

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DAĞITIK PASİF SENSÖR DİZİNLERİ İLE KAZAZEDE KONUM TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike GİRGIN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DAĞITIK PASİF SENSÖR DİZİNLERİ İLE KAZAZEDE KONUM TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melike GİRGIN
(504201329)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tayfun AKGÜL

OCAK 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**VICTIM LOCATION DETECTION WITH DISTRIBUTED
PASSIVE SENSOR ARRAYS**

M.Sc. THESIS

**Melike GİRGIN
(504201329)**

Department of Electronical and Communication Engineering

Telecommunication Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Tayfun AKGÜL

JANUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504201329 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Melike GİRGİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DAĞITIK PASİF SENSÖR DİZİNLERİ İLE KAZAZEDE KONUM TESPİTİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Tayfun AKGÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Umut FIRAT**
TÜBİTAK BİLGEM

Doç. Dr. Hacer ATAR YILDIZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Ocak 2024**
Savunma Tarihi : **26 Ocak 2024**



ÖNSÖZ

Laboratuvarının kapılarını bana açarak hem akademik yolda hem de çalışma hayatımda destek veren, bilgi ve tavsiyelerini hiçbir zaman esirgemeyen; sanatsal ve akademik kişiliğinin getirdiği mükemmel fikirleriyle ufkumu açan; bana benden daha fazla güvenen ve tezimin gerçekleşmesinde büyük emek ve desteği olan Prof. Dr. Tayfun AKGÜL'e teşekkür ederim.

İTÜ ARIS LAB ailemizin kemik kadro üyelerinden ve her türlü konuda destek için yanımda hazır bulunan Eren Taha YÜZGEÇ'e; yüksek lisansımın son senesinde tanışmamıza rağmen bu tezin şekillenmesinde her türlü desteğini, bilgisini ve yazmamdaki motivasyonumu arttıran Aseel ALMASHAYEK'e; ve ekibimizin çalışan üyeleri Bekir OKUDURLAR, Kübra ŞAHİN ve Şeyma ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında moral ve motivasyonları ile destek sağlayan akıl hocalarım babam Adem GİRGİN'e, annem Hatice GİRGİN'e ve kızkardeşim Zeynep GİRGİN'e; ve manevi kızkardeşlerim Berfu ve Hesna ÇELEBİ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışma kısmen İTÜ BAP tarafından MÇAP-2023-44493 nolu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

OCAK 2024

Melike GİRGİN
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xviii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 Sismik sinyaller ve sensörler	2
1.2.2 Konum tespiti	3
1.3 Hipotez	6
2. YÖNTEM	7
2.1 Varış Zaman Farkı	8
2.2 Chan Yöntemi	10
2.3 SO-TDOA Yöntemi	13
2.3.1 Bölgelerin belirlenmesi	14
2.3.2 Bölgelerin ve kaynağın karakteristik vektörü	15
2.3.3 Konum tespiti	19
3. SINAMALAR	21
3.1 Hibrit Yöntem Sinamaları	28
4. DENEYLER-GERÇEK ZAMANLI TESTLER	31
5. SONUÇLAR	37
5.1 Önerilen Çalışmalar	38
KAYNAKLAR	39
EKLER	43
EK A : Yöntemlere Ait Ara Yüz	45
ÖZGEÇMİŞ	47

KISALTMALAR

AG	: Alış Gücü (Received Signal Strength-RSS)
DEKK	: Doğrusal En Küçük Kareler (Linear Least Squares-LLS)
EKK	: En Küçük Kareler Tahmin Edicisi (Least Squares Estimator-LSE)
EKOK	: En Küçük Ortalama Karesel Hata (Minimum Mean Square Error-MMSE)
GA	: Geliş Açısı (Angle of Arrival-AOA)
GCC-PHAT	: Faz Dönüşümüyle Genelleştirilmiş Çapraz Korelasyon
KA	: Küresel Aradeğerleme (Spherical Interpolation-SI)
ML	: En Büyük Olabilirlik (Maximum Mikelihood-ML)
MSE	: Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error)
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SO-TDOA	: Sign of the measured TDOA
VZ	: Varış Zamanı (Time of Arrival-TOA)
VFF	: Varış Frekans Farkı (Frequency Difference of Arrival-FDOA)
VZF	: Varış Zaman Farkı (Time Difference of Arrival-TDOA)



SEMBOLLER

(x, y)	: Kaynak konumu
(x_i, y_i)	: i. sensör konumu
d_i	: i. sensör ve kaynak arasındaki uzaklık
d_{ij}	: i. ve j. sensörler arasındaki uzaklık
$s_i(n)$	: i. sensöre ait sismik sinyal
t_i	: i. sensöre ait zaman gecikmesi
$g_i(n)$	: i. sensöre ait ortam gürültüsü
$x(n)$	: Gürültüsüz sinyal
t_{ij}	: i. ve j. sensörler arasındaki zaman gecikmesi farkı
$E[\cdot]$	: Beklenen değer
$R_{s_i, s_j}(\tau)$	: Çapraz ilinti
$\mathbf{a}_i$	: Sensör konum vektörü
$\mathbf{a}_k$	: Kaynak konum vektörü
c	: Yüzeyin sinyal yayılım hızı
K_{a_k}	: Kaynak orjin arasındaki uzaklık
K_{a_i}	: Sensör orjin arasındaki uzaklık
$(\cdot)^T$	: Transpose
M	: Sensör sayısı
$\mathbf{z}$	: Bilinmeyen değerleri içeren vektör
$\varepsilon, \varepsilon'$	: Hata vektörü
$\mathbf{Q}$	: Uzaklık vektörünün kovaryans matrisi
$\mathbf{B}$	: Sensör ve konum arası uzaklıkların vektörü
$\hat{d}_i$	: i-inci sensör ve kaynak arasındaki uzaklık kestirimi
$\mathbf{W}$	: Gürültü kovaryans matrisi
$\hat{\mathbf{p}}^{Chan}$	: Chan yöntemine ait konum tahmini
$\mathbf{G}_m$	: m. sensörün konum vektörü
r_{ki}, r_{kj}	: Sensör ve üçgen bölge merkezleri arasındaki uzaklık
$\mathbf{v}_b$	: Bölgenin karakteristik vektörü
$\mathbf{v}_k$	: Kaynağın karakteristik vektörü
$sgn(\cdot)$	: İşaret operatörü
$\mathbf{d}_H$	: Hamming mesafesi
$\oplus$	: Dışlayıcı veya - xor
$\mathbf{M}_r$	: Hamming mesafelerinin en az olduğu bölgeler kümesi
$\hat{\mathbf{p}}^{SOR}$	: SO-TDOA yöntemine ait konum tahmini
$y(t)$	: Sönümlü sinyal
γ	: Sönümlenme faktörü
$g(t)$	: Beyaz gürültü
σ	: Gürültünün değişintisi
$P_{x(t)}$	: Sinyalin gücü
e	: Tahmin edilen ve gerçek konum arasındaki hata
$(\hat{x}, \hat{y})$	: Kullanılan yöntemle tespit edilen konum



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yöntemlerin farklı dizinlerdeki MSE değerleri çizelgesi. **29**





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Enkazda bulunan kazazedelerin ve arama-kurtarma ekiplerinin görseli.	2
Şekil 1.2 : Jeofon sensörünün (a) iç tasarım ve (b) üretilen bir sensörün iç kesiti..	3
Şekil 2.1 : Yöntemlerin işlem adımlarına ait blok çizeneği.	7
Şekil 2.2 : Sensörlerin 2 boyutlu düzlemde konumlandırılması ve sensörler arası uzaklığa ait bilgiler görselleştirilmiştir.	8
Şekil 2.3 : SO-TDOA konum tespiti örnek gösterim.	14
Şekil 2.4 : (a) Sensörler ile Delaunay üçgenlemesi sağladığı koşul ve (b) Delaunay üçgenleme şartını sağlamayan durum (G_4 sensörü $\triangle G_1 G_2 G_3$ üçgeninin daire içinde kalmıştır.) görselleştirilmiştir.	15
Şekil 2.5 : (a) Sensörler ile Delaunay üçgenlemesi, (b) Sensör ve ilk merkezler ile Delaunay üçgenlemesi (birinci iterasyon) (c) Sensör ve ikinci merkezler ile Delaunay üçgenlemesi (ikinci iterasyon)	16
Şekil 2.6 : Üçgen bölgelere ayrılmış alanda kazazedeye ait v_s sinyalinin i . ve j .jeofonlara varış zamanları t_i ve t_j (kırmızı kesik çizgi); jeofonların üçgen bölge merkezi c_k 'ya uzaklıkları r_{ki} ve r_{kj} (sarı kesik çizgi) görselleştirilmiştir.	17
Şekil 2.7 : Beş adet sensör (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5) ile bölünmüş alanda (a) R_1 bölgesinin merkezi c_1 'e sensörlerin uzaklıkları $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}$ ve (b) kaynak β_1 'in sensörlere varış zamanları t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 gösterilmektedir.)	18
Şekil 3.1 : (a) Karesel geometriye sahip sensör dizin yerleşimi; (b) dağıtık konuşlandırılmış sensör dizini.	21
Şekil 3.2 : (a) İTÜ İnşaat Fakültesi'ne ait katlı beton bloklarda yapılan test alanının görseli; (b) sensör konumları ve dürtü sinyalinin vurulduğu yeri gösteren test alanının modeli (c) sinyalin Genlik-Zaman grafiği. ...	22
Şekil 3.3 : Sensöre ait 5 dB SNR sahip gürültülü sinyalin Genlik-Zaman grafiği..	23
Şekil 3.4 : 1000 iterasyonlu Monte-Carlo sınamasında (a) Kare ve (b) Dağıtık sensör dizininde elde edilen MSE grafiği.	24
Şekil 3.5 : Chan yöntemi kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).....	25
Şekil 3.6 : SO-TDOA kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).	26
Şekil 3.7 : Chan yöntemi kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).....	26

Şekil 3.8 : SO-TDOA yöntemi kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).....	27
Şekil 3.9 : SO-Chan kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).	28
Şekil 3.10 : SO-Chan kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).	29
Şekil 4.1 : İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği binasında gerçekleştirilen test anından bir görüntü.	31
Şekil 4.2 : (a) Kayıtçı ara yüzü; (b) Kayıt sisteminde kullanılan Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) ve jeofon sensör gösterilmektedir.	32
Şekil 4.3 : (a) Birinci sensör dizini ve (b) ikinci sensör dizinine ait testlerde kaynakların gerçek konumları kırmızı çarpılar ile gösterilmektedir. ...	32
Şekil 4.4 : Birinci sensör dizininde üç farklı noktadan (kırmızı daireler) vurulmuş ve SO-TDOA sonucu mavi alan ile Chan yöntemine ait sonuç ise yeşil daire ile gösterilmiştir.	33
Şekil 4.5 : İkinci sensör dizininde dört farklı noktadan (kırmızı daireler) vurulmuş ve SO-TDOA sonucu mavi alan ile Chan yöntemine ait sonuç ise yeşil daire ile gösterilmiştir.	34
Şekil A.1 : Çevrimdışı çalışan ara yüze ait tasarım.....	45

DAĞITIK PASİF SENSÖR DİZİNLERİ İLE KAZAZEDE KONUM TESPİTİ

ÖZET

Bu tezde dağıtık ve düzgün karesel geometride yerleştirilmiş sensör dizinlerinden toplanan verilerle hedef konum tespiti üzerine yapılan çalışmadan bahsedilmektedir. Çalışmamızda canlıların ürettiği sismik sinyaller ile konum tespiti gerçekleştiren yöntemlerin incelenmesi, karşılaştırılması ve sınamaları gerçekleştirilmiştir.

Özellikle deprem gibi bir doğal afette halihazırdaki sistemlerde bir uzmanın yaptığı dinleme ile tespit gerçekleştirilmektedir. Enkaz ortamındaki çevre etkileri göz önüne alındığında sadece dinleme ile yapılan sistemin eksikliği gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışmamızda, çöken binalarda enkaz altındaki canlıların yerlerini otomatik tespit eden bir sistemin geliştirilmesiyle arama-kurtarmacılara yardımcı olması hedeflenmiştir.

Araştırmamızda sismik aktiviteleri algılayan düşey bileşenli pasif jeofon sensörleri kullanılmıştır. Ön araştırmalarımızda geliştirdiğimiz sismik veri kayıt donanım sistemi kullanılarak yön tespiti üç sensör ile gerçekleştirilmiş fakat yöntemin eksikliklerinin gözlemlenmesi sonucunda hedef konumlandırma için literatür araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Sismik sinyaller ile tespit başarımının yüksek olduğu varış zaman farkları temelli Chan ve SO-TDOA konum tespit yöntemlerine ait araştırmalarımız ve sonuçlarımız bu çalışmamızda ele alınmıştır. Aynı zaman da herhangi bir deprem anında kullanılabilecek, hedef tespitini gerçekleştiren yöntemlerin ve sonuçlarının gösterildiği çevrimdışı çalışan ara yüzümüz de bu çalışmada sunulmuştur.

Arama-Kurtarmacılar kazazede arama esnasında bölgesel tespitleri yapmakta ve kazazedenin bulunduğu bölgede kurtarma faaliyetlerini göstermektedirler. Bu nedenle çalışmamızda bölgesel temelli hedef tespit yapan SO-TDOA yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem diğer konum kestirimlerinden farklı şekilde, sensörleri içeren alanın alt bölgelere bölünmesini ve hedefin bulunduğu bölgenin tespitini sağlamaktadır. Çalışmamızda dağıtık veya düzgün (kare, dikdörtgen gibi) geometrik dizinlerde hedef konumlandırmanın yapılması hedeflendiği için jeoloji araştırmalarında yüzeyi üçgen bölgelere ayıran Delaunay üçgenleme yöntemi kullanılarak üçgen bölgeler ve merkezleri çıkarılmıştır. Sonraki aşamada, hedef sinyalinin sensöre varış zamanı kullanılarak kaynak karakteristik vektörü; ve her üçgen bölgesinin merkezleriyle sensörler arasındaki uzaklıklarının hesaplanması ile bölge karakteristik vektörü hesaplanmıştır. Karakteristik vektörler bölge-sensör ve kaynak-sensör arasındaki yakınlık veya uzaklık bilgisini içeren bir değeri ortaya koymaktadır. Üçgen bölgelerin kaynak karakteristik vektörü ile bölge karakteristik vektörü arasındaki benzerlik ilişkisi Hamming mesafesi ile hesaplanmış ve en az mesafeye sahip üçgen bölge veya bölgeler hedef konumunun bölgesi, üçgen bölgelerin merkezi ise tahmini konum şeklinde kestirilmiştir.

Chan yöntemi çok sensörlü dizinlerdeki performansı ve noktasal konum tespitini gerçekleştirebilmesi nedeniyle yöntemlerimizden bir diğeridir. Sensörlerin varış zaman farklarından elde edilen doğrusal denklemlerin çözümünde işlem yükü gerektirmeyen, yinelemesiz ve yüksek başarımlı yaklaşım sunmaktadır. Yöntem, varış zaman farkından elde edilen denklemlerle bilinmeyen konum verilerin ön işleme ve iyileştirmelerini içeren iki adımdan oluşmaktadır. En büyük olabilirlik kestirimi ve genelleştirilmiş en küçük kareler yöntemi ile hata payı düşük konum tespiti elde edilmektedir. Çalışmamızda SO-TDOA yöntemiyle karşılaştırılması ve dağıtık sensör dizinindeki başarımlı gözlemlenmesi için literatürde performansı kanıtlanmış Chan yöntemi seçilmiştir. Bu çalışmada, aynı zamanda Chan yönteminin dağıtık ve karesel yerleştirilmiş sensör dizinleri ile yapılan simülasyon sonuçlarıyla gerçek zamanlı sonuçları sunulmuştur.

Çalışmamızda, yöntemlere ait sınamalar ve gerçek zamanlı testler yapılmıştır. Sınamalar ve testlerde kullanılan sensör dizinleri düzgün karesel ve enkazların düzensizliği göz önüne alınarak dağıtık yerleştirilmiş jeofon dizinlerini içermektedir.

Sınamalar için beyaz gürültülerin eklendiği farklı SNR değerlerine sahip sentetik veriler üretilmiştir. Kaynak konumları gelişigüzel verilmiş ve 1000 Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Chan ve SO-TDOA yöntemlerinin sınamalarına ait sonuçlar incelenmiştir. Kaynak konumları ve yöntemlerin hata değerleri arasındaki ilişkiyi incelemek için renk haritası kullanılmıştır.

İleriki çalışmalarımızdan, hibrit sisteme ait ön araştırmalarımız ve sınamaları gerçekleştirilmiştir. Hibrit sistemimiz SO-Chan yönteminde SO-TDOA ile bulunan üçgen bölgelerin merkez noktası, Chan yönteminin başlangıç koşulu şeklinde kullanılmış ve Chan algoritmasının işlem adımları ile SO-Chan'e ait konum tespiti gerçekleştirilmiştir. SO-Chan yönteminin konum tespit sonuçlarının hata değerleri ve renk haritası gözlemlenmiştir.

