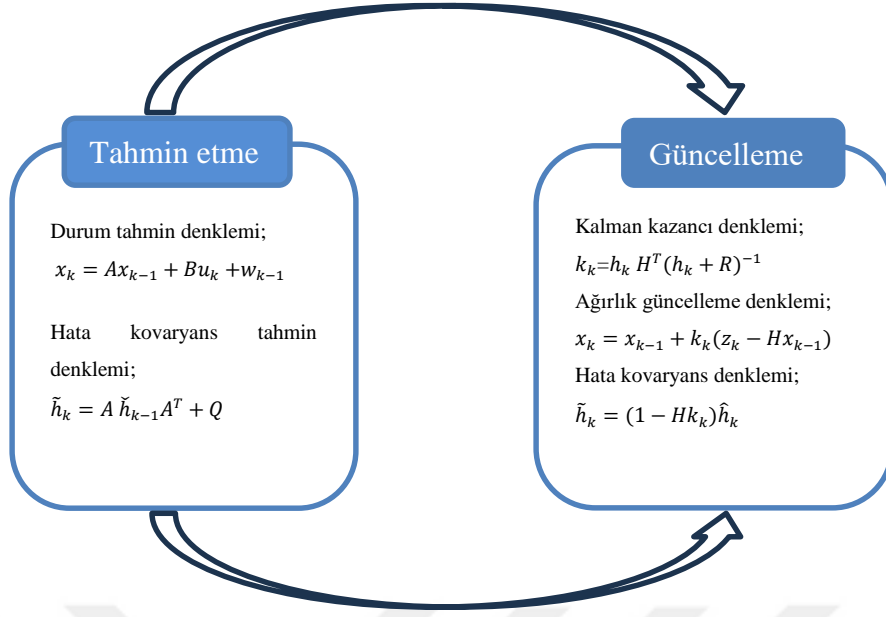
Kalman filtresinin matematiksel mantığını incelendiğinde bir önceki çıkış bilgisini girdi olarak kullanır ve bir sonraki tahmin sonucuna ulaşılır. Eğer sistem gürültülü bir ortamda ise gerçek sinyal üzerine eklenen düşük frekanslı olan bu gürültü üzerinde özyinelemeli gerçek zamanlı çalışarak filtre eder. Kalman filtresi tahmin ve güncelleme olarak iki bölümde incelenir.



Şekil 3. 25. Kalman filtresi algoritmasının gösterimi

Şekil 3.25'te gösterildiği gibi dinamik tartımdan kaynaklı gürültü içeren ölçüm verisi KF'ne tabi tutulur ve gürültülerden arınmış bir çıktı elde eder. KF tahmin algoritmasıyla hem ağırlıkları farklı olan cisimler tartıldığında gürültü elimine edilmiş hem de doğru tahmin oranlarına ulaşılmıştır.

KF'nin matematiksel algoritmasını incelendiğinde tahmin işlemi bilinen-gözlenen veri ile karşılaştırılır. Elde edilen fark Kalman kazancı denilen bir çarpan ile ölçeklendirilir. Sıradaki tahminlerin doğruluğunu artırmak için modele girdi olarak geri besleme uygulanır. Tahmin edilen çıktı sonucu bir sonraki tahmin için matematiksel formülde girilir. İşlemler bu döngü etrafında yenilemeli olarak devam eder. Şekil 3.26'da KF'nin matematiksel modeli verilmiştir.



Şekil 3. 26. KF matematiksel denklemleri

$$x_t = x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1}) \quad (3.6)$$



3.6'daki formül durum güncelleme denklemdir. Durum güncellemesi yapılarak her adımda daha doğru sonuçlar tahmin etmek mümkündür. Bu denklemi inceleyecek olursak t zaman ifadesidir ve deneylerimizde 100xmilisaniye olarak alınmıştır.  $x_t$  değeri elde edilecek olan tahmin değeridir.  $x_{t-1}$  değeri elde edilmiş olan bir önceki tahmin değeri ya da belirtilen ilk tahmin değeridir.  $k_t$  değeri kalman kazancıdır.  $z_t$  ise ölçülen gerçek değerdir.

Durum güncelleme denkleminin daha iyi anlaşılması için çalışma mantığı 5 adımda verilmiştir. İlk tahmin değeri 150g, gerçek ölçüm değeri 157 g ve kalman kazancı 1 olsun.



1. Adım

$$x_t = x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1})$$

$$x_t = 150 + 1.(157 - 150)$$

$$= 157\text{g}$$

2. Adım

Yeni tahmin değeri 157g, kalman kazancı  $\frac{1}{2}$ , ölçülen ağırlık ise 145g olsun.

$$x_t = x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1})$$

$$x_t = 157 + \frac{1}{2}(145-157)$$

$$= 151\text{g}$$

3. Adım

Yeni tahmin değeri 151g, kalman kazancı  $\frac{1}{3}$ , ölçülen ağırlık ise 154g olsun.

$$x_t = x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1})$$

$$= 151 + \frac{1}{3}(154-151)$$

$$= 152\text{g}$$

4. Adım

Yeni tahmin değeri 152g, kalman kazancı  $\frac{1}{4}$ , Ölçülen ağırlık ise 160g olsun.

$$x_t = x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1})$$

$$= 152 + \frac{1}{4}(160-152)$$

$$= 154\text{g}$$

## 5. Adım

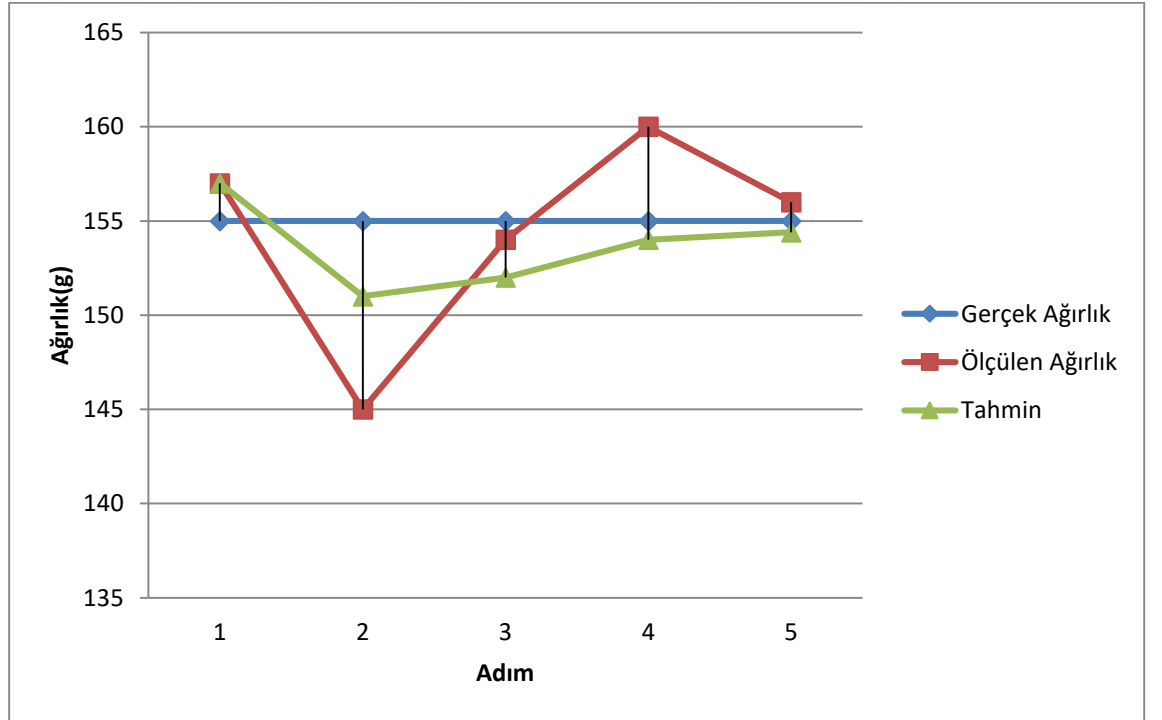
Yeni tahmin değeri 154g, kalman kazancı  $\frac{1}{5}$ , ölçülen ağırlık 156g olsun.

