



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.01.2023
Kabul Tarihi : 30.07.2023

Received Date : 31.01.2023
Accepted Date : 30.07.2023

KİRİŞ VE SAC PLAKA YAPILARDA YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MESNET KONUM OPTİMİZASYONLARI

SUPPORT LOCATION OPTIMIZATIONS IN BEAM AND SHEET PLATE STRUCTURES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Onur ÜNLÜ^{1*} (ORCID: 0000-0001-8154-8104)
Hakan DEMİR¹ (ORCID: 0000-0001-9819-2167)
Necmettin KAYA² (ORCID: 0000-0002-8297-0777)

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D., Bursa, Türkiye
² Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Onur ÜNLÜ, onurunlu@uludag.edu.tr

ÖZET

Kiriş ve sac plaka yapılar otomotiv, havacılık, inşaat ve mimarlık gibi birçok alanda çeşitli amaçlarla kullanılırlar. Yük taşıyan kirişte eğilme ile deformasyon meydana gelir. Kirişlere benzer şekilde sac veya levha şeklindeki yapılarda kendi ağırlıkları ile veya yüzeylerine dik yönde kuvvet taşırken deforme olurlar. Bu tür yapılarda yükün emniyetle taşınmasının yanında, en az deformasyonun oluşması istenir. Bu çalışmada, giriş ve sac parçalarının kesiti, uzunluğu ve yükleme durumu sabit alınarak minimum deformasyonun elde edilmesi için mesnet noktalarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mesnet konumları parametre olarak alınmış ve geliştirilen yazılım ile mesnet noktalarının konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Parametrik sonlu elemanlar modelinden farklı mesnet konumlarına karşılık gelen deformasyon değerleri elde edilmiştir. Python kodu ile yapay sinir ağı ve optimizasyon kodu geliştirilmiş ve deformasyon değerleri verilen mesnet konumlarına göre hesaplanmıştır. Geliştirilen yöntem iki ve üç mesnetli girişler ile sac levha ve kaynakla birleştirilecek iki sac levha örnekleri üzerinde deneyerek optimizasyon sonuçları elde edilmiştir. Her bir giriş ve sac levha probleminde yayılı yük altında minimum deformasyon için mesnetlerin birbirlerine simetrik konumlandırılmaları gerektiği bulunmuştur. Optimum mesnet noktaları; iki mesnetli girişte kenarlardan %21.89, üç mesnetli girişte %13.57, sac levhada %19.13, kaynakla birleştirilecek iki sac levhada ise %14.42 uzaklıkta hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kiriş, optimizasyon, sac plaka, yapay sinir ağları

ABSTRACT

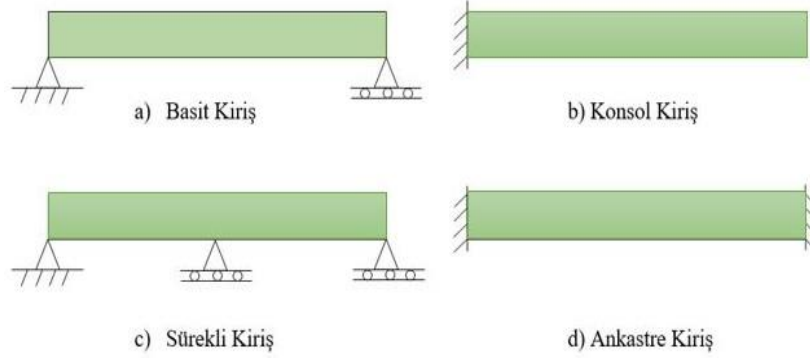
Beam and sheet plate structures are used for various purposes in many fields. Deformation occurs on a load carrying beam by bending. Similar to beams, sheet and plate structures deform with their own weights or by carrying forces perpendicular to their surfaces. In such structures, besides carrying load safely, minimum deformation is desired. In this study, to obtain minimum deformation, cross-section, length and loading conditions of beam and sheet structures were taken constant and support location optimization were performed. Locations of supports were parameterized, and deformation values correspond to different support locations were obtained from parametric finite element model. Artificial neural networks and optimization code were developed in Python and deformation values were predicted by given support locations. Method was used on two and three supported beams, sheet plate and welded two sheet plates examples and optimization results were obtained. It was found that supports should be positioned symmetrically for minimum deformation under distributed load in each beam and sheet plate problem. It was found that optimum support locations should be at a distance of 21.89%, 13.57%, 19.13% and 14.42% from the edges for two supported beam, three supported beam, sheet plate and welded two sheet plates examples respectively.

Keywords: Beam, optimization, sheet plate, artificial neural networks

ToCite: ÜNLÜ, O., DEMİR, H. & KAYA, N., (2023). KİRİŞ VE SAC PLAKA YAPILARDA YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MESNET KONUM OPTİMİZASYONLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 637-652.

GİRİŞ

Kiriş, kesiti uzunluğu yanında çok küçük olan ve eksenine dik doğrultudaki kuvvetleri taşıyan taşıyıcı sistemlere denir. Kiriş yapılar bina, köprü, otomobil ve havacılık endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla tasarımları son derece önemlidir ve emniyetli olacak şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Kiriş yapılar üzerinde uygulanan yükler altında kesme kuvveti ve eğilme momenti meydana gelir. Kirişler geometriye bağlı, denge koşullarına bağlı ve mesnet noktalarına bağlı olmak üzere gruplandırılabilir. Mesnet noktalarına göre kirişler Şekil 1 'de görüldüğü gibi çeşitlendirilebilir.



