

# Researcher

CILT/VOL **03**

SAYI/ISSUE **02**

YIL/YEAR **2023**

# Researcher

CİLT/VOL 03

SAYI/ISSUE 02

YIL/YEAR 2023

## Sahibi / Owner

Ankara Bilim Üniversitesi / Ankara Science University

## İmtiyaz Sahibi / Licensee

Prof. Dr. Yavuz DEMİR (Ankara Science University)

## Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR (Ankara Science University)

## Editör / Editor

Assoc. Prof. Dr. Yavuz Selim ÖZDEMİR (Ankara Science University)

## Alan Editörleri / Section Editors

Assoc. Prof. Dr. Ender SEVİNÇ (Ankara Science University)

Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan Ahmet ARIK (Nuh Naci Yazgan University)

Asst. Prof. Dr. Emir Hüseyin ÖZDER (Ankara Science University)

Asst. Prof. Dr. Ercüment KARAPINAR (Ankara Science University)

## Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR (Ankara Science University)

Prof. Dr. İsmail COŞKUN (Ankara Science University)

Prof. Dr. Halim Haldun GÖKTAŞ (Ankara Science University)

Prof. Dr. Cem Harun MEYDAN (Ankara Science University)

Assoc. Prof. Dr. Yavuz Selim ÖZDEMİR (Ankara Science University)

Assoc. Prof. Dr. Ender SEVİNÇ (Ankara Science University)

Assoc. Prof. Dr. Babek Erdebili (B.D. Rouyendegh) (Ankara Yıldırım Beyazıt University)

Assoc. Prof. Dr. Tansel DÖKEROĞLU (Çankaya University)

Asst. Prof. Dr. Ercüment KARAPINAR (Ankara Science University)

Asst. Prof. Dr. Volkan ÇAKIR (Lebanese American University)

## Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Yavuz DEMİR (Ankara Science University)

Prof. Dr. Beycan İBRAHİMOĞLU (Ankara Science University)

Prof. Dr. Ahmet COŞAR (Çankaya University)

Prof. Dr. Abdullah AVEY (Süleyman Demirel University)

Prof. Dr. Ashraf M. ZENKOUR (King Abdul Aziz University)

Prof. Dr. Sci Nguyen Dinh DUC (Vietnam National University)

Prof. Dr. Mohammad SHARİYAT (K.N. Toosi University of Technology)

Prof. Dr. Mohammad Reza ESLAMİ, (Amirkabir University of Technology)

Prof. Dr. Hui-Shen SHEN (Shanghai Jiao Tong University)

Prof. Dr.-Ing. Eckart SCHNACK (Karlsruhe Institute of Technology)

Assoc. Prof. Dr. Nicholas FANTUZZI (University Bologna)

## Dil Editörü / Language Editor

Asst. Prof. Dr. Ayşe Saki DEMİREL (Ankara Science University)

## Sekretarya / Editorial Secretariat

Derya NURCAN (Ankara Science University)

e-ISSN:2717-9494

Yayıncı / Publisher: Ankara Bilim Üniversitesi / Ankara Science University

Basım Tarihi / Date of Publication: Aralık 2023/ December 2023

Yayın Türü / Publication Type: Uluslararası Süreli Yayın / International Periodical

İletişim Bilgileri / Contact Information: Maltepe Mahallesi Şehit Gönenc Caddesi No: 5 Çankaya Ankara

Web Sitesi / Website: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/researcher>

E-posta / E-mail: [researcher@ankarabilim.edu.tr](mailto:researcher@ankarabilim.edu.tr)

Researcher uluslararası, hakemli ve yılda iki sayı yayınlanan dergidir. İngilizce ve Türkçe dilindeki metinler kabul edilir.  
The Researcher is a peer-reviewed, international journal publishing two issues a year. Manuscripts are accepted in English and Turkish languages.

ANKARA, ARALIK 2023 / DECEMBER 2023

## Önsöz

Yayın hayatına 2013 yılında başlamış olan "Researcher: Social Sciences Studies" (RSSS), 2020 Ağustos ayı itibariyle "Researcher" ismiyle Ankara Bilim Üniversitesi bünyesinde yayın hayatına devam etmektedir. Fen Bilimleri alanına katkıda bulunmayı hedefleyen özgün araştırma makalelerinin yayımlandığı bir dergidir. Dergi, özel sayılar dışında yılda iki kez yayımlanmaktadır.

Amaçları doğrultusunda dergimizin yayın odağında; Endüstri Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği ve Elektrik Elektronik Mühendisliği alanları bulunmaktadır. Dergide yayımlanmak üzere gönderilen aday makaleler Türkçe ve İngilizce dillerinde yazılabilir. Dergiye gönderilen makalelerin daha önce başka bir dergide yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere başka bir dergiye gönderilmemiş olması gerekmektedir. Bir makalenin dergide yayımlanabilmesi için en az iki hakem tarafından olumlu rapor verilmesi gerekir.

Değerlendirme sonucu kabul edilen çalışmalar sırasıyla; intihal kontrolünün yapılması, kaynakça düzenlemesi, gönderme ve atıf kontrolü, mizanpaj ve dizgisinin yapılması süreçlerinden geçer.

Researcher, Dergipark üzerinden bilimsel araştırmaların içeriğine anında açık erişim sağlamaktadır.

Researcher makale işlem ücreti (gönderme, değerlendirme veya basım ücreti) ve makalelere erişim için abonelik ücreti talep etmediği için ücretsiz yayın yapan dergi statüsündedir, Dergimiz herhangi bir kâr amacı gütmemekte ve hiçbir gelir kaynağı bulunmamaktadır.

Baş Editör

**Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR**

Editör

**Doç. Dr. Yavuz Selim ÖZDEMİR**

## **İçindekiler / Index**

A Literature Review on Emotion Recognition in Speech

**Ö. Çağrı DALA**.....46-52

Uzay Tabanlı Güneş Enerjisine Genel Bakış

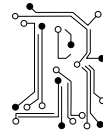
**Hamza ALAHMAD, Edip TAŞKESEN, Elif Nur BİLEN** ..... 53-75

Comparison of Cost and Benefit Analysis of Active Leakage Control Applications in Water Distribution Systems

**Abdullah ATEŞ, Salih YILMAZ, Mahmut FIRAT** ..... 76-85

Fuzzy Logic Methods for Determining the Mechanical Behavior of Masonry Walls

**Başak ZENGİN, Pınar USTA, Özge ONAT** ..... 86-96



## A Literature Review on Emotion Recognition in Speech

Ö. Çağrı DALA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Ankara Science University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Türkiye; ORCID: [0000-0001-8202-7802](https://orcid.org/0000-0001-8202-7802)

\* Corresponding Author: [cagri.dala@ankarabilim.edu.tr](mailto:cagri.dala@ankarabilim.edu.tr)

Received: 20 October 2022; Accepted: 24 September 2023

**Reference/Atıf:** Ö.Ç. Dala, “A Literature Review on Emotion Recognition in Speech”, Researcher, vol.3, no.2, pp.46-52, December 2023, doi: 10.55185/researcher.1192370

### Abstract



In our age, we are bombarded with multimedia content daily. Although, face-to-face communication always outgrows the potential factors of healthy assessment of our peers through recorded content or live media interaction, (be it text, video, images, speech) new approaches to render us able to understand and discern between emotions of our peers on multimedia content are getting more and more popular and more complex. Two robust topics in this regard are generally named as sentiment analysis and emotion detection. The advent and exponential growth of social networks and for instance, the employment of speech bots have made it a necessity to particularly address the problem of healthy emotion recognition outside face-to-face, everyday conversations or interactions. Machines' capability to perform the set of tasks through Machine Learning approaches, namely consisting of detecting, expressing, and understanding emotions is collectively known as, as in humans, emotional intelligence. Different modes of input as human behavior like those taken from audio, image, video sources and signal interpretations processed through Electro-encephalography (EEG), related brain wave measurements are used in emotion recognition. My study aim is intended to be the examination and review of recent study approaches in Emotion Detection in Speech, possibly establishing links or differences between recent study publishes because each study paper focuses on a single or set of Machine Learning approaches which are employed in Emotion Detection in Speech. This paper tries to examine various relevant research involving methods of Machine Learning which were studied and tested under this research respective to Speech Emotion Recognition (SER). Effectiveness of the involved methods and databases are discussed while commenting on the studies and expressed in the form of their findings. Improvements throughout these studies are, though not chronologically, compared using simple tables which show independent accuracies of several Machine Learning classifier combinations.

**Keywords:** speech emotion recognition, emotion detection in speech, machine learning classifier, machine learning approaches

### 1. Introduction

Human emotion detection in speech is a subset of emotion recognition. Emotion recognition focuses on other modes of input as well such as video captures, images, signal interpretations processed through Electro-encephalography (EEG), related brain wave measurements; all collected where a human being is the subject/source. Human emotion can be identified by many physical attributes like responses, body gesture, heart rate, body temperature etc. It can also be detected without a physical contact such as using speech [1]. Speech features such as intensity, intonation, pitch which are prosodic features are extracted from human audio sources. Spectral features are represented by further processing signals from these audio sources. Speech emotion recognition (SER) is benefitting many applications in recent years. Examples include tutoring system used in distance learning which can detect the bored or not interested users and can allow changing the style and the level of study material provided [1][2]. There are three important factors under consideration when detecting emotion from speech:

1. Contents: "what is said"
2. Style/way: "how it was said"
3. Human: It refers to male/female/actor "who says it".

The main steps in SER are speech database (preprocessing if needed), the process of feature Extraction and classifier used to detect the emotions [1].

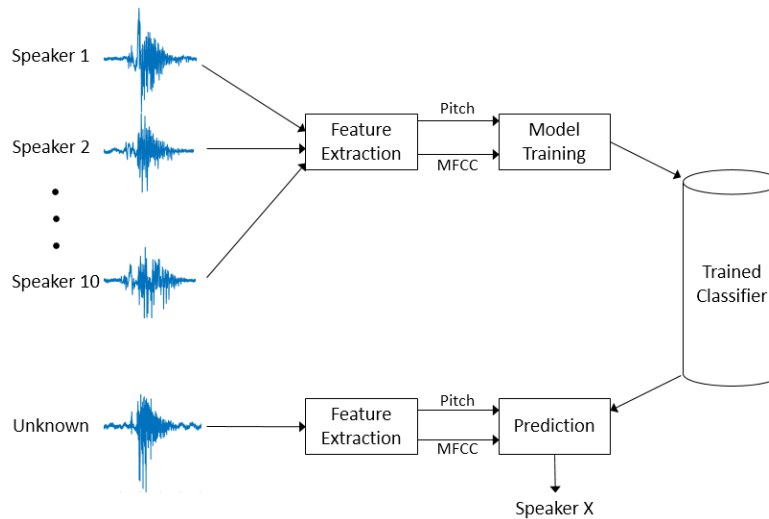


Figure 1 – Classification Process

Speech database collection is important for emotion recognition from speech. A lot of work has been done on collection techniques and evaluation of speech databases. There are many criteria that are used to evaluate the suitability of speech databases for different ML Classification methods.

Feature selection and extraction is the second and one of the important steps in SER activities.

Extraction of features is a critical step in SER, determining the final stage performance which ultimately is the accuracy of Machine Learning classifiers. In the case of relevant features, combination of features can also be relevant in improving the emotion recognition [1] Prior to this final stage which is Classification, the ML model or models in question must be trained with the help of a portion of the dataset. (TRAIN\_SET comprising usually %70-80 of the whole samples belonging to the dataset).

Genetic algorithms are originally a breed of optimization over search problem approaches. If we assume going through weighted nodes or edges to have made out a pattern, in consistently lesser durations of time, is refined closer to the goal at hand, search problem solution improvements can be met as shown in many previous studies. One stretched assumption which shows us that application of GAs on MLs is feasible is that in a credit risk assessment setting when a priori information about the potentially attractive areas is available, then the initial population of the GA can be generated in such a way that the attractive areas of the feasible region must be covered with a set of points and the dimensionality of the problem can be reduced to those features that form attractive areas. In this way, the attractive area (the region of attraction) of a global minimum is defined as the largest set of points, such that for any starting point from that set, the infinitely small step of the gradient descent algorithm will converge to the global minimum. Feature selection is the problem of choosing a small subset of features that ideally is necessary and sufficient for describing the target concept. (Kira & Rendell, 1992) [3]

A more recent study comparing performance of heuristic optimization among options applicable to problems on making decisions shown to be critical by UAV flight range limitations can be found in [4]. These options include improved GA and Nearest Neighbors heuristics.

Parallel computation that starts each optimization process from a different starting point (vertex) and works with diversified vertices can be considered as a mechanism to prevent stagnation during the steps of search optimization techniques. [5]

As an additional remark due to the following part quoted from a study in Machine Learning in [6], “we show that with proper regularization, distributional bias of the data can push the solution towards the global minima.”

## 2 Literature Review

Classifiers are used for recognition of subsets of human emotion. Several classifiers can be implemented for SER and their performance depends on the database design and features extracted from the speech [1]. There are many Machine Learning classifiers to classify emotions from speech input. Some of the popular ML classifiers are mentioned in Table 1 [1]:

TABLE 1: ML classifiers

| Classifiers                                       | Description  |
|---|--|
| Incomplete Sparse Least Square Regression (ISLRS) | It is a model which uses least square regression to find emotion labels based on linear relationship between speech features [1][8]. It is a statistical method which depends on sparseness of the model itself and incompleteness of the dataset. There are two critical reasons why sparse linear models might be preferable to non-sparse models. First, sparse models often produce lower variance predictions, and hence better generalization. Also, models with a reduced number of nonzero coefficients tend to represent only strong effects of the data, thus eliminating details that may be unimportant to a further analysis. |
| Extreme learning machine (ELM)                    | It is a feed forward neural network which uses only one hidden layer. ELM is very efficient and effective when the training set is small. Unlike conventional NNs whose weights need to be tuned using the backpropagation algorithm, in ELM the weights between the input layer and the hidden layer are randomly assigned and then recalculated. The weights between the hidden layer and the output layer can be analytically determined through a simple generalized inverse operation of the hidden layer output matrices. [1][9].  |
| Gaussian Mixture Models (GMMs)                    | GMMs perform better when data is normally distributed. The classification accuracy of GMMs also depends on factors like number of Gaussians in each class, size of the dataset, distribution of data and so on. GMM is a probabilistic model and is considered as a state-of-art model and is used mostly for identification and verification of speaker. This model is the most appropriate model in case of global feature [1] [10-16].  |
| Support Vector Machine (SVM)                      | SVM is more popular in case of non-linear features as opposed to ISLRS (Kernel function). SVM is used in case of speaker independent application and gives better results in such a goal as compared to other classifiers [1][16].   |
| Artificial Neural Networks (ANN)                  | ANN is another classifier which is popular for its non-linear features (Kernel function) [1]. This classifier gives better results compared to GMM and HMM in case of smaller number of training samples [1] After ANN training, the information may produce output even with inadequate data. The loss of performance here relies upon the significance of missing data.  |
| Vector Quantization (VQ)                          | In VQ, a vector of fixed size is created with fixed dimensions. [1] In a Learning Vector Quantization setup, the neural network in question has a first competitive layer and a second linear layer. The competitive transfer function produces a 1 for output element $a_i^1$ corresponding to $F_i$ , the winning neuron. All other output elements in $a_i^1$ are 0. Neurons close to the winning neuron are updated along with the winning neuron. The linear layer transforms the competitive layer's classes into target classifications defined by the user.  |
| k-Nearest Neighbors (k-NN)                        | k-NN assigns the class label of most of the K-nearest patterns in data space. For this sake, we must be able to define a similarity measure in data space.<br><br>The choice of K defines the locality of KNN. For K = 1, little neighborhoods arise in regions, where patterns from different classes are scattered. For larger neighborhood sizes, e.g. K = 20, patterns with labels in the minority are ignored.  |
| Hidden Markov Model (HMM)                         | In case of automated emotion recognition, HMM is very popular and gives accurate results. This model is especially used when samples are subjectively considered to be little in number. [1] Forced alignment can be used to represent audio features as HMM states. HMM can be incorporated along with a Gaussian Mixture Model.  |

In human emotion recognition from speech, most essential part is to identify relevant features and classifiers. From the literature, the accuracy of the above-mentioned classifiers with different speech databases are summarized in Table 2 as follows:

TABLE 2: Literature Survey of Emotion Recognition from Speech

| Ref.    | Classifier used  | Database   | Accuracy (%)   |
|---------|--|--|--|
| [1]     | Autoencoder based Adaptation model   | ABC, GeWEC, EMODB, SUSAS                                 | 63.30 as an autoencoder is a type of artificial neural network used to learn efficient codings of unlabeled data (unsupervised learning) which is suitable for use at the preprocessing step. An autoencoder learns two functions: an encoding function that transforms the input data, and a decoding function that recreates the input data from the encoded representation.   |
| [1][8]  | ISLRS  | eNTERFACE DB, FAUAIBO                                    | 69.33 and 60.50 as we can compare linear and logistic models' performance by using root mean squared error (RMSE) and the coefficient of determination ( $R^2$ score), the linear models being of the nature having more applicability to prediction purposes  |
| [1][9]  | ELM  | IEMOCAP  | 54.30 as Extreme Learning Machine approach used when in its primal development level is moderately efficient   |
| [1]     | GMM  | Real life data   | 75 A further improvement which can be applied on the class margin (in terms of distance between mixture means) is critical for convergence of self training to useful models   |
| [1][10] | GMM  | Basque   | 84.7 as real-life data can be considered randomly generated to a degree except the language in which it is recorded, performance in Basque was more uniform due to setting   |
| [1][11] | ANN and GMM  | IITKGP-SESC  | 56   |
| [1][12] | GMM and SVM  | IITKGP-SESC  | 60.6 where a Support Vector Machine is representative of a more accurate hyperplane among features   |
| [1][13] | SMO (Sequential Minimal Optimization Algorithm) with RBF (Radial Basis Function) | Berlin (EMO-DB)<br>English (SUSAS)                       | 78 as RBF approach includes mapping your point into the function being a Gaussian distribution where data is represented ultimately in a linear fashion. As SMO is fastest for linear SVMs and sparse data sets, this SMO + RBF as part of a SVM approach is successful with the EMO-DB dataset being comprised of the synthesis of data with emotion-simulating speech.   |
| [1][14] | HMM with 4- mixture GMMs   | Human speech and animal voice                            | 69, 82.7 as in a general Gaussian Mixture Model, the mixture is brought together as each model of utterances is a set of model parameters with estimated mean vector, covariance matrix and mixture weight. Each of parameter models is trained as part of unsupervised classification by using the expectation maximization property (EM) in mixture GMMs. A HMM is also employed where for speech recognition, the conditional probability distribution of a state in HMM is classically modelled using GMM. |
| [1][15] | GMM  | Swedish VP and English ISL meeting corpus Real life data | 79   |
| [1][16] | SVM  | Real Life data   | 74.75 where SVMs provide new efficient separability of non-linear regions that use "kernel functions": generalization of 'similarity' to new kinds of similarity measures based on dot products. SVM brings an option of use of quadratic optimization problem to avoid 'local minimum' issues with neural nets. SVMs have higher accuracy on average than most other approaches.  |
| [1][10] | SVM  | Berlin (EMO-DB), VAM DB                                  | 91.6   |
| [1][7]  | SVM  | Danish   | 88   |
| [1]     | SVM  | English speaking people, English movies                  | 71.62  |
| [1][20] | Fuzzy Set  | Malay English  | 60 as when fuzzy sets are implemented by their own in classification purpose, can provide lower accuracy in spite of the setting at the beginning but they can be used in cooperation with Extreme Learning Machine approaches.  |
| [1]     | kNN  | English, Chineseurdu and Indonesian                      | 80.69 where the value of k is crucial, and one needs to choose it wisely to prevent overfitting or underfitting the model.   |
| [1][23] | HMM  | Semi-professional female actress                         | 88 as the accuracy is better than a regular GMM. A HMM can be thought of as a general mixture model plus a transition matrix, where each component in the general Mixture model corresponds to a node in the hidden Markov model, and the transition matrix informs the probability that adjacent symbols in the sequence transition from being generated from one component to another.   |
| [1][24] | HMM  | German   | 64.7   |



|         |              |         |   |
|---------|--------------|---------|---|
| [1][25] | VQ based HMM | Burmese | 60.1, VQ allows each speech utterance under consideration to be represented as a time sequence. The dataset in this study should be evaluated for its suitability given the language hardships. |
| [1][26] | HMM          | Spanish | 70  |

From the literature review, it is observed that the accuracy of the human emotion detection from speech depends on feature extraction, feature vector size, classifier used and speech database.

### 3. Method

As the method of Research Study, Literature Review was chosen. A comparative display of simple tables including the approaches in Machine Learning and their applications on specific databases with the resulting accuracies were given depending on respective studies specified as references.

The research process was divided into three steps:

-Problem definition: A comprehensive reflection of methods used in Machine Learning for the purpose of Emotion detection in speech was to be given. To aid this goal, the following research questions were devised and examined:

- What approaches in Machine Learning are used for emotion detection in speech?
- What are efficient algorithms used for emotion detection in speech?
- Were the approaches or combination of approaches sufficient in terms of accuracy or performance?

-Literature search: to display the paper which gave me further leads in Literature Review, I had to use specific keywords:

“Emotion recognition”  
 “speech database”  
 “feature extraction”  
 “classifier”

-Basic analysis: An elimination of references from the [1] referenced paper which were not immediately relevant to the Literature Review and the comparison of the approaches which were in the remaining studies given as references in [1] were carried out. The paper is intended to be a summarization of comparisons of such approaches in the field.

### 4. Results

The accuracy increases with combination of classifiers. From the survey, it is also observed that the accuracy of the human emotion detection is not only dependent on the classifier used to detect it, it also depends on the speech database, features and the size of the feature vector used [1]. It is also observed that mostly features are categorized into prosodic, spectral or combination of these. Choice of classifiers or the combination used also plays an important role in achieving more accuracy. In the case of database, size and quality of speech recordings are the important factors affecting the accuracy [1].

### 5. Discussions

If we were to assume that all the datasets used were of equal length and quality: the SVM approach is the most accurate in classifying Human emotions from speech with the HMM coming second where HMM is normally most efficiently used over a small number of samples. ELM is the least efficient approach possibly because it uses one hidden layer although being feed forward is a prospective feature for the approach. SMO (Sequential Minimal Optimization algorithm) with RBF (Radial Basis Function) are two linear optimizations which give out a considerably successful outcome. The database and relatedly, the language spoken by the human subject and the naturality of speech in these recordings should play a more important role in the evaluation of accuracy.

## 6. Conclusion

A Literature Review based on Emotion Recognition in Speech has been given in this study. Artificial features like noise have been found to impact the results of the given studies where resulting performance is affected. This problem can be resolved using speech analysis based on correlation. There are still challenges in selecting the right speech database, feature selection by the approach(es) and estimation of features, classifiers which can get accurate results.

## Contribution of Researchers

All researchers have contributed equally to writing this paper.

## Conflicts of Interest

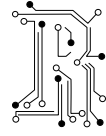
The authors declare no conflict of interest.

## References

- [1] "Survey on Human Emotion Recognition: Speech Database, Features and Classification" – Y.B. Singh, S. Goel
- [2] "Choice of a classifier, based on properties of a dataset: case study-speech emotion recognition", *International Journal of Speech Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 167–183, 2018. – S.G. Koolagudi, Y.V.S. Murthy and S.P. Bhaskar
- [3] "Genetic algorithm-based heuristic for feature selection in credit risk assessment" – S. Oreski, G. Oreski
- [4] "An Efficient Genetic Algorithm for Routing Multiple UAVs under Flight Range and Service Time Window Constraints" – M. Karakaya, E. Sevinç
- [5] "A novel parallel local search algorithm for the maximum vertex weight clique problem in large graphs" – E. Sevinç, T. Dökeroğlu
- [6] "A Theoretical Characterization of Semi-supervised Learning with Self-training for Gaussian Mixture Models" – S. Oymak, T. C. Gülcü
- [7] "Speech emotion recognition based on hmm and SVM", In *proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 4898–4901, 2005. Y.L. Lin and G. Wei
- [8] "A novel speech emotion recognition method via incomplete sparse least square regression", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 21, no. 5, pp. 569–572, 2014. – W. Zheng, M. Xin, X. Wang and B. Wang
- [9] "Speech emotion recognition using deep neural network and extreme learning machine", In *proceedings of Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*, pp. 223- 227, 2014. – K. Han, D. Yu and I. Tashev
- [10] "Automatic emotion recognition using prosodic parameters", *INTERSPEECH*, pp. 493–496, 2005. – I. Luengo, E. Navas, I. Hernáez, J. Sánchez
- [11] "Emotion recognition using LP residual", In *proceedings of IEEE Students' Technology Symposium (TechSym)*, pp. 255–261, 2010. – A. Chauhan, S. G. Koolagudi, S. Kafley and K. S. Rao
- [12] "Emotion recognition from speech signal using epoch parameters", In *proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, pp. 1–5, 2010. – S. G. Koolagudi, R. Reddy and K. S. Rao
- [13] "EmoVoice-A framework for online recognition of emotions from voice", *Perception in multimodal dialogue systems*, pp. 188–199, Springer, 2008. – T. Vogt, E. André and N. Bee
- [14] "Stress and emotion classification using jitter and shimmer features", In *proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. IV, pp. 1081-1084, 2007. – X. Li, J. Tao, M. T. Johnson, J. Soltis, A. Savage, K. M. Leong and J. D. Newman
- [15] "Emotion recognition in spontaneous speech using GMMs", *INTERSPEECH*, pp. 1-4, 2006. – D. Neiberg, K. Elenius and K. Laskowski
- [16] "Speech emotion recognition based on rough set and SVM", In *proceedings of Fifth IEEE International Conference on Cognitive Informatics*, vol. 1, pp. 53–61, 2006. – J. Zhou, G. Wang, Y. Yang and P. Chen
- [17] "SPEECH EMOTION RECOGNITION BASED ON HMM AND SVM", *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 18-21 August 2005 – Y. Lin, G. Wei
- [18] "Automatic speech emotion recognition using modulation spectral features", *Speech communication*, vol. 53, no. 5, 768–785, 2011. – S. Wu, T. H. Falk, and W. Y. Chan
- [19] "Speaker independent emotion recognition by early fusion of acoustic and linguistic features within ensembles", In *proceedings of Ninth European Conference on Speech Communication and Technology*, pp.1-4, 2005. – B. Schuller, R.