$$\begin{aligned}x_t &= x_{t-1} + k_t(z_t - x_{t-1}) \\ &= 154 + \frac{1}{5}(156-154) \\ &= 154.4\text{g}\end{aligned}$$

**Tablo 3.** Yapılan ölçümlerin tabloda gösterimi

T	1.Adım	2.Adım	3.Adım	4.Adım	5.Adım
$z_t$	157	145	154	160	156
$x_t$	157	151	152	154	154.4
$x_{t-1}$	150	157	151	152	154

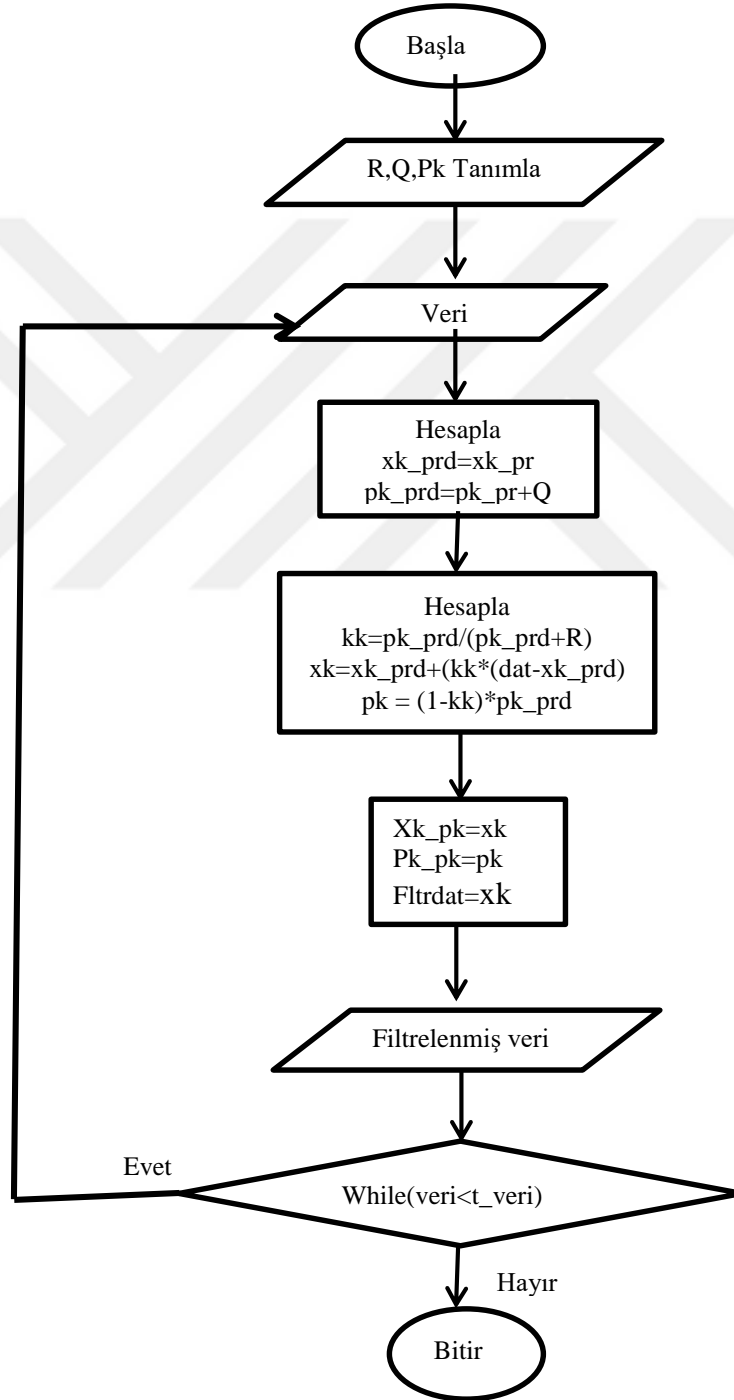
KF tahmin algoritmasının mantığı, ölçülen gerçek değerin tekrar girdi olarak nasıl kullandığı ve Kalman döngüsünün nasıl işlendiği denklemler üzerinden anlatılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.



**Şekil 3. 27.** KF Tahmin algoritmasının grafiksel olarak gösterimi

Şekil 3.27’de gösterilen grafikten anlaşıldığı gibi gerçek ağırlığı 155g olan bir cisim gürültü içeren bir ortamda tartıldığında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Durum güncelleme denklemini kullanarak oluşturulan tahmin algoritmasının sonuçları grafikte gösterilmektedir. Adım sayısı arttıkça grafikte iyileşmelerde olduğu görülmektedir.

KF’nin algoritmasının mantığı anlatılmıştır. Gerçekleştirilen tezin detayları ve uygulanan algoritmanın matematiksel fonksiyonları aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. 28. KF tahmin algoritmasının akış diyagramı

Kalman filtresi tahmin algoritması tasarlarken Şekil 3.28’de kullanılan bir algoritmadan yararlanılmıştır. Formüllerde kullandığımız R, Q ve ilk tahmin değerini tanımlanmıştır. Matematiksel işlemlerini gerçekleştirdikten sonra filtrelenmiş olan tahmin verisini kontrol ederek çıktısı olan bu tahmini bir sonraki adım için girdi olarak verip döngü devam etmiştir.

KF oluştururken matematiksel modellenmesinde pratikte karşılaşılan iki temel sorun vardır:

- 1) Sistem modelinin mükemmel olmaması (yanlış parametre seçimi, zamanla değişen parametreler vs.)
- 2) Sistem çıkışından alınan ölçümlerin mükemmel olmaması (sensörden kaynaklı hata, ölçümlerde gürültü vs.)

KF oluştururken parametreleri belirlemek için yukarıda bahsedilen durumlara göre değer ataması yapılır. Q ve R parametreleri seçilirken;

- Eğer  $Q > R$  alıyorsak oluşturulan modelin mükemmel olmamasından kaynaklı sorunun baskın olduğunu varsayıyoruz demektir.
- Eğer  $R > Q$  alıyorsak modelin sistem çıkışında ölçümden kaynaklı hataların baskın olduğunu varsayıyoruz demektir.

Teoride Q ve R değerleri gürültü kovaryans matrisleri olarak isimlendirilir. Filtrenin performansını Q ve R değerlerini değiştirerek sonucu en uygun olan iterasyon seçilir. Bu değerler uygun olarak seçildiği zaman Kalman filtresinin çok iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. (Admin, Kalman filtresi uygulamaları, 2014)

Kalman filtresi modelinde en önemli detay KF’ni problemimize entegre ederek doğru şekilde çalışmasını sağlamaktır.  $x_k$  parametresi bulunmak istenen tahmin değeri,  $x_{k-1}$  parametresi bir önceki tahmin değeri,  $k_k$  kalman kazancı değeri ve  $z_k$  ise ölçülen cismin ağırlık değeridir.  $x_k$  ve  $z_k$  parametreleri düşük frekanslı sinyalleri de içeren parametrelerdir. Ölçümlere hata kovaryansı ekleyerek bir sonraki güncellenen tahminde iyileştirmeler sağlanmıştır. Hata kovaryansı  $\tilde{h}_k$  ‘dır.

Tahmin et ve güncelle olarak ikiye ayrılan KF’nin matematiksel denklemleri aşağıdaki gibidir:

Durum tahmin denklemi;

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (3.7)$$

Hata kovaryans tahmin denklemi;

$$\tilde{h}_k = A \tilde{h}_{k-1} A^T + Q \quad (3.8)$$

3.7'deki denklem ile durum tahmini yapılır.  $x_k \in R^n$ , başlangıç durum değeri  $x_0$ , ortalama değeri  $m_0$  ve hata kovaryansı  $\tilde{h}_0$  ( $x_0 \sim N(m_0, \tilde{h}_0)$ ) olan n boyutlu bir durum vektörüdür. A, B elemanları matrislerin gösterimidir.  $A \in R^{n \times n}$  durum matrisi,  $B \in R^{n \times m}$  giriş matrisidir. Sinyal verimiz 1 boyutlu olduğu için bu elemanlar nümerik bir sayıdır.  $u_k$  kontrol sinyali ve aynı zamanda  $u \in R^m$  olup sistem girişidir.  $w \in R^n$  olup sinyaldeki gürültüdür.  $w_{k-1}$  ise önceki işlem gürültüsüdür. Hata kovaryans tahmini yapan denklem ise 3.8'de gösterilmiştir.