Şekil 1. Mesnet Noktalarına Göre Kiriş Çeşitleri

Cisimler eksenlerine dik uygulanan kuvvetler ve eğilme momentleri altında eğilme deformasyonuna uğrarlar. Yapıların bütünlüğü ve kararlılığının sağlanması amacıyla deformasyonlar, emniyetli değerler ile sınırlandırılmaktadır. Kirişler ve tasarım ve analiz aşamasında kiriş olarak kabul edilen elemanlarda deformasyonun minimum olması arzulanır. Yüksek deformasyonun yapı üzerinde olumsuz etkileri olabilmektedir. Örneğin bir güç iletim sisteminde dişlileri taşıyan milde deformasyonun yüksek olması istenmez. Eğer mil çok fazla deformasyona uğrarsa dişliler birbirleriyle eşleşemez ve darbe, ses, aşınma ve erken hasar meydana getirmektedir. Yapıdaki deformasyonun azaltılması amacıyla farklı malzeme kullanılması, eleman geometrisi ve tasarımda değişiklikler gerçekleştirilebilir (Darshan vd., 2013). Mesnet yerlerinin farklı pozisyonlarda konumlandırılması, yapı elemanının kuvvet ve moment taşıyan uzunluklarını değiştirerek deformasyon miktarını azaltabilen tasarımsal bir değişikliktir.

Sac ve levha şeklindeki parçalar otomotiv ve havacılık sektörlerinde en sık kullanılan bileşenlerdendir. Sac parçaların boyutsal düzgünlükleri nihai ürün kalitesini doğrudan etkilediğinden oldukça önem arz etmektedir (Li vd., 2006). Sac plakalar, işleme ve montaj aşamalarında oldukça kolay deforme olduklarından fikstürler kullanılarak yüksek deformasyona uğramaları engellenmeye çalışılır. Sac parçaların kaynakla birleştirilmesi bu parçaların montajında en sık rastlanan yöntemlerden birisidir. Yüksek kaliteli bir kaynak bağlantısı elde edilebilmesi için parçaların kaynak edilecek kenarlarındaki deformasyonun mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Bu nedenle mesnet pozisyonları arzulan montaj bağlantısının elde edilmesinde en önemli parametrelerden bir tanesidir (Aderiani vd., 2020). Özellikle sac parçaların kendi ağırlıkları altında en az deformasyon miktarı gösterecek pozisyonda kaynak edilmesi parçaların geometrik doğruluğunu arttıracaktır.

Literatürde parça mesnet mesafelerinin optimizasyonu ile maksimum deformasyonun minimizasyonu konulu çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Selvakumar vd. (2013), talaşlı imalatta bağlama ve kesme kuvvetleri neticesinde iş parçasında meydana gelen deformasyonu minimize edecek optimum fikstür yerleşimini araştırmıştır. İş parçası üzerindeki deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve yapay sinir ağları temelli bir algoritma ile minimize edilmiştir. Jang vd. (2009) kiriş ve sac yapılarda optimum mesnet yerlerinin tespiti için gradyan temelli bir algoritma geliştirmiştir. Li ve Melkote (1999) talaşlı imalatta iş parçasında yerel elastik deformasyonlar nedeniyle meydana gelen konum hatalarını en aza indirmek adına en uygun fikstür düzenini doğrusal olmayan problem çözümü ile hesaplamıştır. Kaya (2006) talaşlı imalatta iş parçası için minimum deformasyonun elde edileceği optimum fikstür konumlarını tespit etmek amacıyla sonlu elemanlar modeli ile entegre genetik algoritmanın kullanıldığı bir yöntem geliştirmiştir. Prabhakaran vd. (2007) talaşlı işleme ile üretilecek iş parçasında optimum fikstür düzenini sonlu elemanlar modeli ile hesaplanan deformasyonlar üzerinde genetik algoritma ve karınca kolonisi algoritmaları ile incelemiştir. Karınca kolonisi algoritmasının daha tutarlı ve daha hızlı sonuç verdiğini belirtmiştir. Yang vd. (2017) sac metal parçalarda fikstür düzenini sonlu elemanlar modeli ile birlikte çalışan guguk kuşu arama algoritması ile incelemiştir. Sonuçlar genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu yöntemleri ile

bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve guguk kuşu arama algoritması ile daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Lu ve Zhao (2015) 4-2-1 yerleşimindeki sac metal parçada ilk üç fikstür, rijit model üzerinde genetik algoritma yardımı ile konumlandırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve yapay sinir ağları ile farklı fikstür düzenlerinde sac parçanın deformasyonları tahmin edilmiş ve genetik algoritma ile yapay sinir ağları optimize edilerek dördüncü fikstür konumu belirlenmiştir. Ahmad vd. (2018) birden fazla noktadan respot kaynakla birleştirilecek sac metal parçalarda minimum deformasyonu veren fikstür konumları sonlu elemanlar modeli ile entegre genetik algoritma ile hesaplanmıştır.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde genellikle talaşlı imalat ile işlenecek parçalar üzerinde fikstür konumlarının optimize edildiği çalışmaların gerçekleştirildiği gözlenmiştir. (Lu ve Zhao, 2015; Prabhakaran vd., 2007; Li ve Melkote, 1999). Yapısal elemanlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar konusunda bir eksiklik bulunmaktadır. Literatürde mesnet konum optimizasyonları için analitik çözümlerin mevcut olmadığı görülmüştür. Deformasyon değerlerinin analitik olarak elde edilmeleri güç olduğundan sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme tercih edilmektedir. Ayrıca deformasyon değerlerini mesnet konumlarına bağlı bir fonksiyon olarak ifade etmek zor olduğundan analitik yöntem ile optimizasyon yerine vekil modellerin kullanıldığı gözlemlenmiştir (Yang vd., 2017; Selvakumar vd., 2013). Çalışmaların çoğunda sonlu elemanlar modeli ile entegre çalışan optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak deney tasarımı yöntemi ile yapılan örneklemeler sonlu elemanlar modeline girdi olarak sağlanmıştır ve sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiştir. Vekil model olarak yapay sinir ağları algoritması kullanılmıştır. Kiriş ve sac yapılarında optimum mesnet noktalarının bulunmasında bir optimizasyon algoritması ile vekil model çıktılarının minimize edilmesi yeni bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Literatüre katkı olarak bu çalışmada kiriş ve sac plaka benzeri yapıların taşıdıkları yükler altında en az deforme olmaları için bir yöntem sunulmuştur. En az deformasyonu ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır ve daha çok ürün hafifletme çalışmalarında tasarım parametreleri olarak ürün boyutları ele alınmaktadır (Alteyeb ve Jolgef, 2017). Bu çalışmada ise mesnet noktalarının konumları optimize edilmek istenen parametreler olarak seçilmiştir. Mesnet noktalarının tasarım parametresi olarak ele alındığı çalışmalar oldukça azdır. (Jang vd., 2009). Bu çalışmanın amacı kiriş ve sac parçalarda minimum deformasyonu elde edilmesi hedefi doğrultusunda optimum mesnet yerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir yeni bir yöntem ortaya koymaktır.