Müller, M. Lang and G. Rigoll

- [20] “Comparison between fuzzy and NN method for speech emotion recognition”, In *proceedings of Third IEEE International Conference on Information Technology and Applications*, pp. 297–302, 2005. – A. A. Razak, R. Komiya, M. Izani and Z. Abidin
- [21] “A neural network approach for human emotion recognition in speech”, In *proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. II, pp. 181-184, 2004. – M. W. Bhatti, Y. Wang and L. Guan
- [22] Dimensionality Reduction with Unsupervised Nearest Neighbors pp 13–23 Chapter K-Nearest Neighbors – O.Kramer
- [23] “Emotion recognition based on phoneme classes”, *INTERSPEECH*, pp. 205–211, 2004. – C.M. Lee, S. Yildirim, M. Bulut, A. Kazemzadeh, C. Busso, Z. Deng, S. Lee and S. Narayanan
- [24] “Hidden markovmodelbased speech emotion recognition”, In *proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. II, pp. 1-4, 2003. – B. Schuller, G. Rigoll and M. Lang
- [25] “Speech based emotion classification”, In *proceedings of IEEE region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology*, pp. 297–301, 2001. – T. L. Nwe, F. S. Wei and L. C. De Silva
- [26] “Speech emotion recognition using hidden markov models”, *INTERSPEECH*, pp. 2679–2682,2001. – A. Nogueiras, A. Moreno, A. Bonafonte and J.B. Mariño, J. B.



## Uzay Tabanlı Güneş Enerjisine Genel Bakış

Hamza ALAHMAD<sup>1\*</sup>, Edip TAŞKESEN<sup>2</sup>, Elif Nur BİLEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Enerji Bilimi ve Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şırnak Üniversitesi, Türkiye; ORCID: [0000-0002-6261-3449](https://orcid.org/0000-0002-6261-3449)

<sup>2</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Şırnak Üniversitesi, Türkiye; ORCID: [0000-0002-3052-9883](https://orcid.org/0000-0002-3052-9883)

<sup>3</sup>Enerji Bilimi ve Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şırnak Üniversitesi, Türkiye; ORCID: [0000-0002-7385-3704](https://orcid.org/0000-0002-7385-3704)

\* Corresponding Author: [hmza8246@gmail.com](mailto:hmza8246@gmail.com)

Received: 25 July 2023; Accepted: 24 September 2023

**Reference/Atf:** H. Alahmad, E. Taşkesen, E. N. Bilen, “Uzay Tabanlı Güneş Enerjisine Genel Bakış”, Researcher, vol.3, no.2, pp.53-75, December 2023, doi: 10.55185/researcher.1332802

### Özet



Bu makale, uzaydan güneş enerjisini yakalama ve onu Dünya'ya aktarma potansiyelini araştıran uzay tabanlı güneş enerjisine genel bir bakış sunmaktadır. Uzay tabanlı güneş enerjisi (UTGE), atmosferik koşullar veya sınırlı gün ışığı saatleri tarafından engellenmeden güneş enerjisinden güneş enerjisini doğrudan kullanma kavramını kapsar, temiz ve sürdürülebilir enerji talebinin artması için umut verici bir çözüm haline getiriyor. Günümüzde enerji taleplerinin artmasıyla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç da büyük ölçüde artmıştır. Güneş enerjisi, temiz ve sınırsız bir kaynak olması nedeniyle enerji üretiminde önemli bir role sahiptir. Bununla birlikte, bazı zorluklar, özellikle atmosferin engel teşkil ettiği yer yüzünde güneş panelleri kurulumu ve enerji toplama verimliliği konularında ortaya çıkmaktadır. Bu makale, uzay tabanlı güneş enerjisinin potansiyel ve önemli faydalarını inceleyerek, bu alanda küresel enerjinin geleceği için devam eden Ar-Ge önemini vurgulamaktadır. Sonuçlar, gelecekteki enerji stratejileri için önemli bilgiler sağlayabilir ve güneş enerjisinin kullanımındaki potansiyeli artırabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Uzay, Enerji, Güneş panelleri, Lazer, Mikrodalga

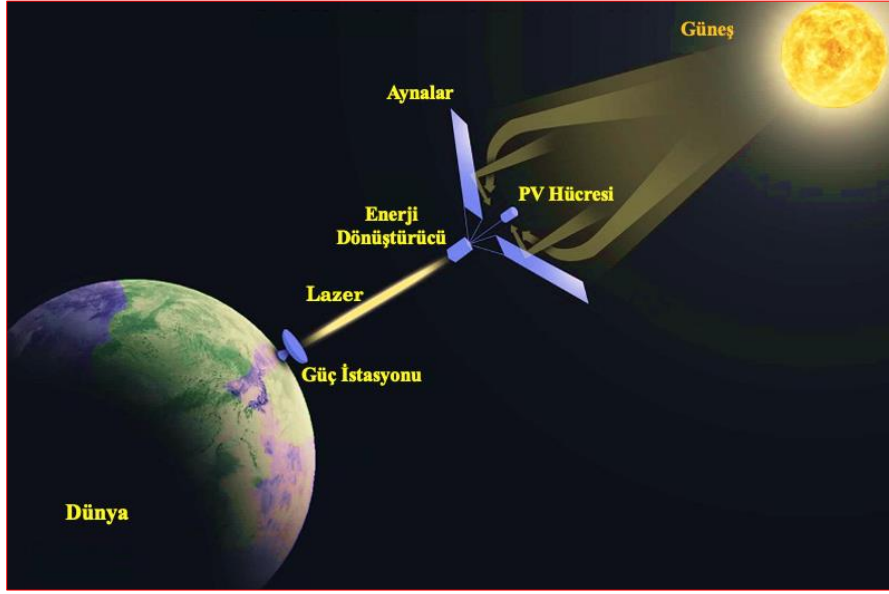
## Space-Based Solar Energy Overview

### Abstract

This article provides an overview of space-based solar energy, which explores the potential to capture solar energy from space and transfer it to Earth. Space-based solar energy (UTGE) covers the concept of using solar energy directly from solar energy without being blocked by atmospheric conditions or limited daylight hours, it makes it a promising solution for increasing demand for clean and sustainable energy. With the increase in energy demands today, the need for renewable energy sources has also increased greatly. Solar energy has an important role in energy production as it is a clean and unlimited resource. However, some difficulties arise especially in the areas of solar panels installation and energy collection efficiency on the face of the atmosphere. This article examines the potential and important benefits of space-based solar energy, emphasizing the ongoing R&D importance for the future of global energy in this field. The results can provide important information for future energy strategies and increase the potential for the use of solar energy.

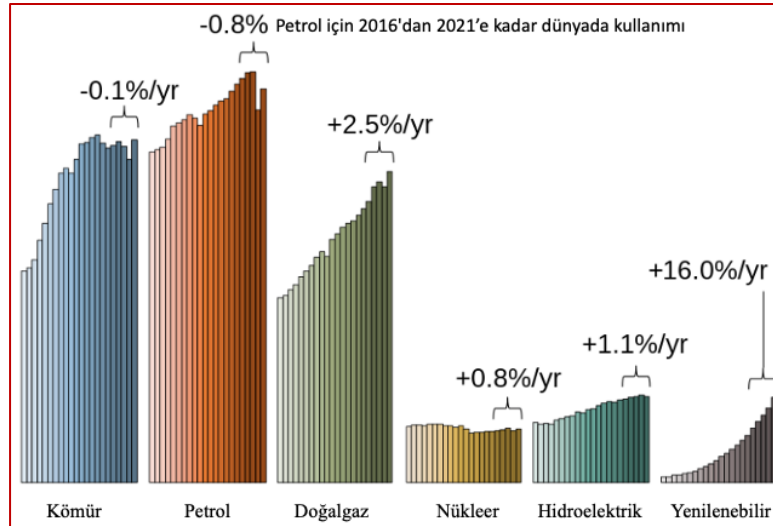
**Keywords:** Space, Energy, Solar panels, Laser, Microwave

## Grafiksel Öz / Graphical Abstract



## 1. Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların sınırlı olması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi birçok seçenek bulunmaktadır. Ancak, bu kaynakların verimliliği ve maliyeti hala birçok ülke için sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, enerji üretiminde yeni ve daha verimli yöntemler arayışı devam etmektedir [1]. Şekil 1’de Yenilenebilir kaynaklar hızla artmaya başlasa da kömür, petrol ve doğalgaz birincil küresel enerji kaynakları olmaya devam ediyor göstermektedir.



Şekil 1. 2000 – 2021 Yılları Arası Küresel Enerji Tüketimi [2].

Uzaydan güç sağlama, bu arayışın sonucunda ortaya çıkan bir fikirdir. Güneş panelleri, dünya yüzeyindeki güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan bir teknolojidir. Ancak, uzayda güneş ışınlarından yararlanarak daha yüksek verimlilikle elektrik üretmek mümkün olabilir. Bu fikir, ilk olarak 1960'larda NASA tarafından ortaya atılmıştır [3]. Uzayda güneş panelleri kullanarak

elektrik üretme fikri, elde edilen enerjinin mikrodalga veya lazer aracılığıyla dünya yüzeyine iletilerek enerji ihtiyacını karşılaması şeklinde gerçekleştirilebilir. (Şekil 2).



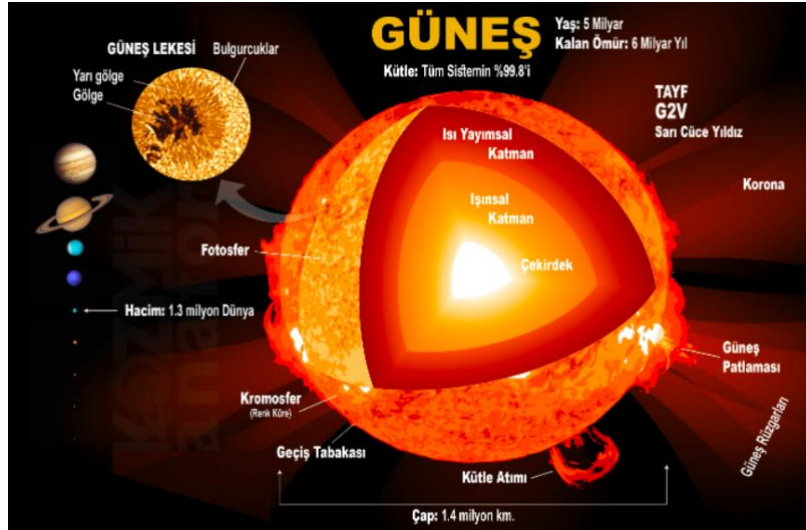
Şekil 2. Uzay Tabanlı GES Çalışma Prensibi [4].

Uzaydan güç sağlama fikri, enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların sınırlı olması gibi nedenlerle yeniden gündeme gelmiştir. Bu teknoloji, dünya yüzeyindeki güneş panellerine göre daha yüksek verimlilik sağlayabilir ve enerji ihtiyacının karşılanması açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, bu teknolojinin uygulanabilirliği ve maliyeti gibi birçok faktörün de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [5].

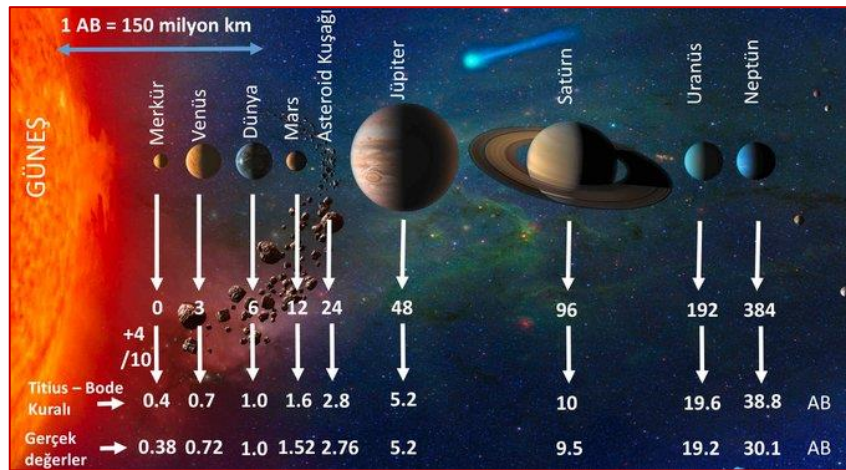
Bu araştırmada, uzaydan güç sağlama potansiyelini ve uygulanabilirliğini incelemektir. Çalışmada, uzay tabanlı güneş enerjisi (UTGE) fikrinin yöntemleri, avantajları, uzaydan güç sağlamaya Yönelik çalışmalar gibi konular ele alınacaktır. Bu araştırmanın sonuçları, Uzaydan güç sağlama, gelecekte enerji üretimi açısından, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik stratejilerin geliştirilmesinde ve enerji güvenliği konusunda önemli bir katkı sağlayabilir.

## 2. Güneş ve Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş, evrenimizdeki en önemli yıldızlardan biridir. Yaklaşık 5 milyar yıl önce oluşmuş ve yaklaşık 6 milyar yıl daha varlığını sürdürmesi beklenen bir yıldızdır. Güneş, dünya üzerindeki hayatın kaynağıdır ve aynı zamanda dünya yüzeyindeki iklimi etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Güneşin dünyaya olan uzaklığı 150 milyon Km (Şekil 4), yaklaşık 109 katrilyon ton ağırlığındadır ve yaklaşık 1,5 milyon kilometre çapındadır (Şekil 3). Yayıldığı ışın Dünyaya 8 dakika sonra gelmektedir. Güneş, yaklaşık 15 milyon derece sıcaklığa sahiptir ve sürekli olarak hidrojeni helyuma dönüştürerek enerji üretir [6–7–8]. Bu nükleer füzyon süreci, Güneş'in içindeki yoğun basınç ve sıcaklık nedeniyle gerçekleşir. Güneş, bu nedenle dünya üzerindeki hayatın devamı için hayati bir öneme sahiptir.



Şekil 3. Güneş'in İç Yapısı [9].



Şekil 4. Güneş, Dünya ve Güneş Sistemindeki Diğer Gezgenler Arasındaki Mesafe [10].

Güneş enerjisi, güneş ışınlarını kullanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan bir teknolojidir. Bu teknoloji, dünya yüzeyindeki güneş panelleri aracılığıyla uygulanır. Güneş panelleri, güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik hücrelerden oluşur. Fotovoltaik hücreler, güneş ışınlarının düşmesiyle birlikte elektrikselsel bir akım üretirler. Bu akım, bir batarya veya elektrik şebekesi aracılığıyla depolanır veya kullanılır [11].

Güneş enerjisi, çevre dostu bir enerji kaynağı olması nedeniyle, dünya genelinde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Güneş enerjisi, dünya genelinde birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle, evlerde ve iş yerlerinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi, su ısıtma sistemlerinde, tarım sektöründe ve ulaşım sektöründe de kullanılmaktadır [12–13].

Güneş enerjisi teknolojileri, son yıllarda büyük bir ilerleme kaydetmiştir. Güneş panelleri, daha verimli ve daha ucuz hale gelmiştir. Ayrıca, güneş enerjisi teknolojileri, depolama kapasitesi ve verimliliği açısından da geliştirilmiştir. Bu gelişmeler, güneş enerjisi üretiminin daha yaygın ve ekonomik hale gelmesini sağlamıştır.

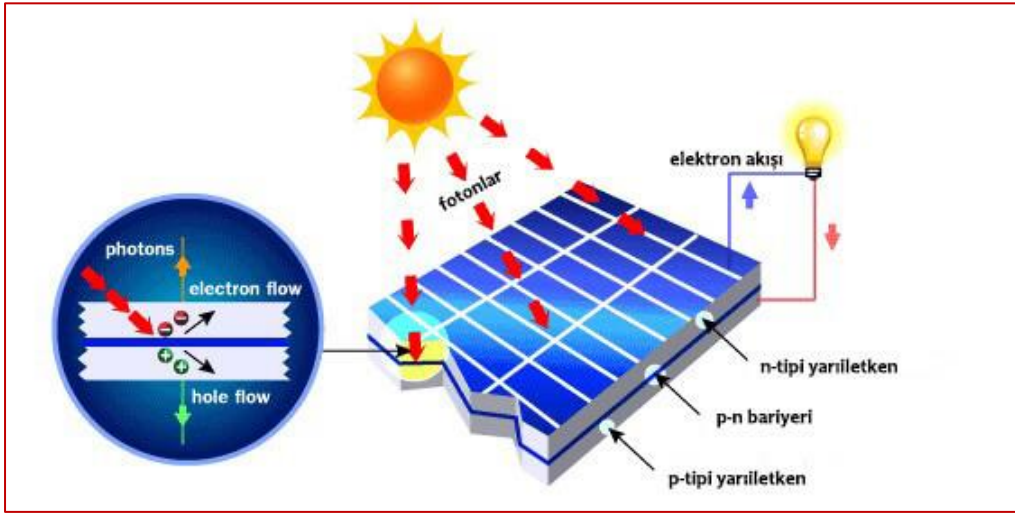
Yenilenebilir enerji hedefleri, enerji politikalarının önemli bir parçası haline gelmiştir. Özellikle, Avrupa Birliği ülkeleri, güneş enerjisi üretimini teşvik eden politikalar uygulamaktadır. Ayrıca, Çin ve Hindistan gibi ülkeler de güneş enerjisi üretiminde büyük bir artış yaşamaktadır. Dünya genelinde giderek daha fazla tercih edilen bir enerji kaynağı haline gelmektedir. Güneş enerjisi, dünya üzerindeki hayatın kaynağı olan güneşten elde edilen bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi teknolojileri, sürekli olarak geliştirilmekte ve daha yaygın hale gelmektedir [14].

## 2.1. Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş enerjisi sistemleri, güneş ışınlarını kullanarak elektrik enerjisi üretmek için kullanılan teknolojilerdir. Bu sistemler, Fotovoltaik (PV) ve Güneş termal olarak iki ana gruba ayrılır. Fotovoltaik sistemler, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken, Güneş termal sistemler ise güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürür ve bu ısı enerjisi ile elektrik enerjisi üretirler. Güneş enerjisi sistemleri, dünya genelinde giderek daha fazla tercih edilmekte ve çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Güneş enerjisi sistemleri, evlerde, işletmelerde, endüstriyel tesislerde ve hatta uzayda kullanılmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri sayısı, kullanım alanlarına göre değişmekle birlikte, dünya genelinde milyonlarca sistem bulunmaktadır [15].

### 2.1.1. Fotovoltaik (PV) Sistemleri

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren teknolojilerdir. Bu sistemler, fotovoltaik hücrelerden oluşur ve güneş ışınları düştüğünde elektrik akımı üretirler. Fotovoltaik hücreler, silisyum kristalleri, fosfor ve bor gibi malzemelerden yapılmıştır. Bu malzemelerin bir araya gelmesiyle, hücrede pozitif (+) ve negatif (-) yükler oluşur. Güneş ışınları, bu yüklerin hareket etmesine neden olur ve elektrik akımı üretilir (Şekil 5) [16].



Şekil 5. Fotovoltaik Sistem Çalışma Prensibi.

Fotovoltaik hücreler, birçok hücrenin bir araya gelmesiyle oluşan PV modülleri şeklinde kullanılır. PV modülleri, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu elektrik enerjisi, bataryalar veya elektrik şebekesi aracılığıyla depolanır veya kullanılır.

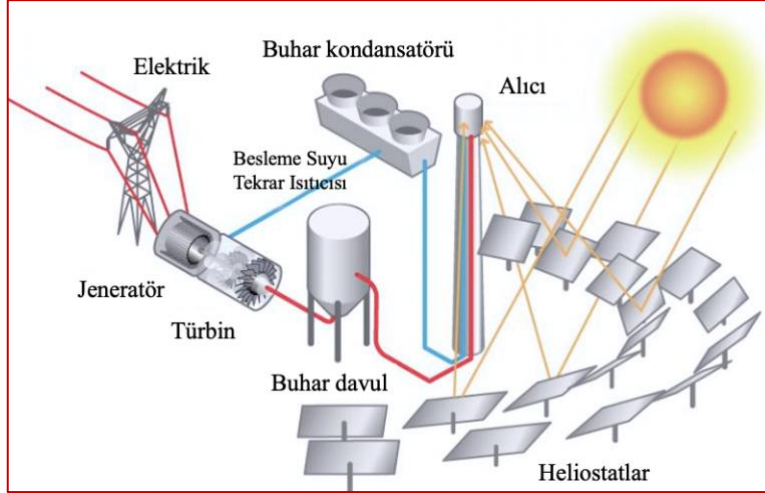
Fotovoltaik sistemlerin işleyiş prensibi, fotovoltaik hücrelerin güneş ışınlarının etkisi altında çalışmasıyla ilişkilidir. Güneş ışınları hücre yüzeyine ulaştığında, "fotonlar" olarak adlandırılan küçük parçacıklar şeklinde gelirler. Bu fotonlar, hücrenin malzemesinde bulunan elektronları serbest bırakarak elektrik akımı oluşturur. Oluşan bu elektrik akımı, hücrenin pozitif ve negatif uçları arasında hareket eder ve bu süreç sonucunda elektrik enerjisi üretilir [16].

### 2.1.2. Güneş Termal Sistemleri

Güneş termal sistemleri, güneş enerjisini kullanarak ısı enerjisi üreten teknolojilerdir. Bu sistemler, güneş enerjisi toplayıcılarından oluşur ve güneş enerjisini kullanarak suyu veya başka bir akışkanı ısıtırlar. Isıtılan su veya akışkan, buhar veya sıcak su üretmek için kullanılabilir. Güneş termal sistemleri, iki ana tipe ayrılır: düz plaka kolektörleri ve konsantre kolektörler. Düz plaka kolektörleri, güneş enerjisi toplayıcıları olarak kullanılır ve genellikle evlerde sıcak su üretmek için kullanılır. Konsantre kolektörler ise, güneş enerjisini yoğunlaştırmak için kullanılır ve genellikle elektrik enerjisi üretmek için kullanılırlar [17].



Bu sistemler çalışma prensibi, güneş enerjisinin toplandığı ve kullanıldığı bir döngüye dayanır. Güneş enerjisi, toplayıcılar tarafından toplanır ve akışkanın içindeki borulara veya tüplere iletir. Akışkan, güneş enerjisi tarafından ısıtılır ve daha sonra bir depolama tankına veya başka bir yerde depolanır. Isıtılan su veya akışkan, daha sonra kullanım için hazır hale getirilir (Örnek Şekil 6'de Bir güneş termal enerji santrali) [17].



Şekil 6. Güneş Termal Enerji Santrali Çalışma Prensibi [18].



Şekil 7. İspanya'da- PS10 Güneş Enerjisi Kulesidir [19].

## 2.2. Güneş Enerjisi Kullanım Alanları

Güneş enerjisi, güneş ışınlarının kullanılarak elektrik enerjisi üretilmesi işlemidir. Bu enerji kaynağı, çevre dostu bir enerji kaynağıdır ve fosil yakıtların kullanımına kıyasla daha az karbon salınımı yapar. Güneş enerjisi kullanım alanları oldukça geniştir ve sürekli olarak gelişmektedir [20]. Aşağıda, güneş enerjisi kullanım alanları sıralanmıştır:

- Evlerde kullanılan güneş panelleri, evlerin ihtiyacı olan elektrik enerjisini güneş enerjisinden karşılar. Bu, evlerin enerji ihtiyacını karşılamak için geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltır.
- İşletmeler, güneş enerjisi kullanarak işletme maliyetlerini düşürebilirler. Endüstriyel işletmelerde güneş enerjisi, üretim maliyetlerini azaltır ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak tercih edilir. Güneş enerjisi kullanımı, işletmelerin sürdürülebilirliğini artırır ve enerji maliyetlerini düşürür.
- Ulaşım sektöründe de güneş enerjisi kullanılabilir. Örneğin, güneş enerjisi ile çalışan arabalar ve trenler geliştirilmiştir. Bu, fosil yakıtların kullanımını azaltarak çevre kirliliğini azaltır ve enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği konusunda adımlar atmamızı sağlar.