Sınamalar sonucunda yöntemlere bağlı şekilde sonuçların değişmektedir. Gürültünün ise hata değerlerini değiştirmedeği sınamalar sonucunda bulunmuştur. Sentetik veriler ile yapılan sınamalarda ortalama karesel sapmaları ve standart sapmaları hesaplandığında, düzgün kare geometrik dizinde Chan yöntemi SO-TDOA'ya göre daha az hata payı ile konum kestirimini gerçekleştirirken; dağıtık sensör dizininde ise SO-TDOA yönteminin başarımlının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hibrit SO-Chan yöntemimizin ise dağıtık dizinde Chan'den düşük fakat SO-TDOA'den yüksek; karesel dizinde ise Chan'den düşük hataya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Renk haritaları incelendiğinde ise Chan ve SO-Chan yöntemindeki yüksek hataya sahip yerlerin sensör etrafında; SO-TDOA yönteminde ise sensörlerle çevrili alan dışına çıkıldığında yüksek hataların yer aldığı görülmüştür.

Gerçek zamanlı testlerde, bina içerisine yerleştirilmiş farklı jeofon dizinlerine alt kattan dürtü sinyalleri gönderilmiştir. Bu testlerde jeofon verilerinin kaydedilebilmesi için İstanbul Teknik Üniversitesi Advanced Research on Intelligent Systems/Advanced Research on Images and Signals (ARIS) Laboratuvarında geliştirilen Kayıtcı sistemi, ADC (Analog-to-Digital Converter) ve jeofonlar kullanılmıştır. Chan ve SO-TDOA yöntemlerinin gerçek zamanlı verilerle yapılan testlerdeki kestirim sonuçları da çalışmamızda yer almaktadır. Gerçek zamanlı testlerde, SO-TDOA yönteminin konum

kestiriminde Chan yöntemine göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu testlere ait konum tespit sonuçları grafikler üzerinde sunulmuştur.

İleriki aşamada başarılı sonuç aldığımız SO-TDOA yönteminin yeni yöntemlerle geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, herhangi bir deprem anında kullanıma hazır sistemimiz ile anlık otomatik konum tespit sonuçlarını gösteren sistemin kurulması hedeflenmektedir.





VICTIM LOCATION DETECTION WITH DISTRIBUTED PASSIVE SENSOR ARRAYS

SUMMARY

This thesis investigates and develops distributed geophone array techniques for earthquake victim location detection. Test findings are discussed, and the developed and useful methodologies are compared and reviewed.

During natural disasters like earthquakes, an expert uses headphones to listen to geophone signals and determines the victim's approximate location based on sounds heard. This is how search and rescue operations are now set up. A system that relied just on listening was shown to have shortcomings when taking into account environmental factors in a debris situation. Therefore, the goal of this research is to create an automated system that will help with rescue and search operations by locating people who are buried behind debris.

Geophone sensors have been used in our study to detect seismic signals from victims. Geophones are non-powered, passive sensors. Low-frequency vertical component geophones were selected for this study in order to improve victim movement detection beneath debris. In our earlier research, we created a hardware device for collecting seismic data of three geophone sensors to detect the victim's direction. However, after observing results of the hardware system, new research investigations for target positioning were conducted. Methods based on received signal strength, angle of arrival, frequency difference of arrival, and time difference of arrival were studied. Following our investigation, Chan and SO-TDOA (Signal of The Measured Time-Difference of Arrival) location detection algorithms based on time difference of arrival were created and their outcomes were compared. To display the location detection results of the methods, an offline interface was also built, which may be utilized for target detection during earthquakes.

During victim search operations, search-and-rescue personnel do area research on debris. Following that, they carry out rescue operations in the region where the victim was found. Consequently, the region-based victim detection SO-TDOA approach is one of the techniques used in this work. In contrast to previous location predictions, this application uses sub-regional mapping to determine the target's location inside the sensor-containing area. The Delaunay triangulation technique, which divides surfaces into triangular sections and is frequently used in geological research, was chosen for this technique because it allowed us to accomplish target positioning in distributed or geometric arrays. These Delaunay triangles' centers and edges were taken out for use in the following steps. The following stage involved calculating the regional characteristic vector by measuring the distances between each triangular region's center and the sensors, and calculating the source characteristic vector using

the target signal's arrival time at the sensor. These characteristic vectors provide a value indicating the proximity or distance information between the region-sensor and source-sensor. The problem of different surface seismic signal speeds due to surface differences in debris was resolved by producing a common value independent of speed in these characteristic vectors. The target location region was determined by calculating the Hamming distance between the source characteristic vector of the triangular regions and the regional characteristic vector. The region with the lowest estimated distance was designated as the target location region.

The Chan method, renowned for its performance in multi-sensor arrays and its ability to conduct precise point location detection, is another method we explored. This method offers a computation-free, iterative-free, and high-efficiency approach for solving linear equations derived from sensors' time differences of arrival. It involves two steps: preprocessing and refining of unknown location data obtained from the equations. Accurate location estimates are achieved using maximum likelihood estimation and generalized least squares methods. In our study, the Chan method was selected for comparison with the SO-TDOA method, to observe its performance in distributed sensor arrays, as its effectiveness has been proven in literature. This study also presents simulation results with distributed and geometrically placed sensor arrays using the Chan method, along with real-time results.

In our study, trials and real-time tests of the methods have been conducted. The sensor arrays used in the trials and tests include geophone arrays placed in a square geometry, as well as geophone arrays positioned in a distributed sensor array geometry, taking into account the irregularity of debris.

For the trials, synthetic data with different SNR values, to which white noise has been added, were generated. Monte Carlo tests, where the location is given randomly in each iteration, were performed with 1000 iterations. The results of the Monte Carlo tests for the Chan and SO-TDOA methods have been examined. A color map has been used to investigate the relationship between source locations and the error values of the methods. The color map for two different geometries has been examined.

From our future work, preliminary research and trials for the hybrid system have been conducted. Our hybrid system SO-Chan uses the center points of the triangles found by SO-TDOA as the initial condition for the Chan method, and the location detection has been carried out with the procedural steps of the Chan algorithm. The error values and color map trials of the location detection results of the SO-Chan method have been examined.

The trials have shown that the results vary depending on the methods. It has been found in the trials that noise does not change the error values. When the mean square deviations and standard deviations are calculated in the trials with synthetic data, it has been determined that the Chan method performs location estimation with less error margin in the square sensor geometry compared to SO-TDOA; however, in the distributed sensor array, the performance of the SO-TDOA method was found to be higher. It has been observed that our hybrid SO-Chan method has lower errors in the distributed array than Chan but higher than SO-TDOA; in the square array, it has lower errors than Chan. When examining the color maps, it was seen that the areas with high

error in the Chan and SO-Chan methods are around the sensors; in the SO-TDOA method, high errors were located outside the area surrounded by sensors.

In real-time tests, impulse signals were sent from the floor below to different geophone arrays placed inside the building. In these tests, a Recorder system, ADC (Analog-to-Digital Converter), and geophones developed at Istanbul Technical University Advanced Research on Intelligent Systems/Advanced Research on Images and Signals (ARIS) Laboratory were used to record the geophone data. The estimation results of the Chan and SO-TDOA methods with real-time data are also included in our study. In real-time tests, it was observed that the SO-TDOA method gave more successful results in location estimation compared to the Chan method. The location detection results of these tests have been presented on graphs.

This study is partly supported by the Istanbul Technical University BAP (Scientific Research Projects Coordination Unit) under the research project number MÇAP-2023-44493. Future phases aim to enhance the successful SO-TDOA method with new techniques. Particularly, developing a system for three-dimensional location detection, automatic extraction of sensor locations, and potentially using hybrid systems form our future work. The design of a user-friendly interface for our algorithms and their integration with the seismic and acoustic hardware system developed at the ARIS Laboratory are among our upcoming projects. This will enable us to establish a system ready for use in any earthquake situation, capable of displaying instant automatic location detection results.



1. GİRİŞ

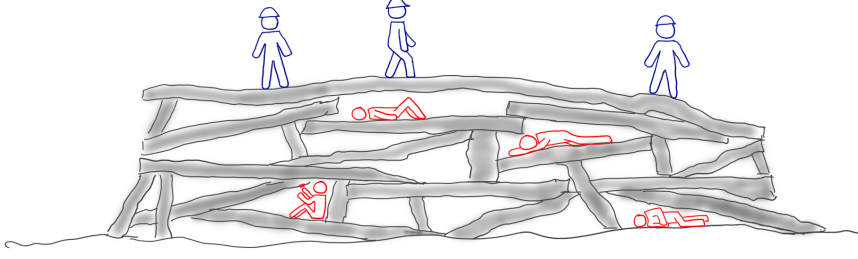
Canlı (insan, hayvan gibi) ve cansız (araba, uçak, gibi) varlıklar hareketleri sonucu yerküre üzerinde sismik sinyal üretmektedir. Bu varlıkların algılanması, kullanılan sensörün frekans limitleri, hassasiyet gibi özelliklerine bağlı gerçekleştirilebilmektedir. Sismik sinyaller farklı yöntem ve yordamların incelenmesiyle sinyal kaynağının tespiti, tanınması ve geliş yönü tespiti gibi birçok farklı özellikler çıkarılabilmektedir. Bu nedenle, farklı araştırma alanlarında ve teknolojik gelişmelerde de sismik sensörler ve veriler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Çalışmamızda da sismik sensörlere gelen canlı sismik sinyallerinin tespiti üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir.

Sismik sensörle yapılan çalışmamızın amacı, literatür araştırmaları ve hipotezi aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Sismik sinyaller günümüzde yaygın şekilde deprem büyüklüğü hesaplamaları için kullanılmakta iken deprem sonrası yıkılan binalarda canlı aramasında da kullanılabilmektedir. Enkaz altında kalmış bir canlının herhangi bir cisme vurması veya hareket etmesi sonucu sismik sinyal üretebilmektedir. Jeofonlar ve veri kayıt donanımı ile toplanan bu sinyaller ile canlı tespiti ve hatta canlının konumunun tespiti gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 1.1’de bir enkazda kazazedelerin konumları, yardım için seslenişleri veya bir zemine vuruşları ve arama kurtarma ekiplerinin enkaz üstündeki keşif çalışması temsil edilmektedir.

Günümüzde sismik sensörleri içeren sistemler kullanılmakta fakat uzman operatöre bağlı bir karar mekanizması ile canlı konumu tespit edilmektedir. Deprem gibi bir doğal afette çevrenin karmaşıklığı düşünüldüğünde, birçok canlının kurtarılması için uzman dinleyiciden bağımsız, dağıtık sensör dizinleri içeren, otomatik bir sistem gereklidir. Çalışmamızda dağıtık veya düzgün geometriyle (kare, dikdörtgen gibi)



Şekil 1.1 : Enkazda bulunan kazazedelerin ve arama-kurtarma ekiplerinin görseli.

yerleştirilmiş sensör dizinlerinde kazazede konumunu veya bulunduğu bölgeyi tespit edebilen bir sistemin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

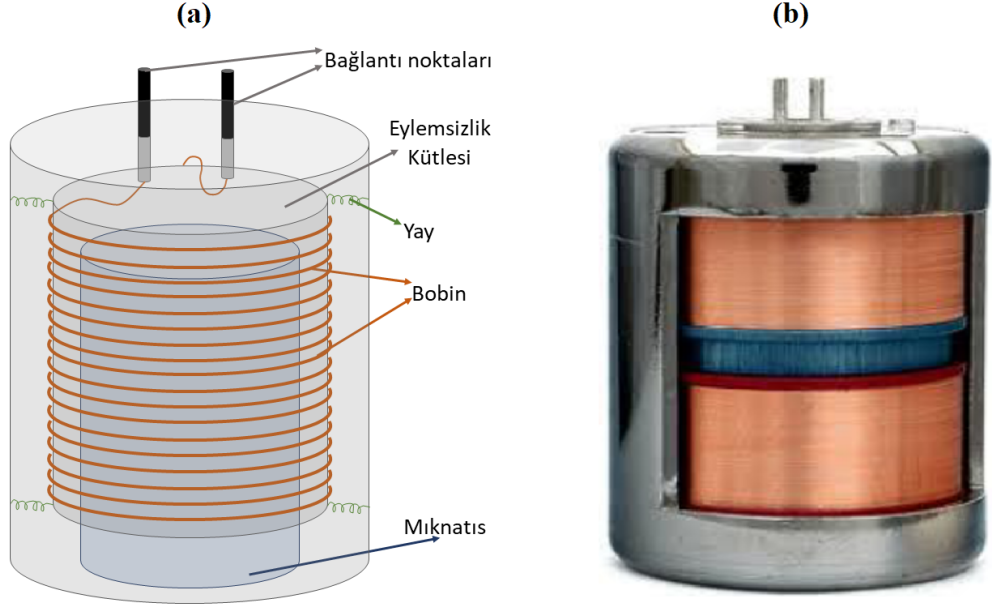
1.2 Literatür Araştırması

Çalışmamızda kullanılan sismik sinyaller ve sensörler ile konum tespit yöntemlerine ait literatür araştırmaları aşağıda açıklanmaktadır.

1.2.1 Sismik sinyaller ve sensörler

Sismik dalgalar yüzey ve cisim dalgası şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Çalışmamızda yer alan sismik sinyaller yüzey dalgaları şeklinde adlandırılmaktadır. Bu tür veya farklı sismik sinyal verilerinin toplanması için jeofon sensörleri kullanılmaktadır. Jeofon sensörleri gelen sismik dalgaları, içindeki mekanik-elektronik sistemler ile gerilime dönüştürmektedir. Şekil 1.2’de iç tasarımı ve kesiti verilen jeofon içerisinde mıknatıs ve eylemsizlik kütlesi (inertial mass) bulunmaktadır. Jeofon içerisindeki eylemsizlik kütlesi, zeminden gelen hareket ile yer değiştirir. Bu hareketin sonucunda eylemsizlik kütlesi etrafında sarılı sarımlar ve mıknatıs manyetik akım üretir [1].

Jeofonlar ortamdaki bir hareketin algılanmasında herhangi bir beslemeye ihtiyaç duymadığından pasif sensörlerdendir. Bu sensörlerin algılayacağı sismik sinyallerin gerilim çıktılarına dair özellikler elektromanyetik denklemlerle elde edilmekte ve tasarımları buna bağlı yapılmaktadır [1,2]. Jeofon verilerinde, etraftaki sismik hareketlere ait sinyaller yer aldığı gibi elektronik-mekanik sistem ve elemanlarından kaynaklı ürettikleri arka plan gürültüsü de bulunmaktadır [1]. Bu gürültüler veri analizlerini zorlaştırabilmektedir.



Şekil 1.2 : Jeofon sensörünün (a) iç tasarım ve (b) üretilen bir sensörün iç kesiti.

Kullanım alanına göre farklı bileşen (düşey ve yatay) ve frekanslarda jeofon sensörleri üretilmektedir. Jeofizikçiler genellikle deprem araştırmalarında sismik dalgaların yer değiştirmelerini hesaplamak için uygun doğal frekansa sahip jeofonlar kullanılmaktadırlar [2]. Aynı zamanda yerküre hareketlerinin incelendiği araştırmalarda zemindeki dikey hareketlerin gözlemleri düşey jeofonlar ile yapılırken yatay hareketler ise yatay jeofonlarla gözlemlenmektedir.

Çalışmamızdaki jeofon sensörleri, deprem gibi araştırmaların aksine canlılar ait sismik hareketlerin dinlenmesi için kullanılacaktır. Bu nedenle jeofonlar ile hassas dinlemenin yapılabilmesi için geniş bantta hassas frekans ölçümü yapabilen sensörlerin tercih edilmesi gerekir. Canlıların üreteceği dürtü sinyalleri yatayda bir yayılım yaptığı gibi yüzeye dik şekilde de sinyal iletilmektedir [3,4]. Düşey ve yatay jeofon sensörleriyle yapılan ön araştırmalarda düşey jeofon sensörlerinde dürtü sinyallerini daha rahat gözlemlendiği tespit edilmiş ve çalışmamızda düşey jeofonlar kullanılmıştır.

1.2.2 Konum tespiti

Günümüzde hedef konumlandırma ortam güvenliği, savunma sistemleri, sivil uygulamalar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Konum tespitinde kullanılan sistemler

aktif (enerji kaynağı ile çalışan) ve pasif (beslemeye gerek duymadan çalışan) şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Mikrofon, radar, jeofon, anten gibi sensörler ise bu araştırmalarda başlıca kullanılan sensörlerdendir. Sisteme ve yönteme bağlı şekilde en az iki ve üstü sensör dizini kullanılmaktadır. Sensör sayısı ve yerleşimi hedef konumlandırma önemli etkenlerdendir.

Konum tespiti için kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilen hesaplamaları temel alır.