Bu çalışmada örnek olarak iki mesnetli kiriş, üç mesnetli kiriş, sac parça ve kaynakla birleştirilecek iki sac parçada minimum deformasyonun elde edilmesini sağlayan mesnet pozisyonları araştırılmıştır. Kiriş ve sac parçaların kesiti, uzunluğu ve uygulanacak kuvvetler belirlendikten sonra mesnet yerlerinin kenarlara olan uzaklıkları birer optimizasyon parametresi olarak alınıp problemler sonlu elemanlar yöntemi ile statik olarak çözülmüştür. Latin Hiperküp örnekleme metodu ile mesnet uzaklıkları için örnek değerler türetilmiş ve türetilen değerler parametrik sonlu elemanlar modelinde ilgili yerlere atanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında her bir mesnet uzaklığı değerine karşılık gelen maksimum deformasyon değeri hesaplanarak mesnet mesafe ve sehim değerleri tablosu oluşturulmuştur. Mesnet uzaklıkları giriş, deformasyon değerleri ise hedef veri seçilerek yapay sinir ağlarına gönderilmiş ve öğrenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğitilmiş model üzerinde bir optimizasyon algoritması kullanılarak yapay sinir ağları modellerinden elde edilen minimum deformasyon değerleri hesaplanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Mesnet Yerleri için Optimizasyon Problemi Algoritması

Optimizasyon, kısıtlara bağlı kalarak amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerlerini sağlayan tasarım parametrelerinin bulunması işlemidir (Arora, 2017). Yapısal optimizasyon yöntemleri, parça geometrik modeli üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon yöntemleridir. Tanımlanan tasarım uzayında belirlenen kısıtları sağlamak şartı ile amaç fonksiyonu doğrultusunda optimizasyon gerçekleştirilir. Amaç fonksiyonu olarak ağırlık, kompians ve şekil değişimi gibi çıktılarının minimizasyonu veya maksimizasyonu hedeflenir. Topoloji, topografya, şekil ve boyut olmak üzere dört farklı yapısal optimizasyon yöntemi bulunmaktadır.

Standart bir optimizasyon problemi

$$\text{Amaç: } \min/\max f(x) \quad (1)$$

$$\text{Kısıtlar: } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, p \quad (3)$$

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, n, \quad x=(x_1, \dots, x_n) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. (1) x_i tasarım değişkenlerine bağlı amaç fonksiyonunu, (2) ve (3) eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarını, (4) ise tasarım değişkenleri için alt ve üst sınır değerlerini ifade etmektedir. Tanımlanan bu optimizasyon problemi uygun bir çözüm algoritması seçilerek çözülebilir (Arora, 2017).

Tanımlanan optimizasyon problemlerinin çözümlerinin bulunmasında kısıt içeren algoritmalar veya kısıt içermeyen algoritmalar kullanılabilir. Bu çalışmada Python'da yer alan Scipy kütüphanesi içerisinde bulunan SLSQP algoritması kullanılmıştır. Kısıt içeren algoritmalar, SLSQP algoritması doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan gradyan tabanlı bir yöntemdir. Sıralı en küçük kareler programlama anlamına gelmekte olup, farklı değişkenlerden oluşan fonksiyonların minimize edilmesinde, değişken sınır değerleri ile eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını kullanarak çözüme giden bir metottur (Scipy, 2022).

SLSQP algoritması, çözüme x_0 başlangıç parametreleri üzerinden iterasyon ile ulaşmaktadır. x_{k+1} değerinin hesaplanmasında (5) bağıntısını kullanır. Bağıntıda a_k adım büyüklüğünü, d_k ise arama yönünü ifade eder.

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (5)$$

Arama yönünün belirlenmesinde problemin Lagrange fonksiyonunun ikinci dereceden yaklaşımı ile formüle edilen bir ikinci dereceden programlama alt probleminden yararlanılır. (6) bağıntısında λ Lagrange sabiti, g_j ise kısıtları belirtir.

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j \quad (6)$$

İkinci dereceden programlama probleminin standart formu

$$\min = \frac{1}{2} d^t B^k d + \Delta f(x_{(k)}) d \quad (7)$$

$$\Delta_{g_j}(x_{(k)})d + g_j(x_{(k)}) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (8)$$

$$\Delta_{g_j}(x_{(k)})d + g_j(x_{(k)}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$B = \Delta_{xx}^2 L(x, \lambda) \quad (10)$$

(7), (8), (9) ve (10) bağıntıları ile tanımlanmaktadır.