- Tarım sektöründe de güneş enerjisi kullanımı yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisi ile çalışan sulama sistemleri, sera ısıtma sistemleri ve hayvan yemleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu, tarım sektörünün sürdürülebilirliğini artırır ve enerji maliyetlerini düşürür.
- Şehirlerde kullanılan sokak lambaları, trafik sinyalleri ve diğer aydınlatma sistemleri güneş enerjisi ile çalışabilir. Bu, şehirlerin enerji maliyetlerini düşürür ve çevre dostu bir enerji kaynağı kullanmalarını sağlar [20].

Güneş enerjisi kullanım alanları, dünya genelinde giderek artmaktadır. Bu, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği konusunda atılan adımların önemli bir parçasıdır. Güneş enerjisi kullanımının artması, çevre kirliliğinin azaltılmasına ve sürdürülebilir bir geleceğe yönelik adımlar atmamıza yardımcı olacaktır.

### 2.3. Güneş Enerjisi Avantajları ve Dezavantajları

Güneş enerjisi, çevre dostu, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ancak, bazı avantajları ve dezavantajları vardır.

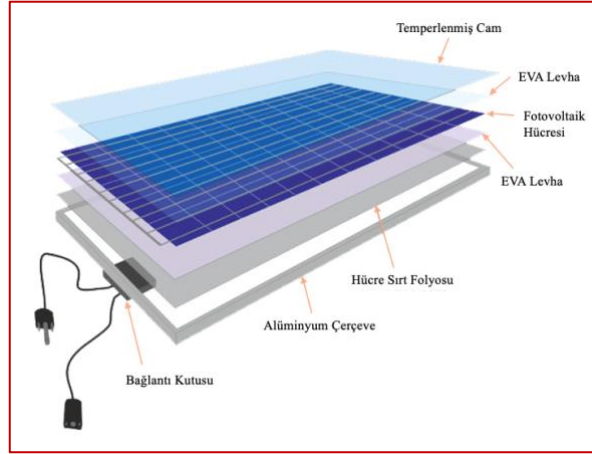
- Avantajları:
  - Çevre dostu: Güneş enerjisi, fosil yakıtlara göre daha çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi üretirken, sera gazları veya diğer kirlenici maddeler salınmaz.
  - Sürdürülebilir ve yenilenebilir: Güneş enerjisi, sınırsız bir kaynaktır ve tükenmez. Bu nedenle, güneş enerjisi, diğer enerji kaynaklarına göre daha sürdürülebilir ve yenilenebilir.
  - Düşük bakım maliyetleri: Güneş enerjisi sistemleri, düşük bakım maliyetleriyle çalışır. Bu nedenle, uzun vadede daha ekonomiktirler.
  - Uzun ömür: Güneş enerjisi sistemleri, uzun ömürlüdür ve genellikle 25-30 yıl boyunca kullanılabilirler [12–13].
- Dezavantajları:
  - Yüksek yatırım maliyetleri: Güneş enerjisi sistemleri, yüksek yatırım maliyetleri gerektirir. Bu nedenle, kurulum maliyeti diğer enerji kaynaklarına göre daha yüksektir.
  - Depolama sorunu: Güneş enerjisi, güneş ışığına bağlıdır ve günün farklı saatlerinde farklı miktarda enerji üretir. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin enerji depolama sorunu vardır.
  - Hava koşullarına bağlı: Güneş enerjisi, güneş ışığına bağlı olduğu için, hava koşullarına bağlıdır. Bulutlu veya yağmurlu havalarda, güneş enerjisi üretimi azalabilir.
  - Alan gereksinimi: Güneş enerjisi sistemleri, geniş bir alan gerektirir. Bu nedenle, bazı yerlerde güneş enerjisi sistemleri kurulması mümkün olmayabilir [12–13].

### 3. Güneş Panelleri

Güneş panelleri, fotovoltaik (PV) paneller olarak da bilinen, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu paneller, silikon gibi yarıiletken malzemelerden yapılmış güneş pilleriyle oluşturulur ve güneş ışığından fotonlar emerek elektronları serbest bırakır, böylece elektrik akışı sağlar. Fotovoltaik etki prensibiyle çalışan bu paneller, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji üretirler, bu nedenle küresel olarak elektrik üretiminde giderek daha fazla tercih edilen bir seçenek haline gelirler [21–22].

#### 3.1. Güneş Panellerinin Yapısı ve Malzemeleri

Güneş panelleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan fotovoltaik (PV) hücrelerden oluşmaktadır. Bu hücreler, genellikle silikon adı verilen bir yarıiletken malzemeden yapılmıştır. Silikon, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilen özel bir özelliğe sahip olan fotovoltaik etkiyi gösterir. Güneş panelleri, genellikle çeşitli katmanlardan oluşur. Şekil 8'de solar panelin hücre katmanları göstermektedir [23–24].



Şekil 8. Solar Panelin Hücre Katmanları [25].

Güneş pili, ön yüzeyinde ışınları absorbe eden 150 mikron kalınlığındaki bir kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. Şekil 6'da gösterilen panelleri çevreleyen alüminyum çerçeve, paneli fiziksel etkilerden korumaktadır. Panellerin dıştan içe yapısı, alüminyum çerçeve, temperlenmiş cam, EVA (etilen vinil asetat), güneş hücresi, arka tabaka folyosu ve bağlantı kutusunu içermektedir. PV (fotovoltaik) paneller, içlerinde bulunan yarıiletken malzeme aracılığıyla güneş enerjisini %6 ila %20 verim oranıyla elektrik enerjisine dönüştürebilirler. PV panel verimliliği üzerinde etkili olan faktörler arasında panelin konumundaki eğim açısı, gölgeleme düzeyi, toz birikimi oranı, güneş ışınımı yoğunluğu, sıcaklık ve diğer kayıplar yer almaktadır [26].

## 2.1. Güneş Panelinin Teknik ve Mekanik Değerleri

Güneş panellerinin teknik ve mekanik değerleri, panelin performansını ve kullanımını belirleyen bir dizi parametreyi ifade eder. Tablo 1'de Bir güneş panellerinin en yaygın teknik ve mekanik değerleri verilmiştir [25].

Tablo 1. Güneş Panellerinin Teknik ve Mekanik Değerleri [25].

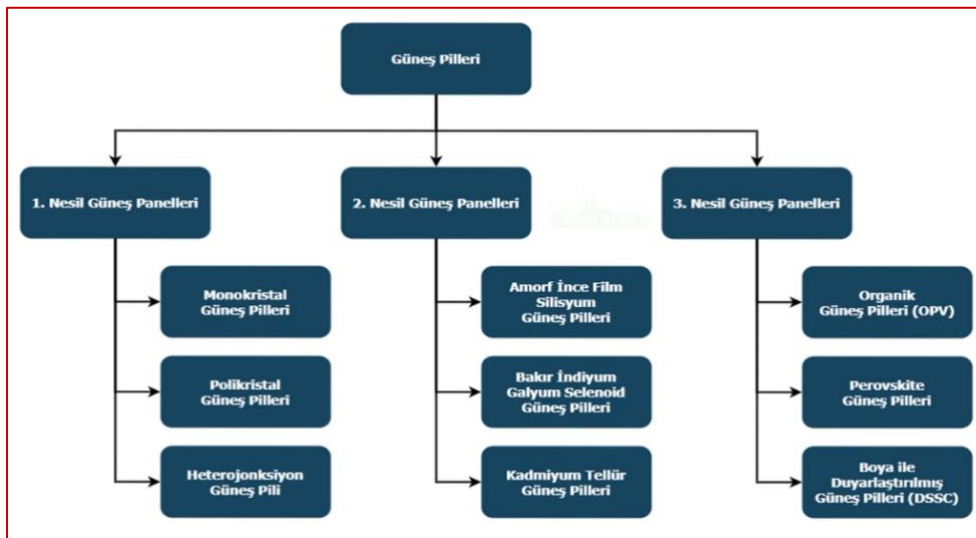
| Güneş Panelinin Teknik ve Mekanik Değerleri                               |  |
|---|--|
| Güç Çıkışı (Watt)   | Güneş panelinin üretebileceği maksimum güç çıkışını ifade eder. Panelin verimliliği ve boyutuna bağlı olarak güç çıkışı farklılık gösterebilir.  |
| Verimlilik (%)  | Güneş panelinin güneş ışığından elektrik enerjisine dönüşme verimliliğini gösterir. Yüksek verimlilik, daha fazla güç üretimi anlamına gelir. Genellikle, güneş panellerinin verimliliği yüzde cinsinden ifade edilir.     |
| Maksimum Güç Noktası (Maximum Power Point- MPP) Gerilimi (V) ve Akımı (A) | Güneş panelinin en yüksek güç çıkışına ulaştığı gerilim ve akım değerleridir. MPP gerilimi ve akımı, panelden maksimum verimlilikle güç elde etmek için önemlidir.   |
| Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage- Voc)                           | Güneş panelinin devre açıkken üretebileceği en yüksek gerilimi ifade eder. Panelin bağlantı noktaları açık olduğunda, bu gerilim elde edilir.  |
| Kısa Devre Akımı (Short Circuit Current- Isc)                             | Güneş panelinin devre kısa devrede olduğunda üretebileceği en yüksek akımı ifade eder. Panelin bağlantı noktaları kısa devre olduğunda, bu akım elde edilir.   |
| Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)   | Güneş panelinin verimli bir şekilde çalışabileceği sıcaklık aralığını gösterir. Yüksek sıcaklıklar panel verimini düşürebilir, bu nedenle çalışma sıcaklığı aralığı önemlidir.   |
| Mekanik Dayanıklılık  | Mekanik Dayanıklılık: Güneş panelleri, dış etkilere ve çevresel koşullara dayanıklı olmalıdır. Mekanik dayanıklılık, panellerin darbelere, rüzgâra, kar yüküne ve diğer mekanik streslere karşı dayanıklı olmasını sağlar. |
| Ömür (Yaşam Süresi)   | Ömür (Yaşam Süresi): Güneş panellerinin kullanım ömrü önemlidir. Panelin kalitesi, üretim malzemeleri ve kullanılan teknoloji, ömrünü etkileyebilir.   |

Bu değerler, güneş panellerinin performansını değerlendirmek ve farklı panelleri karşılaştırmak için kullanılır. Her değer, panelin belirli bir özelliğini temsil eder ve panel seçiminde dikkate alınmalıdır [25].

### 3.2. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş panelleri, farklı yapılar, malzemeler ve uygulamalar için çeşitli tiplerde gelir. Aşağıdaki yaygın olarak kullanılan bazı güneş paneli tipleri:

- Mono kristal Silikon Paneller: Monokristal silikon paneller, tek bir kristal yapıya sahip silikon kullanılarak üretilir. Genellikle siyah renkte ve homojen bir görünüme sahiptirler. Yüksek verimlilik sağlarlar ancak üretim süreci daha maliyetlidir.
- Polikristal Silikon Paneller: Polikristal silikon paneller, birden çok kristal yapıya sahip silikon kullanılarak üretilir. Daha ucuz bir üretim sürecine sahiptirler ve mavi renkte olabilirler. Monokristal panellere göre biraz daha düşük verimlilik sunarlar.
- İnce Film Paneller: İnce film paneller, silikon tabakalarının daha ince bir şekilde uygulanması veya farklı yarıiletken malzemelerin kullanılmasıyla yapılır. Amorf silikon, kadmium tellür veya bakır indiyum galenit gibi malzemeler kullanılabilir. İnce film paneller, esneklik ve hafiflik avantajlarına sahip olabilir, ancak genellikle daha düşük verimliliklere sahiptir.
- Konsantrörlü Paneller: Konsantrator paneller, güneş ışığını odaklamak için lensler veya aynalar kullanır. Bu sayede daha az yarıiletken malzeme kullanarak yüksek verimlilik elde etmeyi hedefler. Konsantrator sistemler genellikle ticari ölçekte kullanılır.
- Organik Güneş Panelleri: Organik güneş panelleri, karbon bazlı organik malzemelerden üretilir. Genellikle esnek ve hafif olurlar. Organik panellerin verimlilikleri hâlâ geliştirme aşamasındadır, ancak düşük maliyet ve çeşitli uygulama potansiyeli sunarlar.
- Hibrit Paneller: Hibrit paneller, güneş ışığından elektrik üretmek için farklı teknolojileri birleştiren panellerdir. Örneğin, Fotovoltaik (PV) güneş panelleri ile termal güneş kolektörleri kombinlenebilir. Bu sayede aynı panel hem elektrik hem de ısı enerjisi üretebilir. Güneş pilleri nesillerine göre şekil 9'da gösterildiği gibi de sınıflandırılabilir [24].



Şekil 9. Nesillerine Göre Güneş Pili Çeşitleri [24].

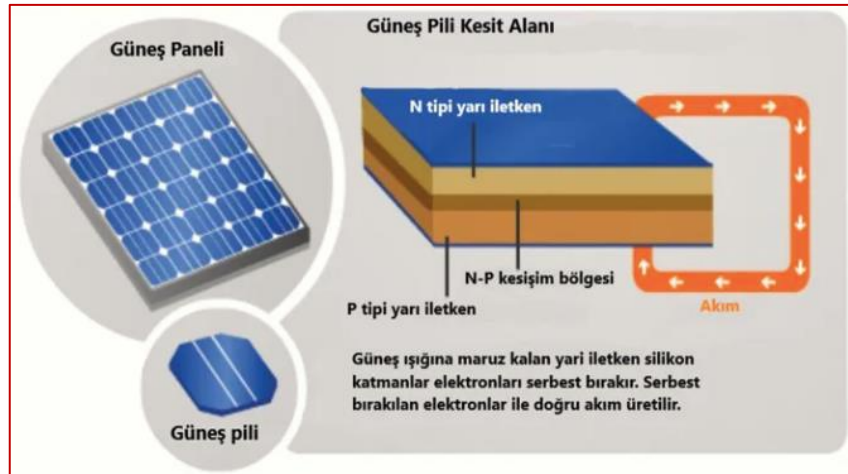
### 3.3. Güneş Pili Çalışma Mekanizması

Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de yarı iletken maddelerden yapılırlar. Güneş hücresi yapımında en çok silisyum, galyum arsenit ve kadmium tellür (CdTe) gibi inorganik yarı iletken maddeler kullanılmaktadır [24].

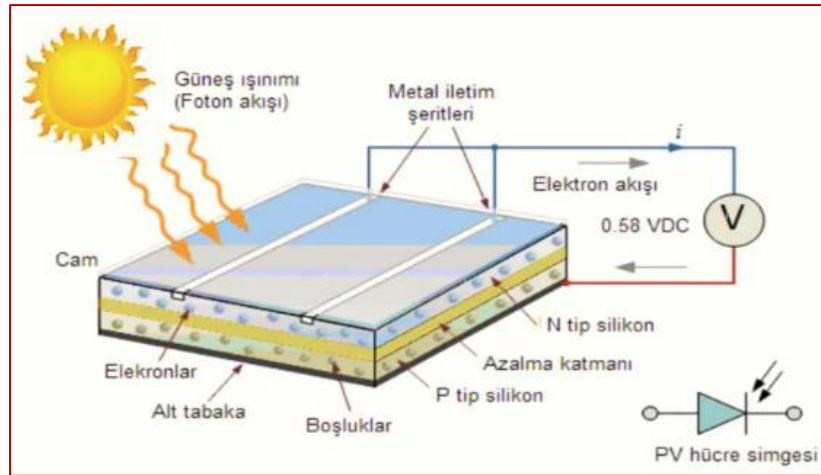
Güneş panelleri birçok güneş hücresinin paralel veya seri olarak bağlanmasıyla oluşmaktadır (Şekil 10). Güneş hücrelerinin elektrik üretimi “fotoelektrik olay” prensibine dayanır. Güneş hücresi yapısında n-

tipi ve p-tipi olmak üzere iki çeşit silikon bulunmaktadır. Valans bandında 4 elektron bulunan n-tipi silikon atomlarına, Valans bandında 5 elektron bulunan fosfor eklenir ve fosfor elektron vermeye yatkın olduğundan kristal yapıya 1 elektron verir. Bu nedenle n- tipi silikon “verici” olarak adlandırılır. P-tipi silikon eriyiğine ise valans bandında 3 elektron bulunan (alüminyum, indiyum, galyum, bor vb.) elementler eklenir. Bu eklenen atomların son katmanında 3 elektron olması nedeniyle kristal yapıda elektron boşluğu (hole) oluşur. Bu nedenle de p-tipi silikon “alıcı” olarak adlandırılır [24].

Şekil 11’de görüldüğü üzere hücre yüzeyine çarpan güneş ışınları (fotonlar) yüzey tarafından absorbe edilerek n-tipi silikondan p-tipi silikona 1 elektron gönderir bu sırada p-tipi silikonda da 1 boşluk oluşur. Bu gönderim sonucu ise p-n aktif maddeleri arasında bir elektriksel potansiyel oluşur ve bu potansiyelin kullanımı ile elektrik enerjisi elde edilebilir [24].



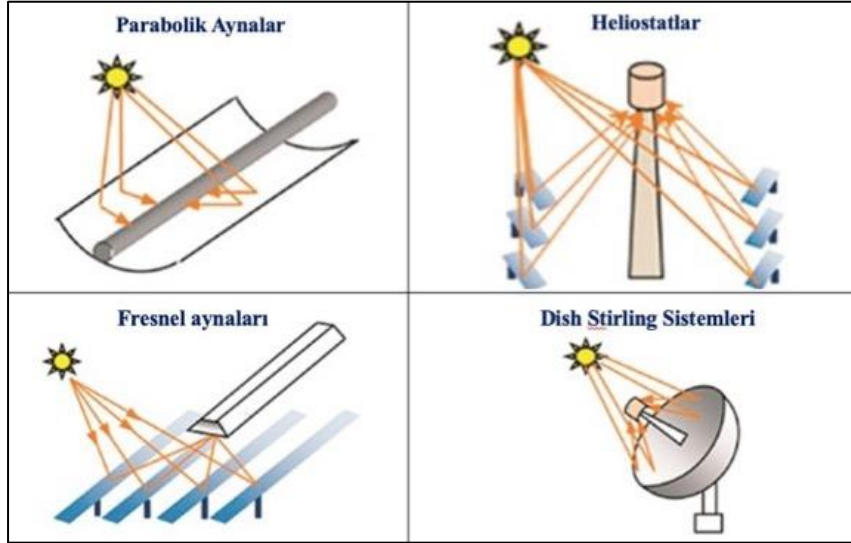
Şekil 10. Güneş paneli bileşenleri [24].



Şekil 11. Güneş pili çalışma şeması [24].

#### 4. Güneş Enerjisi Aynaları

Parabolik aynalar, Fresnel aynaları, heliostatlar ve Dish stirling sistemleri gibi farklı tiplerde üretilen güneş enerjisi aynaları, güneş ışığını toplamak, yoğunlaştırmak veya belirli bir noktaya odaklamak amacıyla kullanılan optik cihazlardır. Bu aynalar, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak ve enerji toplama sürecini optimize etmek için önemli roller üstlenirler (Şekil 12) [27–28].



Şekil 12. Güneş Aynalar Kullanım Sistemi Göre Çeşitleri [28].

## 4.1. Güneş Aynaları Çeşitleri

### 4.1.1. Parabolik Aynalar

Parabolik aynalar, parabolik bir yüzeye sahip olan ve güneş ışığını bir odak noktasında toplamak için kullanılan aynalardır. Bu tür aynalar, termal enerji üretimi için yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemlerinde kullanılır. Parabolik aynalar, genellikle termal alıcıya odaklanarak suyu veya başka bir akışkanı ısıtarak buhar veya sıcak su üretir [27–28].

### 4.1.2. Fresnel Aynaları

Fresnel aynaları, çok sayıda küçük aynanın bir araya gelmesiyle oluşan aynalar sistemidir. Bu aynalar, güneş ışığını bir odak noktasına yönlendirmek için kullanılır. Fresnel aynaları, güneş enerjisi santrallerinde ve güneş odaklı ısıtma sistemlerinde kullanılır. Fresnel aynalarının avantajları, düşük maliyet, kolay üretim ve taşınabilirlik gibi faktörlerdir [27–28].

### 4.1.3. Heliostatlar

Heliostatlar, hareketli aynalara sahip olan güneş aynalarıdır. Heliostatlar, güneşin konumunu takip ederek güneş ışığını istenen bir hedefe yansıtır. Bu tür aynalar, genellikle büyük güneş enerjisi santrallerinde kullanılır ve güneş ışığını odaklamak ve termal enerji üretmek için kullanılır [27–28].

### 4.1.4. Dish Stirling Sistemleri

Dish Stirling Sistemleri: Bu sistemlerde, parabolik bir ayna kullanılarak güneş ışınları bir noktada toplanır ve bu noktada yer alan bir Stirling motoru kullanılarak elektrik enerjisi üretilir. Dish Stirling sistemleri, yüksek verimlilik ve odaklanmış güneş enerjisi kullanımını sağlamasıyla bilinir.

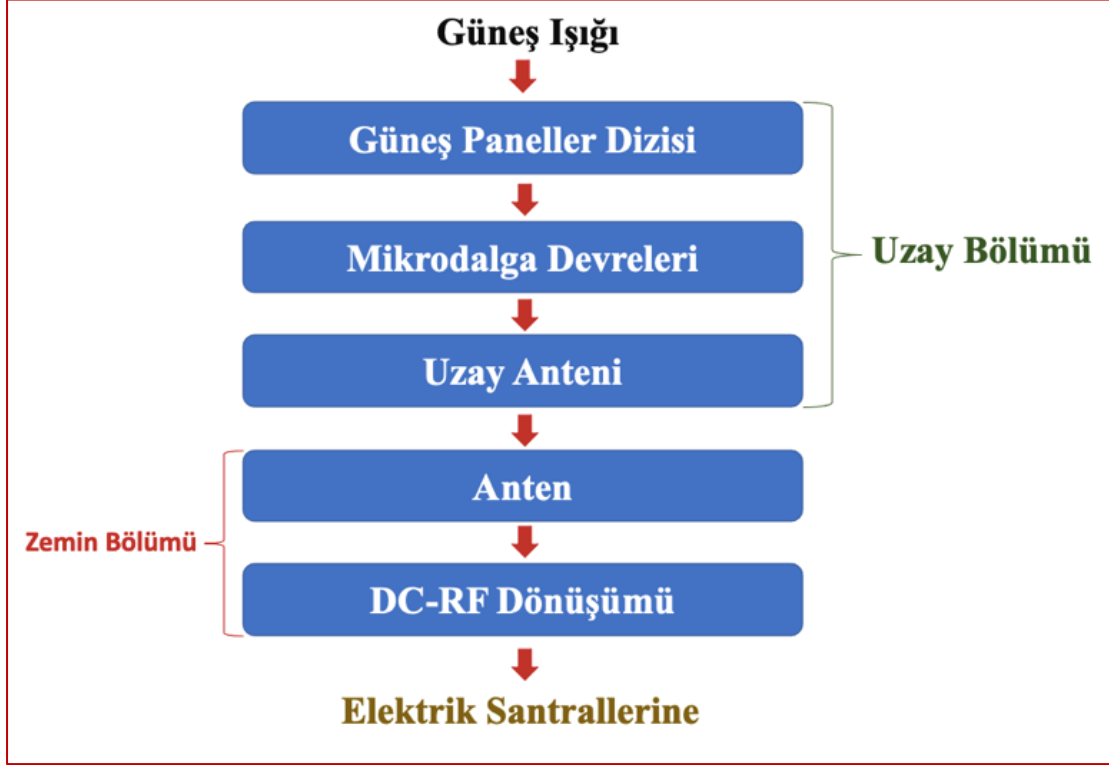
## 4.2. Güneş Enerjisi Aynalar Yapısı ve Malzemeleri

Güneş enerjisi aynaları, güneş ışınlarını odaklayarak yüksek sıcaklıklarda enerji üretmek amacıyla kullanılan bir tür teknolojidir. Genellikle termal enerji üretimi veya güneş enerjisi toplama sistemlerinde kullanılırlar. Güneş enerjisi aynaları, farklı tiplerde olabilir ve farklı malzemelerden yapılmış olabilir.

Güneş enerjisi aynalarının yapımında kullanılan malzemeler genellikle cam veya metaldir. Cam malzemeler, genellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı özel cam veya cam kaplamalı malzemelerdir. Metal malzemeler ise aynaların yüzeyini kaplayan reflektif bir tabaka olarak kullanılır. Bu metal tabakalar genellikle alüminyum veya gümüş bazlıdır, çünkü bu metaller güneş ışığını iyi yansıtabilirler. Ayrıca, aynaların yapısal desteği için çelik veya alüminyum alaşımları gibi malzemeler de kullanılabilir.