- **Alış Gücü Hesaplaması (AG, Received Signal Strength-RSS):** Alış gücü ile gerçekleştirilen konum tespitleri, hedeften sensörlere gelen sinyalin güç bilgisi ile gerçekleştirilmektedir. Sensörlerden gelen güç bilgisinden hedef mesafesi kestirilmekte ve mesafelerin kesişimlerinden konum tespit edilmektedir. AG tabanlı konum kestiriminde doğrusal en küçük kareler (DEKK, Linear Least Squares-LLS), Gauss Süreci Bağlanması (Gaussian Process Regression) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kablosuz haberleşme, radar gibi uygulamalarda hedef sinyali, dış ortam gürültülerinden kaynaklı sönümlendiği görülmektedir. Sinyal gücünün azaldığı durumlarda sinyalin AG ile farklı yöntem ve algoritmalarla konum kestirim başarımını arttıran çalışmalar mevcuttur [5,6].
- **Geliş Açısı Hesaplaması (GA, Angle of Arrival-AOA):** Kaynağa ait sinyal, sensöre belirli bir açı ile gelmektedir. Sensörlere gelen sinyal açıları ve açılarının kesişimlerinin hesaplanması sonucunda konum tespiti gerçekleştirilmektedir. En az iki sensör ile kestirim yapılabilen fakat sensör sayısı arttıkça hata oranı azalmaktadır. En Küçük Kareler (EKK, Least Squares-LS), En Küçük Ortalama Kareler kestiricisi (EKOKK-Mean Square Error-MMSE), Kalman filtereli yöntemler de kestirimin hata oranını azaltmak için kullanılmaktadır [7]–[9].
- **Varış Frekansı Farkları Hesaplaması (VFF, Frequency Difference of Arrival-FDOA):** Doppler etkisi sonucu frekans değişiminin gözlemlendiği durumlarda, sensörler aynı sinyali konumlarından dolayı farklı frekansta algırlar. Varış frekansı farkları yöntemi de sensörlerin algıladığı frekansların farkları ile konum tespitini gerçekleştirmektedir [10]. VZF ile birlikte kullanıldığında gemi,

uçak gibi araçların konum tespitleri VZF, hız ve hareket yönünün çıkarımı VFF ile hesaplandığı çalışmalar bulunmaktadır [11,12].

- **Varış Zaman Farkları Hesaplaması (VZF, Time Difference of Arrival-TDOA):**

Varış zaman farkı da VFF'ye benzer şekilde sensörlere gelen sinyallerin zaman farklarının hesaplaması sonucu bulunur. Sinyallerin çapraz ilintilerinin hesaplanması ile sensörlerin VZF'leri bulunabilmektedir. AG ve GA'da yüksek performanslı konum kestirimi için önerilen LS, LLS, EKK, Küresel Aradeğerleme (KA, Spherical Interpolation-SI) gibi yöntemler VZF dayalı konum kestirimlerinde de kullanılabildiği gibi farklı hedef kestirim yöntemleri mevcuttur. [13]–[21]. Bu yöntem Bölüm 2.1'de detaylı anlatılmaktadır.

Sensörlere ait sinyal verilerinin eş zamanlanması (synchronization) ve ortam gürültülerinden etkilenme durumları, konum tespitinde kullanılan AG, GA, VFF ve VZF yöntemlerinin sonuçlarını etkilemektedir. Bu tür negatif etkileri azaltma ve konum tespit yöntemlerinin performanslarını arttırmak için metodların birlikte kullanıldığı hibrit sistemlere ait çalışmalar da mevcuttur [22,23].

Kazazede tespiti veya sismik konumlandırmada kullanılan sismik sinyaller diğer sinyal türlerine göre hedef sinyalin daha çabuk sönümlendiği veya gürültüden etkilendiği bir sinyal türüdür. Yüzey gürültüleri, yüzey üzerindeki veya yapısında bulunan sönümleyiciler hedefe ait sismik sinyalleri etkilemektedirler. Bu nedenle çalışmamızda alış gücü yönteminin sismik sinyallerdeki sönümlenme sorunundan kaynaklı yetersiz kalacağı gözlemlenmiştir. Sismik sinyaller ile konum tespiti çalışmaları incelendiğinde GA ve VZF'nin en yaygın kullanılan yöntemler olduğu tespit edilmiştir [24]–[26].

Araştırmalarımızın ilk aşamasında, jeofon sensörlerinden verilerin toplandığı bir donanım sistemi geliştirilmiştir. Konum tespiti için ilk aşamada en basit haliyle Faz Dönüşümüyle Genelleştirilmiş Çapraz Korelasyon (GCC-PHAT), GA yöntemleri denenmiş [27] fakat düşük başarımlı sonucu VZF'ye dayanan farklı yöntemler araştırılmıştır. İncelemelerimiz sonucunda, noktasal konum tespiti yapan Chan [17] ve enkazda kazazede aramasına uygun SO-TDOA [30] yöntemlerinin çalışmamızın

performansını arttıracakı öngörölmüş; uygulanan konum tespit yöntemlerine ait araştırmalar ve analizler bu çalışmada sunulmuştur.

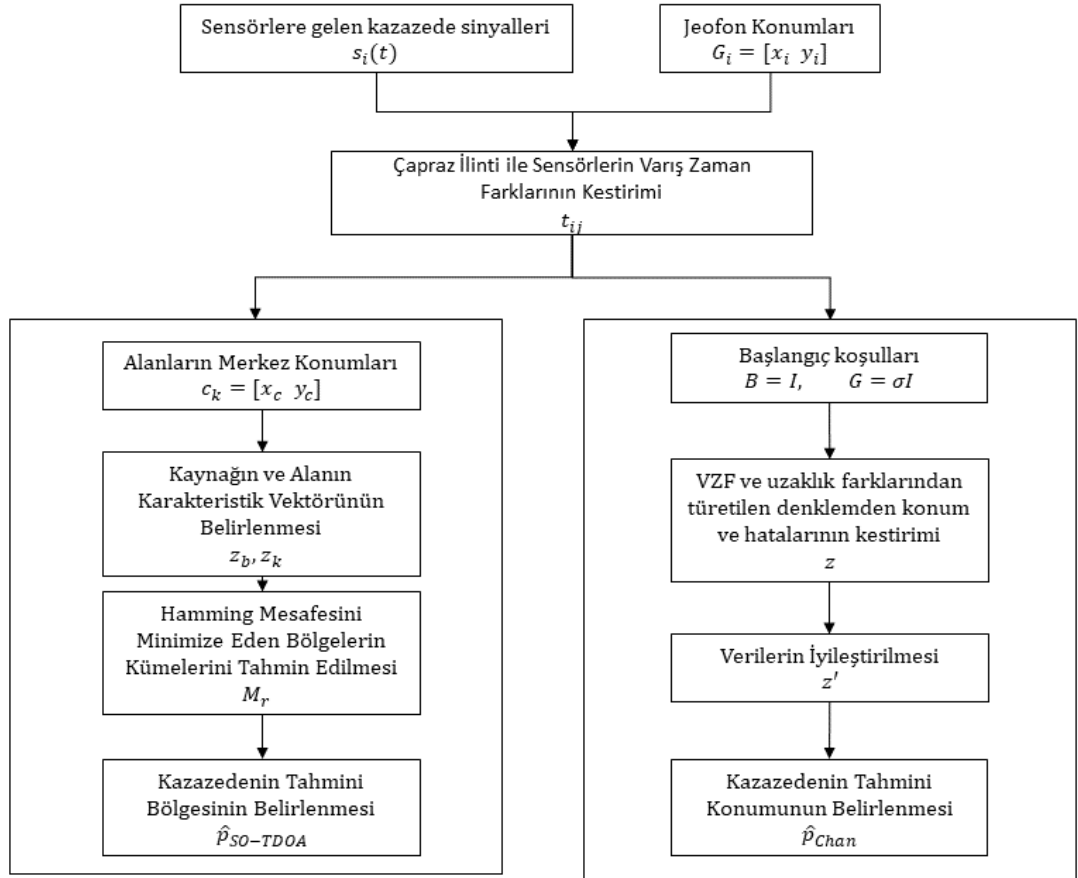
1.3 Hipotez

Arama-kurtarma ekiplerinin bölgesel tespitler ile hızlıca kurtarma işlemlerine başladığı bilinmektedir. Çalışmamızda da bölgesel konum tespitini yapan SO-TDOA yöntemi kullanılarak üçgen bölgelere bölünmüş alt alanlarda otomatik konum tespiti gerçekleştirilmektedir. Böylelikle hali hazırdaki kazazede tespit sistemlerindeki eksikliklerini gideren, geliştirilen arayüz ile otomatik kazazede tespitini yapan bir sistemin herhangi bir afet anında canlı kurtarması hedeflenmektedir. Bu tez aynı zamanda, kullanılan SO-TDOA yönteminin ve literatürde yer alan Chan yöntemiyle farklı sensör dizinlerinde (dağıtık ve düzgün geometrik) karşılaştırılması sonucu, kullandığımız yöntemin performansını analiz etmektedir.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Giriş Bölümü 1’de tezin amacı, kapsamı ve literatür çalışmalarını içermektedir. Bölüm 2’de kazazede konum tespiti ve Chan ve SO-TDOA yöntemleri açıklanmaktadır. Bölüm 3’te sentetik veriler ile yapılan Monte-Carlo sınamalarına ait sonuçlar verilmektedir. Bölüm 4’te, gerçek verilerle yapılan testler yer almaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde varılan sonuçlar ve ileriki çalışmalara ait öneriler Bölüm 5’te tartışılmıştır. Eklerde ise yöntem sonuçlarının gösterildiği çevrimdışı çalışan ara yüz açıklanmıştır.

2. YÖNTEM

Bu bölümde, depremden sonrası çökmüş bir bina üstüne gelişigüzel yerleştirilmiş pasif sensörlere gelen kazazede sinyallerinden konum tespitini gerçekleştiren yöntemlerden bahsedilmektedir. Yöntemlerin işlem adımlarını gösteren blok çizeneği Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

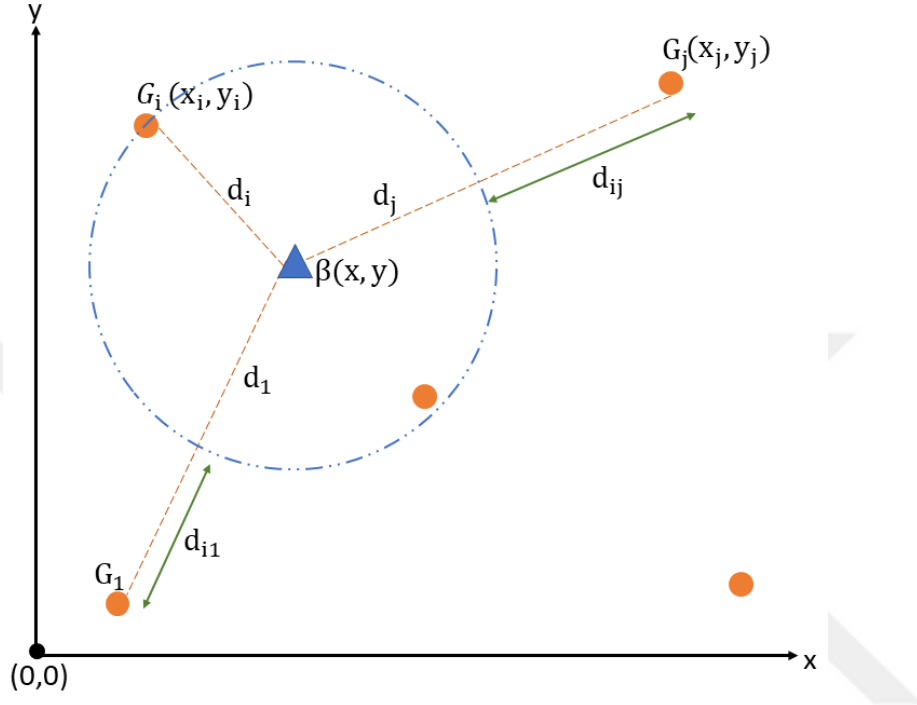


Şekil 2.1 : Yöntemlerin işlem adımlarına ait blok çizeneği.

Toplanan sinyallerden kazazede veya kazazedelere ait sinyallerin varlığının tespit edilmesi sonucu her sensör için VZF hesaplanır. Varış zaman farkı bilgisi, SO-TDOA ve Chan yöntemlerinde ortak kullanılarak konum tespiti gerçekleştirilmektedir.

Bu bölümde aşağıda ilk olarak iki yöntem içinde ortak hesaplanan varış zaman farkına ait bilgiler verilmekte ve sonrasında Chan ve SO-TDOA yöntemleri açıklanmaktadır.

2.1 Varış Zaman Farkı



Şekil 2.2 : Sensörlerin 2 boyutlu düzlemde konumlandırılması ve sensörler arası uzaklığa ait bilgiler görselleştirilmiştir.

Şekil 2.2’de dağıtık yerleştirilmiş M adet sensör dizininde, β hedefinin konumu (x, y) ve i -inci sensörün konumu (x_i, y_i) ’dir. i -inci sensörün kaynağa uzaklığı d_i , i -inci ve j -inci sensörler arasındaki uzaklık farkı ise $d_{ij} = d_i - d_j$ ile gösterilmektedir. Dağıtık sensör dizininde i -inci sensöre ait sinyali

$$s_i(n) = x(n - t_i) + g_i(n), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.1)$$

varsayalım. Burada i -inci sensöre ait varış zamanı (VZ, Time of Arrival-TOA) t_i , ortam gürültüsü $g_i(n)$ ve gürültüsüz sinyal $x(n)$ ile belirtilmiştir.

Şekil 2.2’de belirtilen sensör ve kaynak arasındaki mesafe d_i ’nin, hesaplanması için ilk aşamada sensörlere ait varış zaman farkının bulunması gerekmektedir. i -inci ve j -inci sensörler arasındaki varış zaman farkı çapraz ilinti

$$\begin{aligned} t_{ij} &= R_{s_i, s_j}(\tau) = E[s_i(n)s_j(n - \tau)] \\ &= \sum_{n=0}^{(N-1)} s_i(n)s_j(n - \tau), \quad i, j = 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (2.2)$$

alınarak hesaplanmaktadır [31]. Burada $E[\cdot]$ beklenen değeri ifade etmekte ve birinci sensör referans alınarak, $t_{i1} = t_i - t_1$, her sensörün birinci sensöre göre varış zaman farkı bilgisi elde edilirse i -inci ve j -inci sensörlere ait sinyallerin varış zaman farkları

$$t_{ij} = t_{i1} - t_{j1} \quad (2.3)$$

şeklinde de hesaplanmaktadır. i -inci ve j -inci sensörler arası uzaklık farkı d_{ij} , yüzeyin sinyal yayılım hızı c ’nin varış zaman farkı ile çarpımından

$$d_{ij} = ct_{ij} = d_i - d_j \quad (2.4)$$

elde edilmektedir. Buradan i -inci sensörün kaynağa uzaklığının karesi

$$\begin{aligned} d_i^2 &= (d_{ij} + d_j)^2 \\ &= d_{ij}^2 + d_j^2 + 2d_{ij}d_j \end{aligned} \quad (2.5)$$

ile hesaplanabilir. Sensör konumu $\mathbf{a}_i = [x_i, y_i]^T$ ile kaynak konumunun $\mathbf{a}_k = [x, y]^T$ farklarının karesinin açılımıyla da uzaklık farkları d_{ij}

$$d_{ij} = \|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_k\| - \|\mathbf{a}_j - \mathbf{a}_k\| \quad (2.6)$$

elde edilebilir. Buradan sensör-kaynak uzaklığının karesi

$$\begin{aligned} d_i^2 &= \|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_k\|^2 \\ &= K_{a_i} - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_k + K_{a_k} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ile hesaplanabilir. K_{a_i} orijin ile $\mathbf{a}_i$ konumu arasındaki uzaklık ($K_{a_i} = x_i^2 + y_i^2$), K_{a_k} orijin ile $\mathbf{a}_k$ konumu arasındaki uzaklığı ($K_{a_k} = x^2 + y^2$) vermektedir. Denklem 2.7 ve Denklem 2.5 kullanılarak

$$2\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_k = K_{a_i} + K_{a_k} - d_{ij}^2 - d_j^2 - 2d_{ij}d_j \quad (2.8)$$

türetilir ve burada $i = j$ alınırsa

$$2\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_k = K_{a_j} + K_{a_k} - d_j^2 \quad (2.9)$$

elde edilir. Denklem 2.8, Denklem 2.9'dan çıkartılırsa,

$$2(\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j)^T \mathbf{a}_k = K_{a_i} - K_{a_j} - d_{ij}^2 - 2d_{ij}d_j \quad (2.10)$$

denklemini türetilir. Uzaklık farkının, VZF ve geometrik denklemlerinden türetilen Denklem 2.10'da üç bilinmeyen x , y , d değerleri bulunmaktadır. Bu değerlerin kestirimi ile konum tespitini sağlayan farklı çözüm önerileri mevcuttur [18]–[21,32,33]. VZF denklemleri kullanılarak konum tespitini gerçekleştiren Chan ve SO-TDOA yöntemi aşağıda açıklanmıştır.

2.2 Chan Yöntemi

Chan algoritması, bir kaynağın konum tespiti için sensör verilerinden elde edilen varış zaman farkları ile tanımlanan hiperbolik eğrileri kullanmaktadır. Bölüm 2.1'de türetilen doğrusal denklemlerin çözümleri için önerilen yöntemlerin aksine yinelemesiz yaklaşımı ile kesin sonuçlar sunmaktadır. Bu yöntem aynı zamanda rasgele ve doğrusal sensör dizinleriyle çeşitli sayıdaki dağıtık sensörler için de çözüm önerileri sunmaktadır [17].