Arama yönü, çoğu doğrusal olmayan fonksiyonlar için lokal optimum nokta yakınlarında adım büyüklüğü $\alpha=1$ için optimaldir. Ancak optimum noktadan uzak x_k değerleri için yakınsamanın garanti olması adına adım büyüklüğünün güncellenmesi gerekir. Bu sebeple (11) ile verilen penaltı fonksiyonu kısıt içeren optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır.

$$\varphi(x, \lambda; \rho) = f(x) - \sum_{j=1}^{m_e} (\lambda_j g_j(x) - \frac{1}{2} \rho_j g_j(x)^2) - \sum_{j=m_e+1}^m \begin{cases} \lambda_j g_j(x) - \frac{1}{2} \rho_j g_j(x)^2, & \text{eğer } g_j(x) \leq \frac{\lambda_j}{\rho_j} \\ \frac{1}{2} \frac{\lambda_j^2}{\rho_j}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (11)$$

Pratik uygulamalarda hesaplama verimliliği açısından B_k matrisini her iterasyonda hesaplamak yerine Hessian matrisini yaklaşık hesaplayan Quasi-Newton yöntemleri kullanılmaktadır. BFGS metodunda B_k (12), (13), (14) ve (15) formülleri ile hesaplanır.

$$B_{k+1} = B_k + \frac{q_k(q_k)^T}{(q_k)^T s_k} - \frac{B_k s_k (s_k)^T B_k}{(s_k)^T B_k s_k} \quad (12)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k = a^k d^k \quad (13)$$

$$q_k = \theta_k \eta_k + (1 - \theta_k) B_k s_k \quad (14)$$

$$\eta_k = \Delta_x L(x_{k+1}, \lambda_k) - \Delta_x L(x_k, \lambda_k) \quad (15)$$

B_{k+1} matrisinin pozitif tanımlı olmasını (16) şarta bağlı hesaplanan θ_k , sağlamaktadır.

$$\theta_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } (s_k)^t \eta_k \geq 0.2 (s_k)^t B_k s_k \\ \frac{0.8(s_k)^t B_k s_k}{(s_k)^t B_k s_k - (s_k)^t \eta_k}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (16)$$

En küçük kareler alt problemlerinin oluşturulması için (17) numaralı bağıntıda verilen kompozit-t yöntemi kullanılmaktadır.

$$B_k = L_k D_k (L_k)^T \quad (17)$$

$L = [l_1, \dots, l_n]$ olmak üzere birim köşegen elemanlı alt üçgen matris ve $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ olmak üzere köşegen matristir. Bu yöntem ile B_k yerine faktörler güncellenmektedir. Elde edilen en küçük kareler alt problemi (18), (19) ve (20) formülleri ile verilmektedir (Kraft, 1998).

$$\min \|D_k^{1/2} L_k^T d + D_k^{-1/2} L_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (18)$$

$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (19)$$

$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m_e \quad (20)$$

Yapay Sinir Ağları ile Modelleme

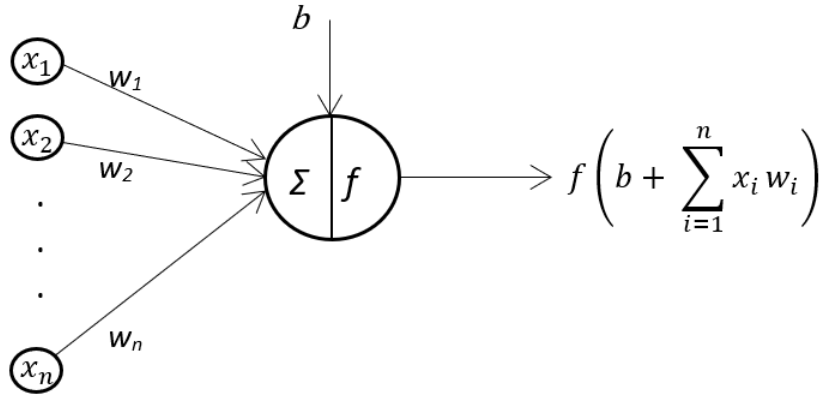
Optimizasyon, kısıtlara bağlı kalarak amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerlerini sağlayan tasarım parametrelerinin bulunması işlemidir (Arora, 2017) Optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları tanımlı için karmaşık problemlerde polinom şeklinde tasarım değişkenlerine bağlı olarak fonksiyon üretmek zor ve bazen imkansızdır (Abbasi ve Mahlooji, 2012). Bu amaçla yanıt yüzeyi yöntemi veya vekil modeller kullanılır. Bu modeller yaklaşık modeller olup bunlara alternatif olarak iyi sonuçlar veren yapay sinir ağları son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Doğrusal olmayan ve hesaplama maliyeti yüksek olan problemlerde yapay sinir ağları başarılı sonuçlar vermektedir (Simpson vd., 2001). Bu nedenle bu çalışmada yapay sinir ağları optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu yerine kullanılmıştır. Böylece her amaç fonksiyonu için sonlu elemanlar modeline ihtiyaç olmayacaktır, bu sayede hızlı çözümler elde edilebilmektedir.