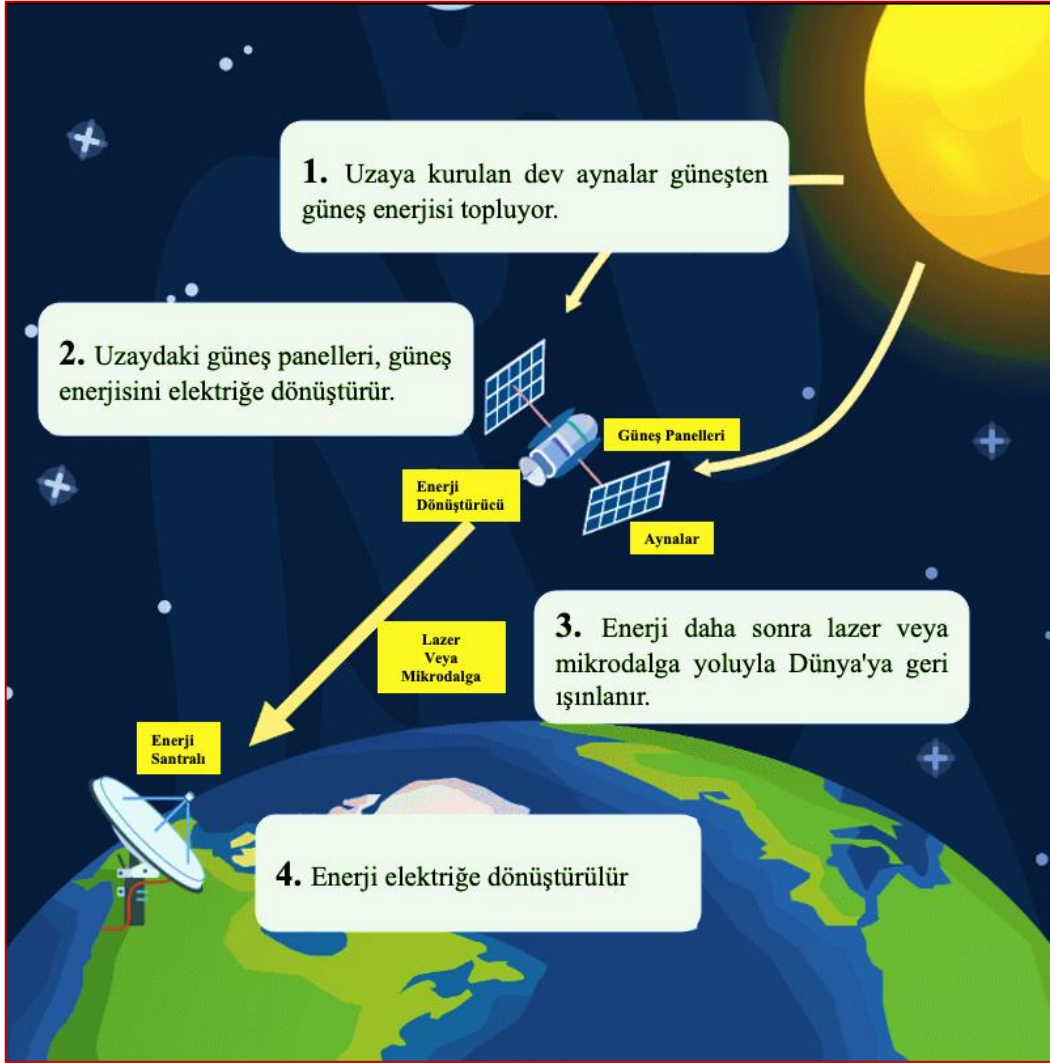
## 5. Uzaydan Güneş Enerjisi

Uzay tabanlı güneş enerjisi (UTGE), güneş enerjisi uyduları ile uzayda güneş enerjisi toplama ve Dünya'ya dağıtma konseptidir. Avantajları arasında atmosferin yansması ve emilimi, çok az gece olasılığı nedeniyle daha yüksek bir enerji toplanması ve güneşe bakacak şekilde daha iyi yönlendirme yeteneği. Uzay tabanlı güneş enerjisi sistemleri, güneş ışığını atmosferden Dünya yüzeyindeki alıcılara iletilebilen mikrodalga veya lazer gibi başka bir enerji formuna dönüştürür [29–30]. Şekil 13'te Uzaya tabanlı güneş enerjisi sistemin blok diyagram göstermektedir.



Şekil 13. Uzay Tabanlı GES Blok Şeması.

Güneş enerjisi elektriğe dönüştürüldükten sonra, çeşitli yöntemlerle Dünya'ya iletilir. Önerilen yöntemler, enerjiyi mikrodalgalar veya lazerler kullanarak yeryüzündeki alıcı istasyonlarına ışınlayarak geri göndermektir. Bu alıcı istasyonları, iletilen enerjiyi mevcut enerji şebekeleri aracılığıyla kullanılabilir elektriğe dönüştürür (Şekil 14). Kablosuz enerji iletimi, uzun mesafe kablolarına veya iletim altyapısına ihtiyaç duymadan enerji kaybını azaltarak iletim sürecini sağlar.



Şekil 14. Uzay Tabanlı GES Çalışma Yöntemi [31].

Güneş enerjisini Dünya'dan farklı olarak uzaydan elde etmenin avantajı, hava koşulları ve gündüz saatleri gibi faktörlerle sınırlı olmayışıdır. Uzayda güneş panelleri Dünya yörüngesine veya hatta Ay yüzeyine yerleştirilebilir ve sürekli güneş ışığı alabilir. Bu sayede bu sistemler sürekli olarak elektrik üretebilir ve güvenilir, kesintisiz ve temiz enerji kaynağı sağlayabilir.

### 5.1. Uzaydan Güneş Enerjisi Toplama Yöntemleri

Güneş enerjisinin uzaydan toplanması için çeşitli yenilikçi yöntemler önerilmiş ve araştırılmıştır. Bu yöntemler, güneş ışığını uzayda verimli bir şekilde yakalamayı amaçlamakta ve Dünya'ya geri iletmeyi hedeflemektedir [32]. Dikkate alınan bazı önemli yaklaşımlar şunlardır:

- **Güneş Enerjisi Uyduları:** Güneş enerjisi uyduları kavramı, jeostatik yörüngede (Geostationary orbit) bir dizi güneş paneli ile donatılmış büyük platformların konuşlandırılmasını içerir. Bu uydular sürekli olarak güneş ışığını yakalayacak ve fotovoltaik hücreler kullanarak elektrığe dönüştüreceklerdir. Üretilen güç daha sonra bir mikrodalga veya lazer ışımına dönüştürülecek ve Dünya'daki alıcı istasyonlarına iletilecektir. UGE, atmosferik koşullardan veya Dünya'nın dönüşünden herhangi bir müdahale olmadan güneş ışığını toplama avantajı sunar [33].
- **Yörünge Aynaları:** Yörünge aynaları kavramı, güneş ışığını Dünya'daki belirli alanlara yönlendirmek için uzaya yerleştirilmiş büyük aynaların veya reflektörlerin kullanılmasını içerir. Güneş ışığını güneş enerjisi santrallerine veya güneş enerjisi santrallerine



odaklayarak ve yoğunlaştırarak, bu yörünge aynaları enerji toplama verimliliğini artırabilir. Bu yöntem, karmaşık iletim sistemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve mevcut enerji üretim teknolojilerinin kullanılmasına izin verir [33].

- Uzak Tabanlı Konsantre Güneş Enerjisi: Konsantre Güneş Enerjisi (CSP) teknolojileri, güneş ışığını merkezi bir alıcıya odaklamak için aynaların veya lenslerin kullanılmasını içerir; daha sonra konsantre güneş ışığını ısıya veya elektriğe dönüştürür. Bu kavramı uzayda kullanarak, atmosferik parazit olmaması nedeniyle güneş enerjisi toplanabilir ve daha etkili bir şekilde konsantre edilebilir. Konsantre güneş enerjisi daha sonra mikrodalga veya lazer ışınları yoluyla Dünya'ya iletmeyi amaçlayabilir [33].
- Güneş Yelkenleri: Güneş yelkenleri, uzayda güneş enerjisini yakalamak için eşsiz bir yaklaşım sunar. Bu büyük, hafif yapılar, bir teknedeki yelkenlerin rüzgar tarafından sürüklendiği gibi, güneş ışığının baskısı ile tahrik edilir. Güneş yelkenleri, güneş ışığını yakalayan ve uzay aracına güç sağlamak veya enerjiyi Dünya'ya geri iletmek için elektriğe dönüştürülen esnek güneş panelleri ile donatılabilir. Bu yöntem, hem enerji toplama hem de itme amaçları için kullanılabilir, bu da onu uzay araştırmaları ve enerji üretimi için çok yönlü bir seçenek haline getirir [33].
- Ay Güç Sistemleri: Bir başka ilgi çekici yaklaşım, Ay'dan güneş enerjisinin kullanılmasıdır. Ay güç sistemleri, güneş ışığını engellenmeden yakalamak için Ay'ın yüzeyinde güneş dizileri inşa etmeyi içerecektir. Toplanan enerji daha sonra lazer veya ışınlanmış güç gibi farklı yöntemlerle dönüştürülerek ve Dünya'ya iletmeyi amaçlayacaktır. Bu yöntem, Ay'ın Dünya'ya yakın olmasından ve uzun süre güneş ışığına maruz kalmasından yararlanır [33].

## 5.2. Uzaydan Güneş Enerjisi İletim Yöntemleri

Güneş enerjisini uzaydan kullanmanın temel zorluklarından biri, toplanan enerjiyi verimli bir şekilde Dünya'ya geri iletmektir. Uzay tabanlı güneş enerjisi (UTGE) sistemlerinin bu önemli yönünü ele almak için çeşitli iletim yöntemleri önerilmiş ve araştırılmıştır [33–34–35]. Bu yöntemler, yakalanan güneş enerjisini önemli mesafeler olmadan geniş mesafelerde iletmeyi ve varışta kullanılabilir elektriğe dönüştürmeyi amaçlamaktadır

### 5.2.1. Mikrodalga Güç İletimi

Mikrodalga güç iletimi, güneş enerjisini uzaydan iletmek için en yaygın olarak incelenen ve umut verici yöntemlerden biridir. Bu yöntem, toplanan güneş enerjisinin mikrodalga radyasyonuna dönüştürülmesini içerir, bu da daha sonra odaklanmış bir ışın şeklinde Dünya'ya ışınlanır. Yerde, doğrultucu antenlerle donatılmış özel alıcı istasyonları mikrodalga kirisini yakalar ve tekrar elektriğe dönüştürür. Mikrodalga güç iletimi, yüksek iletim verimliliği ve uzun mesafelerde güç iletime yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar [32–33–36].

### 5.2.2. Lazer Güç Aktarımı:

Güneş enerjisini uzaydan iletmek için araştırılan bir başka uygulanabilir yöntem lazer güç iletimidir. Toplanan güneş enerjisi daha sonra Dünya'ya yönlendirilen lazer ışınlarına dönüştürülerek iletilir. Yer tabanlı fotovoltaik hücreler veya alıcılar lazer ışınını alır ve elektriğe çevirir. Lazer güç iletimi, uzun menzilli odaklama kabiliyeti ve mikrodalga güç iletimine kıyasla daha yüksek iletim verimliliği potansiyeli gibi avantajlar sunmaktadır [33–36].

### 5.2.3. Radyo Frekansı (RF) ile Güç Işınlama:

Radyo frekansı (RF) ile güç ışınlanması, güneş enerjisini uzaydan iletmek için araştırılan alternatif bir yöntemdir. Bu yaklaşım, uydudan yer tabanlı alıcılara güç aktarmak için radyo dalgalarını kullanır. Toplanan güneş enerjisi, Dünya'ya iletilen ve alıcı istasyonlarda elektriğe dönüştürülen radyo frekans sinyallerine dönüştürülür [37–38].

## 6. Uzak Tabanlı Güneş Enerjisi Santral Güç İletimi Tipi Göre Tasarımı

Uzak tabanlı güneş enerjisi esasen üç unsurdan oluşur:

- Güneş enerjisinin güneş pilleri üzerindeki yansıtıcılar veya yansıtıcı aynalar veya termal sistemler için ısıtıcılar ile uzayda toplanması,
- Mikrodalga veya lazerle Dünya'ya kablosuz güç iletimi,
- Rectenna; Bir mikrodalga anteni aracılığıyla Dünya'da enerji alımı [35].

Uzak tabanlı kısmın nispeten zayıf gelgit gerilmeleri (dışında yerçekimine) karşı kendini desteklemesi gerekmeyecektir. Karasal rüzgar veya hava koşullarından korunmaya ihtiyaç duymaz, ancak mikrometreler ve güneş patlamaları gibi alan tehlikeleriyle başa çıkmak zorunda kalacaktır. İki temel dönüşüm yöntemi incelenmiştir: fotovoltaik (FV) ve güneş dinamiği. UTGU'nin çoğu analizi, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren güneş pilleri kullanarak fotovoltaik dönüşüme odaklanmıştır. Güneş dinamiği, ışığı bir kazan üzerinde yoğunlaştırmak için aynalar kullanır. Güneş dinamiğinin kullanılması watt başına kütle azaltabilir. Kablosuz güç iletimi, çeşitli frekanslarda mikrodalga veya lazer radyasyonu kullanılarak enerjiyi toplamadan Dünya yüzeyine aktarmanın bir yolu olarak erken önerildi [33–38].

Uydu, dünyanın etrafında dönen bir nesne olarak tanımlanır, bu nedenle ay da bir uydu olarak bilinir ve doğal bir uydu olarak adlandırılır. Öte yandan, insan yapımı uydulara yapay uydular denir ve dört tip olarak ayrılmaktadır [39]. Bunlar;

- Düşük Toprak yörüngesi (180-2000 km),
- Orta Dünya yörüngesi (2000-35785 km),
- Jeosenkron yörünge (35786 km),
- Yüksek Dünya yörüngesi (>35786 km).

Üç tip UTGE istasyonu bulunmaktadır, bu istasyonlar tasarımı şu şekilde sınıflandırılmıştır:

- Tip-I,
- Tip-II,
- Tip-III [40].

### 6.1. Tip-I

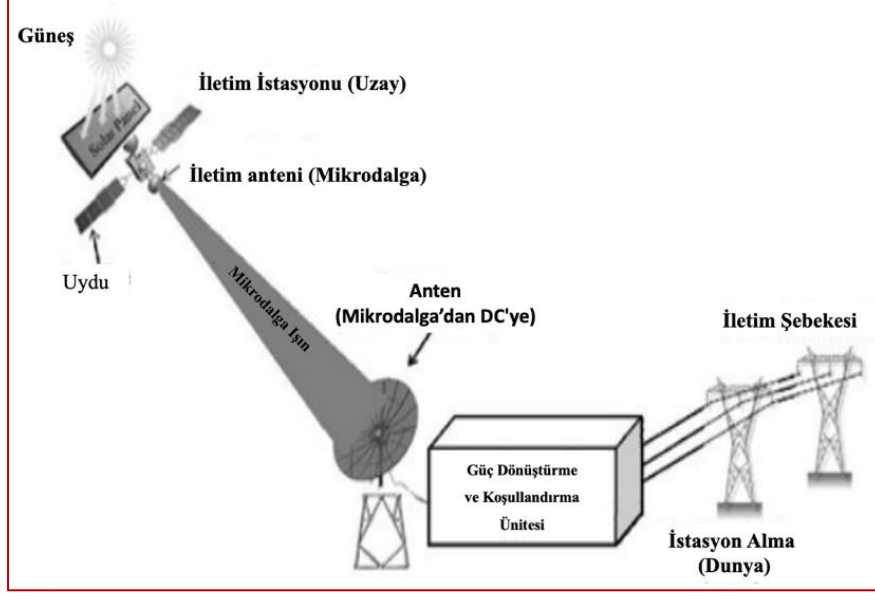
UTGE istasyonu Tip-I güneş işaretli güneş sistemi modülünden, toprak işaretli kablosuz güç iletiminden (Şekil 15) UTGE için mikrodalga frekansı, anten boyutu ile atmosferik zayıflama arasında ödün vererek 1–6 GHz aralığında alınır. Bu tasarım, aşağıdaki farklı tasarım türlerinde çözülen önemli bir sorun “yüksek gerilim güç yönetimi ve dağıtım sistemi” 'e sahiptir [41].



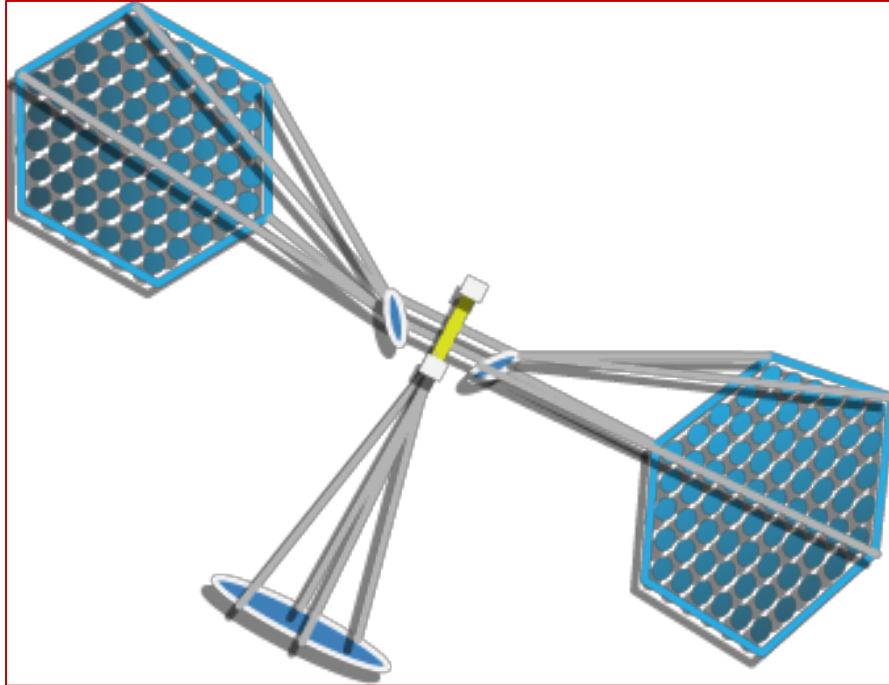
Şekil 15. Tip-I "Mikrodalga" [41].

### 6.1.1. Mikrodalga Tabanlı

Bu teknolojide, güneş pili uyduya monte edilir ve üzerine güneş ışığı düştüğünde elektrik enerjisi üretir. Ayrıca, bu elektrik enerjisi 5.8 GHz frekansta toprağa ileten bir yardım vericisi (anten) aracılığıyla radyo frekans enerjisine dönüştürülür. Bu konsept, magnetron ve empedans eşleştirme devresini içerir. Magnetron, elektrik enerjisini mikrodalgalarına dönüştürürken, empedans eşleştirme devresi mikrodalga fırının empedansını antenle uyumlu hale getirmeye yardımcı olur [42].



Şekil 16. Mikrodalga Tabanlı UTGE Sistemi [42].



Şekil 17. Mikrodalga İletimli Güneş Uyduları Şekil.

Dünya'da, mikrodalga radyo frekansları uzaydan alınarak doğrudan akıma (DC) dönüştürülür; ayrıca yerel ve ticari enerji sağlamak için alternatif akıma (AC) dönüştürülür. Bu alıcı aynı zamanda "Rectenna" olarak adlandırılan bir doğrultucu ve anten kombinasyonunu ifade eder. Bu kavramın anlaşılması için Şekil 16, kullanılacak olan tüm modülleri temsil etmektedir [42].

## 6.2. Tip-II

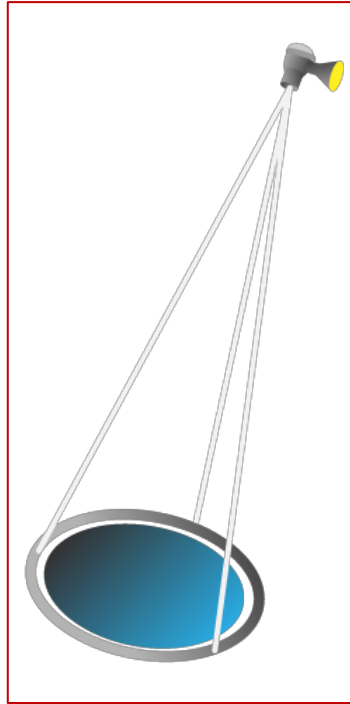
UTGE istasyonunun Tip-II tasarımı, Tip-I tasarımından farklılık gösterir. Bu tasarım temel olarak "Lazer Teknolojisi"ne dayanmaktadır. Elektrik, lazer tabanlı bir yaklaşımla oldukça uygulanabilir hale gelir ve bu çoklu bireysel ve bağımsız lazer platformunda sağlanır. Tip-II tasarımını uygulamak için tek engelin verimliliğidir. Lazer ışını, katı hal lazer cihazları kullanılarak güneş enerjisinden üretilecektir. Bu lazer ışını zemine odaklanacak ve pürüzsüz iletim ile elektrik enerjisi üretmek için kullanılacaktır [41].



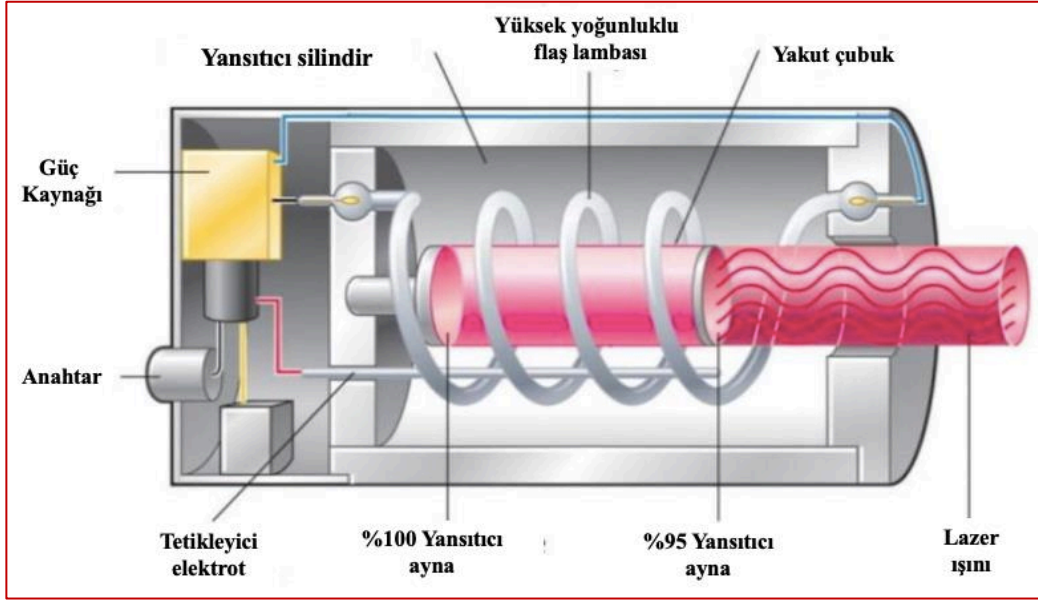
Şekil 18. Tip-II UTGE İstasyonu [41].

### 6.2.1. Lazer Tabanlı

"Doğrudan güneş enerjisi toplama lazer ile güç üretimi" olarak adlandırılan bu teknoloji, güneş panelleri tarafından toplanan enerjiyi kullanarak, önerilen konseptte göre, Şekil 20'de gösterilen (katı hal lazer ortamı) kullanılarak tek renkli "tek dalga boyu" ışık demeti üretmektedir. Bu tür bir cihaz, elektrik enerjisini bir lazer ışığına dönüştürmek için kullanılır. Oluşturulan lazer ışını, tüm sistemi verimli hale getirmek için kullanılır; bu ışın, alıcı olarak fotovoltaik hücrenin yüzeyine yönelir ve yerden alıcıya her zaman işaret etmesini sağlamak için vericinin bir kontrol sistemi tarafından yönlendirilir. Alıcı tarafından lazer ışını alındıktan sonra, güneş pili ile elektrik enerjisi üretmek için aynı kriterleri takip eder [42].

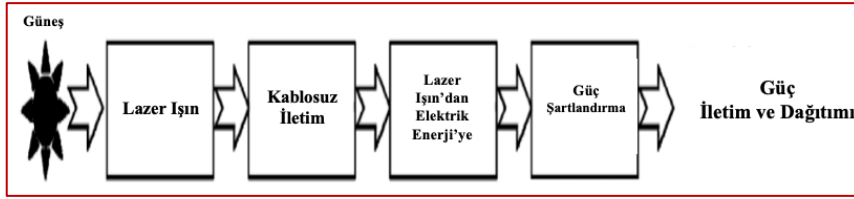


Şekil 19. Lazer Tabanlı Güneş Enerjisi Uyduları.



Şekil 20. Katı Hal Lazer Cihazı [42].