Çalışmamızda, kullanılacak sensör sayısı dört ve daha fazladır. Bu nedenle, Chan algoritmasında yer alan dört ve üstü dağıtık sensör dizini ile konum tespitine ait çözüm önerisi kullanılmıştır. Chan yöntemi hiperbolik eğrilerden türetilen denklemini kullanarak iki aşamada tespiti gerçekleştirir. İlk aşamada başlangıç değerleri ile

bilinmeyen değerlerin ve hataların ön kestirimini yapar; ikinci aşamada ise ön kestirim sonucu elde edilen verilerin iyileştirilmesini sağlar. Buna göre M adet sensör dizini için yöntemde önce Bölüm 2.1’de verilen Denklem 2.10’u birinci sensör referans sensör seçilerek ($j = 1$) tekrar yazılırsa,

$$2(\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_1)^T \mathbf{a}_k = K_{a_i} - K_{a_1} - d_{i1}^2 - 2d_{i1}d_1 \quad (2.11)$$

doğrusal denklemi türetilir. Burada bilinmeyen değerleri içeren vektörü $\mathbf{z} = [x, y, d_1]^T$ ile tanımlarsak, hata vektörü

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{h} - \mathbf{G}\mathbf{z} \quad (2.12)$$

ile elde edilmektedir. Burada,

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} d_{21}^2 - K_{a_2} + K_{a_1} \\ d_{31}^2 - K_{a_3} + K_{a_1} \\ \vdots \\ d_{M1}^2 - K_{a_M} + K_{a_1} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ve

$$\mathbf{G} = -2 \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & d_{21} \\ x_{31} & y_{31} & d_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & y_{M1} & d_{M1} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Ağırlıklandırılmış EKK yönteminden, bilinmeyen değerler vektörü

$$\mathbf{z} = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}) \mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h} \quad (2.15)$$

ile bulunabilmektedir. Buradan kestirilen x , y değerleri ile kaynağın i -inci sensöre uzaklığı

$$\hat{d}_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2.16)$$

ile hesaplanırken, kestirilen uzaklık vektörü

$$\mathbf{B} = 2\text{diag}\{\hat{d}_2, \hat{d}_3, \dots, \hat{d}_M\} \quad (2.17)$$

ile tanımlanabilir. Denklem 2.15'te görülen, kestirilen uzaklık vektörü $\mathbf{B}$ 'nin hatalarının kovaryans matrisi $\mathbf{Q}$

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}\mathbf{W}\mathbf{B}^T)^{-1} \quad (2.18)$$

ile hesaplanırken, gürültü kovaryans matrisi $\mathbf{W}$ köşegenleri gürültünün değışintisi σ' 'ne eşit $M-1$ boyutlu köşegen matrisidir ($\mathbf{W} = \sigma'^2\mathbf{I}$). Başlangıçta $\mathbf{B} = \mathbf{I}$ ile tanımlanır ve elde edilen x ve y verilerinden $\mathbf{B}$ tekrar hesaplanarak $\mathbf{z}$ vektörü elde edilir.

Yöntemin ikinci adımında, hesaplanan $\mathbf{z}$ vektörü ve birinci sensörün konumu kullanılarak

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}'\mathbf{z}' \quad (2.19)$$

$\mathbf{z}'$ 'nin

$$\mathbf{z}' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ölçüm hatalarını belirten yeni bir denklem elde edilir. Burada,

$$\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \\ \hat{d}_1^2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ve

$$\mathbf{G}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

ile ifade edilmektedir. Buradan $\mathbf{z}'$ için ML kestirimi

$$\mathbf{z}' = (\mathbf{G}'^T \mathbf{Q}'^{-1} \mathbf{G}')^{-1} \mathbf{G}'^T \mathbf{Q}'^{-1} \mathbf{h}' \quad (2.23)$$

ile elde edilir. Burada,

$$\mathbf{Q}' = (\mathbf{B}'^T)^{-1} (\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}) (\mathbf{B}')^{-1} \quad (2.24)$$

ve

$$\mathbf{B}' = 2\text{diag}\{(x - x_1), (y - y_1), (\hat{d}_1)\} \quad (2.25)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. İşlemler sonucunda nihai konum kestirimi

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_{Chan} &= \sqrt{\mathbf{z}'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \\ \hat{\mathbf{p}}_{Chan} &= -\sqrt{\mathbf{z}'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.26)$$

ile hesaplanmaktadır.

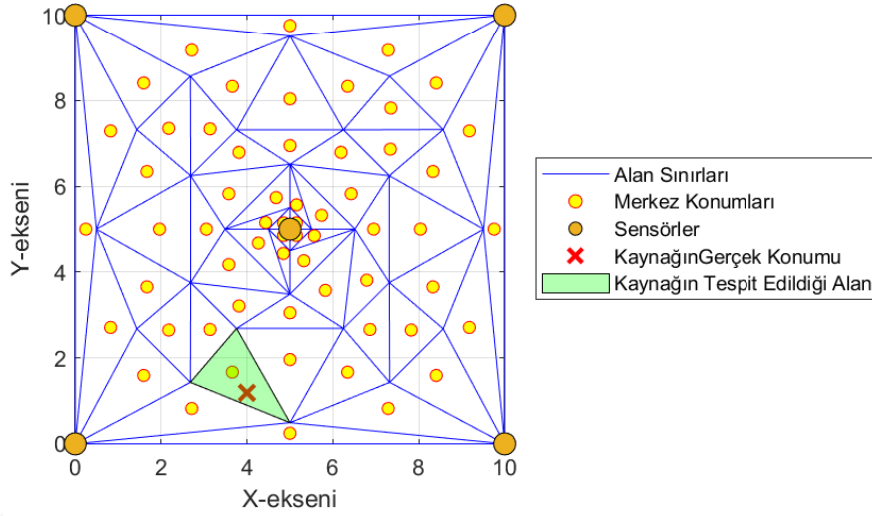
2.3 SO-TDOA Yöntemi

SO-TDOA yöntemi sensörleri içeren alanın alt bölgelere bölünmesi ile sinyal varlığının bulunduğu konumun belirlenmesini sağlamaktadır [30]. Aynı zamanda sinyalin sönümlendiği ve dağılma özelliği gösterdiği ortamlarda bu yöntemin uyum sağlaması nedeniyle yıkılmış bir binada kazazede konum tespitini gerçekleştireceği öngörülerek çalışmamızda kullanılmaktadır.

SO-TDOA yöntemi konum bulurken VZF, Chan, GA gibi yöntemler gibi noktasal veya açısal konum bulma yöntemlerinden farklı, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi alt alanlara bölünmüş ortamda sinyalin konumunu içeren bölümü tespit eden bir yaklaşım sunmaktadır.

SO-TDOA yöntemi için

- Bölgelerin belirlenmesi,
- Bölgelerin ve kaynağın karakteristik vektörünün çıkarımı,
- Elde edilen veriler ile tahmini konumun hesaplanması gibi adımların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.3 : SO-TDOA konum tespiti örnek gösterim.

SO-TDOA yöntemine ait adımların açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

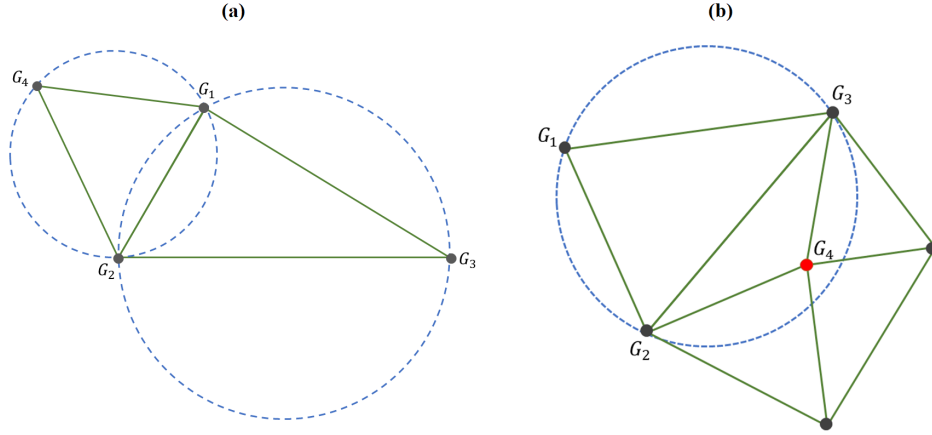
2.3.1 Bölgelerin belirlenmesi

SO-TDOA yönteminde sensörlerle çevrili alana ait bölgeler, sensörler arası dik ortay doğruları ile belirlenmektedir. Sensör yerleşiminin dikdörtgen, kare gibi düzgün şekil seçildiği durumlarda, dik ortay doğrularının oluşturduğu bölgeler daha geometrik iken; gelişigüzel yerleştirilmiş sensör dizinlerinde bölgeler birbirlerinden farklı oranlarda (çok büyük veya çok küçük alanlı gibi) şekiller gözlemlenmiştir. Çalışmamızda daha az işlem yükü ve tutarlı bölgeler üreten, farklı bir geometrik bakış açısıyla SO-TDOA yöntemiyle konum kestirimi gerçekleştirilmiştir.

Geometrik veya özellikle gelişigüzel yerleştirilmiş sensörlerin bölgelere ayrılması için kullanılabilecek en uygun yöntem üçgenlemedir [34]. Yüz imgelerinden yeryüzü modellemesine kadar farklı alanlarda kullanılan üçgenleme yöntemlerinden Delaunay üçgenlemesi, çalışmamızda bölgelerin belirlenmesi için kullanılmıştır.

Delaunay üçgenlemesinde boş küme özelliğinin getirdiği geometrik özelliklerle üçgen bölgeler belirlenmektedir. Bu özelliğe göre Şekil 2.4'te verildiği gibi, sensör konumları ile elde edilen herhangi bir delaunay üçgenini, $\triangle G_1 G_2 G_3$, çevreleyen daire

üzerinde, düzlemdeki sensör nokta kümesinden, $\mathbf{G} = \{G_4, G_5, \dots, G_M\}$, $\{G_1, G_2, G_3\}$ noktaları hariç hiçbir sensör bu daire üzerinde bulunmamalıdır [35,36].



Şekil 2.4 : (a) Sensörler ile Delaunay üçgenlemesi sağladığı koşul ve (b) Delaunay üçgenleme şartını sağlamayan durum (G_4 sensörü $\triangle G_1G_2G_3$ üçgeninin daire içinde kalmıştır.) görselleştirilmiştir.

Çalışmamızda dört ve üstü sensör ile çalışılacağı için sensörün kapladığı alanının daha detaylı üçgen bölgelerine bölünmesi gerekmektedir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi yinmeli şekilde her adımda bulunan Delaunay üçgen merkez bilgileri ve sensör konumları kullanılarak alan daha küçük üçgen bölgelerine bölünür.

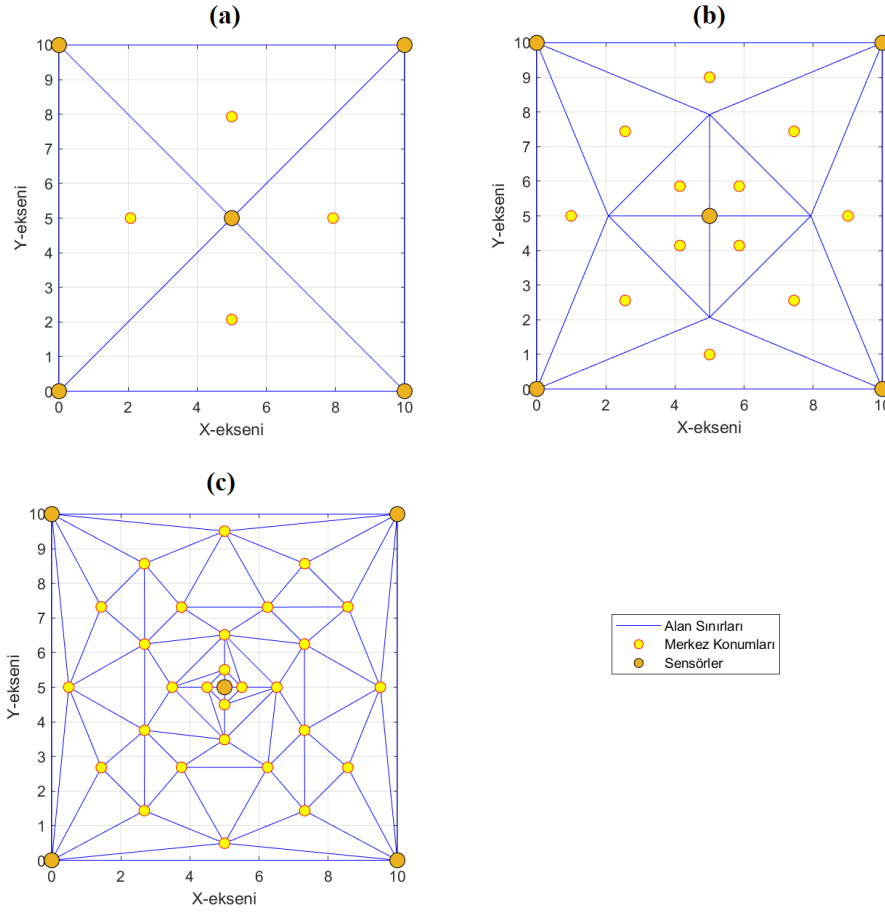
Delaunay üçgenleme yöntemi sonucu elde edilen A adet üçgen bölgesi R_k ($k = 1, \dots, A$) belirlenir ve bölgelerin merkez noktaları $\mathbf{c}_k$ ileriki aşamalarda kullanılmak üzere bulunur.

2.3.2 Bölgelerin ve kaynağın karakteristik vektörü

SO-TDOA yöntemi, Şekil 2.6'da verilen varış zamanı ve uzaklık bilgileri ile üçgen bölgelerinin ve kaynağın karakteristik vektörlerinin çıkarılmasını önermektedir [30].

Dağıtık yerleştirilmiş M adet jeofonlardan ($\mathbf{G} = G_1, G_2, \dots, G_M$), i -inci ve j -inci sensörlerinin k -ıncı üçgen bölgenin merkez noktası $\mathbf{c}_k$ 'ya, uzaklıklığı (r_{ki}, r_{kj}) hesaplanır. Elde edilen uzaklıkların birbirinden çıkartılıp işaret operatörü $sgn(\cdot)$ alınması

$$\mathbf{v}_b(k) = sgn(r_{ki} - r_{kj}), \quad (i, j) = (1, 2), (1, 3), \dots, (M-1, M) \quad (2.27)$$



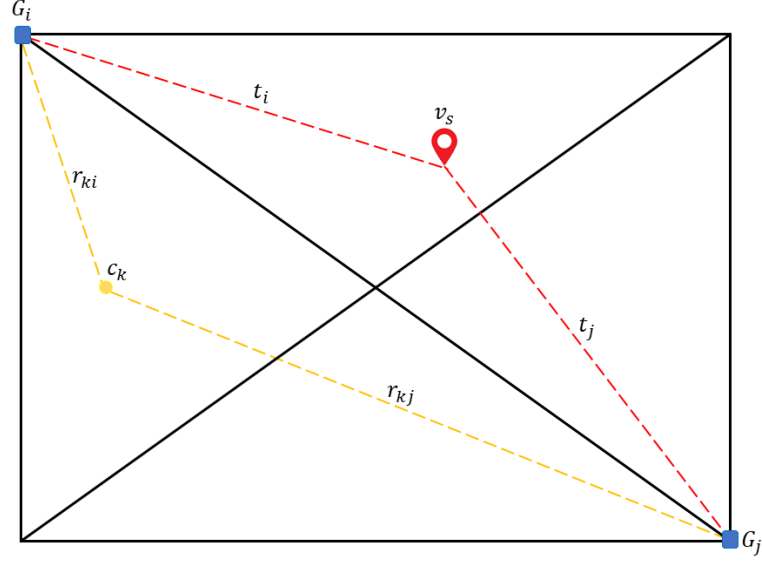
Şekil 2.5 : (a) Sensörler ile Delaunay üçgenlemesi, (b) Sensör ve ilk merkezler ile Delaunay üçgenlemesi (birinci iterasyon) (c) Sensör ve ikinci merkezler ile Delaunay üçgenlemesi (ikinci iterasyon) .

ile k -ıncı bölge karakteristik vektörü $\mathbf{v}_b(k)$ elde edilmektedir.

Kaynağa ait karakteristik vektörü $\mathbf{v}_k$ ise bölge karakteristik vektöründen farklı biçimde, i -inci ve j -inci jeofon sensörlerinin VZ'lerinin (t_i, t_j) sonucunda işaret operatörünün

$$[\mathbf{v}_k]_{ij} = \text{sgn}(t_i - t_j), \quad (i, j) = (1, 2), (1, 3), \dots, (M-1, M) \quad (2.28)$$

hesaplanması ile elde edilir. Karakteristik vektörler bir bölgenin veya kaynağın herhangi iki sensör arasındaki ilişkisini içeren bir değeri ortaya koymaktadır. Karakteristik vektörlerde yer alan işaret operatörü $\text{sgn}(\cdot)$ ise,



Şekil 2.6 : Üçgen bölgelere ayrılmış alanda kazazedeye ait v_s sinyalinin i . ve j .jeofonlara varış zamanları t_i ve t_j (kırmızı kesik çizgi); jeofonların üçgen bölge merkezi c_k 'ya uzaklıkları r_{ki} ve r_{kj} (sarı kesik çizgi) görselleştirilmiştir.