Kalman kazancı denklemi;

$$k_k = h_k H^T (h_k + R)^{-1} \quad (3.9)$$

Ağırlık güncelleme denklemi;

$$x_k = x_{k-1} + k_k (z_k - Hx_{k-1}) \quad (3.10)$$

Hata kovaryans denklemi;

$$\tilde{h}_k = (1 - Hk_k) \hat{h}_k \quad (3.11)$$

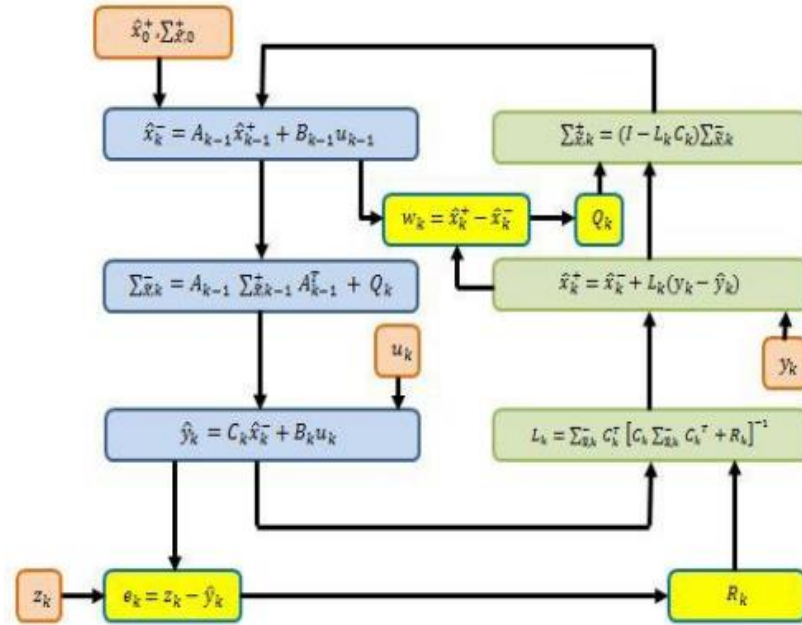
3.9'daki denklem Kalman kazancının (Kalman gain) hesaplandığı formüldür. Kalman kazancı tahmin yöntemi için en önemli parametredir. 3.10'da verilen denklemde bir önceki ağırlığı bilinen değeri kullanarak bir sonraki değer için durum güncellemesi yapan formüldür. Burada kullanılan H değeri ölçüm durum değeri ile gürültünün birleşimi sonucu ortaya çıkar ve genellikle 1 kabul edilir. (Çayıroğlu, 2012) Hata kovaryansının güncellenmesini sağlayan formül ise 3.11'de gösterilmiştir.

#### 3.4.2.2. Adaptif kalman filtresi

Stokastik model parametrelerin belirsizliği nedeniyle Kalman filtresinde oluşan dezavantajları minimuma indirmek için Adaptif (Uyarlamalı) Kalman filtresi (AKF)'nin geliştirilmesine önem verilmiştir. KF'ndeki parametre değerindeki belirsizlikler sebebiyle oluşturulan model KF'nin performansında olumsuz etkiler AKF ile birlikte statik gürültü parametrelerinin ayarlanması ve gürültünün sistem üzerindeki

olumsuz etkisinin azaltılmasına olanak sağladığından araştırılmaya devam edilmektedir. AKF'nin süreç varyanslarındaki değişimleri daha rahat kontrol ettiği ve doğrusal olmayan sistemlerde de uygulanabilir bir yaklaşım olduğu için KF'ne göre daha fazla tercih edilebilir. Şekil 3.29'da AKF'nin denklem şeması verilmiştir.

Literatürde üç AKF vardır. Bunlar; yenilik tabanlı uyarlamalı tahmin (IAE), çoklu model tabanlı uyarlamalı tahmin (MMAE) ve ölçekli durum kovaryans tahmini yöntemidir. (Muhammed & Schwarz, 1998) İşlem gürültüsü kovaryans matrisi olan Q ve ölçüm kovaryansı R, IAE tahmin yöntemini ile bulunur. Tahmin edilen Q değeri hesaplanan örnek kovaryans ile değerlendirilir. R değeri KF güncellenen örnek kovaryansını kullanarak hesaplanır. Örnek kovaryansı ise geçmiş veriler ile hesaplanır her bir adımda de yeniden güncellenir. IAE yönteminin dezavantajı, hesaplama yükünün fazla olması nedeniyle çevrimiçi gerçekleştirilmezler. (Hashlamon & Erbatur, 2016) MMAE yönteminde ise modellerden birinin doğru olduğu varsayılarak her bir model için doğruluk olasılığı hesaplanır. Bayes olasılığı ve olasılığı en yüksek çıkan model işleme alınır ancak MMAE yönteminde model seçerken modeldeki doğruluk varsayımındaki belirsizlikten dolayı tercih edilmemektedir. Modeldeki bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak için Karasola ve ark tarafından optimizasyona dayalı uyarlamalı tahmin yöntemi geliştirmişlerdir. (Karasola & Hu, 2011)



Şekil 3. 29. Adaptif Kalman filtresi şeması

### 3.4.2.3. Genişletilmiş kalman filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi, non-linear durum uzayı ile modellenen sistemlerde önceki durum ve ölçüm değerine göre sonraki durumu tahmin eden KF çeşididir. (Oğuz & Temeltaş, 2013) KF sadece lineer sistemler için uygun olduğu için denklemlerinde lineer olması beklenir. Ancak pratik sistemler çoğu zaman lineer olmayan sistemlerdir. KF'nin uygulama alanının sadece lineer sistemler üzerinde olması sorunu üzerine durularak Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan(non-linear) sistemlerde filtreleme alanında en klasik algoritmalarından biri EKF olarak bilinir.

EKF'nin temel mantığı; tahmin edilen durum etrafında birinci dereceden doğrusal olmayan Taylor açılımının değerine odaklanmak ve non-linear sistemi lineer bir denkleme dönüştürmektir. (Fujii, 2013) EKF algoritması doğrusal olmayan sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Taylor açılımı ile ön işlemden geçip doğrusal olan sistem durumunu sürekliyse EKF'nin sonuçları gerçek değere yakındır.

EKF'nin filtreleme sonucu durum ve ölçüm gürültüsünden etkilenir. Aynı zamanda durum ve gözlemin gürültü kovaryans matrisi doğru şekilde tahmin edilmezse kümülatif hata filtrenin sapmasına neden olabilir. Sistemler göz önüne alındığında;

$$x(k)=f(x(k-1),w(k-1)) \quad (3.10)$$

$$y(k)=h(x(k),v(k)) \quad (3.11)$$

3.10'daki denklemde  $x(k)$  sistemin  $n$  boyutlu durum vektörü, 3.11'deki  $y(k)$  denklemi  $k$  anında  $m$  boyutlu gözlem vektörüdür.  $v(k)$  ölçmedeki gürültü ve  $w(k-1)$  proses gürültüsüdür. Gözlem matrisi ve geçiş matrisi olan  $h$  ve  $f$  doğrusal olmayan durum geçiş ve ölçüm fonksiyonlarıdır.

Tahmin denklemleri:

$$A=\frac{df}{dx} \Big|_{x=\hat{x}_{k-1}} \quad (3.12)$$

$$x_k^- = f(\hat{x}_{k-1}) \quad (3.13)$$

$$P_k^- = AP_k A^T + Q \quad (3.14)$$

Güncelleme denklemleri:

$$A=\frac{dh}{dx} \Big|_{x=\hat{x}_k^-} \quad (3.15)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3.16)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-)) \quad (3.17)$$

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^- \quad (3.18)$$

EKF'nin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. Bunlar:

- EKF gerçek değerden büyük ölçüde sapan genişleme noktası durumunda kullanılırsa EKF algoritması gerçek değerden büyük ölçüde sapabilir.
- Taylor serisi açılımından sonra durum ve gözlem gürültüsü değişebileceğinden gürültü varsayımı tutarsız olabilir.
- EKF algoritma sürecinin gözlem süreci boyunca gözlem denkleminin Jacobian matrisini yeniden hesaplaması gerekir. Matris hesabı karmaşık olduğu için bazı sistemlerde Jacobian matrisini çözmek zordur ve zaman alır.