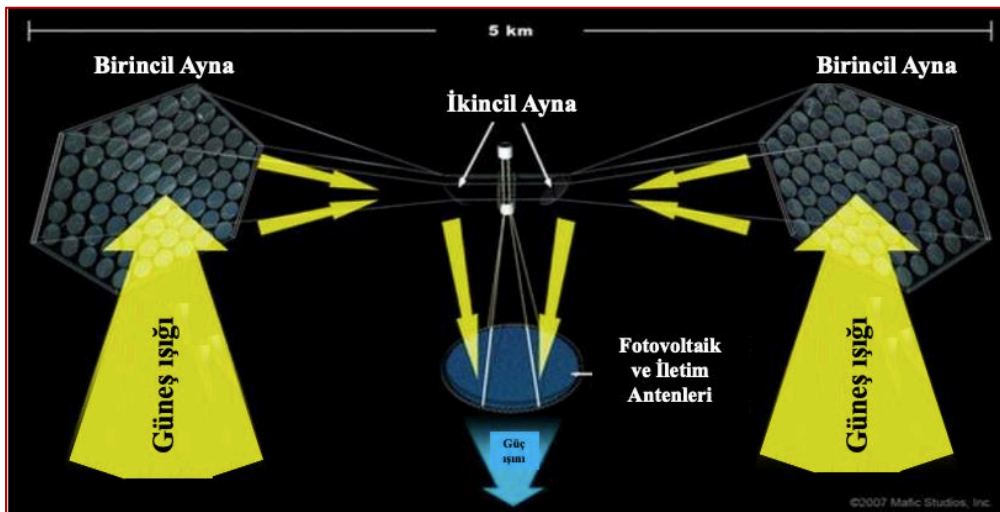
Bu modül, belirli frekans fotonlarını artırmaya ve işlemi verimli hale getirmeye yardımcı olur; safir malzeme lazer ortamı olarak veya kristal olarak kullanılır. Aşağıdaki şekil, lazer tabanlı UTGE çalışma prensibini göstermektedir [43].



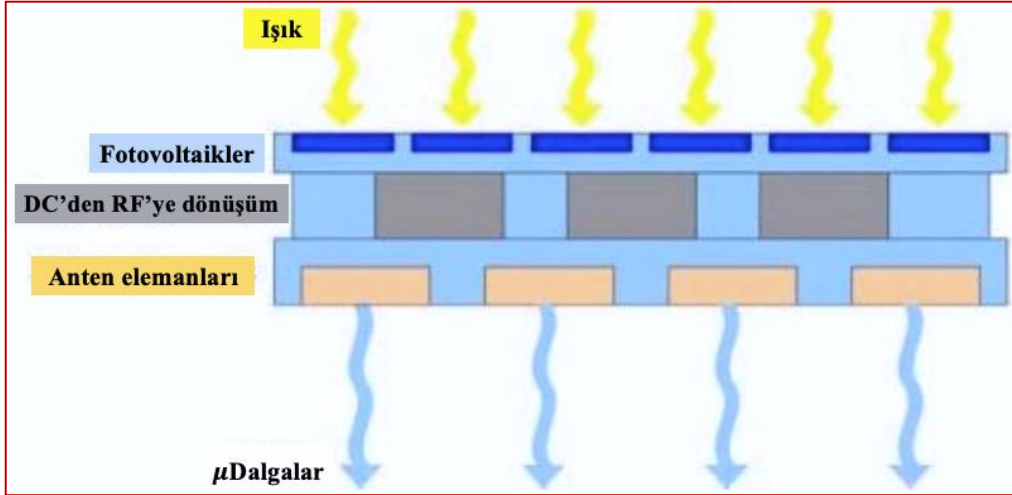
Şekil 21. Lazer Tabanlı UTGE Çalışma İlkeleri [43].

### 6.3. Tip-III

Bu tasarım, modüler simetrik yoğunlaştırıcı konseptini sandviç şeklinde kullanır. Bu sayede tasarım, hafif yeniden yönlendirme konseptini içerir ve bu nedenle Tip-I'deki (Güç yönetimi ve dağıtım sistemi) sorunu çözer (Şekil 22 ve 23) [44].



Şekil 22. Tip-II UTGE "Modüler Sandviç Mikrodalga" [44].



Şekil 23. Sandviç Modülünün Fonksiyonel Katmanları [44].

Sandviç modülü, ışımlanabilir ısı transfer ilişkisi nedeniyle bazı kısıtlamalar sergiler;

$$P = \epsilon \sigma AT^4 \quad (1)$$

P iletilen ısı gücüdür,  
 $\epsilon$  malzemenin emisyonudur,  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabiti,  
 A yayılan alandır,  
 T modülün çalışma sıcaklığı [44].

### 6.3.1. Hibrit Tabanlı

Burada, mikrodalga teknolojisi ve lazer teknolojisi bu konsept içerisinde ele alınmıştır. Çünkü her iki teknolojinin de tüm sorunların üstesinden gelmek ve özelliklerine uygun en iyi modülü tasarlamak konusunda faydaları ve dezavantajları bulunmaktadır. "Japonya Ulusal Uzay Kalkınma Ajansı" (NASDA), hibrit bir konsepti planlamıştır. Bu jeosenkron yörüngeden gelen uyduda elektrik enerjisi üretilecek ve lazer olarak yörünge tabanlı istasyona iletmeyi hedefleyecektir. İstasyonda, lazerden gelen enerji önce elektriğe, ardından elektrik mikrodalga radyasyonuna dönüştürülecektir. Ortaya çıkan mikrodalga enerjisi, dünyanın yüzeyine yerleştirilen alıcıya iletmeyi amaçlamaktadır [45].

## 7. Uzaydan Güç Sağlamanın Avantajları

Güneş enerjisini uzaydan kullanmak, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sayısız avantaj sunar. Daha sürdürülebilir bir geleceğe geçiş yapmaya çalışırken, uzay tabanlı güneş enerjisinin (UTGE) potansiyel faydaları giderek daha belirgin hale geliyor [46].

- Çevresel Sürdürülebilirlik: UTGE, karbon ayak izimizi azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için önemli bir fırsat sunuyor. Temiz ve yenilenebilir güneş enerjisine dayanarak, geleneksel enerji üretim yöntemleriyle ilişkili sera gazı emisyonlarını en aza indirebiliriz. Fosil yakıt bazlı enerji üretiminin aksine, uzay tabanlı güneş enerjisi atmosfere karbondioksit veya kükürt dioksit gibi zararlı kirleticileri salmaz. Bu yaklaşım daha temiz havaya katkıda bulunur, küresel ısınmanın etkisini azaltır ve daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir bir gezegeni teşvik eder [46].
- Sınırsız Güneş Potansiyeli: Uzayda güneş enerjisinin bolluğu, uzay tabanlı güneş enerjisi için benzersiz bir avantaj sağlar. Hava koşulları, mevsimler ve gece nedeniyle güneş ışığında değişikliklere maruz kalan karasal güneş panellerinin aksine, uzaydaki güneş panelleri sabit ve kesintisiz güneş ışığı alır. Bu, uzay tabanlı güneş dizilerinin maksimum verimlilikte çalışmasını sağlayarak daha yüksek enerji verimi ve daha tutarlı bir güç kaynağı sağlar. Uzayda neredeyse sınırsız güneş potansiyeli, büyüyen küresel ihtiyaçlarımız için sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji kaynağı sağlar [46].

- Küresel Enerji Erişilebilirliği: UTGE'nin dikkat çekici yönlerinden biri, coğrafi sınırlamaların üstesinden gelme yeteneğidir. Geleneksel enerji altyapısının oluşturulmasında zorluklarla karşılaşan uzak ve yoğun nüfuslu bölgeler, uzay tabanlı güneş enerjisinden büyük fayda sağlayabilir. Güneş enerjisini kablosuz olarak yer tabanlı istasyonlara ileterek, enerji, ulaşılması zor olan veya büyük ölçekli güneş enerjisi tesisatları için uygun araziye sahip olmayan alanlara dağıtılabilir. Bu erişilebilirlik, toplulukları ve ulusları temiz bir enerji kaynağı ile güçlendirir, gelişmeyi teşvik eder ve enerji erişimindeki eşitsizlikleri azaltır [46].
- Azalan Arazi Kullanımı ve Çevresel Etki: Dünyadaki güneş panelleri, genellikle tarımsal veya doğal yaşam alanlarıyla rekabet eden kurulum için önemli arazi alanları gerektirir. Buna karşılık, uzay tabanlı güneş enerjisi, büyük kara ayak izlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırarak karasal güneş çiftlikleriyle ilişkili çevresel etkiyi azaltır. Güneş enerjisi toplama için alan kullanarak, tarım, koruma ve diğer hayati amaçlar için araziyi koruyabilir, böylece enerji üretimi ile çevre yönetimi arasında daha sürdürülebilir bir denge sağlayabiliriz [46].
- Ekonomik Fırsatlar: UTGE'nin ilk yatırım ve geliştirme maliyetleri önemli olsa da, uzun vadeli ekonomik faydalar umut vericidir. Uzay tabanlı güneş enerjisi yeni endüstriler yaratma, istihdam fırsatları yaratma ve teknolojik gelişmeleri teşvik etme potansiyeline sahiptir. UTGE'nin altyapısı oluşturuldukça ve büyütüldükçe, uzay araştırmaları, uydu teknolojisi ve enerji iletim sistemlerine yenilik ve yatırım getirebilir. Buna ek olarak, maliyetli ve sınırlı fosil yakıt kaynaklarına olan bağımlılığın azalması, daha fazla enerji güvenliği ve fiyat istikrarına yol açarak ekonomik dayanıklılığı artırabilir ve sürdürülebilir ekonomik büyümeyi teşvik edebilir [46].

Uzay tabanlı güneş enerjisi, çevreyi korurken enerji ihtiyaçlarımızı karşılamak için dönüştürücü bir yaklaşımı temsil eder. Güneşin gücünü uzaydan kullanarak, gelecek nesiller için daha temiz, daha sürdürülebilir bir gelecek yaratabiliriz. Bu alandaki araştırma ve geliştirme ilerledikçe, uzay gücünün çevresel ve ekonomik avantajları giderek daha cazip hale geliyor ve sınırsız, yenilenebilir enerji ile çalışan bir geleceğe bir bakış sunuyor [46].

## 8. Uzay Tabanlı Güneş Enerjisi Yönelik Çalışmalar

Uzay tabanlı güneş enerjisi arayışı, ülkeler enerji üretme ve dağıtma şeklimizde devrim yapma potansiyelini tanıdığından, dünya çapında çok sayıda proje ve çalışmaya yol açtı. Bu çabalar, güneş enerjisini uzaydan kullanmak, temiz ve sürdürülebilir kaynaklardan güç alan bir geleceğin yolunu açmakla ilgili teknolojik, ekonomik ve lojistik zorlukları ele almayı amaçlamaktadır [33–47–48].

- Amerika Birleşik Devletleri: Amerika Birleşik Devletleri, çeşitli devlet kurumları, araştırma kurumları ve özel şirketler ile olasılıkları aktif olarak araştıran uzay enerjisi araştırmalarının ön saflarında yer almıştır. NASA, Ulusal Uzay Topluluğu ve Enerji Bakanlığı gibi kuruluşlarla işbirliği yaparak, uzay tabanlı güneş enerjisi için çalışmalar ve fizibilite değerlendirmeleri yapmıştır. Ayrıca, SpaceX ve Lockheed Martin gibi özel şirketler uzay gücü teknolojilerini geliştirmeye ilgi duyduklarını ifade ettiler[35].
- Çin: Çin, artan enerji taleplerini karşılama ve fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltma potansiyelini kabul ederek uzay enerjisi araştırmalarında önemli adımlar attı. Çin Ulusal Uzay İdaresi (CNSA), uzay tabanlı güneş enerjisinin fizibilitesini değerlendirmek için çalışmalar ve deneysel görevler başlattı. Özellikle, Çin 2021 yılında uzayda güneş enerjisi toplama ve Dünya'ya aktarma kavramını test etmek için deneysel bir uydu başlattı [35].
- Japonya: Japonya'nın uzay gücü teknolojilerinde uzun bir araştırma ve geliştirme geçmişi vardır. Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA), uzay tabanlı güneş enerjisi kavramını incelemekte aktif olarak yer aldı ve 2030'lara kadar bir gösteri gücü uydusu inşa etmek için iddialı planlar önerdi. JAXA, mikrodalga ışınları kullanarak kablosuz güç iletiminin başarılı bir şekilde gösterilmesi ve uzay güç sistemlerinin potansiyelini daha da doğrulaması gibi deneyler gerçekleştirdi [35].
- Avrupa Birliği: Avrupa Birliği (EU), uzay tabanlı güneş enerjisinin önemini de kabul etmiş ve fizibilitesini araştırmak için araştırma projelerine fon sağlamıştır. Uluslararası Uzay Üniversitesi liderliğindeki AB tarafından finanse edilen SPS-ALPHA projesi, gelişmiş robotik ve otonom montaj tekniklerini birleştiren uzay tabanlı bir güneş enerjisi sistemi geliştirmeyi hedefliyor. Proje, uzay

gücü teknolojilerinin anlaşılmasını ve uygulanmasını ilerletmek için çeşitli Avrupa ülkelerinden uzmanları bir araya getiriyor [35].

- Uluslararası İşbirliği: Bireysel ülke girişimlerine ek olarak, uluslararası işbirliği uzay gücü çalışmalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Uluslararası Uzay Bilimleri Akademisi (IAA) ve Uluslararası Uzay Bilimleri Federasyonu (IAF) gibi kuruluşlar, araştırma, bilgi alışverişi, ve ülkeler arasında işbirliğini kolaylaştırmak [35].

Bu küresel çabalar, uzay tabanlı güneş enerjisinin potansiyel faydalarının giderek daha fazla tanınmasını yansıtmaktadır. Ülkeler iş birliği yaparken ve bulgularını paylaştıkça, kazanılan kolektif bilgi, uygulanabilir alan güç sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Önemli zorluklar devam etmekle birlikte, bu çalışmaların işbirlikçi doğası, uzay tabanlı güneş enerjisi potansiyelinin kilidini açmak için ortak bir çaba sağlamaktadır.

## 9. Sonuç

Bu makale, çevre sorunları ve bölge sakinleri için enerji üretimi eksikliği gibi sorunlarımızın üstesinden gelen uzay tabanlı güneş enerjisi üretimi ve dağıtılmış ağ kavramını özetlemektedir. Bu teknoloji ile, temiz ve temiz bir işleme gece gündüz herhangi bir etkisi olmadan 24 saat güç elde etmek mümkündür. Güç, dünyanın herhangi bir noktasını kablosuz olarak farklı konumlardaki alıcı istasyonlara iletiyor olabilir.

UTGE, geleneksel enerji kaynakları için önemli bir seçenek olarak kanıtlanma yeteneğine sahiptir. Mikrodalga iletimindeki kayıplar, geleneksel enerji iletim seçeneklerinden çok daha azdır. Böyle bir kablosuz İletim, biyolojik ekosistemi ve dünyadaki doğayı etkilemez. Mikrodalga enerjisi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerini kolayca karşılayacak çok temiz bir kaynaktır. Bununla birlikte, böyle bir güneş enerjisi istasyonunun uygulanması sadece uygulanabilir teknolojinin yavaş gelişimi değil, aynı zamanda daha yüksek maliyettir. Gelecekte UTGE, enerji krizinde yaklaşan ihtiyaçları karşılamak için uzaya dayalı enerjiyi kullanmak için daha etkili ve verimli bir seçenek olacaktır. Elbette uygulanması zaman alacaktır. Ancak, bu alandaki tutarlı çalışma ve teknolojik araştırma, daha hızlı ve başarılı bir şekilde büyümemize yardımcı olacaktır.

## Contribution of Researchers

All researchers have contributed equally to writing this paper.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## Referanslar

- [1] C. Sevim, "Küresel enerji jeopolitiği ve enerji güvenliği," Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, vol. 7, no. 26, pp. 4378–4391, 2012.
- [2] "World energy supply and consumption," Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_supply\\_and\\_consumption](https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_supply_and_consumption)
- [3] S. F. Adams, "Solar thermionic space power technology testing: A historical perspective," in AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2006, pp. 590–597.
- [4] S. Tokin, "China plans to launch trial for a solar power plant SPACE STATION in 2028 that will beam energy back down to Earth - beating the US and UK to the punch," Dailymail, 2022. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-10893523/China-plans-launch-solar-power-plant-space-station-beam-energy-Earth.html> (accessed Jun. 07, 2022).
- [5] N. Lior, "Power from space," Energy Convers Manag, vol. 42, no. 15–17, pp. 1769–1805, 2001.
- [6] "Güneş," Vikipeidi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F>



- [7] M. YILDIZ, "Güneş'in İç Yapısını Ne Kadar Biliyoruz?," in XI. Ulusal Astronomi Toplantısı, ELAZIĞ: Fırat Üniversitesi, Fizik Bölümü, Aug. 1999, pp. 16–19. [Online]. Available: <http://kitap.uak.info.tr/1999/1999UAK..1999...16Y.pdf>
- [8] C. K. ULUSOY, "YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMINDAKİ GELİŞMELER; GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ VE FİNANSMAN MODELLERİ," ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi, vol. 6, no. 13, pp. 65–84, 2019.
- [9] "Güneş'in İç Yapısı (standard solar model)," Prof. Dr. Bilsen Beşergil, Dec. 08, 2020. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/ic-yap-standardsolar-model-ic-yap.html>
- [10] "Arka Fön Görüntüsü: Güneş, Dünya ve güneş sistemindeki diğer gezgenler arasındaki mesafe(NASA)," NASA, 2017. <https://www.nasa.gov/>
- [11] F. Ç. KILIÇ, "Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri," Mühendis ve Makina, vol. 56, no. 671, pp. 28–40, 2015.
- [12] B. TURAN and S. DAĞDAŞ, "Güneş enerjisi ve artan kullanım imkanları," Artvin: III. Ulusal Karadeniz Ormanlık Kongresi, Jun. 2010, pp. 97–106. [Online]. Available: <https://openaccess.artvin.edu.tr/xmlui/handle/11494/2689>
- [13] H. H. ÖZTÜRK, Yenilenebilir Enerji Kaynakları. İstanbul: Birsan Yayınevi, 2021, pp. 667
- [14] N. Altıntop and D. Erdemir, "Dünyada ve Türkiye'de güneş enerjisi ile ilgili gelişmeler," Mühendis ve Makina, pp. 69–77, 2013.
- [15] S. Öksüz, "Güneş Enerjisi Sistemleri Temel Prensipler," Teknik ve Eğitim Bölümü. Makine Mühendisleri Odası. Ankara, 2014.
- [16] D. S. Polatkan, "Fotovoltaik Güneş Elektiriği Sistemleri," YEKSEM 2009 5. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, pp. 215–217, 2009.
- [17] M. S. CENGİZ and M. S. MAMİŞ, "Termal Güneş Enerjisi Kullanımı ve CSP Sistemlerin Verimlilik Analizi," Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 5, no. 1, 2016.
- [18] "Güneş Enerjisi Hakkında Genel Bilgi," Yavuz Enerji. <https://www.yavuzenerji.com/y/gunes-enerjisi-hakkinda-genel-bilgi.html>
- [19] "Güneş enerjisi kulesi nedir?," Yeşil Odak. <https://www.yesilodak.com/gunes-enerjisi-kulesi-nedir>
- [20] H. S. TORTOP and Ö. Nuri, "Proje tabanlı öğrenmede anlamlı alan gezisi; güneş enerjisi ve kullanım alanları konusu," Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, vol. 44, no. 44, pp. 300–307, 2013.
- [21] S. RÜSTEMLİ, F. DİNÇER, M. ÇELİK, and M. S. CENGİZ, "Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri," Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 2, no. 2, pp. 141–147, 2013.
- [22] R. Zakharchenko et al., "Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 82, no. 1–2, pp. 253–261, 2004.
- [23] G. KARPUZ, "Güneş Paneli Üretiminde Kullanılan Yarı İletken Malzemeler", Metalurji Ve Malzeme Mühendisleri Odası Dergisi, Available: [https://metalurji.org.tr/ehaber/2020\\_07/18\\_Makale\\_Gunes\\_Paneli.pdf](https://metalurji.org.tr/ehaber/2020_07/18_Makale_Gunes_Paneli.pdf)
- [24] "Şeffaf Güneş Pilleri," Yeşerenerji, Jul. 07, 2021. <https://yeserenerji.com/seffaf-gunes-pilleri/>
- [25] "Güneş Paneli Yapımı-Yapısı," Antalya Enerji. <https://www.antalyaenerji.com/gunes-paneli-nasil-yapilir/>
- [26] R. SELBAŞ and H. ÇETİN, "FOTOVOLTAİK GÜNEŞ SANRALLERİNİN VERİMLERİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ," Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, vol. 6, no. 1, pp. 10–17.
- [27] H. İ. Erdal, "Parabolik Oluk Sistem Güneş Santralleri ile Güneş Kuleleri Yatırımlarının Teknik Değerlendirmesi ve Maliyet Karşılaştırması," Enerji, Piyasa ve Düzenleme (Cilt:2, 2011, Sayfa 21-48).
- [28] H. LİVATYALI, "YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ TEKNOLOJİLERİ," Tübitat, Marmara Araştırma Merkezi, Enerji Enstitüsü, Apr. 2011, [Online]. Available: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/c21ec3eb17542d5\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/c21ec3eb17542d5_ek.pdf)
- [29] S. S. Gosavi et al., "A review on space based solar power," Journal of Thermal Energy Systems, vol. 6, no. 1, pp. 16–24, 2021.
- [30] R. Check, P. S. Space-based, K. Percent, and E. Shingles, "The future of solar energy," Mitochondrion, pp. 3–6, 2015.
- [31] "Space-Based Solar Power: The Future Source of Energy?," Green Match, Jul. 12, 2022. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2020/02/space-based-solar-power> (accessed Jul. 07, 2022).
- [32] P. Jaffe and J. McSpadden, "Energy conversion and transmission modules for space solar power," Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1424–1437, 2013.
- [33] "Space-based solar power," Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based\\_solar\\_power#:~:text=Space%2Dbased%20solar%20power%20essentially,a%20rectenna%2C%20a%20microwave%20antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_solar_power#:~:text=Space%2Dbased%20solar%20power%20essentially,a%20rectenna%2C%20a%20microwave%20antenna)
- [34] K. Chaudhary and D. Kumar, "Satellite solar wireless power transfer for baseload ground supply: clean energy for the future," European Journal of Futures Research, vol. 6, no. 1, p. 9, 2018, doi: 10.1186/s40309-018-0139-7.
- [35] C. Yang, X. Hou, and L. Wang, "Thermal design, analysis and comparison on three concepts of space solar power satellite," Acta Astronaut, vol. 137, pp. 382–402, 2017.

- [36] X. Li, B. Duan, L. Song, Y. Yang, Y. Zhang, and D. Wang, "A new concept of space solar power satellite," *Acta Astronaut*, vol. 136, pp. 182–189, 2017.
- [37] S. Sasaki, K. Tanaka, and K. Maki, "Microwave power transmission technologies for solar power satellites," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1438–1447, 2013.
- [38] R. Venugopal, H. Manjunath, V. R. Anjanpura, and P. K. Singh, "Overview of space based solar power," *Material Science and Research India*, vol. 19, no. 1030, pp. 58–62, 2022.
- [39] H. Matsumoto, "Space solar power satellite/station and the politics," *IEICE Proceedings Series*, vol. 14, no. 21Q1-4, 2009.
- [40] F. E. Little, J. O. McSpadden, K. Chang, and N. Kaya, "Toward space solar power: Wireless energy transmission experiments past, present and future," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 1998, pp. 1225–1233.
- [41] R. M. McLinko and B. V Sagar, "Space-based solar power generation using a distributed network of satellites and methods for efficient space power transmission," in *International Conference on Space Information Technology 2009*, SPIE, 2010, pp. 908–914.
- [42] S. S. Mohammed and K. Ramasamy, "Solar Power Generation using SPS and Wireless Power Transmission," in *Proc. Int. Conf. Energy Environ*, 2009, pp. 413–418.
- [43] L. Summerer and O. Purcell, "Concepts for wireless energy transmission via laser," *Europeans Space Agency (ESA)-Advanced Concepts Team*, 2009.
- [44] P. Jaffe et al., "Opportunities and challenges for space solar for remote installations," *Naval Research Lab Washington DC Washington United States*, 2019.
- [45] S. Sasaki, K. Tanaka, and K. Maki, "Microwave power transmission technologies for solar power satellites," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1438–1447, 2013.
- [46] J. K. Strickland Jr, "Advantages of solar power satellites for base load electrical supply compared to ground solar power," *Solar Energy*, vol. 56, no. 1, pp. 23–40, 1996.
- [47] J. O. McSpadden and J. C. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," *IEEE Microw Mag*, vol. 3, no. 4, pp. 46–57, 2002, doi: 10.1109/MMW.2002.1145675.
- [48] P. Jaffe and J. McSpadden, "Energy conversion and transmission modules for space solar power," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1424–1437, 2013.