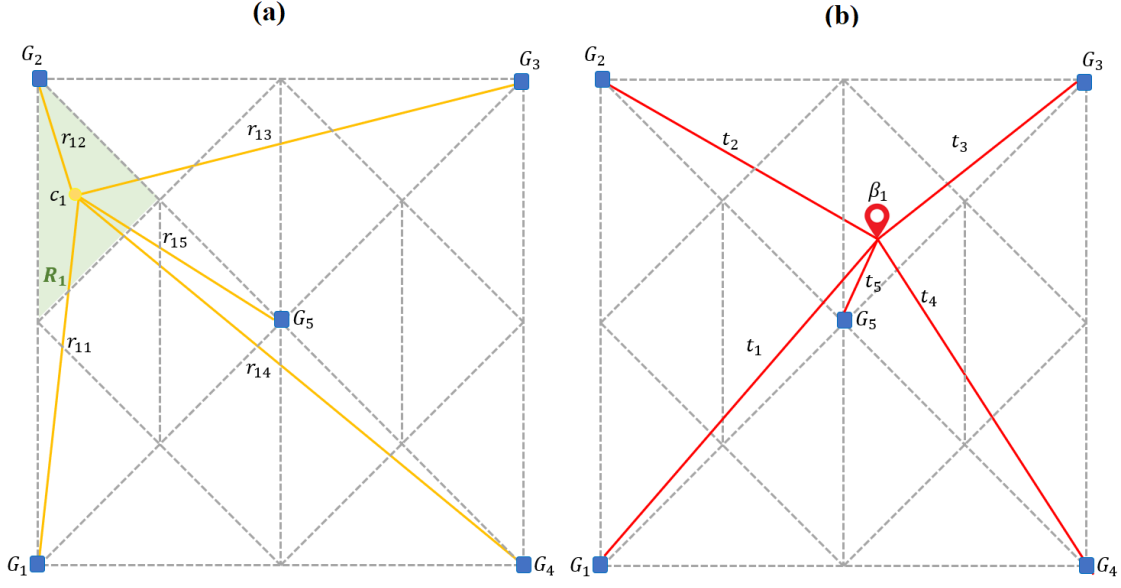
$$\text{sgn}(\cdot) = \begin{cases} 1, & (\cdot) > 0 \\ 0, & (\cdot) = 0 \\ -1, & (\cdot) < 0 \end{cases} \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilir.

Bir örnek ile karakteristik vektörleri özetlemek gerekirse, Şekil 2.7 (a)'da verilen grafikten R_1 alanının bölge karakteristik vektörü

$$\mathbf{v}_b(1) = \text{sgn} \begin{bmatrix} r_{11} - r_{12} \\ r_{11} - r_{13} \\ r_{11} - r_{14} \\ r_{11} - r_{15} \\ r_{12} - r_{13} \\ r_{12} - r_{14} \\ r_{12} - r_{15} \\ r_{13} - r_{14} \\ r_{13} - r_{15} \\ r_{14} - r_{15} \end{bmatrix}^T = [1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1] \quad (2.30)$$

ve Şekil 2.7 (b)'de verilen grafikten β_1 kaynağının kaynak karakteristik vektörü



Şekil 2.7 : Beş adet sensör (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5) ile bölünmüş alanda (a) R_1 bölgesinin merkezi c_1 'e sensörlerin uzaklıkları $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}$ ve (b) kaynak β_1 'in sensörlere varış zamanları t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 gösterilmektedir.)

$$\mathbf{v}_{K_1} = \mathbf{sgn} \begin{bmatrix} t_1 - t_2 \\ t_1 - t_3 \\ t_1 - t_4 \\ t_1 - t_5 \\ t_2 - t_3 \\ t_2 - t_4 \\ t_2 - t_5 \\ t_3 - t_4 \\ t_3 - t_5 \\ t_4 - t_5 \end{bmatrix}^T = [1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1] \quad (2.31)$$

şeklinde bulunur. Burada $\mathbf{sgn}[\{.\}, \{.\}, \dots] = [\mathbf{sgn}\{.\}, \mathbf{sgn}\{.\}, \dots]$ şeklindedir. Uygulamada, yöntemde belirtilen alan karakteristik vektör çıkarımı, alanların merkez ve sensör konumları bildiğinden rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Buna rağmen, yöntemde belirtilen kaynak karakteristik vektörü kaynağın sensörlere varış zamanına bağlı hesaplandığı gösterilmiş ve uygulamada bu bilinmediğinden Denklem 2.3 kullanılarak kaynak karakteristik vektörü

$$\mathbf{v}_{K_1} = \mathbf{sgn} [t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{23}, t_{24}, t_{25}, t_{34}, t_{35}, t_{45}] \quad (2.32)$$

sensörler arası VZF kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yöntemde yer alan işaret operatörü işlemi sayesinde jeofon sensörlerinin konumlandırıldığı yüzeyin hızına gerek duyulmamaktadır. Bu nedenle SO-TDOA yöntemi yıkılmış binaların yapı karmaşıklığı göz önüne alındığında kazazedenin konumunu bulma konusunda avantaj sağlayacaktır.

2.3.3 Konum tespiti

SO-TDOA'da konum tespitinin kestirimi için kaynak karakteristik vektörü $\mathbf{v}_k$ 'ye uyan bölge karakteristik vektörleri belirlenmesi gerekmektedir. $\mathbf{v}_k$ (Denklem 2.28) ile $\mathbf{v}_b$ (Denklem 2.27) karakteristik vektörler arasındaki Hamming mesafesi

$$\mathbf{d}_h(l) = (\mathbf{v}_k \odot \mathbf{v}_b(l)) \quad (2.33)$$

her üçgen bölgesi için hesaplanarak kaynağın bölgeler ile ilişkisi çıkartılır. Burada $\odot$ operatörü

$$\mathbf{a} \odot \mathbf{b} = \sum_{i=1}^{M(M-1)/2} (\mathbf{a}(i) \oplus \mathbf{b}(i)) \quad (2.34)$$

ve $\oplus$ operatörü XOR

$$\mathbf{a} \oplus \mathbf{b} = \begin{cases} 1, & \mathbf{a}(i) \neq \mathbf{b}(i) \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.35)$$

işlemine karşılık gelmektedir. A adet üçgen bölgesi için elde edilen Hamming mesafelerinin $\mathbf{d}_h(l)$ en az olduğu bölgeler kümesi

$$M_r = \arg \min_{l \in \{1..A\}} \mathbf{d}_h(l) \quad (2.36)$$

tanımlanır. Hamming mesafesi, bir veya birden fazla bölgede aynı değeri alabilir. Bu nedenle M_r vektörünün uzunluğu $|M_r| \geq 1$ ile ifade edilebilir. M_r vektörünün uzunluğu $|M_r| = Z$ ise kaynağa ait tahmini konum $\hat{\mathbf{p}}_{SOT}$, M_r 'nin ortalama değerinin tespit edilmesiyle

$$\hat{\mathbf{p}}_{SOT} = \frac{1}{|M_r|} \sum_{r=1}^Z \mathbf{p}_r^c \quad (2.37)$$

hesaplanır. Burada $\mathbf{p}_r^c$, r . bölgenin merkezidir. Konum kestirimi sonucunda sinyal kaynağının yer aldığı bölge veya bölgelerin işaretlenmesi gerçekleştirilir.

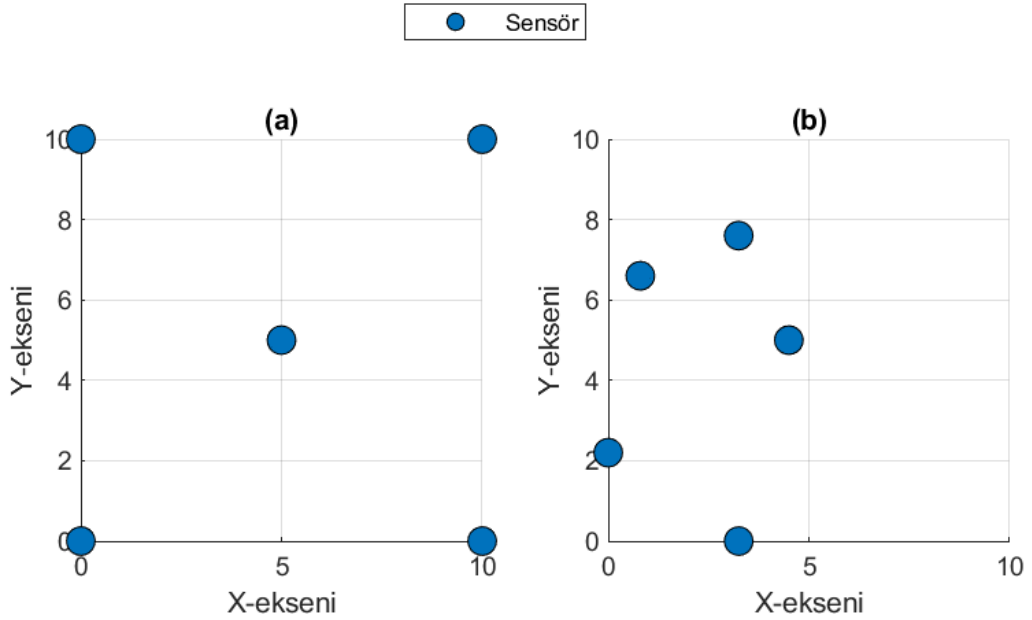
Her iki yöntem içinde sonuçların gösterildiği çevrimdışı çalışan ara yüz tasarımı EK A'da yer almaktadır.



3. SINAMALAR

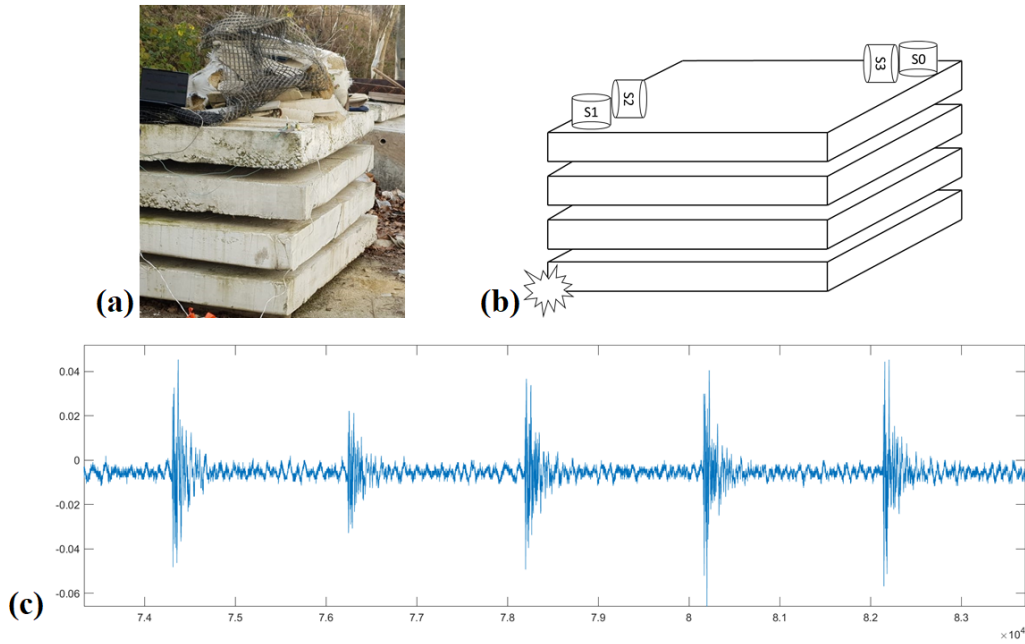
Bu bölümde, iki farklı sensör dizisinde rasgele seçilen kaynak konumlarından üretilen sentetik sinyallere Bölüm 2’de bahsedilen yöntemlerin her biri uygulanmıştır. Yöntemler vasıtasıyla kestirilen konumlar ile "bilinen" kaynak konum değerleri arasındaki hataların sonuçları bu bölümde karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda ön araştırmalarını gerçekleştirdiğimiz hibrit yöntemimize ait sonuçlar da bu bölümde sunulmuştur.

Sınamalarda, 10 m x 10 m’lik bir alan içerisinde beş adet sensör yerleştirilmiştir. Alanın boyutu, yıkılmış bir binanın tahmini ölçüsü şeklinde seçilmiştir. Bir dizi sensör Şekil 3.1 (a)’da görüldüğü gibi bütün alanı kaplayan kare geometrisi biçiminde konuşlandırılmıştır. Enkazdaki düzensizlik göz önüne alınarak ikinci geometrik dizin ise, Şekil 3.1 (b)’de gösterildiği gibi (nispeten gelişigüzel konuşlandırılmış) dağınık yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : (a) Karesel geometriye sahip sensör dizin yerleşimi; (b) dağınık konuşlandırılmış sensör dizini.

Kaynak konumları, kare sensör dizini için 10 m x 10 m’lik düzgün ve dağıtık sensör dizini için 4.5 m x 7.6 m’lik gelişigüzel alan içinde konuşlandırılmıştır. Kaynak konumları ve sensör dizinleri arası uzaklık farklarından yola çıkarak sentetik veri üretimi gerçekleştirilmiştir. Verilerin üretiminde, kazazedelerin enkaz altından konumlarını belirlemek için bir yüzeye vurma veya sürtme yoluyla işaret vermeye çalıştıkları öngörüsünden yola çıkılmıştır. Bu varsayım doğrultusunda, Şekil 3.2 (a)’da gösterilen İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi’nin test alanlarında yapılan deneylerle beton bloklara vurma sinyalleri elde edilmiş ve analiz edilmiştir. Deneyler kapsamında, temsili gösterilen Şekil 3.2 (b)’deki beton bloklara alttan darbeler uygulanmış ve üst bloğa yerleştirilen jeofonlar aracılığıyla sinyaller kaydedilmiştir. Bu kayıtlar, Şekil 3.2 (c)’de sunulmuştur. Beton blok deneylerindeki dürtü sinyalinin zamanla sönümlenmesi nedeniyle kazazedelerin sönümlü sinyal (damped signal) ürettiği varsayılmıştır.



Şekil 3.2 : (a) İTÜ İnşaat Fakültesi’ne ait katlı beton bloklarda yapılan test alanının görseli; (b) sensör konumları ve dürtü sinyalinin vurulduğu yeri gösteren test alanının modeli (c) sinyalin Genlik-Zaman grafiği.

Gözlemler sonucunda kazazedeye ait $y(t)$ sinyali modellenirken

$$y(t) = Ae^{-\gamma t} \sin(2\pi ft + \phi) + g(t) \quad (3.1)$$

gürültü karışmış sönümlü sinusoid göz önüne alınmıştır. Buradaki γ sönümleme katsayısı ve $g(t)$ beyaz, normal dağılımlı

$$g(t) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \quad (3.2)$$

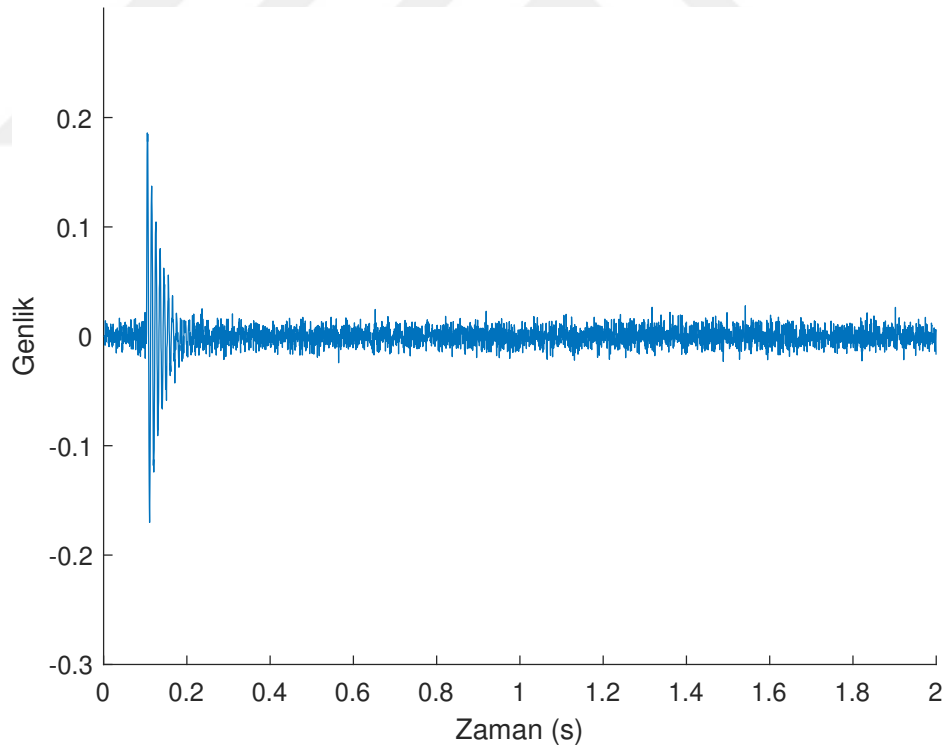
Gauss gürültüsüdür. Gürültünün ortalama değeri simülasyonlar boyunca $\mu = 0$ varsayılmış, standart sapması

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_{x(t)}}{10^{(SNR_{dB}/10)}}} \quad (3.3)$$

ile hesaplanmıştır. Burada gürültülü sinyale ait sinyal gürültü oranı

$$SNR_{dB} = 10 \log \frac{P_{x(t)}}{\sigma^2} \quad (3.4)$$

ve gürültüsüz sinyal $x(t)$ 'nin gücü $P_{x(t)} = RMS(x(t))^2$ şeklindedir.