EKF'nin standart KF'den farkı doğrusal olmayan durum ve fonksiyonların kısmi türevlerini alarak denklemleri doğrusallaştırmaktır. EKF algoritması doğrusal olmayan sistemlerde kullanıldığından tercih edilmektedir. Bu konuda birçok araştırma yapılmış ve dezavantajlarını elimine etmek için günümüzde çalışmalar devam etmektedir.

#### 3.4.2.4. Kokusuz kalman filtresi

Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) Julier ve Uhlmann tarafından önerilmiş ve doğrusal olmayan dağılıma yakın örnekleme stratejisi uygulayan yöntem sınıfından biridir. Kokusuz Kalman Filtresinin temelinde ortalama etrafında yer alan noktaların bir kümesinin deterministik olarak seçilmesi esasına dayanan ve lineer olmayan sistemler için geliştirilmiş kokusuz dönüşüm vardır. (Köksal Babacan, Özbek, & Biçer, 2011) UKF kokusuz dönüşüme dayalı 2k(UT) doğrusal Kalman filtresini kullanarak rastgele örnekleme stratejisi yerine örnekleme stratejisini tanımlar. Örnekleme noktaları sayısı (genellikle Sigma noktaları olarak tanımlanır) azdır ve örnekleme stratejisine bağlıdır. En sık kullanılan örnekleme stratejisi 2n+1 simetrik Sigma örnekleme stratejisidir. (Julier, Uhlmann, & Durrant-Whyte, 1995)

UT'nin temel fikri şu şekildedir: örnekleme ortalamasının x ve kovaryansının  $P_x$  olduğu bilinerek bir dizi sigma noktaları kümesi seçilir ve her bir sigma örnekleme noktasına doğrusal olmayan dönüşüm uygulanır. Bu sayede doğrusal olmayan dönüştürülmüş y ve  $P_y$  noktaları kümesi Sigma'nın istatistik noktaları olur. (Li, Chen, Nan, & Jia, 2013)



Zaman güncelleme denklemleri:

$$\hat{x}_k^- = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum_{i=1}^{2n} f_{k-1}(x_{k,i}) \quad (3.19)$$

$$P_k^- = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum_{i=1}^{2n} [f_{k-1}(x_{k,i}) - \hat{x}_k^-] [f_{k-1}(x_{k,i}) - \hat{x}_k^-]^T + Q_{k-1} \quad (3.20)$$

Sigma noktalarının belirlenmesi:

$$x_{k,i} = \hat{x}_k^- + (\sqrt{nP_k^-})_i^T, x_{k,i+n} = \hat{x}_k^- - (\sqrt{nP_k^-})_i^T, i = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

Ölçümlerin tahmin denklemi:

$$\hat{y}_k = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum_{i=1}^{2n} h_k(x_{k,i}) \quad (3.22)$$

Kovaryans güncelleme denklemleri:

$$P_k^y = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum_{i=1}^{2n} [h_k(x_{k,i}) - \hat{y}_k] [h_k(x_{k,i}) - \hat{y}_k]^T + R_k \quad (3.23)$$

$$P_k^{xy} = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum_{i=1}^{2n} [(x_{k,i}) - \hat{x}_k^-] [h_k(x_{k,i}) - \hat{y}_k]^T \quad (3.24)$$

Ölçüm güncelleme denklemleri:

$$K_k = P_k^{xy} (P_k^y)^{-1} \quad (3.25)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k) \quad (3.26)$$

$$P_k^+ = P_k^- - K_k P_k^y K_k^T \quad (3.27)$$

Q matrisi sistem işlem gürültüsünün kovaryans matrisini, n sistem durum vektör boyutunu, R matrisi ölçümlerin gürültüsünün kovaryans matrisini temsil etmektedir. (İlvan & Bostancı, 2021)

UKF algoritmasının işlem adımları:

- 1) Durum vektörü ve durum tahmini hata kovaryansı başlatılır.
- 2) Önceki adımın durum vektörü ve hata kovaryansına göre örnekleme noktaları seçilir ve ağırlıklı değer hesaplanır.
- 3) Durum denklemi vasıtasıyla ortalama ve kovaryans yayılması hesaplanır ve seçilen sigma örnekleme noktalarına göre bitiş süresi güncellenir.
- 4) Seçilen örnekleme noktaları tarafından doğrusal olmayan bir gözlem denklemi yoluyla ölçüm güncellemesi tamamlanır.
- 5) Kalman filtre katsayıları güncellenir.

Durum ve gözlem denklemleri EKF ile aynıdır. EKF ile karşılaştırıldığında UKF'nin uygulanması daha kolaydır ve Jacobian matrisini hesaplamaktan kaçınır.

UKF'nin EKF gibi doğrusal olmayan sistem analizlerinde kullanılması ve EKF'nin dezavantajının olmasından dolayı günümüzde çalışmalar devam etmektedir.

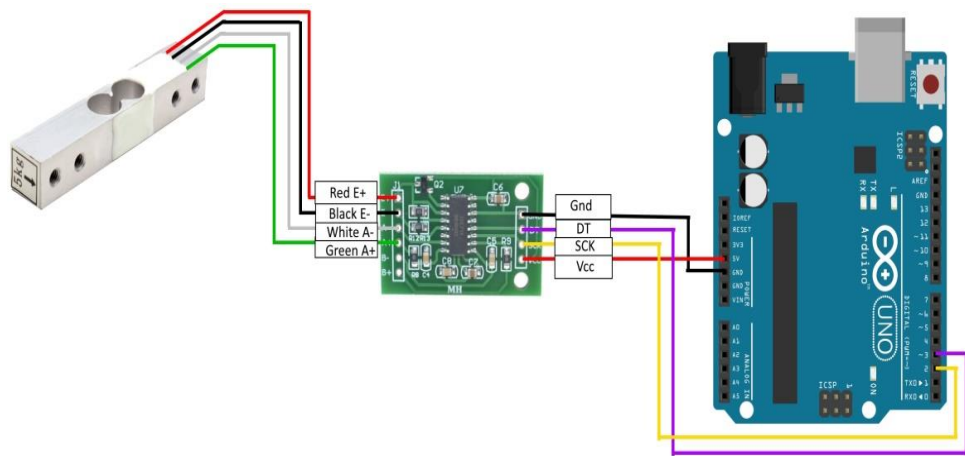


#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

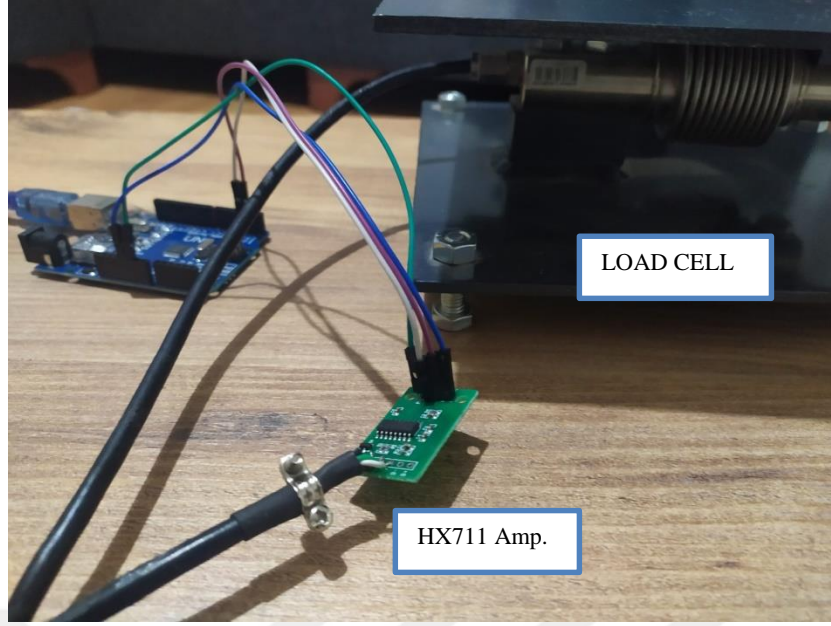
Dinamik tartım yöntemleri günümüzde hemen hemen her alanda kullanılır. Dinamik tartımdan kaynaklı oluşan küçük frekanslı gürültü olarak tanımlanan sinyaller gerçek değer ölçülmesinde yanlış sonuçlar verebilir. Literatürde bu gürültülü sinyallerin elimine edilmesini gerçekleştirmek amacıyla LMS, IIR, OE, FIR ve KF gibi farklı filtreler kullanılmıştır. Gürültülü sinyallerin azaltılması hatta yok edilmesi için bu tezde KF ve FIR filtreleri kullanılmıştır.