Yapay sinir ağları beyin çalışma prensibi örnek alınarak geliştirilen bir yapay zekâ algoritmasıdır (Arslan, 2019). En sık kullanılan yapay sinir ağı algoritmalarından bir tanesi ileri beslemeli yapay sinir ağlardır. Ağ katmanlardan meydana gelmektedir ve ilk katman giriş katmanı, son katman çıktı katmanı ve aradaki diğer katmanlar ise gizli katmanlar olarak isimlendirilmektedir. Katmanlar nöronlardan oluşmaktadır ve her nöron bağlı olduğu diğer nöronlar ile matematiksel olarak ilişki içerisindedir. Şekil 2’de bir nörondan elde edilen çıktı değerinin kendisinden önce gelen nöronlar ile arasındaki bağlantısı gösterilmektedir. Doğrusal olmayan problemlerin çözülebilmesi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve daha başarılı tahminler yapılabilmesi ve hata toleransı olması yapay sinir ağlarının avantajlarından. Başarılı bir şekilde eğitilen yapay sinir ağları ile giriş ve çıkış verileri üzerine oluşturulan model sayesinde, farklı bir veri için düşük hata oranlarında tahminler yapılabilmektedir (Arslan, 2019). Yapay sinir ağlarında eğitim sonucu türetilen fonksiyon üzerinde optimizasyon algoritmaları kullanılarak, fonksiyonların global minimum değerleri bulunabilmektedir.

Veri setinin eğitim ve test verileri olarak ayrılması yapay sinir ağlarında önemli bir konudur. Verilerin daha büyük bir kısmı eğitim verisi olarak ayrılmaktadır ve öğrenme bu veriler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Test verileri üzerinde ise tahminler gerçekleştirilerek kurulan algoritmanın performansı ölçülmektedir. Yapay sinir ağları ile deney tasarımı örnekleme yöntemlerinden elde edilen bir veri seti üzerinde eğitim gerçekleştirildikten ve modelin doğruluğu kabul edildikten sonra optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapay sinir ağlarında optimizasyon gerçekleştirilebilir. Eğitim işleminden sonra giriş ve çıkış verileri optimizasyon algoritmasına bağlanarak hangi giriş verisine karşılık minimum çıkış değerinin hesaplandığı bulunabilir.

Bu çalışmada yapay sinir ağı modelleri Keras kullanılarak oluşturulmuştur. Keras, Python dilinde yazılmış açık kaynaklı bir kütüphanedir. Basit, esnek ve güçlü bir yapıya sahip olması, hesaplamanın yüksek ölçeklenebilirliği, hem CPU hem de GPU üzerinde çalışabilmesi gibi nitelikleri nedeniyle oldukça popüler olduğundan bu çalışmada

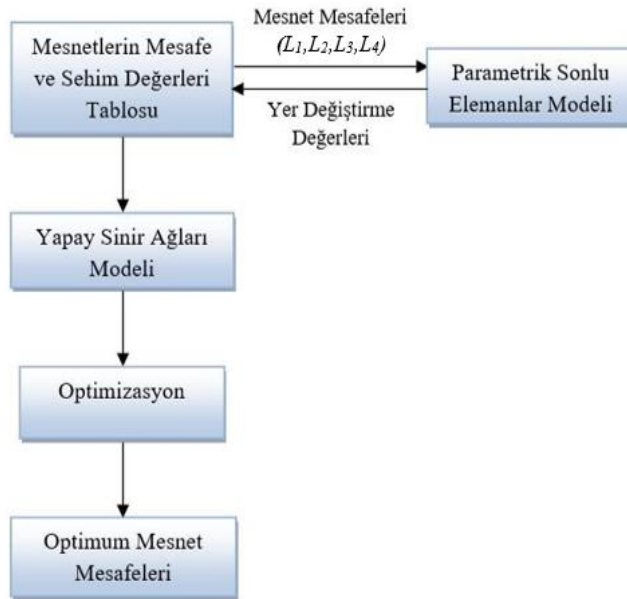
Keras kütüphanesi tercih edilmiştir. Her bir problem için ayrı ayrı çok katmanlı yapay sinir ağları oluşturulmuştur. Her bir problemde çıkış nöronu için aktivasyon fonksiyonu olarak regresyon problemlerinde tercih edilen linear fonksiyonu seçilmiştir. Optimizer olarak ise hesaplama verimliliği, düşük bellek isteri ve yüksek sayıda veri içeren problemlere uygunluğu nedenleriyle adam algoritması seçilmiştir. (Keras, 2022).



Şekil 2. Bir Nöronun Çıktı Elde Edilmesi

Yöntem

İki mesnetli kiriş, üç mesnetli kiriş, sac parça ve kaynakla birleştirilecek sac parça problemleri için dört adet parametrik sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Her bir sonlu elemanlar modelinde tasarım değişkeni mesnet pozisyonları olduğundan mesnet mesafeleri parametrik olarak ayarlanmıştır. Analiz türü statik olarak belirlenmiş, kiriş ve sac parçaların malzemesi yapı çeliği olarak kabul edilmiştir. Her bir problem için mesh yakınsama çalışması gerçekleştirilmiş ve en uygun eleman sayısı bulunarak model hazırlanmıştır.



Şekil 3. Python Kodu Akış Diyagramı

Parametrik mesnet mesafe değerleri, deney tasarımı yöntemlerinden Latin Hiperküp kullanılarak örneklendirilmiştir. Çok sayıda parametre ve yüksek sayıda seviye için uygun olduğundan bu yöntem tercih edilmiştir (Viana, 2015). Her bir problem için 200 adet örnek mesnet mesafe değerleri, geometriye uygun olarak türetilmiştir.