Şekil 3.3 : Sensöre ait 5 dB SNR sahip gürültülü sinyalin Genlik-Zaman grafiği.

Çalışmamızda SNR değeri 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dB değerlerine sahip sinyaller üretilerek gürültünün etkisi irdelenmiştir. Örneğin, herhangi bir jeofon sensörü için 5dB SNR değerine sahip sönümlü sinusoide ait sinyal Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Sentetik verilerle yapılan sınamaların tümünde 1000 Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

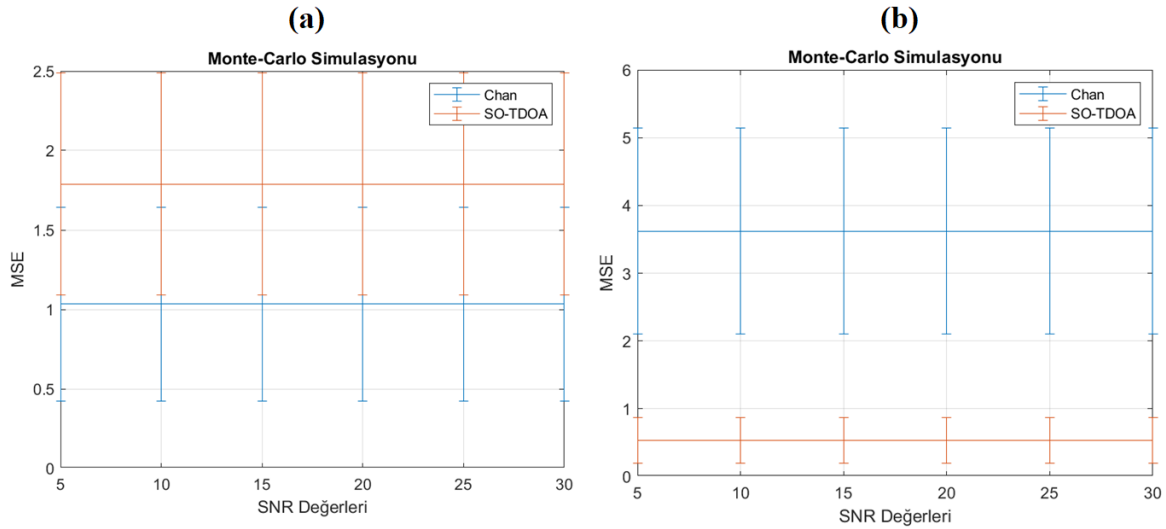
Chan yönteminin Denklem 2.26'dan ve SO-TDOA yönteminin Denklem 2.37'de kestirilen $(\hat{x}, \hat{y})$ ve bilinen kaynak (x, y) konumları arasındaki hata

$$e = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (3.5)$$

ile tanımlanmıştır. Yöntemlerin konum tahminlerindeki ortalama karesel hata (Mean Square Error - MSE) değerleri,

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.6)$$

kullanılarak hesaplanır. 5 ile 30 dB arasındaki SNR'a sahip sınamalar sonucunda, her bir dB'ye karşılık düşen MSE değerleri yaklaşık aynı elde edilmiştir. Dolayısıyla 5 dB üzerindeki SNR değerlerinin konum tespitine etki etmediği gözlenmiştir.

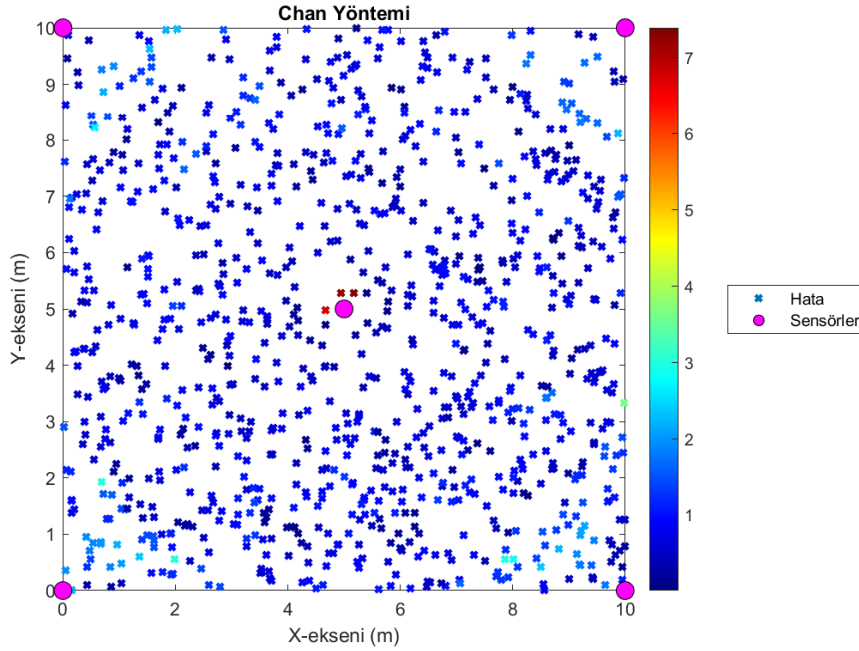


Şekil 3.4 : 1000 iterasyonlu Monte-Carlo sınamasında (a) Kare ve (b) Dağıtık sensör dizininde elde edilen MSE grafiği.

Her dB değerine karşılık düşen toplam MSE değerlerini gösteren grafikler, kare sensör düzeni için Şekil 3.4 (a) ve dağıtık sensör düzeni için Şekil 3.4 (b)'de verilmektedir.

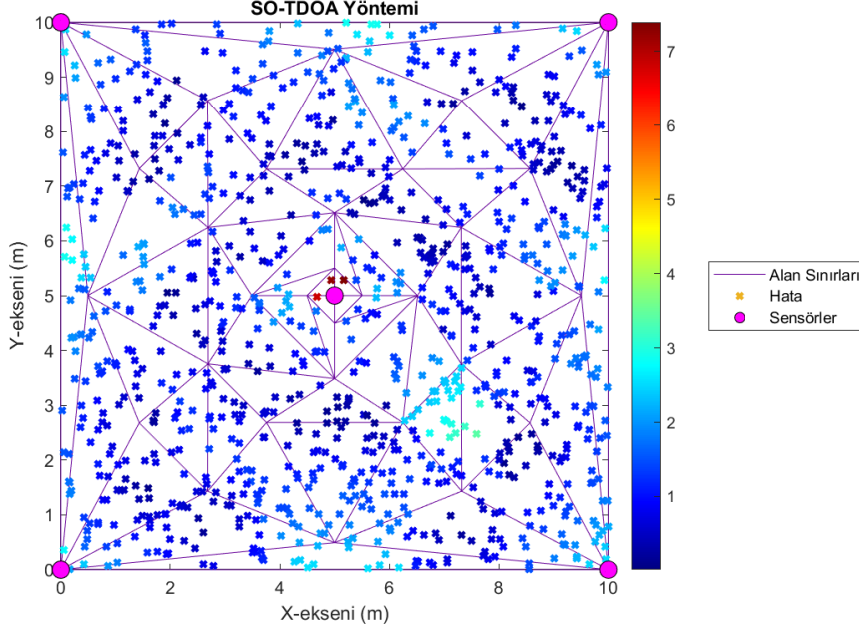
Sınamalarda elde edilen bir diğer önemli sonuç, düzgün kare geometrik dizinde Chan yönteminin SO-TDOA'ya nazaran daha yüksek başarımlı sağladığı, dağıtık sensör dizininde ise SO-TDOA'nın daha düşük hata değerlerine sahip olduğudur.

Sonuçlara farklı bakış açısı katmak amacıyla, sınamalar hata değerlerine karşılık gelen renk kodu (RGB değerleri) 'jet' adı verilen (maviden sırasıyla yeşil, sarı ve kırmızıya doğru giden renk dağılımı üzerinden) bir renk haritası ile görselleştirilmiştir. Düzgün kare geometriye sahip sensör dizininin alan içerisindeki 1000 adet rasgele kaynak konumu için Chan yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.5'te verilmiş ve toplam MSE değeri 0.99 elde edilmiştir.



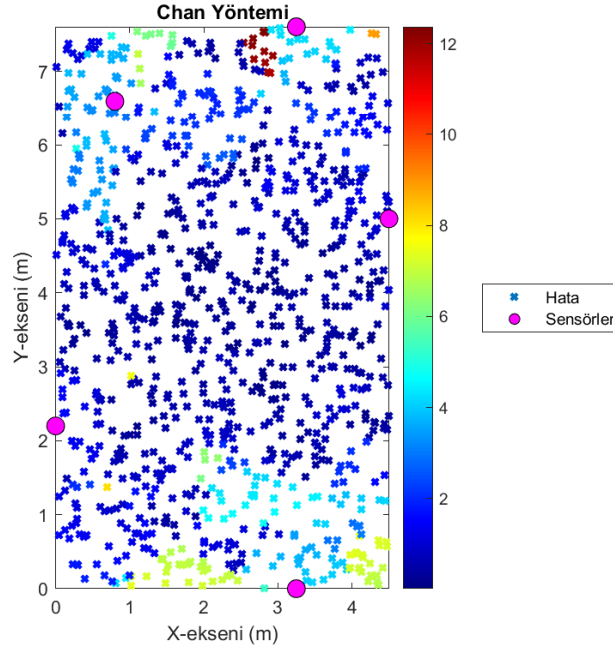
Şekil 3.5 : Chan yöntemi kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

Düzgün geometriye sahip sensör dizininin alan içerisindeki 1000 adet rasgele kaynak konumu için SO-TDOA yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.6'da verilmiş ve toplam MSE değeri 1.87 elde edilmiştir.



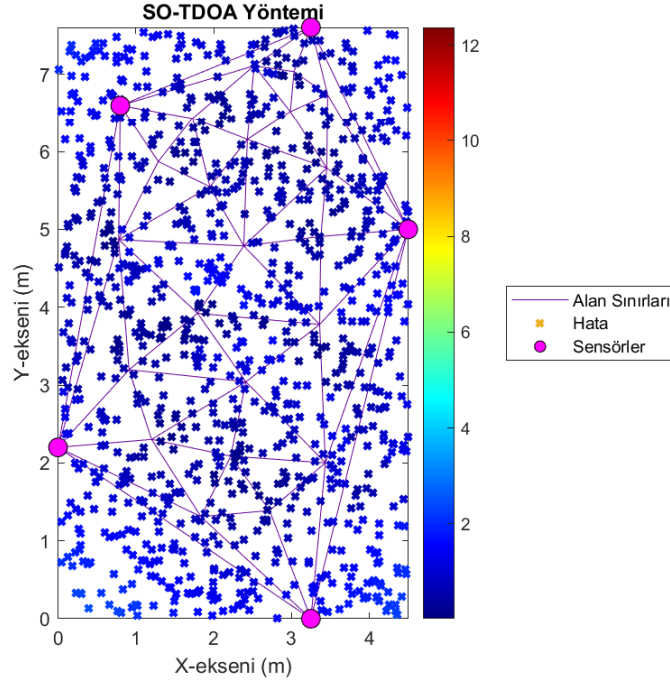
Şekil 3.6 : SO-TDOA kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

Dağıtık geometriye sahip sensör dizinindeki sınamalarda ise 4.5 m x 7.6 m alan içerisinde rasgele seçilen 1000 kaynak konumu için Chan yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.7’de verilmiş ve toplam MSE değeri 6.22 elde edilmiştir.



Şekil 3.7 : Chan yöntemi kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

Dağıtık geometriye sahip sensör dizinin 4.5 m x 7.6 m alan içerisinde rasgele seçilen 1000 kaynak konumu için SO-TDOA yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.8’de verilmiş ve bu yöntemle ait toplam MSE değeri 1.01 elde edilmiştir. Dağıtık sensörlerle yapılan bu sınamada SO-TDOA yönteminin toplam MSE değerinin diğer yöntemlerinkine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8 : SO-TDOA yöntemi kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

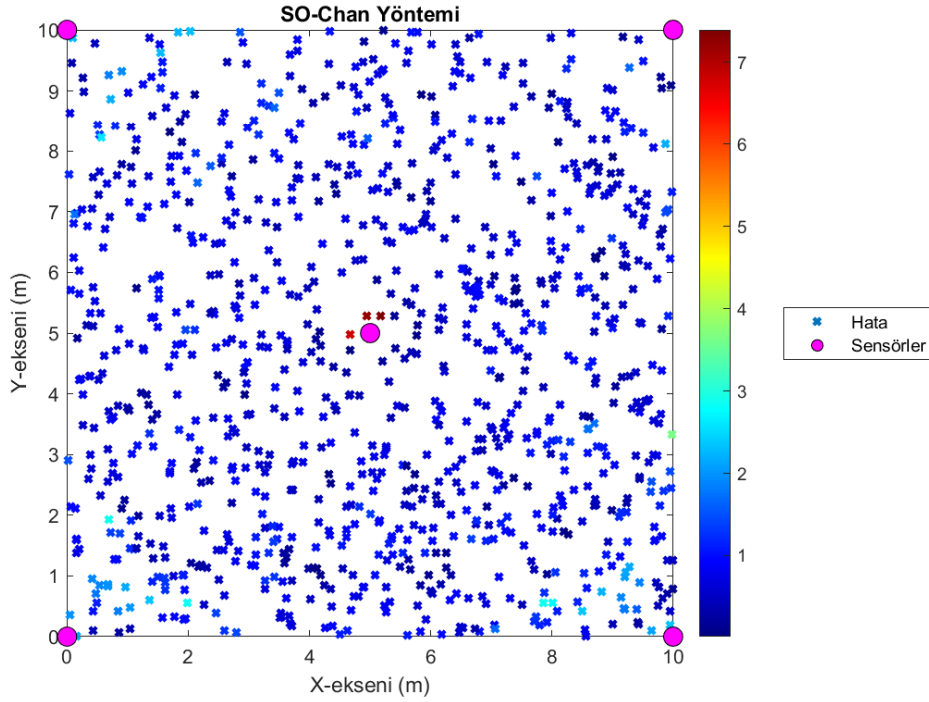
Chan ve SO-TDOA yöntemlerinin konum tespitlerindeki renk haritaları incelendiğinde,

- SO-TDOA yöntemi Chan yöntemiyle karşılaştırıldığında, sensörler ile çevrili alan içindeki hatalar benzer ve düşük değerler almakta iken, sensör dışı alanlarda sensörlerden uzaklaştıkça hatanın arttığı;
- Chan yönteminin ise özellikle sensörlerin etrafında daha çok hata yaptığı görülmektedir.

3.1 Hibrit Yöntem Sınamaları

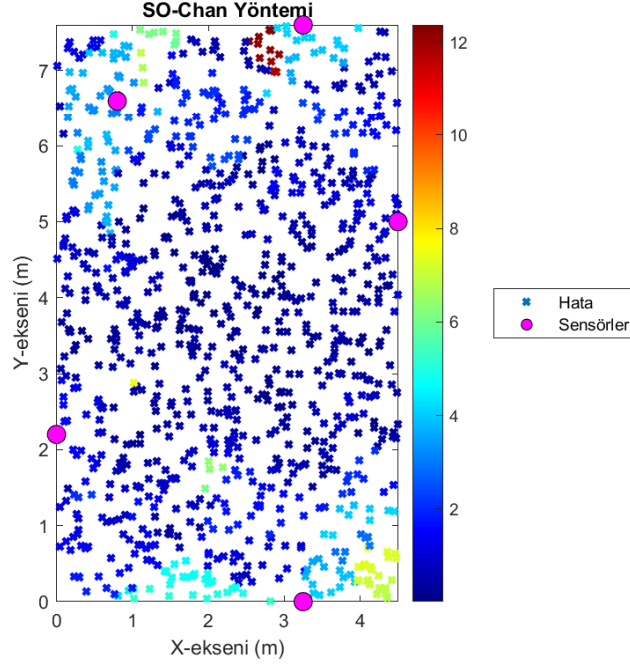
İleriki çalışmalarımızda hibrit yöntemlerle konum tespiti hedeflenmektedir. Bu amaçla ön araştırmalarını yaptığımız hibrit yöntemimizde SO-TDOA ve Chan yöntemleri birlikte kullanılmıştır. SO-Chan adını verdiğimiz çalışmamızda, SO-TDOA sonucu elde edilen bölgeye ait merkez konumu Chan yönteminde başlangıç koşulu olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma ait sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Düzgün kare geometriye sahip sensör dizininin alan içerisindeki 1000 adet rasgele kaynak konumu için SO-Chan yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.9'deki gibi renk haritası elde edilmiş ve MSE değeri 0.94 bulunmuştur.