KF'ni belirsiz ve kesin olmayan durumlarda veya doğruluğundan emin olmadığımız, ölçemediğimiz, verilerin tahmin edilmesinde kullanılır. KF geçmiş, şimdiki ve gelecekteki durumları tahminleme de kullanıldığından birçok yönden güçlüdür. Bu çalışmada ağırlıkları farklı olan cisimler tartılırken KF yardımıyla bir tahmin algoritması geliştirilmiş ve bir sonraki tartılacak olan cismin ağırlığı tahmin edilmiştir. KF, en küçük kareler yönteminin özyinelemeli bir çözümünü sağlayan doğrusal bir denklemdir. Döngü şeklinde işlem gören, güncelle ve tahmin et olarak ikiye ayrılan KF, ölçülen ağırlıkların tahminleme işlemini ms cinsinden yapılmıştır. Tahmin sonuçları grafiklerle desteklenerek ispatlanmıştır.

Gerçekleştirilen tezde HX711 yükselteç ile load cell kullanılarak Arduino üzerinden ölçüm verileri alınmış, MATLAB'ta bu veriler işlenmiştir. Ağırlık ölçümü için kullanılan sistemin bağlantı şeması Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.2'de ise gerçekleştirilen uygulamanın deney şeması verilmiştir.



Şekil 4. 1.Gerçekleştirilen uygulamanın bağlantı şeması



Şekil 4. 2. Deney şeması

Sistem üzerinden alınan ölçüm verileri işlenip modellenerek KF tahmin algoritması geliştirilmiştir. Ağırlıkları farklı cisimlerin tartım işlemi gerçekleştirilmiş tahmin sonuçları grafiklerle desteklenmiştir. Orijinal veriye gürültü eklenmiş ve KF ve FIR filtresi kullanılarak gürültü elimine edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen KF, FIR-KF, KF-FIR tahmin algoritmalarının bulunduğu değerler ile gerçek değerler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi Arduino Seri port ekranından okunan değer ve tahmin değerini içeren bir resim mevcuttur. Ölçülen ağırlık değerleri KF modeli ile tahmin algoritmasının sonuçları gösterilmektedir.

```
COM4
19:53:30.349 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 4.9
19:53:30.396 ->
19:53:30.443 -> Okunan Değer: 4 lbs
19:53:30.443 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 4.7
19:53:30.490 ->
19:53:30.537 -> Okunan Değer: 7 lbs
19:53:30.537 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 5.3
19:53:30.583 ->
19:53:30.630 -> Okunan Değer: 13 lbs
19:53:30.630 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 7.4
19:53:30.678 ->
19:53:30.771 -> Okunan Değer: 17 lbs
19:53:30.771 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 10.0
19:53:30.771 ->
19:53:30.865 -> Okunan Değer: 22 lbs
19:53:30.865 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 13.2
19:53:30.865 ->
19:53:30.959 -> Okunan Değer: 26 lbs
19:53:30.959 -> Kalman Filtre Tahmin Değeri: 16.7
19:53:31.006 ->
```

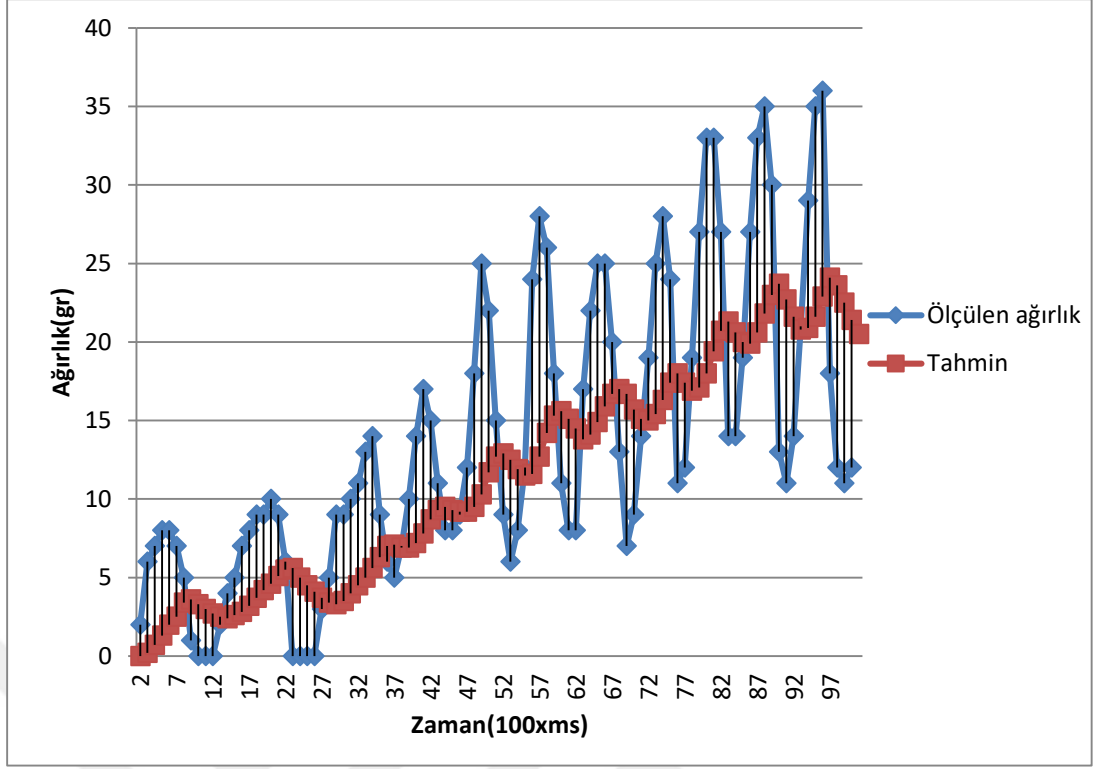
Şekil 4. 3. Ölçülen değerlerin seri port ekranında gösterimi

Şekil 4.4'te ağırlıkları farklı cisimler ms hızında ölçülmüş ve seri çiziciden alınan bir kesit mevcuttur. Ölçüm verisi ile KF tahmin algoritması ile grafik çizdirilmiştir. Görüldüğü üzere ani artış azalışlarda bulunan tahmin değerlerinde de paralel olarak artış azalış gerçekleşmiştir. Ağırlıklar belirli bir aralıkta olmaya başladığında tahmin değerlerinin de ölçülen değerlere yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4. 4. Ölçülen değerlerin seri çizici ekranında gösterimi

Şekil 4.5'te verilen grafikte ölçülen ağırlık sinyalleri ve KF ile oluşturulan tahmin algoritmasının sonuçları verilmiştir. Ağırlıkta azalma olduğunda tahmin algoritmasının değerleri düşüğe geçerken ani bir artım olduğunda algoritma değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Bu grafikte ölçülen değerlerdeki ani artış ve azalıştan dolayı KF algoritmasının tahmin değeri birbirine yaklaşmıştır ancak ölçülen değeri tam tahmin edilememiştir.