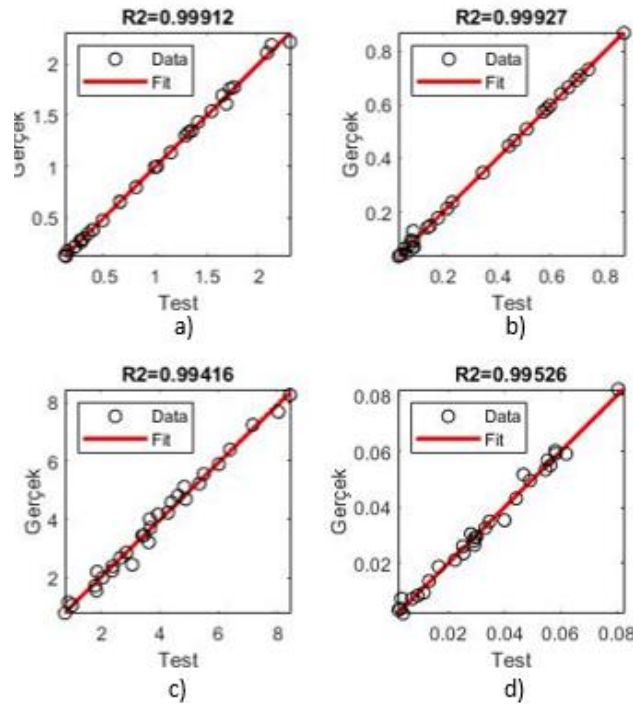
Bu çalışmada mesnet konumlarının optimizasyonu için Python dilinde bir program yazılmıştır. Bu programda, hazırlanan script dosyası ile Ansys yazılımında ilgili probleme ait sonlu elemanlar modelinin açılması, deney tasarımı ile örneklenen mesnet mesafe değerlerinin uygun parametrelere atanması, analizin gerçekleştirilmesi ve analiz sonucunda maksimum deformasyon değerlerinin hesaplanması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Python kodu komut

satırında çalıştırılarak sonlu elemanlar analizleri yığın modda koşurulmuştur. Bu sayede yazılım arayüzüne girilmeden sonlu elemanlar modelinde değişiklikler yapılabilmekte ve analizler çok daha hızlı bir şekilde koşurulabilmektedir. Python kodu iş akış şeması Şekil 3'te görülmektedir. Komut satırında çalıştırılan ilgili kod aşağıdaki gibidir.

```
wb_path = r"C:\...\" #Ansys Workbench yazılımının dizindeki yeri
script = 'script.wbjn'
try:
    os.system('{} -B -R {}'.format(wb_path, script))
except Exception:
    print('ANSYS Workbench Başlatılmadı')
    sys.exit(0)
```

Python kodu ile koşutulan analizler sonrası her bir problem için deney tasarımı ile örneklenen mesnet mesafe değerleri ve karşılık gelen deformasyonlar veri tablosu halinde elde edilmiştir.

Her bir kiriş ve sac parça problemi için ayrı ayrı ileri beslemeli yapay sinir ağı modelleri hazırlanmıştır. Deney tasarımı yöntemi ile türetilen mesnet mesafe değerleri yapay sinir ağlarına giriş verisi olarak gönderilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden her bir örnek mesnet mesafesi değerine karşılık elde edilen deformasyon verileri ise yapay sinir ağlarında hedef veri olarak belirlenmiştir. Giriş ve hedef verileri yapay sinir ağlarında öğrenme işlemi gerçekleştirilmeden önce eğitim ve test verilerine sırasıyla %80 ve %20 oranlarında ayrılmıştır (Lipovetsky, 2009). Yapay sinir ağları ile öğrenme sonucunda kurulan algoritmanın performansı test verileri üzerinde yapılan tahminler ve gerçek değerleri arasındaki farklar incelenerek ölçülmüştür. Şekil 4'te her bir yapay sinir ağı için test verileri üzerinde yapılan tahminlerin performansları görülebilir.



Şekil 4. Yapay Sinir Ağlarının Test Verileri Üzerindeki Performansı (a) İki Mesnetli Kiriş b) Üç Mesnetli Kiriş c) Sac Levha d) Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Levha)

Yapay sinir ağları modeli üzerinden elde edilen deformasyon tahminlerini minimize edecek optimizasyon algoritması, Python Scipy kütüphanesi içerisindeki SLSQP metodu temel alınarak oluşturulmuştur. Optimizasyon algoritması içerisinde mesnet mesafe değerleri tasarım değişkeni, amaç fonksiyonu yapay sinir ağları ile elde edilen tahmin değeri ve sınırlar ve kısıtlar ise daha önce belirlenen geometriye uygun olarak belirlenmiştir. Bu sayede yapay sinir ağları modeli çıktıları minimize edilebilmekte ve deformasyon değerlerine karşılık gelen mesnet pozisyonları

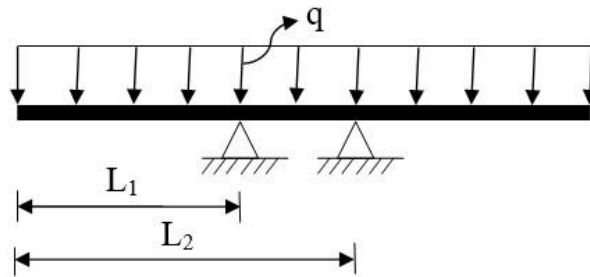
hesaplanabilmektedir. Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet mesafeleri ve karşılık gelen deformasyon değerleri parametrik sonlu elemanlar modeli üzerinde çalıştırılarak bulunan sonuçların tutarlılığı ölçülmüştür.

BULGULAR

Bu bölümde yük taşıyan kiriş yapılarda farklı mesnet durumları için mesnet konum optimizasyonları ve sac plaka şeklinde yük taşıyan yapıların yine benzer şekilde mesnet konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Kiriş geometrisi Ansys Design Modeler kullanılarak, mesnet noktaları referans noktasına göre uzaklıkları parametrik olarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli ise Ansys sonlu elemanlar yazılımında analizleri gerçekleştirilmek üzere 1D çubuk elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Tasarımlarının kolay, hesaplama sürelerinin kısa, daha kararlı sonuç vermeleri ve yüksek sistem gereksinimlerine ihtiyaç duymamaları özelliklerinden dolayı 1D elemanlar kullanılmıştır (Waia vd., 2013).