Şekil 3.9 : SO-Chan kullanılarak düzgün kare geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

Dağıtık geometriye sahip sensör dizinin 4.5 m x 7.6 m alan içerisinde rasgele seçilen 1000 kaynak konumu için SO-Chan yöntemine ait hataların renk haritası Şekil 3.10'de verilmiş ve bu yönteme ait toplam MSE değeri 5.01 elde edilmiştir.



Şekil 3.10 : SO-Chan kullanılarak dağıtık sensör geometrisinde her bir noktadaki hataların renk haritası (Bu görselde 1000 kaynak bulunmaktadır).

Çalışmamızda yapılan analizler sonucunda, düzgün karesel sensör dizinleri için SO-Chan yönteminin, karşılaştırılan diğer yöntemlere nazaran daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Dağıtık sensör dizinleri bağlamında incelendiğinde ise, SO-TDOA yönteminin Chan ve SO-Chan yöntemlerine göre üstün sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir. İlgili MSE değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 3.1’de ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

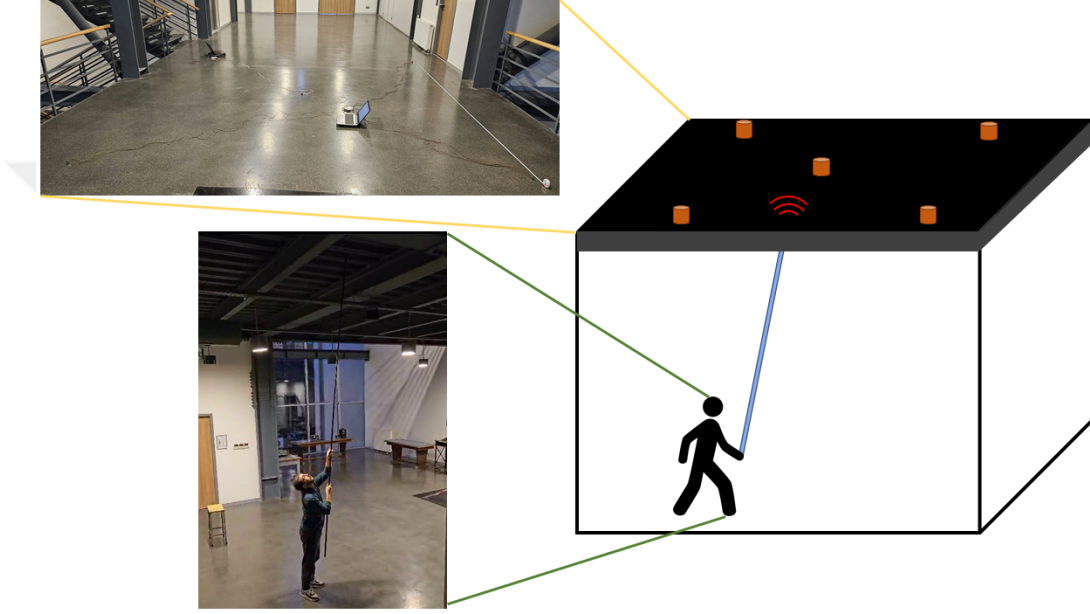
Çizelge 3.1 : Yöntemlerin farklı dizinlerdeki MSE değerleri çizelgesi.

Dizin Geometrisi	MSE_{Chan}	$MSE_{SO-TDOA}$	$MSE_{SO-Chan}$
Düzenli Kare Sensör Dizini	0.99	1.87	0.94
Dağıtık Sensör Dizini	6.22	1.01	5.01



4. DENEYLER-GERÇEK ZAMANLI TESTLER

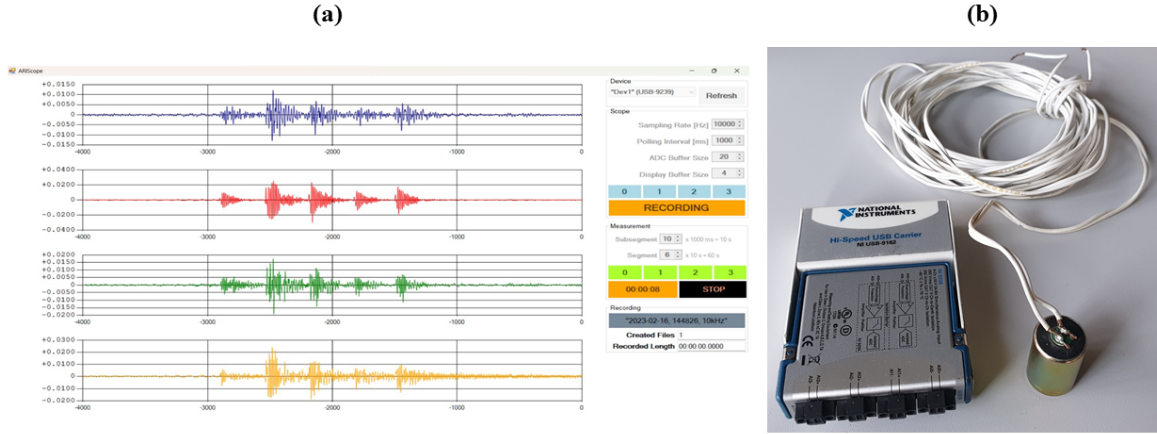
İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği binasında gerçek zamanlı testler yapılmıştır. Şekil 4.1’de gösterilen asma kat üzerine yerleştirilmiş sensör dizinine alt kattan uzun bir çubuk yardımıyla vurularak kazazedenin hareketi mimiklenmiştir.



Şekil 4.1 : İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği binasında gerçekleştirilen test anından bir görüntü.

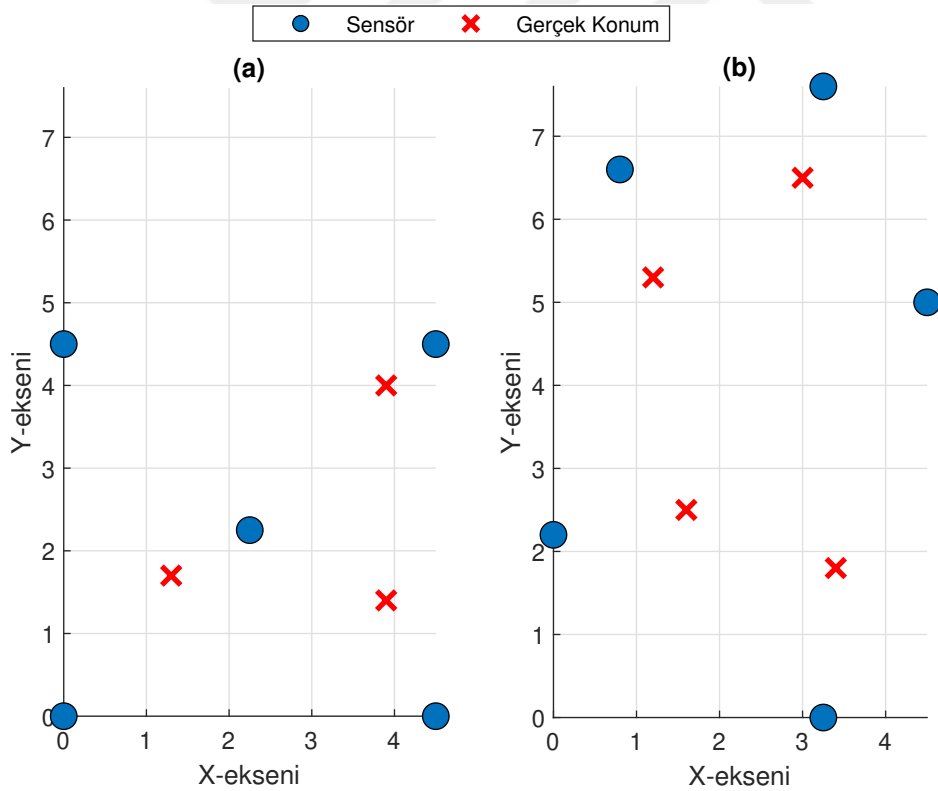
Bu test için sınamalarda kullanılan iki farklı sensör dizini ile testler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmesi devam eden [37] donanım sisteminin limitli sensör sayısından dolayı İTÜ ARIS LAB’da bulunan *Kayıtçı* sistemi ve 5 adet jeofon sensörü ile gerçek zamanlı kayıtlar alınmıştır. *Kayıtçı* sistemine ait ara yüz ve kullanılan donanımlar Şekil 4.2’de verilmektedir. Kayıt için

- Jeofon: 14 Hz, Düşey-bileşenli;
- Örnekleme hızı: 2 kHz;
- ADC: National Instrument’a ait NI 9239 ADC ve Hi-Speed USB Carrier NI USB-9162 kullanılmıştır.



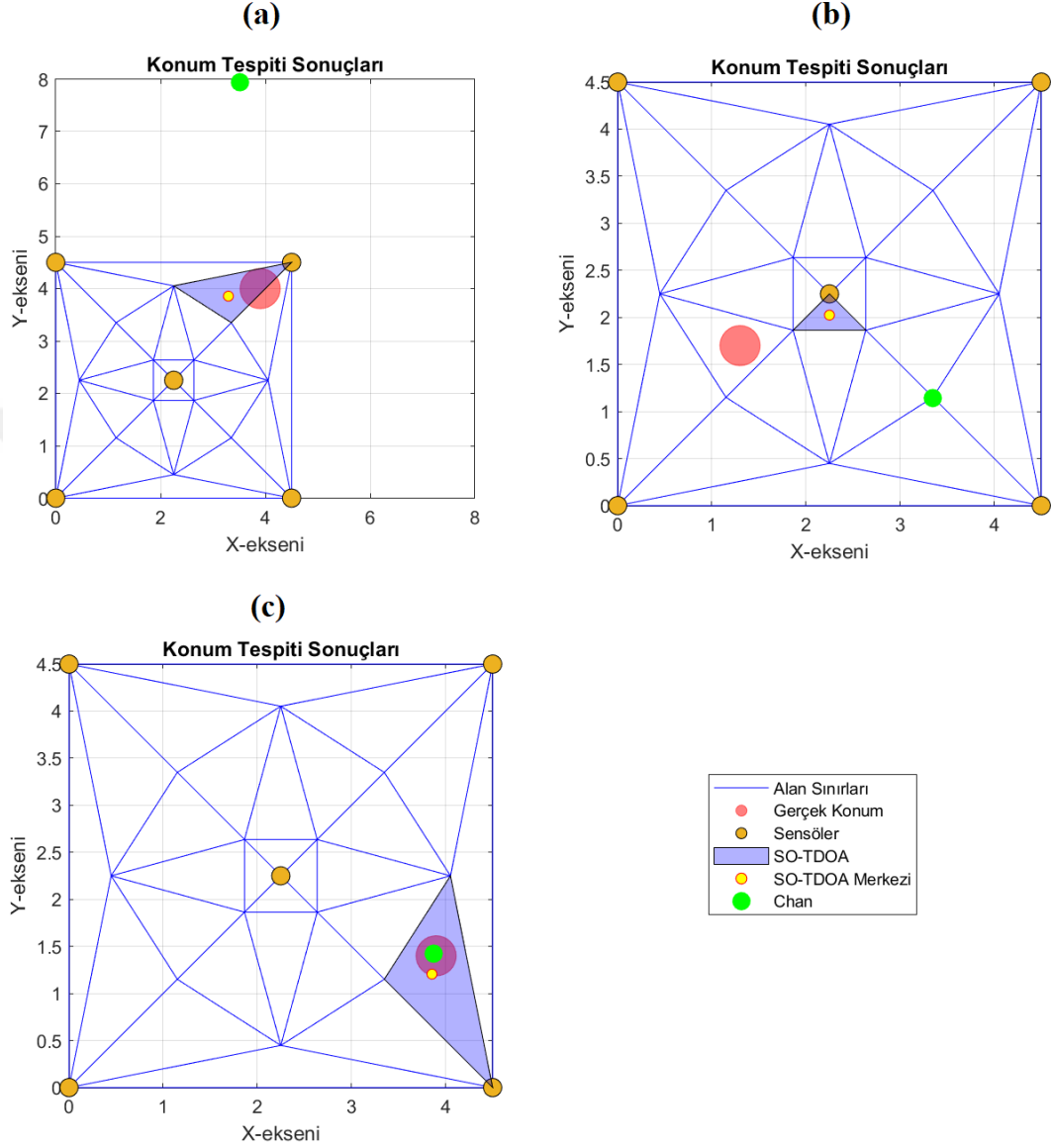
Şekil 4.2 : (a) Kayıtcı ara yüzü; (b) Kayıt sisteminde kullanılan Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) ve jeofon sensör gösterilmektedir.

Karesel geometrik dizinle yapılan birinci testte Şekil 4.3 (a)'da gösterildiği gibi üç farklı yerden; dağıtık yerleştirilmiş sensör dizininde ise Şekil 4.3 (b)'de gösterildiği gibi dört farklı yerden vurulmuştur.



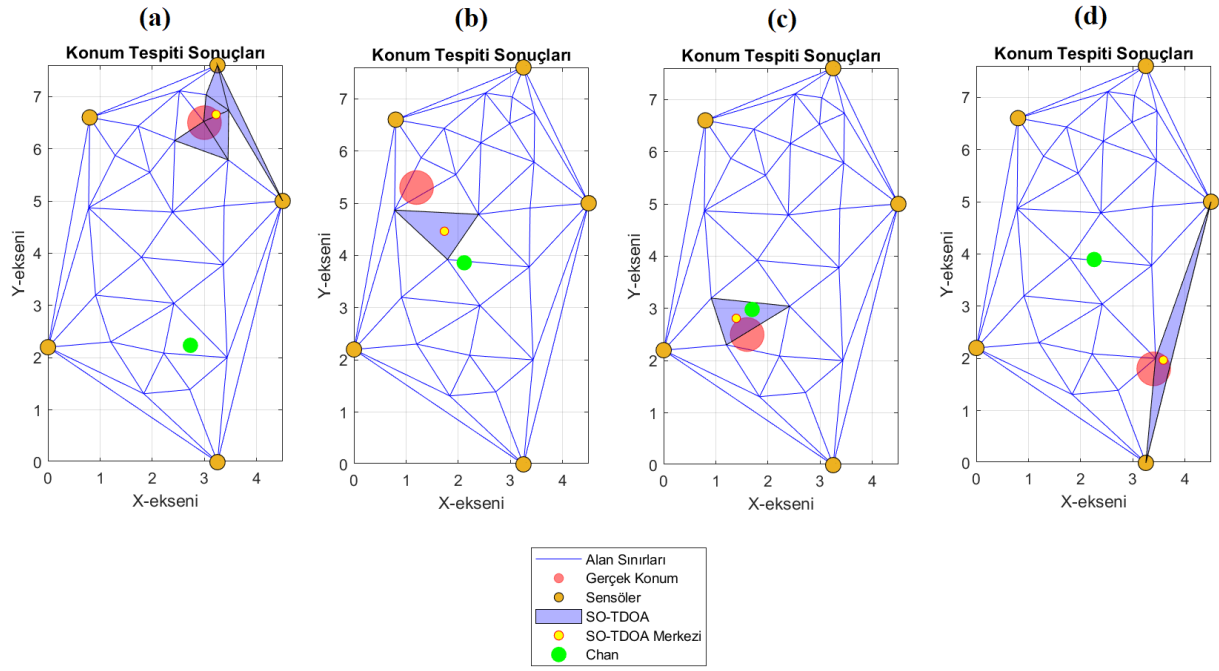
Şekil 4.3 : (a) Birinci sensör dizini ve (b) ikinci sensör dizinine ait testlerde kaynakların gerçek konumları kırmızı çarpılar ile gösterilmektedir.

Chan ve SO-TDOA yöntemleri ile elde edilen konum tespitleri karesel geometrik sensör dizini için sonuçlar Şekil 4.4'te verilirken; Şekil 4.5'te ise dağıtık sensör dizinine ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.4 : Birinci sensör dizininde üç farklı noktadan (kırmızı daireler) vurulmuş ve SO-TDOA sonucu mavi alan ile Chan yöntemine ait sonuç ise yeşil daire ile gösterilmiştir.

Chan ve SO-TDOA yöntemleri ile tespit edilen alanlar ve gerçek konum arasındaki uzaklıklar hesaplanmıştır. SO-TDOA yöntemi bölge temelli konum kestirimi sağladığı için üçgen bölgenin merkezi ile gerçek konum arasındaki fark, karşılaştırma için



Şekil 4.5 : İkinci sensör dizisinde dört farklı noktadan (kırmızı daireler) vurulmuş ve SO-TDOA sonucu mavi alan ile Chan yöntemine ait sonuç ise yeşil daire ile gösterilmiştir.

kullanılmıştır. Buna göre gerçek konum ve konum tespitleri arası uzaklıklar Şekil 4.4'te

- (a)'da Chan 3.95 m SO-TDOA 0.62 m,
- (b)'de Chan 2.12 m SO-TDOA 1 m,
- (c)'de Chan 0.03 m SO-TDOA 0.19 m

iken ve Şekil 4.5'te

- (a)'da Chan 4.27 m SO-TDOA 0.27 m,
- (b)'de Chan 1.71 m SO-TDOA 0.99 m,
- (c)'de Chan 0.48 m SO-TDOA 0.37 m,
- (d)'de Chan 2.38 m SO-TDOA 0.25 m şeklinde bulunmuştur.