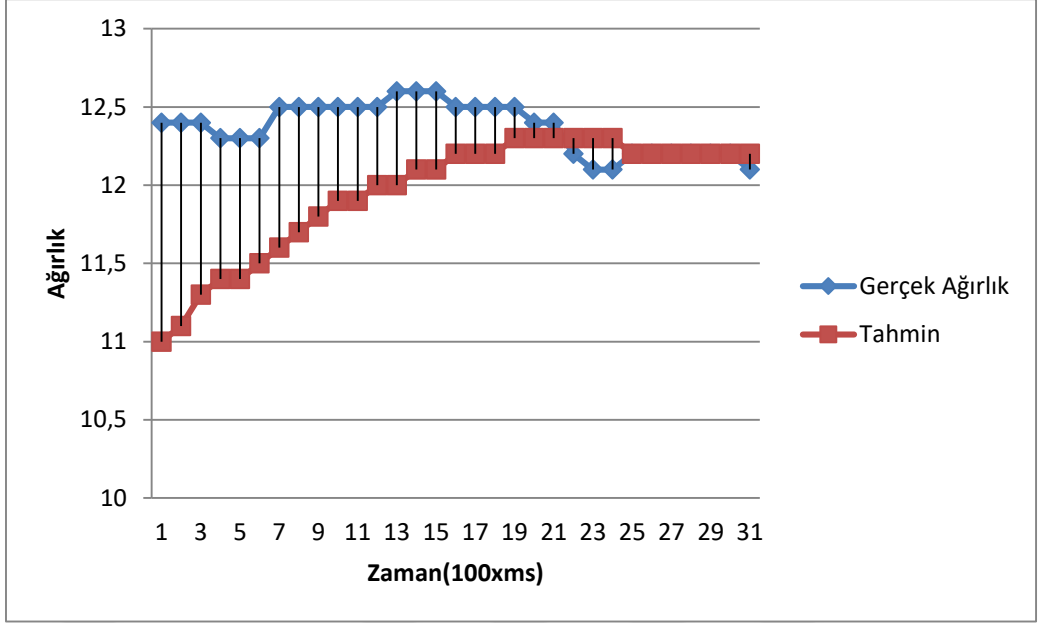


Şekil 4. 5. Ölçüm verileri ve tahmin sonuçlarının grafiksel gösterimi

Tablo 4. Ölçüm verilerinin durum kestirim tablosu

Süre	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Ölçüm	12,5	12,5	12,5	12,5	12,6	12,6	12,6	12,5	12,5	12,5	12,5	12,4	12,4	12,2	12,1	12,1	12,2	12,2	12,2
Tahmin	11,8	11,9	11,9	12	12	12,1	12,1	12,2	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,2	12,2	12,2

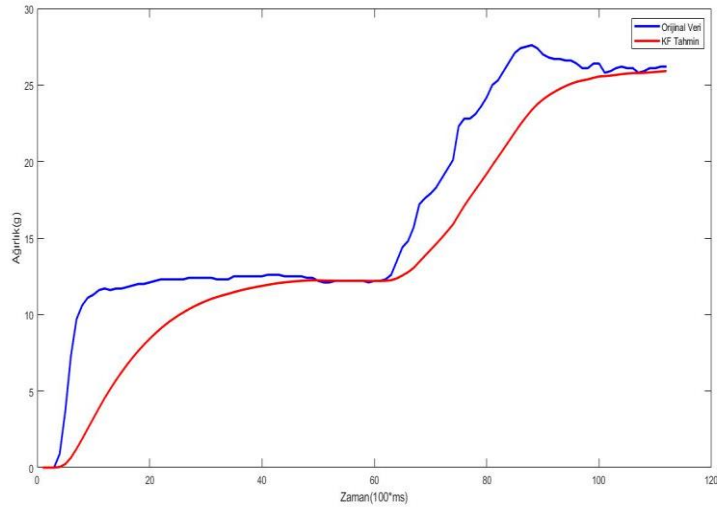
Tablo 4’te belirli bir kesite ait ölçüm ve tahmin değerleri verilmiştir. Orijinal ağırlık değerleri ile geliştirilen KF tahmin algoritmasının bulduğu değerler bir süre sonra aynı olduğu deneylerle ispatlanmıştır.



Şekil 4. 6. Ortalama değeri 12 olan grafiğin durum-kestirim sonucu

Verilen grafikteki sonuçlar dikkate alındığında ortalama olarak birbirine yakın değerlerin durum kestirim sonuçları ağırlıkları birbirinden farklı olan cisimlerin durum kestirim sonuçlarına oranla daha iyi sonuçlar verdiği Tablo 4'te ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Kalman filtresi algoritması ile yapılan tahmin işleminin başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Hata oranı sıfıra düştüğü tablo ile gösterilmiş grafik ile desteklenmiştir.

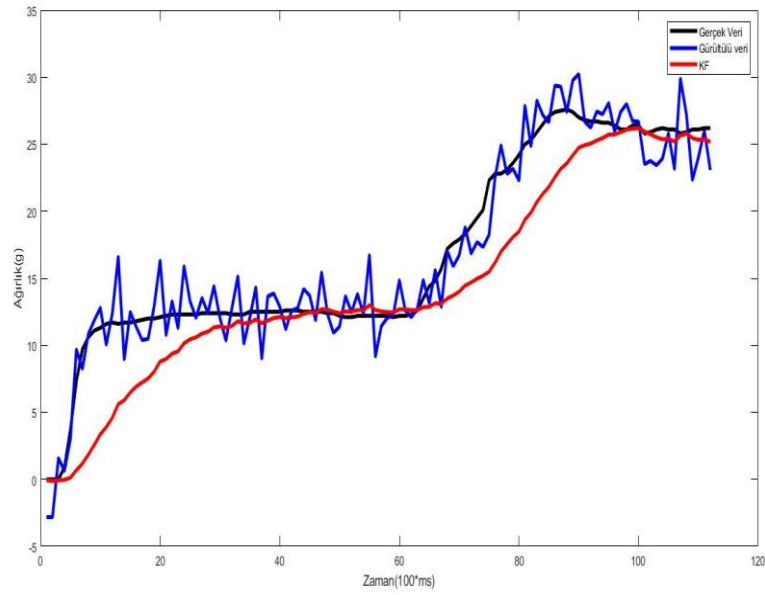
Ağırlıkları farklı olan bir başka gürültüsüz veri KF ile tahmin edilmiş ve grafik sonucu Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4. 7. Orijinal ağırlığın KF ile tahmin edilmesi

Şekilde de görüldüğü üzere ölçülen değer sabit olduğu zaman Kalman filtresi ile gerçekleştirilmiş olan tahmin değeri gerçek değere yaklaşarak hata oranını oldukça düşürmektedir.

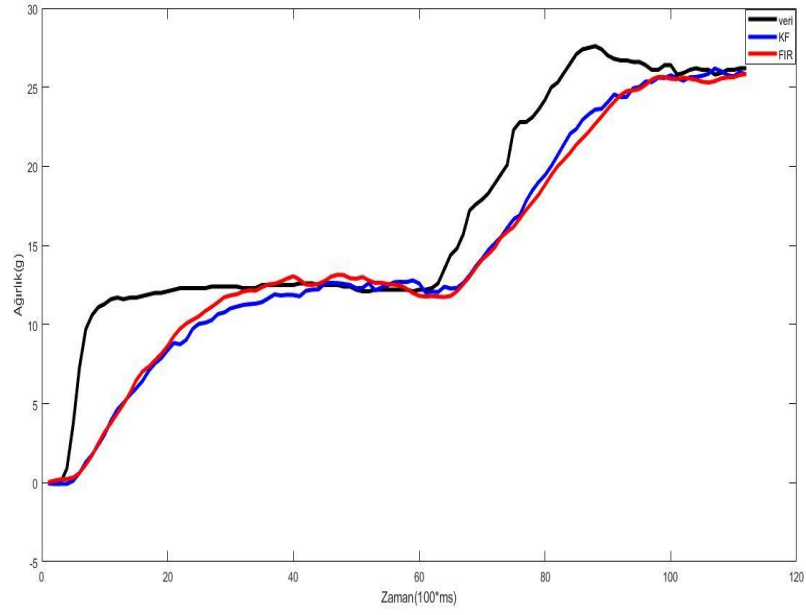
Orijinal veriye MATLAB üzerinden beyaz gürültü eklendikten sonra gürültülü veriye KF uygulanmış ve sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bir önceki şekil ile karşılaştırıldığında KF ile gerçekleştirilen tahmin sonucunda dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmaların önüne geçebilmek ve kesin sonuca ulaşabilmek için FIR filtresi kullanılmıştır.