# Comparison of Cost and Benefit Analysis of Active Leakage Control Applications in Water Distribution Systems

Abdullah ATEŞ<sup>1</sup>, Salih YILMAZ<sup>2</sup>, Mahmut FIRAT<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>İnönü University Computer Engineering Department; ORCID: [0000-0002-4236-6794](https://orcid.org/0000-0002-4236-6794)

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin University Civil Engineering Department; ORCID: [0000-0002-3206-1225](https://orcid.org/0000-0002-3206-1225)

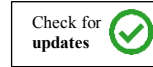
<sup>3</sup>İnönü University Civil Engineering Department; ORCID: [0000-0002-8010-9289](https://orcid.org/0000-0002-8010-9289)

\* Corresponding Author: [mahmut.firat@inonu.edu.tr](mailto:mahmut.firat@inonu.edu.tr)

Received: 10 December 2023; Accepted: 31 December 2023

**Reference/Atıf:** Ateş, A., Yılmaz, S., Fırat, M. (2024). "Comparison of Cost and Benefit Analysis of Active Leakage Control Applications in Water Distribution Systems", Researcher, vol.3, no.2, pp.76-85, December 2023, doi: 10.55185/researcher.1402832

## Abstract



The fight against leaks and failures in water distribution systems has gained a serious importance with the increasing drought, the inefficient use of water resources and the rapid contamination of existing water resources. These studies are generally carried out with two different approaches, active leakage control and passive leakage control. Although the passive control method, which covers the repair of the reported faults, is less costly and easier, the vast majority of the faults that occur in the system are caused by unreported faults. It is possible to detect, repair and control such faults with active leakage methods. In order to gain the expected efficiency from these methods, it is very important to regularly monitor the networks by dividing them into isolated areas, to estimate the amount of preventable leakage, and to determine the leak location with devices and equipment such as ground microphone, regional recorder, regional correlator within the framework of a certain systematic program. The regular maintenance of these systematic studies in the implementation of the active leakage method also creates serious costs for water administrations. In addition to the costs of creating and monitoring measurable regions, the costs of devices and equipment with different characteristics, sensitivities and costs to be used for the determination of the fault location should also be considered in the studies to be carried out. In this study, a standard calculation structure is defined for the benefits and costs of the ground microphone and regional correlator methods used to locate unreported leaks. By using the defined calculation methodology, the benefits and costs for both methods are analyzed and compared in a sample network. The method to be selected according to the general characteristics of the networks plays an important role for the most efficient operation.

**Keywords:** Water distribution system, leakage, active leakage control, leakage detection

## 1. Introduction

Water distribution systems are one of the most important urban infrastructure systems. Ensuring normal operating conditions in water distribution systems is quite important for water supply safety. However, failures, breaks and leaks occur in water distribution systems depending on various factors that are the physical properties of network (pipe length, pipe material, pipe diameter etc.), environmental (traffic loads, groundwater variation etc.) and hydraulic parameter (high pressure, pressure change) [1]. A certain portion of these leakages rise to the surface and constitute the reported leakages. On the other hand, a significant portion does not rise to the surface and constitutes unreported leakages [2]-[3]. Annual leakage rates in distribution systems are between 25 and 30% [4], and the NRW rate is approximately 30% [5]. A significant part of water resources is lost due to leaks in water distribution networks. In developed countries, the volume of these leaks is seen to be between 3 and 7% of the water provided, while in developing countries there is more than 50% leakage [6]. In our country, according to the data of 25 administrations in the report published by the Turkish Water Institute (SUEN); The average GGS rate is 42%, and the lowest and highest values are 22% and 67%, respectively [7].

In water distribution systems, an active leak control strategy, which includes the activities of recognizing, locating and repairing unreported leaks, which constitute a significant portion of leaks, plays an important role in reducing the volume of physical losses [2], [8]. Active leak control includes minimum night flow in district metered areas, performing night flow analysis, identifying potential

recoverable leaks, and locating unreported leaks with acoustic methods. However, in order to obtain the expected benefits of the active leak control approach, creating district metered areas and defining boundaries is quite important step. The volume of recoverable leaks increases as the time it takes to detect and locate unreported leaks increases [5], [9-11]. Moslehi et al. emphasized that leaks constitute the most important component of water losses. It was stated that in many administrations, high-cost methods are applied to minimize leaks, but economic criteria should be taken into account in leak management in order to ensure efficiency in all aspects of the system [12].

Active leak control covers the detection, reduction and prevention of non-surface (unreported) leaks in district metered areas. For active leakage control, it is necessary to district metered areas in the water distribution system, perform minimum night flow analysis, monitor flow-pressure changes, detect detected leakage locations and carry out leak repairs [13]. In addition, the flow-pressure change in the isolated measurement area should be constantly monitored and new leaks should be intervened immediately. Active leak control is applied to locate and prevent potential preventable leaks determined by minimum night flow analysis. This method has no effect on reducing and preventing uncertain leaks. In order to reduce the volume of preventable leakage detected by monitoring the minimum night flow rate in a district metered areas, studies are carried out to detect the leak location with devices and equipment such as ground microphone, regional recorder, regional correlator. It has been emphasized in the literature that the aim is to detect and repair pipe bursts faster as a result of active leak control studies [14]. In this way, it has been argued that the benefits of reducing both possible damage to the environment and water loss will be achieved. Leak detection team refers to the technical team formed to locate non-surface faults detected by minimum night flow analysis in distribution systems. This team is of critical importance in combating leaks. Detecting the leak location late or not detecting it causes the leak volume to increase. The field experience of the leak detection team is very important in accurately detecting the leak location [15],[16].

Leak detection devices refer to acoustic devices that are based on sound waves and their propagation and change along the pipeline-connectors in determining the exact location of the leak. These devices can basically be given as ground microphone (local listening), regional correlator, regional recorders, hydraulic model-based monitoring systems. Local leak detection involves monitoring the street-based step-by-step change of sound waves by using acoustic devices, referred to as ground microphones, to locate leaks that do not surface in the distribution system. Pipe material type, fault location, fault diameter, soil cover thickness on the pipe, experience of the personnel using the device and inspection time are effective in detecting this type of leak. In order to perform leakage inspection more accurately, night hours when ambient noise is the least should be preferred. Regional leak detection aims to determine the location of potential leak points with the help of sensors placed at valve points in the region in order to prevent potential preventable leaks detected by MNF analysis in isolated measurement areas. In this method, potential streets that may leak are determined based on the frequency changes received from sensors in the region. Then, local detection work is carried out on the street with leakage potential using local leak detection equipment.

The regular maintenance of these systematic studies in the implementation of the active leakage method also creates serious costs for water administrations. In addition to the costs of creating and monitoring measurable regions, the costs of devices and equipment with different characteristics, sensitivities and costs to be used for the determination of the fault location should also be considered in the studies to be carried out. In this study, a standard calculation structure is defined for the benefits and costs of the ground microphone and regional correlator methods used to locate unreported leaks. By using the defined calculation methodology, the benefits and costs for both methods are analyzed and compared in a sample network. The method to be selected according to the general characteristics of the networks plays an important role for the most efficient operation.

## 2. Material and Method

### 2.1. Non-Revenue Water and Components

Non-revenue water refers to water that is supplied to the distribution system but cannot be charged for. Non-revenue water basically consists of three main components: apparent losses, real losses and unbilled authorized uses. This component should be minimal to ensure operational efficiency in the system. In its simplest form, the non-revenue water ratio is obtained as the ratio of the non-revenue water volume to the inlet volume. According to the water balance table, the non-revenue water volume is calculated as the difference between the system inlet volume and the revenue-generating water volume. Real losses occur as a result of malfunctions (reported/unreported) in water distribution systems due to various factors or overflows and cracks in water tanks. This component is lost as leakage before the water supplied to the system reaches the subscribers and constitutes a significant part of the volumetric water losses. One of the most basic tools used to determine the amount and rate of water loss at a certain standard and to monitor its change is the "standard water balance" recommended by International Water Association (IWA) and American Water Works Association (AWWA) (Table 1). In the next stage of this method, Administrative and Physical losses and their sub-components are calculated or estimated based on legal consumptions and input volumes. The standard water balance table, filled in using real data to represent the system, provides the opportunity to access information about the subcomponents of water losses as well as the non-revenue water rate.

Table 1: IWA Standard water balance [2]

|                         |                             |                                     |   |                       |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------|
|                         | (10) Authorized consumption | (4) Billed authorized consumption   | (2) Billed metered consumption<br>(3) Billed unmetered consumption                          | (5) Non-revenue water |
|                         |                             | (9) Unbilled authorized consumption | (7) Unbilled metered consumption<br>(8) Unbilled unmetered consumption                      |                       |
| (1) System Input Volume |                             | (15) Apparent losses                | (12) Illegal consumption<br>(13) Losses due to meter inaccuracies                           | (6) Revenue water     |
|                         | (11) Water losses           |                                     | (14) Losses due to reading errors<br>(17) Leakages in transmission and distribution systems |                       |
|                         |                             | (16) Real losses                    | (18) Leakages in reservoirs<br>(19) Leakages in service connections                         |                       |

In order to monitor the water loss performance of administrations and municipalities in Turkey and to carry out water loss management studies effectively, systematically and at a certain standard, the "Control of Water Loss in Drinking Water Supply and Distribution Systems" regulation was issued by the Ministry of Agriculture and Forestry in 2014. The most basic methods applied in the management of leaks in the international literature are suggested as active leak control, pressure management, fault repair speed and quality and pipe material management (Figure 1).

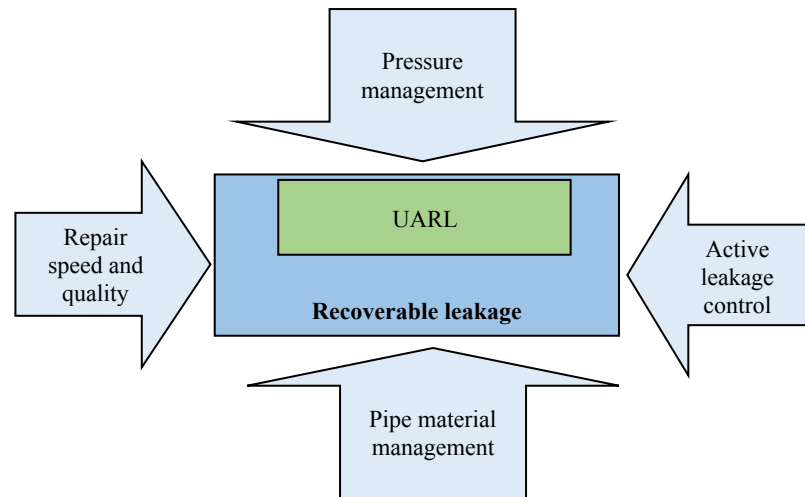


Figure 1: Basic reduction components of real losses [2]

In this figure, the unavoidable annual real loss (UARL) volume is the lowest value of leakages as technical in a water distribution system. This volume is not the economical level. Therefore, the economical leakage level should be defined based on the network characteristics and water utility properties. Pipe material management is defined as the most difficult and costly process in reducing, managing and controlling leaks [17-18]. Therefore, less costly methods such as active leak control, fault repair speed and quality, and pressure management should be applied primarily in the distribution system. Two different intervention methods such as passive leakage control and active leakage control are applied to control and manage malfunctions and leaks occurring in the water distribution system. Active leakage control covers the detection, reduction and prevention of non-surface (unreported) leaks in district metered areas. For active leakage control, it is necessary to create isolated measurement zones in the water distribution system, perform MNF analysis, monitor flow-pressure changes, detect detected leakage locations and carry out leak repairs. This method has no effect on reducing and preventing uncertain leaks. Passive leak control includes the process of repairing and managing surface (reported) faults in distribution systems. This method only covers the management and repair of faults that surface. Leak location detection refers to the determination of the location of potential preventable leaks in the network (in which pipe on a street basis) detected by MNF analysis in district metered areas. Local, regional and instant monitoring systems are used to detect the leak location. Detecting the leak location is very important to reduce the leak volume and ensure water efficiency. Local leak detection involves monitoring the street-based step-by-step change of sound waves by using acoustic devices, referred to as ground microphones, to locate leaks that do not surface in the distribution system. Pipe material type, fault location, fault diameter, soil cover thickness on the pipe, experience of the personnel using the device and inspection time are effective in detecting this type of leak. In order to perform leakage inspection more accurately, night hours when ambient noise is the least should be preferred.

## 2.2. Leak Detection with Ground Microphone and Cost-Benefit Analysis

Ground microphones refer to local detection devices used to listen from the ground on the pipeline using the acoustic method. This device similarly detects leaks by monitoring acoustic signals. In this context, it should be protected from external sounds such as traffic and wind, and listening should be done step by step at 1- or 2-meters intervals on the pipe. Listening to and locating faults with a ground microphone is one of the most frequently used methods in active leak management. In this method, when the location of the existing network is known, an operator tries to detect the sound of the leaks by listening sensitively on the route of the network. The unreported leaks can be detected and leakage losses can be prevented with this equipment [2], [19] (Figure 2).



Figure 2: Sample Fault Detection Process with ground microphone

In the cost-benefit analysis of this method, after obtaining the data on the total line length and subscriber numbers of the network to be studied, the total water loss in the network must be calculated in l/km/hour (Yilmaz et al., 2023). The current average network pressure of the system and unit water costs should also be defined as variables. The benefits and possible costs that can be obtained were calculated using the following data, while making the cost benefit analysis of this method.

Table 2: Data used in analysis

| No | Parameters  | Unit                              |
|----|---|-----------------------------------|
| 1  | Total length of main line   | m                                 |
| 2  | Average length of service connections   | m                                 |
| 3  | Unit cost of water produced   | Turkish Liras (TL)/m <sup>3</sup> |
| 4  | Total number of failures in a year  | No.                               |
| 5  | The volume of real losses   | m <sup>3</sup> /month             |
| 6  | The volume of leakages in water tanks   | m <sup>3</sup> /month             |
| 7  | The rate of unreported failures to total failures in water distribution network | %                                 |
| 8  | System operation pressure   | m                                 |

### 2.3. Leak Detection with Regional Correlator and Cost-Benefit Analysis

Acoustic (zonal) recorders can be considered as a compact unit containing acoustic sensors and programmable data loggers, which can be mounted on a valve-fire hydrant or metal pipe with a magnetic structure. Its size and features enable it to be easily placed and used at points suitable for monitoring sound frequencies in the distribution system. These devices are generally placed at suitable points to listen to the sound of leaks between 02:00 and 04:00 at night, which is the most suitable time for monitoring sound changes. After the recorders are correctly programmed and placed, the propagation of sound waves along the pipeline is recorded and the collected data is analyzed to determine the potential leak line.

Acoustic (regional) correlators are shown to be one of the most effective tools used in locating leaks. In the application of this tool, a mathematical-based relationship is established between the frequency curves of two signals coming from the same leak (potential leak), and the location of the leak is determined. Therefore, instead of looking for the highest noise point, the potential leak point is determined by applying cross-correlation based on the frequency curves between two sensors.

In studies conducted in the literature, this method/tool detects the leak location with high accuracy (generally with an error of less than 1 m). When planning the placement of recorders, two basic elements must be taken into account as they affect the propagation of sound waves. These factors are the type of pipe material to be listened to, the operating pressure present in the system. Another method most frequently used in the active leakage method is to detect faults with a regional correlator. In this method, a constant sound and vibration is listened to with the help of correlators placed at certain distances, and accordingly, the location of the leak is aimed to be determined.

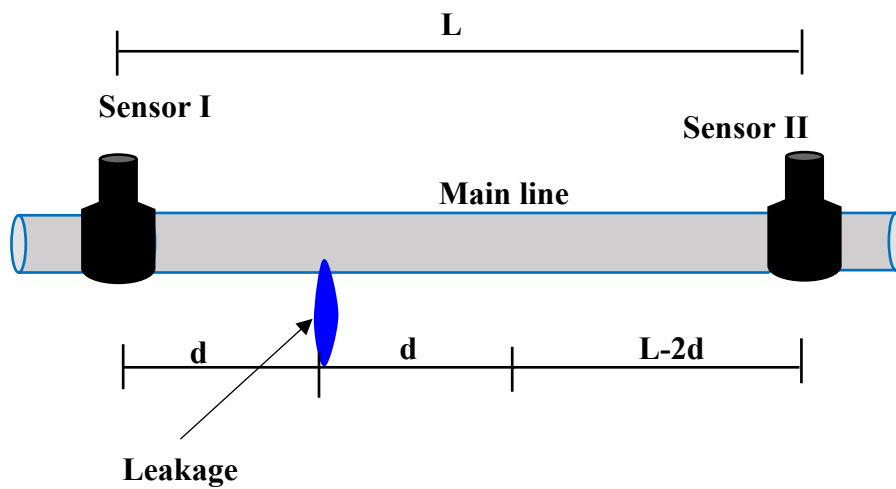


Figure 3: Regional Correlator working structure

The acoustic leak sound correlation method aims to compare the leak sound determined by sensors (monitoring the exit sound frequency of water coming out of the fault crack point) placed at two valve points (in a pipeline) in order to detect leaks that do not come to the surface in the isolated measurement area and to determine the potential leak point accordingly. In this method, it is assumed that the leak sound velocity in the pipe is constant and the leak sound moves from the leak note in both sensor directions. If the crack (leak) in the pipe is at an equal distance from both sensors, the sensors detect the leak simultaneously. If the crack (leak) in the pipe is not at an equal distance from both sensors, the sensors detect the leak at different times, in which case the difference between the time the leak sound reaches the sensors is measured by the correlation process [19].

Sensors are placed at two valve points (points I and II) as shown in the figure. The distance of the leak point that occurs at the bottom of the pipe between the two sensors to sensor no. I is ( $d$ ), and the distance from the leak point to sensor no. II is marked ( $d$ ). In this example, the distance ( $L-2d$ ) between the point ( $d$ ) away from the leak point and sensor no. II causes the delay time ( $t$ ) for the leak sound speed to reach sensor no. II. This distance ( $L-2d$ ), which causes the delay time, can be written as  $V*t$ .

Here,  $V$ ; The speed of sound created by the leakage coming out of the crack,  $L$ ; horizontal distance (m) between two sensors.  $L = (2 * d) + (V * t)$

$$L = (2 * d) + (L - 2d) \quad (1)$$



In this case, the distance of the leak point to the sensor can be written as follows;

$$d = \frac{L - (V * t)}{2} \quad (2)$$

In this method, the correlation process determines the delay time (t) of the leak sound between two sensor points. In this method, the distance (L) between the two sensors must be measured accurately. The speed of the sound of the leak caused by the leak coming out of a crack varies depending on the pipe material, pipe diameter, pipe wall thickness and the characteristics of the ground around the pipe. In general, theoretical values for the speed of sound are used in many cases and are acceptable for the initial assumption of the leak location. However, since the sound speed varies depending on these factors, if there are previous repairs on the pipe (different pipe material, etc.), then the assumption made for the sound speed may change. In this method, the performance of the correlators depends on the system operating pressure and the level of acoustic noise in the network. While making the cost benefit analysis of this method, the benefits and possible costs that can be obtained were calculated using the following data.

Table 3: Data Used in Analysis

| No | Parameters  | Unit                  | Value       |
|----|---|-----------------------|-------------|
| 1  | Total Network Length  | m                     |             |
| 2  | Unit Water Cost   | TL/m <sup>3</sup>     |             |
| 3  | Existing Weighted Pipe Type of the Network                      | -                     |             |
| 4  | Network Failure Repair Cost                                     | TL/piece              | ₺3.200,00   |
| 5  | Correlator Cost   | TL/piece              | ₺5.500,00   |
| 6  | Correlator System and Transmitter Cost                          | TL/piece              | ₺120.000,00 |
| 7  | Estimated Number of Network Failures                            | pieces/month          | Calculating |
| 8  | Calculation of Interceptable Flow                               | m <sup>3</sup> /month | Calculating |
| 9  | Calculation of Benefit Flow Rate to be Obtained with Microphone | m <sup>3</sup> /month | Calculating |
| 10 | Number of Correlators Required                                  | piece                 | Calculating |

Network main line length refers to the length of the pipeline that passes through the street or street in the distribution system and is under the responsibility of the water administration. Unit water production cost refers to the production cost of water obtained from the sources feeding the distribution system. In order to calculate this cost, first of all, all resources feeding the system must be measured continuously and accurately. Energy expenses should be monitored regularly in the promotion system for water production costs. Unit fault repair cost refers to the cost incurred by repairing one reported or unreported fault that occurs in the distribution system. This cost especially has a direct impact on operating cost and efficiency. This cost basically includes components such as excavation, pipe material, labor, filling, road covering, and the cost of unsold water. In systems with a high number of malfunctions, fault repair costs increase linearly, causing the water sales price to reach high levels. Correlator System and Transmitter Cost includes the initial investment cost of the regional correlator used for leak detection in the distribution system.

Table 4: Data Used in Analysis (comt.)

| No | Data Name   | Unit                  | Value       |
|----|---|-----------------------|-------------|
| 11 | Determination of Method Performance                                 | %                     | Calculating |
| 12 | Calculation of Interceptable Flow                                   | m <sup>3</sup> /month | Calculating |
| 13 | False Detection Cost  | TL                    | Calculating |
| 14 | Detected Fault Repair Cost  | TL                    | Calculating |
| 15 | Calculation of the Benefit Flow Rate to be Obtained with Correlator | m <sup>3</sup> /month | Calculating |
| 16 | Correlator Total Cost   | TL/year               | Calculating |
| 17 | Economic Gain to be Obtained with Correlator                        | TL/year               | Calculating |

### 3. Results

In order to compare the costs and benefits of fixed correlator and ground microphone methods, calculations were made for a network whose values are given below.

Table 5: Network Data used in analysis

| Parameters                             | Unit                  | Value  |
|--|-----------------------|--------|
| Total Network Length                   | km                    | 15     |
| Total Number of Customers              | No.                   | 1000   |
| Total Number of Commercial Subscribers | No.                   | 250    |
| Total Number of Housing Subscribers    | No.                   | 750    |
| Average Night Pressure                 | atm                   | 55     |
| System Inlet Flow                      | m <sup>3</sup> /month | 125000 |
| Amount of Water Accrued                | m <sup>3</sup> /month | 100000 |
| Average Unit Water Cost                | TL/m <sup>3</sup>     | 6.5    |
| Average Unit Water Sales Price         | TL/m <sup>3</sup>     | 8      |
| Annual Breakdown Amount                | No.                   | 200    |

As a result of the analyses, different amounts of water were recovered depending on the method chosen in the ground microphone and correlator studies. Additionally, differences were observed in the application costs of the methods. The benefit to be obtained is calculated in direct proportion to the water sales price.

Table 6: Results of cost benefit analysis

| Method                | Benefit Flow<br>(m <sup>3</sup> /month) | Cost<br>(TL) | Benefit<br>(TL) | + / -<br>(TL) |
|-----------------------|---|--------------|-----------------|---------------|
| ALC Ground Microphone | 3,075                                   | 146,420      | 184,530         | 38,110        |
| ALC Correlator        | 6,430                                   | 270,320      | 385,930         | 115,610       |

According to the results, the method is seen as a factor that seriously affects the benefit to be obtained in ground microphone and correlator studies. The benefits to be obtained from the methods also vary depending on the current characteristics of the region and the different values of the network and operating conditions. Therefore, before developing water loss reduction strategies, the current conditions of the region must be analyzed and appropriate methods must be selected.

## Conclusions

In this study, a standard calculation structure is defined for the benefits and costs of the ground microphone and regional correlator methods used to locate unreported leaks. By using the defined calculation methodology, the benefits and costs for both methods are analyzed and compared in a sample network. The average non-revenue water rate in Turkey is 42%, and the lowest and highest values are 22% and 67%, respectively. These data show that non-revenue water rates in Turkey are very high and urgent measures must be taken to reduce these rates. It can be concluded that the total annual economic loss due to water loss and leakage in our metropolitan cities exceeds 7 billion TL at 2017 prices. This economic loss is undoubtedly; This is a valid reason in itself to combat water loss and leakage. Technological tools are needed for each method in combating water loss. For pressure management, pressure breaking valves to be placed in various parts of the network or new drinking water tanks to be built, and state-of-the-art equipment such as audio listening devices and magnetic listening devices are required to perform active leakage control. Long-term strategies should be put forward by water utilities to prevent losses and keep the system under control. This strategy should be based on the following studies;

- Continuous and active monitoring of the system
- Constantly combating leaks and administrative loss of components
- Implementation of active leak control approach
- Implementation of subscriber, meter management, pressure management, pipe material management, fault management applications

Although the approach based on active leakage control seems costly, it provides a long-term solution in terms of resource efficiency, subscriber satisfaction and network management. Obtained results; It has been concluded that the method to be chosen according to the general characteristics of the networks plays an important role for the most efficient operation.

## Acknowledgments

This research was supported by TUBITAK (Turkish National Science Foundation) under the Project Number 122M577. The authors thank TUBITAK for their support.

## Contribution of Researchers

All authors contributed to the preparation of the article. Abdullah ATEŞ contributed to the writing and editing of the article, Salih YILMAZ contributed to the analysis of the data and evaluation of the results, Mahmut FIRAT contributed to the interpretation of the results and writing the article.

## Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

## References

- [1]. Berardi, L., Laucelli, D., Ugarelli, R., ve Giustolisi, O. (2015). Leakage management: Planning remote real time controlled pressure reduction in Oppegård municipality. *Procedia Engineering*, 119 (1), 72–81.
- [2]. Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., and Weimer, D. (1999). "A review of performance indicators for real losses from water supply systems." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*.
- [3]. Yılmaz, S., Fırat, M., Ateş, A., Özdemir, Ö. (2021). Analysis of Economic Leakage Level and Infrastructure Leakage Index Indicator by Applying Active Leakage Control. *ASCE's Journal of Pipeline Systems - Engineering and Practice*. 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000583.
- [4]. European Commission (2014) LEAKCURE project, focus on reducing urban water leakage. [http://cordis.europa.eu/news/rcn/36134\\_en.html](http://cordis.europa.eu/news/rcn/36134_en.html). Access 3 May 2021
- [5]. Liemberger R, Wyatt A (2019) Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply* 19(3):831– 837. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.
- [6]. Moslehi, I., Jalili Ghazizadeh, M.R., ve Yousefi Khoshghalb, E. (2019). Economic analysis of pressure management in water distribution networks. *Journal of Water and Wastewater*, 31 (2), 100–117.
- [7]. SÜEN. (2020). Türkiye Su Kayıp İstatistikleri.
- [8]. Fırat, M., Yılmaz, S., Ateş, A., Özdemir, Ö. (2021). Determination of Economic Leakage Level with Optimization Algorithm in Water Distribution Systems. *Water Economics and Policy*. 7(3):1-38. 2150014. DOI:10.1142/S2382624X21500144.
- [9]. Haider, H., Al-Salamah, I.S., Ghazaw, Y.M., Abdel-Maguid, R.H., Shafiquzzaman, M., ve Ghumman, A.R. (2019). Framework to establish economic level of leakage for intermittent water supplies in arid environments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145 (2), 1–12.
- [10]. Ahopelto, S. ve Vahala, R. (2020). Cost-Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks. *Water*, 12 (1), 195.
- [11]. Choi, G.W., Geun Jo, H., Park, H., ve Jang, D. (2020). Application of decision making model for leakage reduction to economic project in water distribution systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- [12]. Moslehi, I., Jalili-Ghazizadeh, M. Yousefi-Khoshqalb, E. (2021). 'Developing a Framework for Leakage Target Setting in Water Distribution Networks from an Economic Perspective'. *Structure and Infrastructure Engineering* 17(6): 821–37. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568>.
- [13]. Aboelnga, A., Saidan, M., Al-Weshah, R., Sturm, M., Ribbe, L., Frechen, F-B. (2018). Component analysis for optimal leakage management in Madaba, Jordan. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 1 June 2018; 67 (4): 384–396. doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.180>.
- [14]. Berardi, L., and O. Giustolisi. 2021. 'Calibration of Design Models for Leakage Management of Water Distribution Networks'. *Water Resources Management* 35(8): 2537–51.
- [15]. Ye, G. ve Fenner, R.A. (2011). Kalman Filtering of Hydraulic Measurements for Burst Detection in Water Distribution Systems. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2 (1), 14–22.
- [16]. He, S., Wu, Q.H., ve Saunders, J.R. (2009). Group search optimizer: An optimization algorithm inspired by animal searching behavior. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13 (5), 973–990.
- [17]. AL-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., AL-Nozaily, F., Haidera, M., ve Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling*, 152 (September 2019), 104515.
- [18]. Yılmaz, S., Fırat, M., Ateş, A., Özdemir, Ö. (2022). Analyzing the economic water loss level with a discrete stochastic optimization algorithm by considering budget constraints. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 1 July 2022; 71 (7): 835–848. doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.060>
- [19]. Pearson, D. ve Trow, S.W. (2005). Calculating the Economic Levels of Leakage. *Leakage 2005 Conference Proceedings*, 1–16.



# Fuzzy Logic Methods for Determining the Mechanical Behavior of Masonry Walls

**Başak ZENGİN<sup>1\*</sup>, Pınar USTA<sup>2</sup>, Özge ONAT<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Kahramanmaraş İstiklal University, Construction Technology, Kahramanmaraş/Turkey, ORCID: [0000-0003-3719-9423](https://orcid.org/0000-0003-3719-9423)

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Technology Faculty, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey, ORCID: [0001-9809-3855](https://orcid.org/0001-9809-3855)

<sup>3</sup> Graduate Institute, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey, ORCID: [0000-0002-4336-0212](https://orcid.org/0000-0002-4336-0212)

\* Corresponding Author: [zenginbasak@gmail.com](mailto:zenginbasak@gmail.com)

Received: 20 December 2023; Accepted: 31 December 2023

**Reference/Atf:** B. Zengin, P. Usta, O. Onat. "Fuzzy Logic Methods for Determining the Mechanical Behavior of Masonry Walls", Researcher, vol.3, no.2, pp.86-96, December 2023, doi: 10.55185/researcher.1407488

## Abstract



The mechanical behaviour of the wall, in-situ wall tests and numerical analysis is required along with the material properties. With the support of smart learning techniques, the state of the walls was estimated. This makes it possible to obtain healthy data to support the experiment and modelling. The utilization of mathematical tools like Fuzzy Logic has been demonstrated to be beneficial in resolving intricate engineering issues, without the need to replicate the studied phenomenon, given that the only available information consists of the problem's parameters and desired outcomes. To analyse the wall's behaviour more accurately and quickly, analyses were made using the fuzzy method, one of the smart learning techniques, and compared with the data in the studies in which experimental analysis was applied. The behaviour of the wall, the flexibility and energy capacity were tried to be estimated. In the fuzzy, material parameters and wall load capacities that will affect the properties of the wall are used as inputs. Thirty-five (35) data sets, experiments and modelling data from different studies were taken. Estimation results were compared with empirical results.

**Keywords:** ductility, energy capacity, fuzzy logic, and masonry wall.

## 1. Introduction

Unreinforced masonry structures are known for their insufficient seismic performance, which has been confirmed through numerous investigations of earth-quake disasters. This inadequate behavior is typically attributed to the unsuitable characteristics displayed by the masonry when subjected to tensile stress. In this regard, unreinforced masonry structures can be enhanced by incorporating vertically and horizontally reinforced concrete elements (known as confining elements) to create confined masonry structures. These confined structures offer the advantage of efficiently confining masonry walls and enhancing the structure's ability to withstand deformation. [1-4].

There are many factors that affect the compressive strength of clay brick masonry walls connected by cement mortar. In general, the way masonry responds to compressive loads depends on how the brick and mortar interact. The properties of the materials themselves (bricks and mortar) also change when used in a masonry wall compared to when they are used individually. Additionally, it is important to consider that masonry is a material that has different properties in different directions and is highly influenced by construction processes. The wide variety of metrics available, some of which are quantitative (such as brick compression resistance) and others more qualitative (such as construction processes), make the construction and design of masonry structures more complex.

The deformability of the wall is influenced by the specific properties of the mortar, especially in the joints of the matrix [5-6]. The mechanical properties of the components that compose the walls and joining points were determined through laboratory experiments. Wall models were created. The behavior of the walls was analyzed, and the obtained parameters were utilized in the modeling process for comparisons [7-10]. The fragility of masonry walls is evident when they are exposed to compressive stresses. However, under shear stresses, they can exhibit ductile behavior to some extent. Research on the load-displacement behavior of masonry walls under axial load has shown that the compressive

strength of the masonry can be estimated using the single-axis compressive strength of the masonry unit, while also considering the compressive strength of the mortar. Further analysis of the district split of the walls revealed that the power level of the wall is low, leading to reduced ductility. To address this issue, the wall distance proportion must be carefully designed, and the use of brittle materials should be evaluated. Therefore, it is important to maintain earthquake reliability and ductility through appropriate construction methods [11]. There is evidence that masonry infill walls affect the stiffness and strength of unfilled frame structures. Building designs have often ignored infill walls because their brittle behaviour is unknown. It is recommended to conduct experimental tests and analytical investigations to understand the behaviour of the frame and composite infill walls [12, 13 and 14]. During damage mechanisms, it is also important to conduct extensive tests to determine what caused the corners of the walls to fail. A lateral load acts on an infill wall as a diagonal structure connecting two corners. Masonry structures exhibit limited ductility under shear stresses and brittleness under compression. According to the results of experiments on overload displacement behaviours under axial load in masonry structures, the uniaxial strength of these structures is only determined by their uniaxial strength and the mortar effect is minimal [15-21]. Based on the concept of an excellent plastic curve, Tomazevic (1999) suggests that the durability effect of walls can be explained by considering both inelastic and elastic achievements. This illustrates a reliance on the equal energy dissipation of actual and theoretical stress-strain curves [22]. In a study conducted by Essa et al. (2014), the researchers evaluated the impact of the performance of high strength reinforced concrete beams on the ductility of the infill walls. To achieve this objective, they prepared different types of materials with varying thicknesses and loaded them with filled and non-filled beams [23]. Several parameters were obtained during this count. It was found that the type of scrape-off influences ductility. As a result, the load-bearing walls' behavior could be determined, and it might be possible to devise techniques for repairing the damage [24]. Modeling techniques are often employed to study the behaviors of walls, as experimental work on the walls is not always feasible. Composite models are commonly used to represent walls in these simulations. However, there are instances where quick judgment is necessary. Recent studies have also incorporated artificial intelligence methods alongside traditional approaches.

Artificial Intelligence (AI) refers to the advanced concept of machines being capable of independently performing tasks by utilizing algorithms/models that enable computers and machines to function intelligently. Consequently, AI has been developed at the intersection of various fields, including computer science, cybernetics, information theory, psychology, linguistics, and neurophysiology [25]. All previous research has demonstrated the effectiveness of AI algorithms using traditional methods related to assessment, decision-making, prediction, and optimization. The current survey focuses on these methods as they are applicable to network issues in civil engineering, which is an interdisciplinary field influenced by various global factors that are hard to simulate using calculations in math, physics, and mechanics. Additionally, the effectiveness of AI in solving engineering problems relies on its capability to learn from data inputs and outputs, guaranteeing that the complex relationships between the data are accurately simulated, even when the interdependencies are uncertain, or the physical phenomena are difficult to interpret [26]. Over the years, artificial neural networks (ANNs) and customized Neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) have been widely used in civil engineering due to their resilience and high precision. These models have proven successful in various applications, including the evaluation of compressive strength and elastic modulus of different concrete types, as well as the analysis of concrete drying shrinkage and durability [27-36]. The purpose of this report is to determine the compressive strength of a masonry structure made of clay bricks and cement mortar using two numerical techniques: Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, rather than relying on pragmatic models. These techniques address a complex problem by analyzing the input and output data of the system, rather than considering the physical phenomena that served as their inspiration [36-39].

There have been only a few studies that have utilized artificial intelligence technology in the analysis of masonry structures. In one study conducted by Plevris and Asteris [40], they employed an artificial neural network (ANN) to forecast the failure of masonry under biaxial four (4) compression. Their ANN model not only successfully predicted the failure pattern of masonry at a specific  $\theta$  (angle between the bed joint and horizontal compressive stress), but also identified the three-dimensional failure surface formed by the failure pattern at any  $\theta$ . Afterwards, Plevris and Asteris [41] proceeded to develop a

dimensionless model for predicting masonry surface failure based on ANN. This model can also be applied to other masonry materials with similar geometry and mechanical properties. However, there have been very few studies conducted on the application of artificial intelligence techniques to predict masonry behavior. Zhang et al. [37] conducted a study where they developed a cellular automata model to determine the cracking patterns of vertically loaded masonry structures. In a separate study, Garzón-Roca et al. [38,39] used both artificial neural network (ANN) and fuzzy logic methods to estimate the compressive strength of brick masonry. Another study by Plevris et al. [40] involved the development of an ANN model to analyze the failure surface of masonry under biaxial compressive stress. They aimed to create ANN and ANFIS models that could predict the compressive strength of masonry prisms made of hollow concrete blocks. To achieve this, they compiled and evaluated 102 sets of experimental data from their own experiments and from previously published technical literature. The proposed models were then compared to various empirical techniques to assess their reliability and accuracy [42-45].

The results of this study, which used Fuzzy Logic methods, were subsequently compared with various empirical suggestions to demonstrate their accuracy.

## 2. Material and Method

### 2.1. Material

Factory bricks, hollow bricks, clay bricks, pumice, cement mortar, and lime mortar were commonly employed in the research. The mechanical properties of the materials were determined by assessing their compressive strength and bending strength. (Fig 1).



Fig.1 Masonry unit

The table with the data obtained from the studies is presented (Table1) [46-48].

Table 1. Mechanical strengths of materials

| Code | Flexure Strength |        | Compressive Strength |        |
|------|------------------|--------|----------------------|--------|
|      | Brick            | Mortar | Brick                | Mortar |
| A2   | 0.3              | 2.12   | 6.38                 | 12.5   |
| A3   | 0.3              | 2.12   | 6.38                 | 12.5   |
| A4   | 0.3              | 2.59   | 6.38                 | 4.59   |
| A5   | 0.3              | 2.59   | 6.38                 | 4.59   |
| A7   | 0.4              | 2.12   | 6.11                 | 12.5   |
| A8   | 0.4              | 2.12   | 6.11                 | 12.5   |
| A9   | 0.4              | 2.12   | 6.11                 | 12.5   |
| A11  | 0.4              | 2.59   | 6.11                 | 4.59   |
| A12  | 0.4              | 2.59   | 6.11                 | 4.59   |
| A13  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   |
| A14  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   |
| A15  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   |
| A17  | 0.8              | 2.59   | 6.05                 | 4.59   |
| A19  | 0.5              | 2.12   | 2.63                 | 12.5   |
| A20  | 0.5              | 2.12   | 2.63                 | 12.5   |
| A22  | 0.5              | 2.59   | 2.63                 | 4.59   |
| A23  | 0.5              | 2.59   | 2.63                 | 4.59   |
| A24  | 0.5              | 2.59   | 2.63                 | 4.59   |
| B1   | 3                | 3      | 10.3                 | 7.2    |
| B2   | 4                | 4      | 8.8                  | 7.1    |
| B3   | 3.4              | 3.4    | 7.5                  | 6      |

|           |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|
| <b>B4</b> | 3.3  | 3.3  | 7.8  | 5.7  |
| <b>B5</b> | 4    | 4    | 8.5  | 7.3  |
| <b>B6</b> | 3.3  | 3.3  | 7.9  | 5.2  |
| <b>C1</b> | 1.32 | 1.32 | 2.37 | 2.37 |
| <b>C2</b> | 1.32 | 1.32 | 2.37 | 2.37 |
| <b>D2</b> | 2    | 2    | 10.5 | 10.5 |
| <b>D3</b> | 2    | 2    | 11.5 | 11.5 |

Sample models of the walls were established in the studies, and experiments were conducted (Figure 2-3). To analyze and compare the conditions of these test walls, simulations were conducted. It was determined that the results of the experiment and the fuzzy logic were compared, and these results showed similarity.

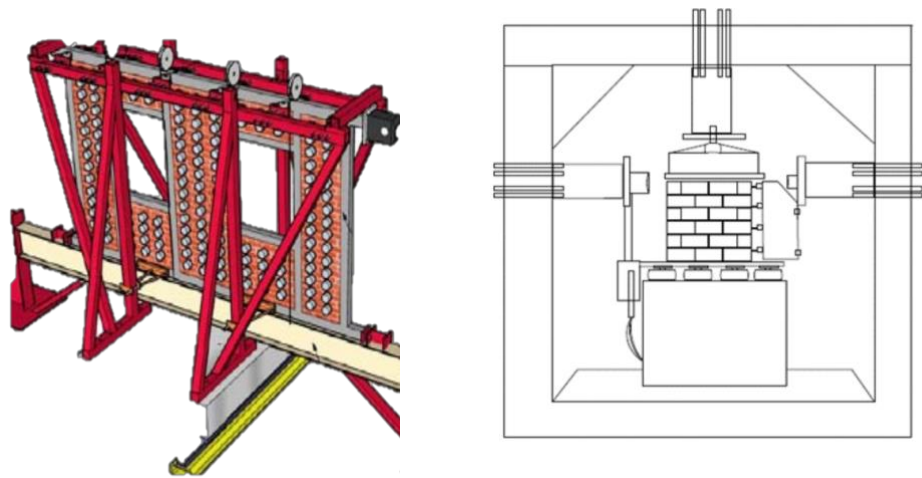


Fig.2 Experimental of Walls Set

It was discovered that the mechanical properties of the materials used in wall production have an impact on the ductility and energy capacity of the walls. As a result, the data obtained from these studies were utilized in this study.

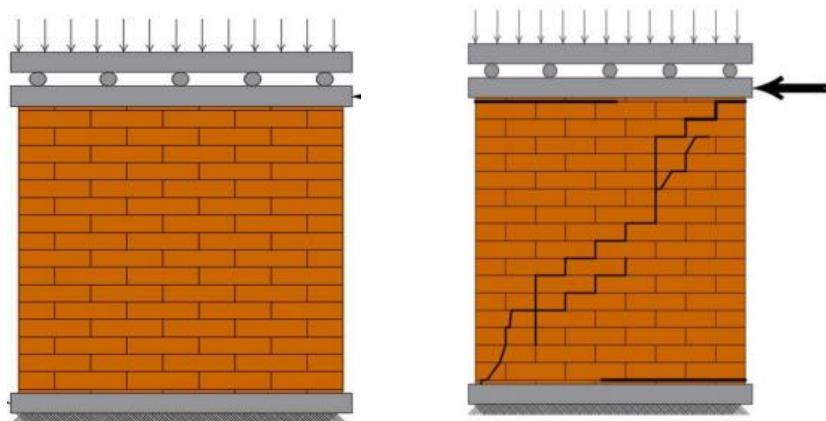


Fig 3. Before-After Experimental System



The data obtained depending on the experiment data of the walls are given in the table. Thirty- five (35) sample wall works were selected. These walls are coded as follows (Table 2)

Table 2. Walls of Experimental Results

| Code | Horizontal Load | $\Delta u$ | $\Delta y$ | Ductility | Energy Capacity |
|------|-----------------|------------|------------|-----------|-----------------|
| A1   | 92.53           | 34.12      | 28.15      | 1.21      | 2325.41         |
| A2   | 107.16          | 29.81      | 22.85      | 1.30      | 1722.03         |
| A3   | 95.44           | 32.67      | 17.7       | 1.85      | 1824.57         |
| A4   | 42.02           | 35.96      | 23.61      | 1.52      | 786.72          |
| A5   | 49.07           | 24.99      | 12.08      | 2.07      | 703.11          |
| A6   | 42.96           | 52.27      | 30.7       | 1.70      | 1263.54         |
| A7   | 43.39           | 31.08      | 23.73      | 1.31      | 756.31          |
| A8   | 52.51           | 22.18      | 17.85      | 1.24      | 565.14          |
| A9   | 44.47           | 21.87      | 14.73      | 1.49      | 527.72          |
| A10  | 26.21           | 18.77      | 16.37      | 1.15      | 306.2           |
| A11  | 40.57           | 13.41      | 11.88      | 1.29      | 244.89          |
| A12  | 34.41           | 34.43      | 17.18      | 2.00      | 500.43          |
| A13  | 18.93           | 22.65      | 17.8       | 1.27      | 295.81          |
| A14  | 51.27           | 30.56      | 9.89       | 3.09      | 1169.9          |
| A15  | 35.77           | 24.51      | 15.2       | 1.61      | 553.26          |
| A16  | 12.08           | 21.93      | 10.56      | 2.08      | 186.83          |
| A17  | 14.41           | 25.6       | 9.43       | 2.71      | 270.66          |
| A18  | 12.42           | 23.05      | 8.47       | 2.72      | 206.73          |
| A19  | 46.21           | 36.21      | 22.95      | 1.58      | 1127.48         |
| A20  | 96.06           | 28.15      | 21.47      | 1.31      | 1400.33         |
| A21  | 53.58           | 21.79      | 10.3       | 2.12      | 471.375         |
| A22  | 36.4            | 21.76      | 11.83      | 1.84      | 441.02          |
| A23  | 46.69           | 22.95      | 14.55      | 1.57      | 557.16          |
| A24  | 43.92           | 12.65      | 6.78       | 1.86      | 334.93          |
| B1   | 84.2            | 8          | 1.8        | 4.44      | 597.82          |
| B2   | 95.2            | 7.4        | 1.6        | 4.63      | 628.32          |
| B3   | 52.4            | 21.7       | 2.2        | 9.86      | 1079.44         |
| B4   | 75.3            | 14.3       | 1.5        | 9.53      | 1020.31         |
| B5   | 63.8            | 15.3       | 1.6        | 9.56      | 925.1           |
| B6   | 94.1            | 20.9       | 4.6        | 4.54      | 1750.26         |
| C1   | 35.3            | 12         | 2.5        | 4.80      | 379.47          |
| C2   | 63.4            | 11.9       | 1.2        | 9.92      | 716.42          |
| D1   | 40              | 4          | 0.8        | 5.00      | 144             |
| D2   | 42              | 3.7        | 0.8        | 4.63      | 138.6           |
| D3   | 70              | 3.9        | 0.6        | 6.50      | 252             |

## 2.2. Method

Sufficient data has been collected at the start of fuzzy Logic modeling to define the parameters of the models (Table 3-4). This data is obtained from the experiments being conducted and from previous studies.

Table 3 Training Data Test

|     | Flexure Strength | Flexure Strength | Compressive Strength | Compressive Strength | Ductility | Energy Capacity |
|-----|------------------|------------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------------|
|     | Brick            | Mortar           | Brick                | Mortar               | Wall      | Wall            |
| A2  | 0.3              | 2.12             | 6.38                 | 12.5                 | 1.30      | 1722.03         |
| A7  | 0.4              | 2.12             | 6.11                 | 12.5                 | 1.31      | 756.31          |
| A11 | 0.4              | 2.59             | 6.11                 | 4.59                 | 1.29      | 244.89          |
| A17 | 0.8              | 2.59             | 6.05                 | 4.59                 | 2.71      | 270.66          |
| A19 | 0.5              | 2.12             | 2.63                 | 12.5                 | 1.58      | 1127.48         |
| A22 | 0.5              | 2.59             | 2.63                 | 4.59                 | 1.84      | 441.02          |
| D2  | 2                | 2                | 10.5                 | 10.5                 | 4.63      | 138.6           |

Table 4 Testing Data Set

| Code | Flexure Strength |        | Compressive Strength |        | Ductility | Energy Capacity |
|------|------------------|--------|----------------------|--------|-----------|-----------------|
|      | Brick            | Mortar | Brick                | Mortar | Wall      | Wall            |
| A1   | 0.3              | 2.12   | 6.38                 | 12.5   | 1.21      | 2325.41         |
| A3   | 0.3              | 2.12   | 6.38                 | 12.5   | 1.85      | 1824.57         |
| A4   | 0.3              | 2.59   | 6.38                 | 4.59   | 1.52      | 786.72          |
| A5   | 0.3              | 2.59   | 6.38                 | 4.59   | 2.07      | 703.11          |
| A6   | 0.3              | 2.59   | 6.38                 | 4.59   | 1.70      | 1263.54         |
| A8   | 0.4              | 2.12   | 6.11                 | 12.5   | 1.24      | 565.14          |
| A9   | 0.4              | 2.12   | 6.11                 | 12.5   | 1.49      | 527.72          |
| A10  | 0.4              | 2.59   | 6.11                 | 4.59   | 1.15      | 306.20          |
| A12  | 0.4              | 2.59   | 6.11                 | 4.59   | 2.00      | 500.43          |
| A13  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   | 1.27      | 295.81          |
| A14  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   | 3.09      | 1169.90         |
| A15  | 0.8              | 2.12   | 6.05                 | 12.5   | 1.61      | 553.26          |
| A16  | 0.8              | 2.59   | 6.05                 | 4.59   | 2.08      | 186.83          |
| A18  | 0.8              | 2.59   | 6.05                 | 4.59   | 2.72      | 206.73          |
| A20  | 0.5              | 2.12   | 2.63                 | 12.5   | 1.31      | 1400.33         |
| A21  | 0.5              | 2.12   | 2.63                 | 12.5   | 2.12      | 471.38          |
| A23  | 0.5              | 2.59   | 2.63                 | 4.59   | 1.57      | 557.16          |
| A24  | 0.5              | 2.59   | 2.63                 | 4.59   | 1.86      | 334.93          |
| B1   | 3                | 3      | 10.3                 | 7.2    | 4.44      | 597.82          |
| B2   | 4                | 4      | 8.8                  | 7.1    | 4.63      | 628.32          |
| B3   | 3.4              | 3.4    | 7.5                  | 6      | 9.86      | 1079.44         |
| B4   | 3.3              | 3.3    | 7.8                  | 5.7    | 9.53      | 1020.32         |
| B5   | 4                | 4      | 8.5                  | 7.3    | 9.56      | 925.10          |
| B6   | 3.3              | 3.3    | 7.9                  | 5.2    | 4.54      | 1750.26         |
| C1   | 1.32             | 1.32   | 2.37                 | 2.37   | 4.80      | 379.48          |
| C2   | 1.32             | 1.32   | 2.37                 | 2.37   | 9.92      | 716.42          |
| D1   | 2                | 2      | 10.5                 | 10.5   | 5.00      | 144.00          |
| D3   | 2                | 2      | 11.5                 | 11.5   | 6.50      | 252.00          |

**2.2.1. Fuzzy Logic** The fuzzy Logic theory, proposed by Zadeh [50], is a mathematical application that enables its use in uncertain environments. Unlike classic logic, which categorizes items as either belonging (1) or not belonging (0) to a set, fuzzy Logic considers a blurred pattern as a set that does not have a clearly defined limit [51]. This set may only contain basic information with a partial membership rating (a number between 0 and 1). In 1985, Sugano [52] conducted a study on a fuzzy deduction technique, which showed that the out-come of the if-then rules can be linear or constant. A fundamental rule in Sugano's fuzzy model takes the form: "If input 1 = x and input 2 = y, then output is z = ax + by + c." For each rule, the resulting output  $z_i$  is weighted by the firing strength  $w_i$  of the rule [50]. Therefore, the final output (ofinal) of the technique is the average of all control outputs, which are balanced and estimated as shown in figure 4.