Elde edilen gerçek zamanlı testlerde, her iki sensör yerleşimi için de SO-TDOA yönteminin Chan yöntemine göre daha başarılı hedef konumlandırmayı sağladığı görölmüşür.





5. SONUÇLAR

Çalışmamızda pasif sensör dizinlerinin yerleştirildiği yıkılmış bir binada otomatik kazazede konum tespitini sağlayan SO-TDOA ve Chan yöntemleri araştırılmıştır. Yöntemlere ait hedef konumlandırma için çözüm aşamaları irdelenmiş ve hem sentetik veri sınamaları hem de gerçek zamanlı testlerle analizleri gerçekleştirilmiştir.

Araştırmamızda iki farklı konum tespit yaklaşımı sunulmuştur. Chan yöntemi noktasal bir konum tespitini gerçekleştirirken, SO-TDOA yöntemi hedefin bulunabileceği üçgen bölgeyi veya bölgeleri tespit etmektedir. İki yöntemin sınamaları karesel ve dağıtık geometriye sahip sensör yerleşimleriyle sınanmıştır. Karesel geometrik dizinle yapılan sınamalarda Chan yönteminin MSE değeri daha düşük gözlemlenirken, gerçek zamanlı testlerde Chan metodunun bazı testlerde diğer yönteme göre yüksek hata payı gözlemlenmiştir. Özellikle doğal afetin yaşandığı bir ortam koşulunda ise sensörlerin dağıtık konumlandırılması ön görülmüş, sınamalar ve gerçek zamanlı testler de çalışmamızda gerçekleştirilmiştir. İki yöntem hem sentetik verilerle hem de gerçek zamanlı verilerle yapılan testleri karşılaştırıldığında SO-TDOA yönteminin daha yüksek başarımlar sağladığı tespit edilmiştir.

Çalışmamızda analiz ve karşılaştırmada kullanılan Chan yöntemi gibi diğer konumlandırma yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin, konum tespitindeki hataların azaltılması amacıyla ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. SO-TDOA ve Chan yöntemlerinin hibrit kullanıldığı SO-Chan yöntemimize ait sonuçlar incelenmiştir. Elde edilen sınama sonuçları ile karşılaştırıldığında SO-Chan yöntemi dağıtık dizinlerde SO-TDOA'ye göre hata oranı daha fazla, karesel geometride ise Chan'e göre daha az bulunmuştur.

Çalışmamızın herhangi bir doğal afette kullanılması için ara yüz geliştirilmiştir. Ara yüz iyileştirmeleri ve sismik-akustik kazazede donanım sistemine entegrasyonu devam etmektedir.

5.1 Önerilen Çalışmalar

Araştırmalarımız hali hazırda kullanılan kazazede tespit sistemlerinin eksikliklerini kapatarak, kullanılan yöntemlerin geliştirilmesiyle yeni teknolojik gelişmelerle canlı hayatının kurtarılmasına yardımcı olacaktır.

SO-TDOA yönteminin testler sırasında gözlemlenen eksiklikleri, yöntemin geliştirmelerini önemli kılmaktadır. Hibrit sistemimiz SO-Chan'ın ileriki aşamalarında,

- SO-Chan metodunun kestirimlerini yinelemeli sonuçlar ile iyileştirilmesi,
- Farklı yeni yöntemlerin uygulanması,
- Yöntemlerin dağıtık dizinlerdeki renk haritası sonuçlarının incelenmesiyle yöntemde geliştirmelerin yapılması planlanmaktadır.

SO-TDOA ile konum tespitinde kullanılan alanın alt üçgen bölgelere ayrılmasında Delaunay üçgenleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu üçgenleme yöntemi özellikle dağıtık sensör dizininde üçgen bölgeler orantısız boyutlanmaktadır. Alt bölgelerin farklı geometrik şekillerle veya eş üçgenlerle testlerinin etkisi araştırılması önerilen çalışmalardandır.

Yöntemlerde sensör konumları bilinerek hedef konumlandırılması yapılmaktadır. Sabit sensörlerin yerleştirilmediği konum tespiti çalışmalarında, sensör konumlarının alana göre dağıtık yerleştirilmesi sensörlerin konum bilgisinin bulunmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum için otomatik sensör konum çalışmaları araştırılabilir.

SO-TDOA yönteminin, sensör alanı dışında da konum tespitini yapabildiği bir yöntemin geliştirilebilir. Böylelikle daha farklı uygulama alanlarında kullanılabilir.

Bölgesel tespit yapan SO-TDOA yöntemi iki boyutta konum tespitini gerçekleştirmektedir. Bu yöntem ile geliştirilecek üç boyutlu konum tespitleri ile havada ve yer altında konumlandırmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Collette, C., Artoos, K., Guinchard, M., Janssens, S., Carmona Fernandez, P. ve Hauviller, C.** (2011). Review Of Sensors for Low Frequency Seismic Vibration Measurement, *Teknik Rapor*.
- [2] **Havskov, J. ve Alguacil, G.** (2004). *Instrumentation in Earthquake Seismology*, cilt358, Springer.
- [3] **Ketcham, S., Moran, M., Lacombe, J., Greenfield, R. ve Anderson, T.** (2005). Seismic Source Model for Moving Vehicles, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(2), 248–256.
- [4] **Ketcham, S., Anderson, T., Lacombe, J. ve Moran, M.** (2005). Seismic Propagation from Humans in Open and Urban Terrain, *2005 Users Group Conference (DOD-UGC'05)*, s.270–277.
- [5] **So, H.C. ve Lin, L.** (2011). Linear Least Squares Approach for Accurate Received Signal Strength Based Source Localization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59(8), 4035–4040.
- [6] **Yin, F., Zhao, Y., Gunnarsson, F. ve Gustafsson, F.** (2017). Received-Signal-Strength Threshold Optimization Using Gaussian Processes, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(8), 2164–2177.
- [7] **Lin, S.K.** (2013). *Electronic Warfare Target Location Methods*, Second Edition. Edited by Richard A. Poisel, Artech House, 2012; 422 pages. ISBN 978-1-60807-523-2, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13, 1151 – 1157.
- [8] **Zheng, Y., Liu, J., Sheng, M. ve Li, J.** (2017). Indoor Localization with Irregular Antenna Deployment, *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, s.1–5.
- [9] **Zou, Y., Wu, L., Fan, J. ve Liu, H.** (2023). A Convergent Iteration Method for 3-D AOA Localization, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(6), 8267–8271.
- [10] **Shin, D. ve Nikias, C.** (1994). Estimation of Frequency-Delay of Arrival (FDOA) Using Fourth-Order Statistics in Unknown Correlated Gaussian Noise Sources, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(10), 2771–2780.
- [11] **Pine, K.C., Pine, S. ve Cheney, M.** (2021). The Geometry of Far-Field Passive Source Localization With TDOA and FDOA, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(6), 3782–3790.

- [12] **Zhang, B., Hu, Y., Wang, H. ve Zhuang, Z.** (2018). Underwater Source Localization Using TDOA and FDOA Measurements With Unknown Propagation Speed and Sensor Parameter Errors, *IEEE Access*, 6, 36645–36661.
- [13] **Schmidt, R.O.** (1972). A New Approach to Geometry of Range Difference Location, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-8(6), 821–835.
- [14] **Fang, B.** (1990). Simple Solutions for Hyperbolic and Related Position Fixes, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26(5), 748–753.
- [15] **Bancroft, S.** (1985). An Algebraic Solution of the GPS Equations, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-21(1), 56–59.
- [16] **Abel, J.** (1990). A Divide and Conquer Approach to Least-Squares Estimation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26(2), 423–427.
- [17] **Chan, Y.T. ve Ho, K.C.** (1994). A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(8), 1905–1915.
- [18] **Friedlander, B.** (1987). A Passive Localization Algorithm and Its Accuracy Analysis, *IEEE Journal of Oceanic engineering*, 12(1), 234–245.
- [19] **Smith, J. ve Abel, J.** (1987). Closed-Form Least-Squares Source Location Estimation from Range-Difference Measurements, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(12), 1661–1669.
- [20] **Schau, H. ve Robinson, A.** (1987). Passive Source Localization Employing Intersecting Spherical Surfaces from Time-Of-Arrival Differences, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(8), 1223–1225.
- [21] **Abel, J. ve Smith, J.** (1987). The Spherical Interpolation Method for Closed-Form Passive Source Localization Using Range Difference Measurements, *ICASSP '87. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, cilt 12, s.471–474.
- [22] **Tomic, S., Beko, M. ve Tuba, M.** (2019). A Linear Estimator for Network Localization Using Integrated RSS and AOA Measurements, *IEEE Signal Processing Letters*, 26(3), 405–409.
- [23] **Wu, M. ve Hao, C.** (2022). Super-Resolution TOA and AOA Estimation for OFDM Radar Systems Based on Compressed Sensing, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(6), 5730–5740.
- [24] **Stafsudd, J.Z., Hudson, R.E., Taciroglu, E. ve Yao, K.** (2007). Seismic-Array Signal Processing for Moving Source Localization, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XVII*, cilt6697, International Society for Optics and Photonics, SPIE, s.66970H.

- [25] **Faghfourı, A.E. ve Frısh, M.B.** (2011). Robust Discrimination of Human Footsteps Using Seismic Signals, *E.M. Carapezza, (düzenleyen), Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications XIII*, cilt8046, International Society for Optics and Photonics, SPIE, s.80460D.
- [26] **Jin, B., Xu, X. ve Zhang, T.** (2018). Robust Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Localization Using Weighted Least Squares with Cone Tangent Plane Constraint, *Sensors*, 18(3).
- [27] **Aras, A., Girgin, M. ve Akgül, T.** (2023). Victim Detection System via Geophone Arrays, *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, s.1–4.
- [28] **Mukhopadhyay, B., Anchal, S. ve Kar, S.** (2018). Person identification using seismic signals generated from footfalls, *arXiv preprint arXiv:1809.08783*.
- [29] **Zetterqvıst, G., Wahledow, E., Sjövik, P., Gustafsson, F. ve Hendeby, G.** (2023). Elephant DOA Estimation using a Geophone Network, *2023 26th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, IEEE, s.1–6.
- [30] **Bahroun, R., Michel, O., Frassati, F., Carmona, M. ve Lacoume, J.** (2014). New Algorithm for Footstep Localization Using Seismic Sensors in An Indoor Environment, *Journal of Sound and Vibration*, 333(3), 1046–1066.
- [31] **Knapp, C. ve Carter, G.** (1976). The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 24(4), 320–327.
- [32] **Torrieri, D.J.** (1984). Statistical Theory of Passive Location Systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (2), 183–198.
- [33] **Foy, W.H.** (1976). Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (2), 187–194.
- [34] **Lee ve Preparata** (1984). Computational Geometry—A Survey, *IEEE Transactions on Computers*, C-33(12), 1072–1101.
- [35] **De Loera, J., Rambau, J. ve Santos, F.** (2010). *Triangulations: Structures for Algorithms and Applications*, cilt 25, Springer Science & Business Media.
- [36] **Preparata, F.P. ve Shamos, M.I.** (2012). *Computational Geometry: An Introduction*, Springer Science & Business Media.
- [37] **Aras, A.** (2024). *Jeofon Dizinleri Vasıtasıyla Kazazede Tespit Sistemi*.



EKLER

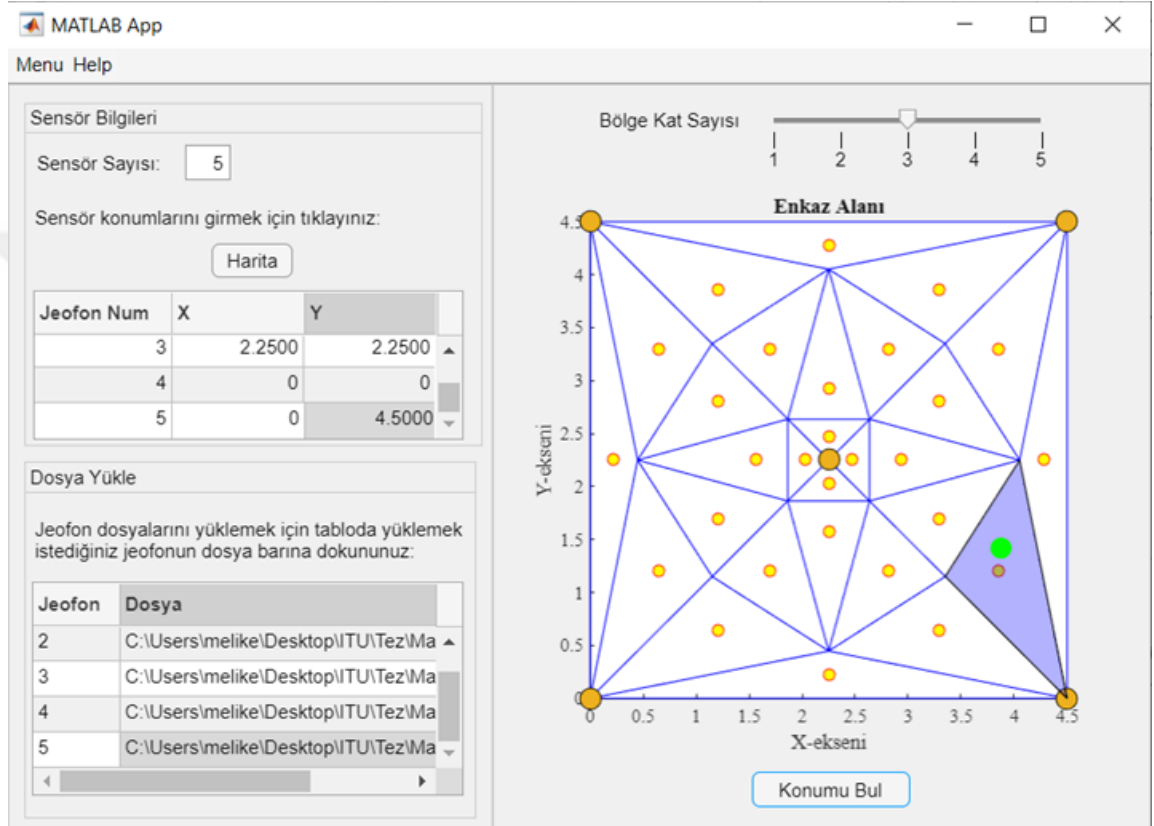
EK A : Yöntemlere Ait Ara Yüz





EK A : Yöntemlere Ait Ara Yüz

Hem deprem sonrası kazazede aramasında hem de herhangi bir sismik sinyalin konum tespitinde kullanılabilecek Şekil A.1’de verilen ara yüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede jeofon sensörlerinden toplanan veriler ara yüze yüklenerek otomatik konum tespit sonuçlarını görselleştiren, kullanıcı dostu tasarım hedeflenmiştir.



Şekil A.1 : Çevrimdışı çalışan ara yüze ait tasarım.

Ara yüz yazılımı MATLAB App Designer’ı ile yapılmıştır. App Designer, hazır ara yüz kütüphanesi ile buton, kutucuk, grafik, sayı-yazı girişleri gibi ikonları içerisinde bulundurmaktadır. Tasarımımız da sensör bilgilerinin girildiği, dosyaların yüklendiği ve sonuçların gösterildiği üç ana alan bulunmaktadır. Tasarımda sensör sayısının, sensör konumlarının girildiği, değerlerin değiştirebildiği metin giriş kutuları ve tablolar kullanılmıştır. Sensör konumları hem tablo üzerinden girilebildiği gibi hem de harita üzerinden de nokta seçimleri ile de girilebilmektedir. Sismik sinyal dosyalarının bilgisayar içerisindeki herhangi bir dosyadan seçilebildiği ve ".wav" formatında yüklendiği ve dosya adının bulunduğu bir tablo alanı bulunmaktadır. "Bölge Kat Sayısı" alanında sürüklenabilir kutucuk sayesinde üçgen bölgelerin detaylandırılabilir. Bütün veriler girildikten sonra konum tespitinin başlatılması bir buton aracılığıyla yapılmaktadır. Butona tıklanıldığında sonuçlar

ara yüzde sağ tarafta bulunan grafik üzerinde görselleştirilmektedir. Aynı zamanda herhangi bir veri eksik girildiğinde uyarı ekranı vasıtasıyla eksik bilginin girilmesi istenilmektedir.



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Melike GİRGIN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2019, Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2021'den beri İstanbul Teknik Üniversitesi Advanced Research on Images and Signals (ARIS) Laboratuvarı'nda sinyal işleme üzerine çalışmaktadır.
- 2023 yılında ArtGe Teknoloji Mühendislik San. ve Tic. A.Ş.'de çalışmaya başlamıştır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Aras A., **Girgin M.**, Akgul T. (2023). Victim Detection System via Geophone Arrays, *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, July 05-08, 2023 Istanbul, Türkiye, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU59756.2023.10223914.