Şekil 4. 8. Gürültülü verinin KF tahmin sonucu

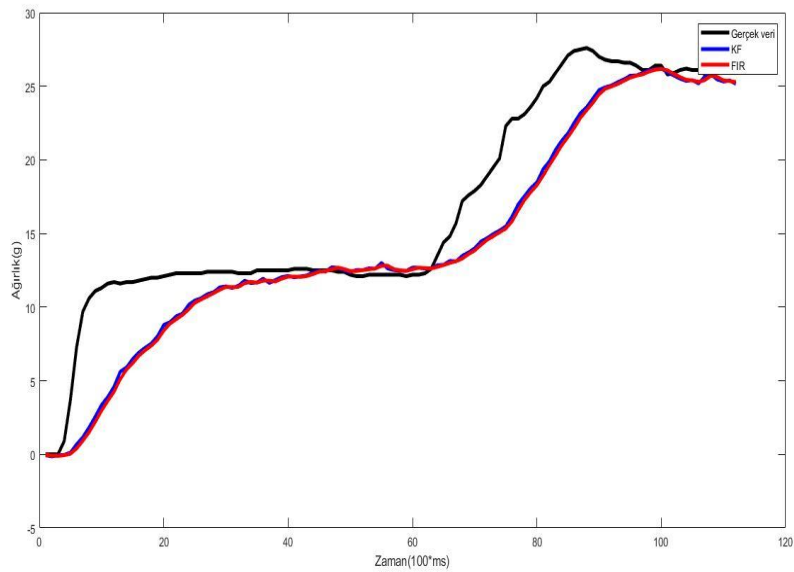
FIR filtresini gürültülü sinyale uygulamak için önce FIR karakteristiği ve filtre katsayıları hesaplanmıştır. FIR filtresi tasarımı yapıldıktan sonra gürültülü olan veriye filtre uygulanmıştır. Oluşan filtrelenmiş sinyal KF ile filtrelenmiş ve tahmin sonucu Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Gürültülü sinyal verisine FIR filtresi uygulandıktan sonra KF ile tahmin işlemi yapıldığında hata oranı %0.134 olarak bulunmuştur. Kırmızı olarak çizdirilen kısım gürültülü verinin FIR filtresi ile filtrelenmiş sonucunu içerir. Mavi ile çizdirilen kısımda FIR ile filtrelenen sinyalin KF algoritması ile tahmin sonucunu içermektedir.





**Şekil 4. 9.** FIR-KF algoritmasının sonuçları

Şekil 4.10'da gürültülü sinyal önce KF ile tabi tutulmuş daha sonra tahmin edilen bu sinyal FIR filtresi ile filtrelenmiştir. KF-FIR algoritmasının hata oranı %0.802 olarak bulunmuştur. KF ile elde edilen tahmin sonucundaki dalgalanmalar FIR filtresi ile azaltılmıştır. Mavi ile çizdirilen kısım KF ile tahmin edilen sonucu içerir. Kırmızı ile çizdirilen kısım ise KF'ne tabi tutulan sinyalin FIR filtresi ile filtrelenmiş sonucu içermektedir.



**Şekil 4. 10.** KF-FIR filtresi algoritmasının sonuçları

FIR filtresi kullanılan algoritmada dalgalanmanın daha az olduğu grafiklerle desteklenmiştir.

**Tablo 5.** Filtreleme sonuçları

Filtreleme Yöntemi	KF	KF-FIR Algoritması	FIR-KF Algoritması
Hata oranı	%3.35	%0.802	%0.134

Tablo 5'te gösterildiği üzere gürültülü sinyal verisine FIR-KF algoritmasının uygulanmasıyla oluşan hata oranı diğer algoritmaların hata oranlarına göre daha azdır.

#### 4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dinamik ortamda tartım işlemi özellikle endüstriyel alanda birim zamanda tartılan ürün sayısını artırarak tartım işlemini hem ekonomik hem de hızlı şekilde gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda iş yükünü de ciddi ölçüde azaltmıştır. Bu sebepten dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Dinamik tartımın avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Dinamik ortamda cisimlerin tartılmasıyla oluşan sinyale gürültüde eklenir ve sonuca yansır. Sonuçlar yanıltıcı olabilir bu nedenle tahmin algoritması geliştirilerek sonuçlarda iyileştirmeler sağlanmıştır.

Bu tezde ağırlıkları farklı olan cisimlerin hareketli alanda tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı ağırlıktaki cisimler tartılırken gürültünün de eklenmesiyle yanıltıcı sonuçlar verebilir. Bu durumu engellemek için Kalman filtresi kullanılmış ve bir sonraki tahmin için bir değer üretmiştir. Kalman filtresinin sürekli değişen sistemlerde durum tahmininde birçok avantajı vardır. (Pitawala, 2020) Kalman filtre kazancı, hesaplamalarının her adımında güncellendiği için kazanç faktörü sayesinde hata en aza indirilir ve daha doğru tahmin verileri elde eder. Kalman filtresi pratikte çok faydalı bir yöntem olmakla birlikte teorik yönden de güçlüdür. Çünkü diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında tahmin verisindeki hatayı minimize eden tek filtredir. (Çayıroğlu, 2012) Deneysel sonuçlardan da görüldüğü üzere KF ile FIR filtresi uygulanarak karşılaştırılmıştır. FIR-KF algoritmasının sonucu diğer algoritmalara oranla daha doğru sonuçlar vermiştir. Gerçekleştirilen tahmin algoritması ile en az hata oranıyla tahmin yapılmış ve sonuçlar grafiklerle desteklenmiştir.

Ağırlıkları farklı cisimlerin Kalman filtresi yardımıyla tahmin edilmesi başarılı bir sonuç gösterse de geliştirilmesi gereken yönleri de mevcuttur. Ağırlıkları ortalama olarak seyreden durum kestirimlerde daha doğru sonuçlar vermiştir ancak anlık ağırlık değişimlerinde durum kestirimi yaparken ortalama ağırlığa göre daha az başarılı olmuştur. Bu sorunun önüne geçebilmek için Kalman filtresi algoritmasında düzenlemeler yapılabilir. Ayrıca bu sistem daha profesyonel alanlarda denenmelidir. Farklı ürünlerin tek bir dinamik tartım sisteminde sınıflandırma işlemi gerçekleştirilebilir. İlerleyen zamanlarda bu sisteme bir yapay zekâ eklenerek tartımı yapılacak ürünün fiziki durum kontrolü sağlanıp ayrı bir sınıf da oluşturulabilir.