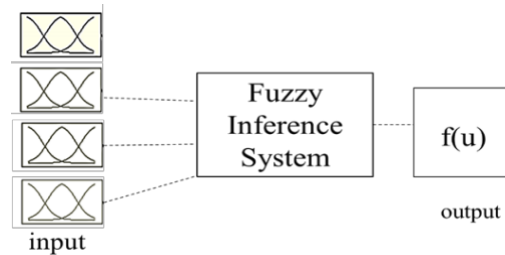


Fig. 4 Back propagation training fuzzy logic.

### 2.2.2. Fuzzy Logic and Set Data

In order to increase the size of the training-testing database, 35 test data sets were compiled from published information, specifically representing the test results for 35 prisms (as shown in Table 3-4). For the implementation of Fuzzy Logic, the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox [51] was utilized to create a fuzzy deduction system. This system can be employed to determine the ductility and energy capacity of a masonry structure ( $f$ ), provided that the compressive strengths of its bricks and mortar, as well as its flexure strength, are already known. This toolbox includes a membership function, the if-then rules,

and the weight  $w_i$ . These elements define the fuzzy inference system and establish the connections between a set of inputs and the output. In this section, a hierarchical evaluation was first established, which divided the factors that influence the health of the masonry structure into four layers. Based on the hierarchical model, the judgment matrix of each level was determined using expert experience and the characteristics of masonry structures. The weight coefficient vectors were then calculated based on the judgment matrix. The process of fuzzy logic is depicted in figure 5.

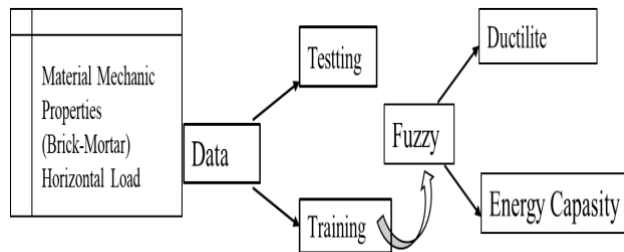


Fig. 5 Fuzzy Logic process

The evaluation matrix was determined using the grey method. Consequently, the comprehensive rating vector for each layer factor was calculated using fuzzy linear transformation, which involves the weight coefficients vector and the evaluation matrix. Figure 6 depicts the study upload system.



Fig. 6 Fuzzy Logic Study System and Upload Data

### 3. Finding and Results

After allocating 7 out of 35 data for training, the data underwent training. The preceding section provides a detailed explanation of how the model operates. A comparison was made between the data obtained from the fuzzy model and the actual data. The graphs generated using the acquired data demonstrate that an accurate prediction was made using fuzzy logic. The objective of the research was to obtain information regarding the ductility and energy capacities of the walls. By adding the horizontal loading, according to the material strengths, the displacement of the wall at the point where it first started to flow and the final displacement under loading were also estimated to support the study. In Figure 6 and 7 the

study was observed to be demonstrable. Looking at the  $R^2$  coefficients, which was obtained as 0.93-0.95 (figure 6-7).

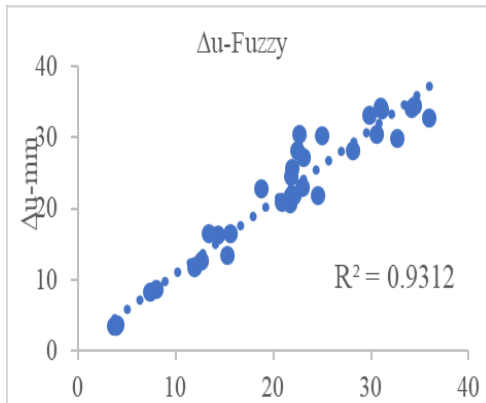


Fig 6. Du- Fuzzy Logic Dat

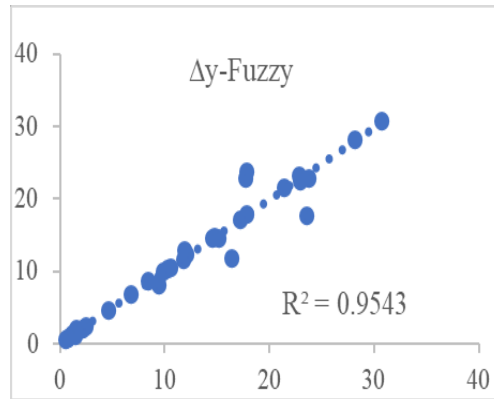


Fig. 7 Dy-Fuzzy Logic Data

The ductility and energy capacity of the wall are important for interpreting its behavior. The main objective of the study was to analyses the conditions of the walls using intelligent techniques. The figure 8 and 9 values and have obtained in show that the study is supported by fuzzy logic.  $R^2$  values were obtained as 0.99 to 0.97.

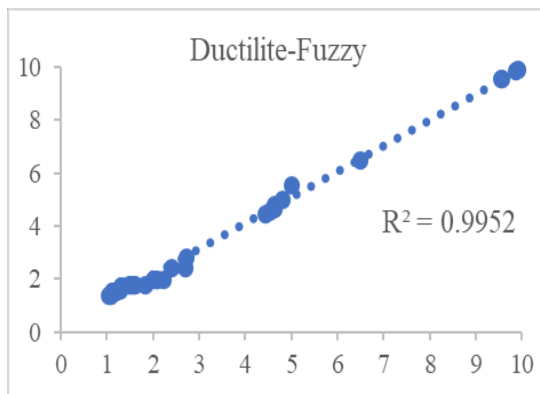


Fig. 8 Ductility- Fuzzy Logic Data

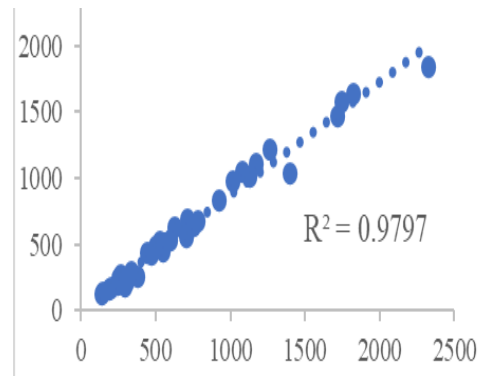


Fig 9 Energy Capacity- Fuzzy Logic

Experiment and model values were modeled by fuzzy logic. What's more, the results are charted to be healthy. To compare the Values, here, they are compared with the RSM technique. The results from the RSM are given in the table of 5. In both estimation methods, results close to the real values were obtained. When the R coefficients are compared according to the obtained data, it has been determined that the values are very close. R values were obtained above 0.9

Table 5. Experimental, RSM and Fuzzy Logic Compared

| Run no. <sup>a</sup> | Independent variables |        |                  |        | Dependent variables |      |       |                 |        |        |
|----------------------|-----------------------|--------|------------------|--------|---------------------|------|-------|-----------------|--------|--------|
|                      | Compressive Strenght  |        | Flexure Strenght |        | Ductilite           |      |       | Energy Capacity |        |        |
|                      | Brick                 | Mortar | Brick            | Mortar | Experimental        | RSM  | Fuzzy | Experimental    | RSM    | Fuzzy  |
| 1                    | 0.3                   | 2.12   | 6.38             | 12.5   | 1.21                | 1.50 | 1.53  | 1550            | 1520.8 | 1463.0 |
| 2                    | 0.3                   | 2.12   | 6.38             | 12.5   | 1.30                | 1.50 | 1.71  | 1722.03         | 1520.8 | 1577.0 |
| 3                    | 0.3                   | 2.12   | 6.38             | 12.5   | 1.85                | 1.50 | 1.76  | 1824.5          | 1520.8 | 1642   |
| 4                    | 0.3                   | 2.59   | 6.38             | 4.59   | 1.52                | 1.76 | 1.76  | 786.72          | 940.59 | 679    |
| 5                    | 0.3                   | 2.59   | 6.38             | 4.59   | 2.07                | 1.76 | 1.99  | 703.11          | 940.5  | 562    |
| 6                    | 0.3                   | 2.59   | 6.38             | 4.59   | 1.70                | 1.76 | 1.76  | 1263.54         | 940.5  | 1220   |
| 7                    | 0.4                   | 2.12   | 6.11             | 12.5   | 1.31                | 1.20 | 1.71  | 756.31          | 849.55 | 562.0  |
| 8                    | 0.4                   | 2.12   | 6.11             | 12.5   | 1.24                | 1.20 | 1.57  | 565.14          | 849.5  | 628.0  |
| 9                    | 0.4                   | 2.12   | 6.11             | 12.5   | 1.49                | 1.20 | 1.76  | 527.72          | 849.5  | 538.0  |
| 10                   | 0.4                   | 2.59   | 6.11             | 4.59   | 1.15                | 1.56 | 1.53  | 306.2           | 331.7  | 189.0  |
| 11                   | 0.4                   | 2.59   | 6.11             | 4.59   | 1.29                | 1.56 | 1.57  | 244.8           | 331.7  | 271.0  |
| 12                   | 0.4                   | 2.59   | 6.11             | 4.59   | 2.00                | 1.56 | 1.99  | 500.4           | 331.7  | 224    |

|    |      |      |      |      |       |       |      |        |        |      |
|----|------|------|------|------|-------|-------|------|--------|--------|------|
| 13 | 0.8  | 2.12 | 6.05 | 12.5 | 1.27  | 1.62  | 1.57 | 295.8  | 412.7  | 294  |
| 14 | 0.8  | 2.12 | 6.05 | 12.5 | 2.03  | 1.62  | 1.99 | 569    | 412.7  | 441  |
| 15 | 0.8  | 2.12 | 6.05 | 12.5 | 1.61  | 1.62  | 1.76 | 553.2  | 412.76 | 253  |
| 16 | 0.8  | 2.59 | 6.05 | 4.59 | 2.08  | 2.53  | 1.99 | 186.8  | 231.1  | 172  |
| 17 | 0.8  | 2.59 | 6.05 | 4.59 | 2.71  | 2.53  | 2.4  | 270.6  | 231.1  | 247  |
| 18 | 0.8  | 2.59 | 6.05 | 4.59 | 2.72  | 2.53  | 2.8  | 206.7  | 231.1  | 201  |
| 19 | 0.5  | 2.12 | 2.63 | 12.5 | 1.58  | 1.65  | 1.76 | 1127.4 | 1166.3 | 1012 |
| 20 | 0.5  | 2.12 | 2.63 | 12.5 | 1.31  | 1.65  | 1.71 | 1400.3 | 1166.3 | 1115 |
| 21 | 0.5  | 2.12 | 2.63 | 12.5 | 2.12  | 1.65  | 1.99 | 997    | 1166.3 | 1047 |
| 22 | 0.5  | 2.59 | 2.63 | 4.59 | 1.84  | 1.81  | 1.76 | 441.02 | 439.3  | 487  |
| 23 | 0.5  | 2.59 | 2.63 | 4.59 | 1.57  | 1.81  | 1.76 | 557.16 | 439.3  | 517  |
| 24 | 0.5  | 2.59 | 2.63 | 4.59 | 1.86  | 1.81  | 1.76 | 334.9  | 439.38 | 426  |
| 25 | 3    | 3    | 10.3 | 7.2  | 4.75  | 4.78  | 5    | 597    | 597.78 | 602  |
| 26 | 4    | 4    | 8.8  | 7.1  | 4.63  | 4.70  | 4.63 | 2112   | 2207.6 | 1839 |
| 27 | 3.4  | 3.4  | 7.5  | 6    | 10.65 | 10.71 | 9.91 | 1079.4 | 1212.8 | 1220 |
| 28 | 3.3  | 3.3  | 7.8  | 5.7  | 7.89  | 7.92  | 7.94 | 1020.3 | 999.53 | 833  |
| 29 | 4    | 4    | 8.5  | 7.3  | 9.56  | 9.70  | 9.56 | 264    | 156.30 | 162  |
| 30 | 3.3  | 3.3  | 7.9  | 5.2  | 5.28  | 5.39  | 5.55 | 1347   | 1273.0 | 1042 |
| 31 | 1.32 | 1.32 | 2.37 | 2.37 | 7.36  | 7.37  | 7.34 | 379.4  | 551.09 | 448  |
| 32 | 1.32 | 1.32 | 2.37 | 2.37 | 7.36  | 7.37  | 7.34 | 716.4  | 551.09 | 512  |
| 33 | 2    | 2    | 10.5 | 10.5 | 5.00  | 4.79  | 5.55 | 144    | 124.02 | 140  |
| 34 | 2    | 2    | 10.5 | 10.5 | 4.63  | 4.79  | 4.81 | 138.6  | 124.02 | 125  |
| 35 | 2    | 2    | 11.5 | 11.5 | 6.50  | 6.44  | 6.5  | 1038   | 1084.2 | 980  |

#### 4. Conclusions

In this study, the researchers utilized the numerical procedure of fuzzy logic to determine the compressive strength and tension of masonry prisms. They gathered a reliable database of published experimental results, from which they randomly selected 35 samples for instructional purposes.

The remaining 28 samples were then used to test the suggested modeling. The research resulted in the subsequent outcome, which shows that the Fuzzy Logic modeling trained by the algorithm in the hidden layer performs well in predicting commodities. The projected significance is important in relation to experimental consequences for both the training and testing sets in the formulated models.

The Fuzzy Logic model, which utilized bell-shaped participation functions, displayed a high level of accuracy. Additionally, the performance indices indicated that the Fuzzy Logic model slightly outperformed the RSM model. The comparison revealed that, on average, the empirical methods underestimated ductility and energy capacity by around 10.

On the other hand, the predicted results obtained from the models developed in this study closely align with experimental values. Generally, the proposed Fuzzy Logic models exhibit great applicability and reliability in predicting the ductility and energy capacity of various masonry prisms.

The estimation of ductility's energy has been found to be more accurate compared to its capacity. According to the study, selecting material properties allows for estimating the mechanical behaviors of the wall.

In subsequent research, various mechanical strengths can be examined, or empirical formulas can be created to describe the behaviors of the wall. Experimental data is open to further increases and experimentation with various methods in smart learning techniques.

#### Contribution of Researchers

All researchers have contributed equally to writing this paper.

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- [1] A. Furtado, T. Ramos, H. Rodrigues, A. Arêde, H. Varum, and P. Tavares, "In-plane Response of masonry infill walls: experimental study using digital image correlation", *Procedia Engineering*, 114, 870–876, 2015.
- [2] D. Gautam, and H. Chaulagain, "Structural performance and associated lessons to be learned from world earthquakes in Nepal after 25 April 2015 (MW 7.8) Gorkha earthquake", *Engineering Failure Analysis*, 68, 222–243, 2016.
- [3] P.Usta, N. Morova, Evci, A., and Ergün, S. "Assessment of seismic damage on the exist buildings using Fuzzy Logic", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 300(1), 012062, 2018.
- [4] D. Parisi, A., Calabrese, and G. Serino, "Seismic performance of a Low-Cost base isolation system for unreinforced brick masonry buildings in developing countries", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106501, 2021.
- [5] B. Zengin, B., Toydemir, S., Ulukaya, D., Oktay N. Yüzer and A. Kocak, "Determination of mechanical properties of blend bricks used in historical structures", 3<sup>rd</sup> International Conference on Protection of Historical Constructions, Portugal, 2017.
- [6] G. Vasconcelos and P.B. Lourenço, "Experimental characterization of stone masonry in shear and compression", *Construct Build Material*; 23(11):3337–45, 2009.
- [7] V. Sarhosis and Y. Sheng , "Identification of material parameters for low-bond-strength masonry. *Engineering Structures*", 60,100–11,2014.
- [8] H.R. Eslami Ronagh S.S. Mahini and R. Morshed, "Experimental investigation and nonlinear analysis of historical masonry buildings – A case study", *Construction and Building Materials*, 35, 251–260, 2012.
- [9] S. Aktan and B. Doran., "Constitutive modeling of masonry walls under in-plane loadings. *Sigma J-Eng & Nat Sci* 7 (2), 165-171, 2016.
- [10] B. Doran, H. O. Köksal, S. Aktan, S. Ulukaya, D. Oktay and N. Yüzer, "In-Plane shear behavior of traditional masonry walls. *International Journal of Architectural Heritage Conservation*", Analysis, and Restoration ISSN: 1558-1558-3066, 2016.
- [11] M., Tomazevic, M. Lutman, and V. Bosiljkov , "Robustness of hollow clay masonry units and seismic behavior of masonry walls", *Construction and Building Materials*, 20 (10): 1028-1039, 2009.
- [12] O.Onat, P.B. Lourenco and A. Koçak, "Nonlinear analysis of RC structure with massive infill wall exposed to shake table",*Earthquakes and Structures*, 10, 811-828, 2016.
- [13] A. Koçak and M.K. Yildirim, "Effects of infill wall ratio on the period of reinforced concrete framed buildings. *Advances in Structural Engineering*, 14, 731-743, 2011.
- [14] F.J. Crisafulli, A.J. Carr, and R. Park, "Analytical modeling of infilled frames structures, A general review. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33, (1), 30-47, 2000.
- [15] A. Koçak and M.K. Yildirim Effects of infill wall ratio on the period of reinforced concrete framed buildings", *Advances in Structural Engineering*, 14, 731-743,2011.
- [16] F.J., Crisafulli, A.J. Carr, and R. Park, "Analytical modeling of infilled frames structures, A general review", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33, (1). 30-47, 2000.
- [17] P.G., Asteris, I.P. Giannopoulos, and C.Z. Chrysostomou, "Modeling of infilled frames with openings", *Open Construction and Building Technology Journal*, 6, 81-91, 2012.
- [18] P.G. Asteris and D.M. Cotsovos, "Numerical investigation of the effect of infill walls on the structural response of RC frames", *Open Construction and Building Technology Journal*, Bentham Science Publishers, 6, 164-181, 2012.
- [19] P.G., Asteris, S.T., Antoniou, D.S. Sophianopoulos, and C.Z. Chrysostomou, , "Mathematical macro-modeling of infilled frames: State of the art", *Journal of Structural Engineering*, 137 (12), 1508-1517, 2011.
- [20] C.Z. Chrysostomou, and P.G. Asteris, "On-the in-plane properties and capacities of infilled frames", *Engineering Structures*, 41, 385-402, 2012.
- [21] P.G., Asteris, C.Z., Chrysostomou, Giannopoulos., and E. Smyrou, "Document masonry infilled reinforced concrete frames with openings", In: III ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering, Corfu, Greece, 2011.
- [22] M. Tomaževič, "Earthquake -Resistant design of masonry buildings, series on innovation in structures and construction", Vol 1, Imperial College Press, London, 1999.
- [23] A. Sayed, A. Essa T., M. R. K Badr and A., H. El-Zanaty, "Effect of infill wall on the ductility and behavior of high-strength reinforced concrete frames", *CHBRC Journal*, 10, 258–264, 2014.
- [24] R.M., Bennett, K.A. Boyd, and R.D. Flanagan, "Compressive properties of structural clay tile prisms", *Journal of Structural Engineering*, 123(7): 920-926, 1997.
- [25] P, Lu, S, Chen and Y., Zheng, "Artificial intelligence in civil engineering", *Math Probl Eng* 2012.
- [26] MA. Shahin "State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations", *Geosci Front*;7(1):33–44. 2016.
- [27] G. Tayfur, T.K. Erdem and Ö. Kirca , "Strength prediction of high-strength concrete by fuzzy logic and artificial neural networks", *J. Mater. Civil. Eng.* 26 (11) 04014079, 2014.
- [28] Madandoust, R. J.H. Bungey, R. Ghavidel, , "Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models. *Comput. Mater. Sci.* 51 (1) 261–272, 2012.
- [29] A.C. Aydin, A. Tortum, M. Yavuz, , "Prediction of concrete elastic modulus using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 23 (4) 295–309, 2006.
- [30] Z.H. Duan, S.C. Kou, C.S. Poon, , "Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete", *Constr. Build. Mater.* 44 524–532, 2013.
- [31] Ahmadi-Nedushan, B. , "Prediction of elastic modulus of normal and high-strength concrete using ANFIS and optimal nonlinear regression models", *Constr. Build. Mater.* 36 665–673, 2012

- [32] Yuan, Z. Wang, L.N. and Ji, X. , “Prediction of concrete compressive strength: Research on hybrid models genetic based algorithms and ANFIS”, *Adv. Eng. Softw.*, 67 156–163, 2014.
- [33] Z.H. Duan, S.C. Kou, and C.S. Poon, , “Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks”, *Constr. Build. Mater.*, 40 1200–1206, 2013.
- [34] A. Öztas, M. Pala, E. Özbay, E. Kanca, N. Çağ-lar, and M.A. Bhatti, , “Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network”, *Constr. Build. Mater.*, 20 (9) 769–775, 2006.
- [35] L. Bal, F. Buyle-Bodin, , “Artificial neural network for predicting drying shrinkage of concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 38 248–254, 2013.
- [36] R. Parichatprecha and P. Nimityongskul, , “Analysis of durability of high-performance concrete using artificial neural networks”, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2) 910–917, 2009.
- [37] Y. Zhang, Zhou, G. Xiong, Y. and M. Rafiq, , “Techniques for predicting cracking pattern of masonry wallet using artificial neural networks and cellular automata”, *J. Comput. Civ. Eng.*, 24 (2) 161–172, 2010.
- [38] J. Garzón-Roca, C.O. Marco and Adam, J.M. , “Compressive strength of masonry made of clay bricks and cement mortar: Estimation based on neural networks and fuzzy logic”, *Eng. Struct.* 48 21–27, 2013.
- [39] J. Garzón-Roca, J.M. Adam, C. Sandoval, and P. Roca, , “Estimation of the axial behaviour of masonry walls based on Artificial Neural Networks”, *Comput. Struct.* 125 145–152, 2013.
- [40] V. Plevris, and P.G. Asteris, , “Modeling of masonry failure surface under biaxial compressive stress using neural networks”, *Constr. Build. Mater.* 55 447–461, 2014.
- [41] P G Asteris and V. Plevris, “Anisotropic masonry failure criterion using artificial neural networks”, *Neural Comput Appl*; 28:2207–2229, 2016.
- [42] Masonry Standards Joint Committee (MSJC) of the Masonry Society. Building code requirements and specification for masonry structures: containing building code requirements for masonry structures (TMS 402–11/ACI 530–11/ASCE 5–11), specification for masonry structures (TMS 602–11/ACI 530.1- 11/ASCE 6–11), and companion commentaries. Reston (VA): American Society of Civil Engineers, p. 236. 2011.
- [43] Canadian Standards Association (CSA), CSA S304.1-04 (R2010) – Design of Masonry Structures, Canadian Standards Association, Toronto (Ontario), p. 64, 2004.
- [44] British Standards Institution (BSI), BS EN 1996 (Eurocode 6): Design of Masonry Structures, British Standards Institution, p. 128, 2005.
- [45] S.R. Sarhat, and E.G. Sherwood, “The prediction of compressive strength of ungrouped hollow concrete block masonry”, *Constr. Build. Mater.*, 58 111–121, 2014.
- [46] V. Singhal and D. Rai, “Behaviour of Confined Masonry Walls with Openings under In-Plane and Out-of-Plane Loads”, *Earthquake Spectra*, 34, 2, 817–841, 2018.
- [47] T-T. Bui , A. Limam and V. Sarhosis, “Failure analysis of masonry wall panels subjected to in-plane and out-of-plane loading using the discrete element method”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019.
- [48] Abdulla K. F. Cunningham L S, Gillie M., , “Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach”, *Engineering Structures* 151 349–365, 2017.
- [49] B. Zengin, “Investigating elastic-plastic behaviour of masonry walls by experimental and numerical methods”, Department of Civil Engineering, Ph.D. Thesis, Turkey, 2018.
- [50] LA. Zadeh Fuzzy sets. *Inform Control* 1965; 8:338–53, 1965.
- [51] Matlab 7.0. User’s Guide. The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2004.
- [52] T., Takagi, and M. Sugeno “Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems*”, *Man and Cybernetics*. Pp.116-132, 1985.