## KAYNAKÇA

- Admin. (2014, 01). *Kalman filtresi uygulamaları*. Wordpress: [https://kasnakoglu.files.wordpress.com/2014/01/ders7\\_ck01.pdf](https://kasnakoglu.files.wordpress.com/2014/01/ders7_ck01.pdf) adresinden alınmıştır
- Admin. (2019). *Arduino Nedir? Robotik Sistem:* [https://www.robotiksistem.com/arduino\\_nedir\\_arduino\\_ozellikleri.html](https://www.robotiksistem.com/arduino_nedir_arduino_ozellikleri.html) adresinden alınmıştır
- Admin. (2020, Haziran 22). *Geçmişten Bugüne Tartı Kullanımı*. Terazi Deposu: <https://blog.terazideposu.com/gecmisten-bugune-tarti-kullanimi/> adresinden alınmıştır
- Admin. (2020, Haziran 22). *Geçmişten günümüze tartı kullanımı*. Terazi Deposu: <https://blog.terazideposu.com/gecmisten-bugune-tarti-kullanimi/> adresinden alınmıştır
- Admin. (2021, 09 09). *Arduino Nedir? Nasıl Çalışır? Ne İşe Yarar? ve Özellikleri*. Robocombo: <https://www.robocombo.com/blog/icerik/arduino-nedir-arduino-ile-neler-yapilir> adresinden alınmıştır
- Admin. (tarih yok). *Arduino Uno*. Farnell: <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf> adresinden alınmıştır
- Admin. (tarih yok). *ESİT*. [https://www.esit.com.tr/tr/yuk\\_hucresi\\_loadcell\\_nedir\\_nasil\\_calisir/blog/3](https://www.esit.com.tr/tr/yuk_hucresi_loadcell_nedir_nasil_calisir/blog/3) adresinden alınmıştır
- Admin. (tarih yok). *HX711*. Alldatasheet: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1132222/AVIA/HX711/689/6/HX711.html> adresinden alınmıştır
- Admin. (tarih yok). *Wheatstone Köprüsü*. diyot.net: <https://diyot.net/wheatstone-koprusu/> adresinden alınmıştır
- Aldawoodı, S. O. (2022). *Power system estimation based on Kalman filter and artificial neural network*. İstanbul.
- Ankışhan, H., Efe, M., & Özbek, L. (2010). Renkli Gürültülü Ses Sinyali İyileştirilmesine İkili Kalman Filtre Yaklaşımı. *IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference* (s. 633-636). Diyarbakır: IEEE.
- Anonim. (2022, Temmuz 10). *Hürriyet*. Hürriyet: <https://www.hurriyet.com.tr/egitim/dinamometre-nedir-nasil-yapilir-ve-calisir-dinamometre-neyi-olcer-42099104> adresinden alınmıştır
- Anonim. (tarih yok). *Load Cell Nedir?* Tunasistem: <https://www.tunasistem.com.tr/load-cell-nedir> adresinden alınmıştır
- Baker, B. (2011). How delta-sigma ADCs work, Part 1. *Analog Applications Journal*, 13-16.

- Baker, B. (2011). How delta-sigma ADCs work, Part 2. *Analog Applications Journal*, 5-7. Data converter. adresinden alınmıştır
- Balanchandran, W., Halimic, M., & Enab, Y. (2002, Ağustos 6). Fuzzy Logic Estimator for Dynamic Weighing System . *IEEE*, s. 2123-2128.
- Batik, Z. (2011). *Sayısal Filtre Tasarım Yöntemleri ve Performans Analizleri*. Sakarya.
- Bayramlı, B. (2016, Ocak 25). *Kalman Filtresi*. Wikipedia: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_Filtresi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kalman_Filtresi) adresinden alınmıştır
- Bulut, Y., & Ünal, B. (2020). Process Noise Source Localization Using Kalman Filter. *Bilim, Teknoloji ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi*, 19-24.
- Çalışkan, A. (2020, Nisan 15). *Kalman Filtresi nedir?* Medium: <https://medium.com/@syndrome/kalman-filter-nedir-51c38a12c423> adresinden alınmıştır
- Çayıroğlu, İ. (2012). Kalman filtresi ve programlama. *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*.
- Dağ, O. K. (2013, Nisan 07). *Dijital Filtre Tasarımı Giriş*. Elektrik Port : [https://www.elektrikport.com/universite/dijital-filtre-tasarimi-giris-\(digital-filter-design\)-elektrikport-akademi/8232#ad-image-0](https://www.elektrikport.com/universite/dijital-filtre-tasarimi-giris-(digital-filter-design)-elektrikport-akademi/8232#ad-image-0) adresinden alınmıştır
- Fujii, K. (2013). *Extended Kalman Filter*. The ACFA-Sim-J Group.
- G., E. (2011, Aralık). M.Ö. II.Bin Anadolu Terazileri Kefeleri Hakkında Gözlemler. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, s. 35-44.
- Guo, J., Huang, W., & Williams, B. (2014). Adaptive Kalman filter approach for stochastic shortterm traffic flow rate prediction and uncertainty quantification. *Elsevier*.
- Gülbaş, M. (2022). *Dynamic Weighing Method for Checkweigher*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Güney, S., & Bilen, M. (2016). Mobil Robot Navigasyonu için Kestirim Algoritmalarının Karşılaştırılması. *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference*. Zonguldak: IEEE.
- Halimic, M., & Balachandran, W. (1995). Kalman Filter for Dynamic Weighing System. *IEEE*.
- Hashlamon, I., & Erbatur, K. (2016, 1 1). An improved real-time adaptive Kalman filter with recursive noise covariance updating rules. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, s. 524-539.
- İçöz, C. (2022). *USE OF EXTENDED KALMAN FILTERING FOR BATTERY MANAGEMENT*. Yeditepe Üniversitesi.
- İlvan, A., & Bostancı, B. (2021). İnsansız Hava Araçları İçin Düşük Bütçeli INS/GNSS Sistemi Entegrasyonunda Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *18. Türkiye Harita Bilimsel Ve Teknik Kurultayı*. Ankara: ResearchGate.

- Julier, S. J., Uhlmann, J. K., & Durrant-Whyte, H. F. (1995). A new Approach for Filtering Nonlinear Systems. *Proceedings of the American Control Conference*, (s. 1628-1632). Washington.
- Karasalo, M., & Hu, X. (2011, 08 8). An optimization approach to adaptive Kalman filtering. *Elsevier*, s. 1785-1793.
- Köksal Babacan, E., Özbek, L., & Biçer, C. (2011). Uyarlı Kokusuz Kalman Filtresi. *BAÜ Fen Bil. Ens. Dergisi Cilt 13(1)* , 59-67.
- Kutlu, C., & Arserim, M. A. (2012). Spektral çıkarma tabanlı kalman filtresi ile. *Mühendislik Dergisi*, 49-59.
- Li, Q., Chen, L. F., Nan, & Jia, Z. (2013). A Data processing algoritm based on vehicle weigh-in-motion systems. *2013 Ninth International Conference on Natural Computation (ICNC)* (s. 227-231). China: IEEE.
- Matthies, L., & Kanade, T. (1989). Kalman Filter-based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences . *Kluwer Akademic Publishers*, 209-237.
- Meixedo, A., Gonçalves, A., Çalçada, R., Gabriel, J., Fonseca, H., & Martins, R. (2015). Weighing in Motion and Wheel Defect Detection of Rolling Stock. *3rd Experiment International Conference (exp.at'15)*, (s. 86-89). Portugal.
- Mohammed, Y. M., & Uddin, N. (2018). Acceleration-based bridge weigh in motion. . *Bridge Structures*, s. 131-138.
- Muhammed, A., & Schwarz, K. (1998, 11 21). Adaptif Kalman Filtering for INS/GPS. *Journal of Geodesy*, s. 193-202.
- Niedzwiecki, M., & Wasilewski, A. (1996). Application of adaptive filtering to dynamic weighing of vehicles. *Elsevier*.
- Oğuz, A. E., & Temeltaş, H. (2013). Genişletilmiş Kalman Filtresi (Gkf) Tabanlı Uçak Üzeri. *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi Cilt 6 Sayı 2*, 69-74.
- Pitawala, S. (2020). State estimation for dynamic weighing using Kalman filter. *5th International Conference on Mathematical Applications in Engineering*. IOP Publish.
- Rehman, T., Tahir, W., & Lim. (2016). Kalman Filtering for Precise Mass Flow Estimation on a Conveyor Belt Weigh System. *Springer Link*.
- Simon, D. (2001). Kalman Filtering. D. Simon içinde, *Empedded Systems Programming* (s. 72-79). ABD.
- Sinchai, S., Saechia, S., Limpiti, T., Koseeyaporn, J., & Wardkein, P. (2014). Estimating an optimal setpoint to lessen errors in filling weighing system based on Kalman filtering. *IEEE*.
- Varmış, S. (2021, 08 07). *Arduino Pinleri ve Fonksiyonları*. elektrikport: <https://www.elektrikport.com/universite/arduino-pinleri-ve-fonksiyonlari/23261#ad-image-0> adresinden alınmıştır
- Vural, C. (2022). *Adaptif kalman filtresi kullanımı ile gerçek zamanlı yaya takibi*.

- Welch, G., & Bishop, G. (1997). An Introduction to the Kalman Filter. *Springer*, 1-15.
- Woods, J. W., & Radewan, C. H. (1977). Kalman filtering in two dimensions. *IEEE Transaction on information theory*, 473-482.
- Yanık, M. (2017). *Dinamik Ağırlık Ölçümü için Filtre Tasarımı*. Afyon Kocatepe Üniversitesi.