Benzer şekilde sac metal yapıların sonlu elemanlar modellemelerinde de iki boyutlu (2D) elemanlar kullanılmıştır. Plane stress seçeneği ile kullanılan iki boyutlu elemanlar sayesinde hem zamandan hem de hafıza kullanımı açısından avantajlar elde edilmiştir. Aşağıda, dört farklı yapının mesnet konumlarının optimizasyonları, geliştirilen yöntemin uygulanması olarak ele alınmıştır.

İki Mesnetli Kirişte Mesnet Yerleri Optimizasyonu



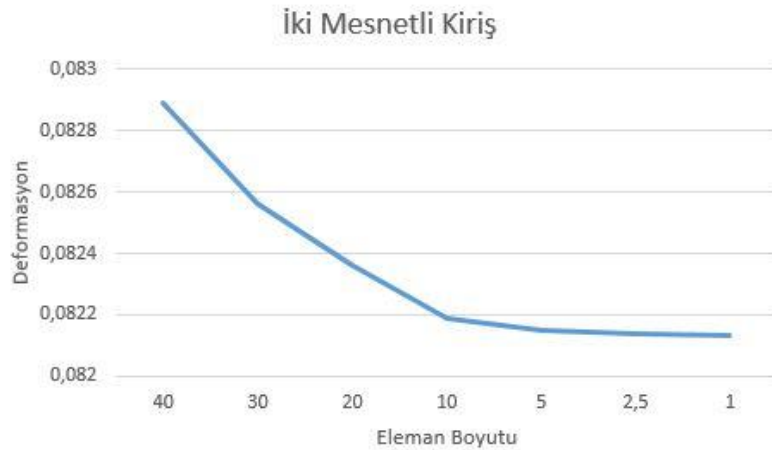
Şekil 5. Yayılı Yük Uygulanan İki Mesnetli Kiriş Problemi

Yayılı yük altındaki iki mesnetli kiriş Şekil 5’ te görülmektedir. Amaç mesnet konumlarının en az maksimum deformasyonun elde edilmesi için bulunmasıdır. Bu nedenle her bir mesnetin referans noktasına olan uzaklıkları:

$$0 < L_1 < 499$$

$$501 < L_2 < 1000$$

olarak sınırlandırılmıştır. Kiriş kesiti 10 mm kenar uzunluğuna sahip kare olarak alınmıştır. Mesh yakınsama çalışması yapılmış ve en uygun eleman boyutu 5 mm olarak bulunarak model hazırlanmıştır. İki mesnetli kiriş problemine uygulanan mesh yakınsama işlemi Şekil 6’da verilmiştir. Modellenen iki mesnetli kirişin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 6. İki Mesnetli Kiriş Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 1. İki Mesnetli Kirişin Özellikleri

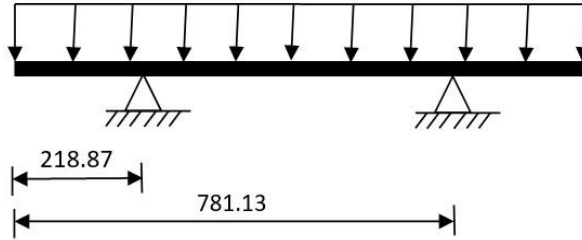
Toplam Uzunluk (mm)	1000
q (N/m)	50
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	100
I (mm ⁴)	883,33

Yapay sınır ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon Sonuçları

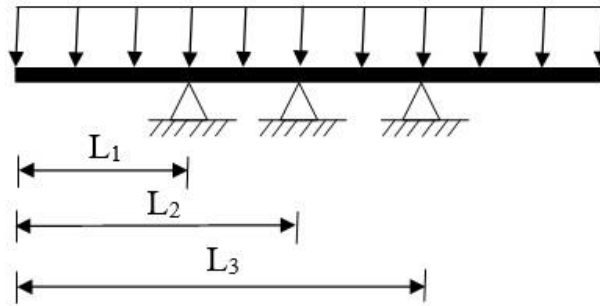
L_1 (mm)	218,87
L_2 (mm)	781,13
Deformasyon (mm)	0,0877

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,083 mm olarak hesaplanmıştır. Deformasyon değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Optimizasyon sonrası elde edilen kiriş modeli Şekil 7’de görülmektedir.

**Şekil 7.** Optimizasyon Sonucu Elde Edilen İki Mesnetli Kiriş Modeli

Sonuçlar değerlendirildiğinde mesnet konumları simetrik çıkmış ve uç noktalardan uzunluğa göre %21,89 mesafesindedir. Bu tür yük taşıyan sistemlerde mesnet noktaları bu oranlarda konumlandırıldığında yapı üzerinde minimum sehim oluşacaktır.

Üç Mesnetli Kirişte Mesnet Yerleri Optimizasyonu

**Şekil 8.** Yayılı Yük Uygulanan Üç Mesnetli Kiriş Problemi

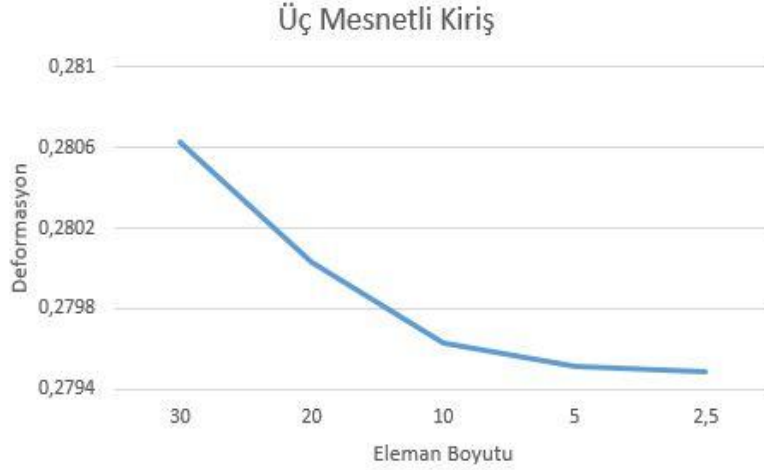
Yayıllı yük altındaki üç mesnetli kiriş Şekil 8’ de görülmektedir. Burada da amaç benzer şekilde kirişte en az deformasyon olacak şekilde mesnet konumlarının optimizasyon ile belirlenmesidir. Mesnet noktalarının parametreleri ve sınırları:

$$0 < L_1 < 333$$

$$334 < L_2 < 666$$

$$667 < L_3 < 1000$$

olarak verilmiştir. Kiriş kesiti 10 mm kenar uzunluğuna sahip kare olarak alınmıştır. Üç mesnetli kiriş sonlu elemanlar modeline mesh yakınsama çalışması yapılarak optimum eleman boyutu 5 mm olarak alınmıştır. Modellenen üç mesnetli kirişin özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 9. Üç Mesnetli Kiriş Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 3. Üç Mesnetli Kirişin Özellikleri

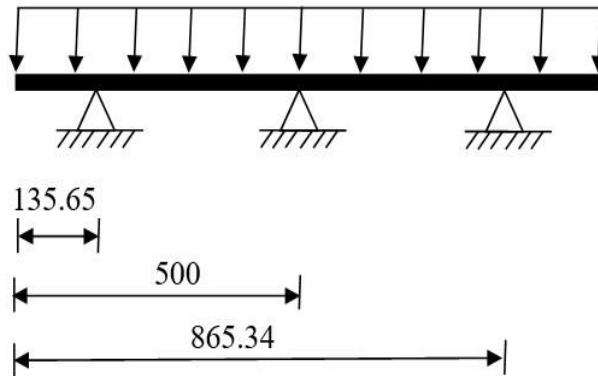
Toplam Uzunluk (mm)	1000
q (N/m)	50
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	100
I (mm ⁴)	883,33

Yapay sınır ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	135,65
L_2 (mm)	500
L_3 (mm)	865,34
Deformasyon (mm)	0,03

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,026 mm olarak hesaplanmıştır. Deformasyon değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Optimizasyon sonrası elde edilen kiriş modeli Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen İki Mesnetli Kiriş Modeli

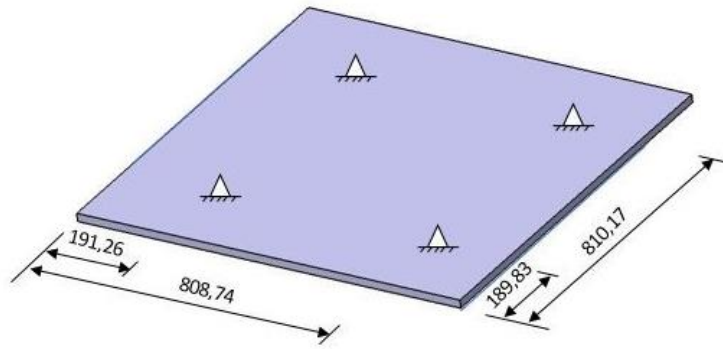
Üç mesnetli kiriş probleminde, orta mesnetin yeri olan L_2 mesafesi kirişin tam ortasında çıkmıştır. Ayrıca L_1 ve L_3 mesafeleri ile konumlanan kenarlardaki mesnetlerin kiriş boyunun %13.57 oranı kadar uzaklıkta ve ortadaki mesnete göre simetrik çıktığı görülmüştür. Bu sonuca göre, üç mesnetli yayılı yük taşıyan kirişlerde mesnet konumları bu oranlarda alınırsa minimum sehim elde edilir.

Yapay sinir ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	191,26
L_2 (mm)	808,74
L_3 (mm)	189,83
L_4 (mm)	810,17
Deformasyon (mm)	0,40177

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,44742 mm olarak bulunmuştur. Bulunan deformasyon miktarları karşılaştırıldığında yapay sinir ağları ile optimizasyon algoritmasının oldukça tutarlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası elde edilen sac parça modeli Şekil 12'de görülmektedir. Mesnet pozisyonları beklenildiği üzere birbirlerine simetrik olarak elde edilmiştir.



Şekil 12. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Mesnet Konumları

Optimizasyon sonucu mesnet konumları incelendiğinde minimum deformasyon için mesnetlerin sac levha ağırlık merkezine göre simetrik pozisyonlandığı görülmüştür. Sac levha yapılarında parçanın kendi ağırlığı veya üzerindeki yük altında en az deformasyon oluşması için mesnet konumları Şekil 12'de verilen mesnet mesafeleri oranlarında belirlenmelidir. Buna göre sac levhalarda mesnetler kenarlardan %19.13 mesafesinde seçildiğinde en az deformasyon elde edilecektir.

Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Levhanın Mesnet Yerleri Optimizasyonu

Kaynakla birleştirilecek saclar ve yapıdaki mesnetler Şekil 14'te görülmektedir. Sac parçaların özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir. Sac parçalar 5 mm kalınlığında, 392 düğüm noktası ve 338 iki boyutlu (2D) eleman ile kabuk eleman olarak modellenmiştir. Mesh optimizasyonu ile eleman boyutu 50 mm olarak belirlenmiştir. Sınır şartı olarak iki sac parça toplam 8 adet mesnet ile sabitlenmiştir. Sac parçanın modeli üzerine yük uygulanmamış, kendi ağırlığı etkisi altındaki deformasyonu incelenmiştir.

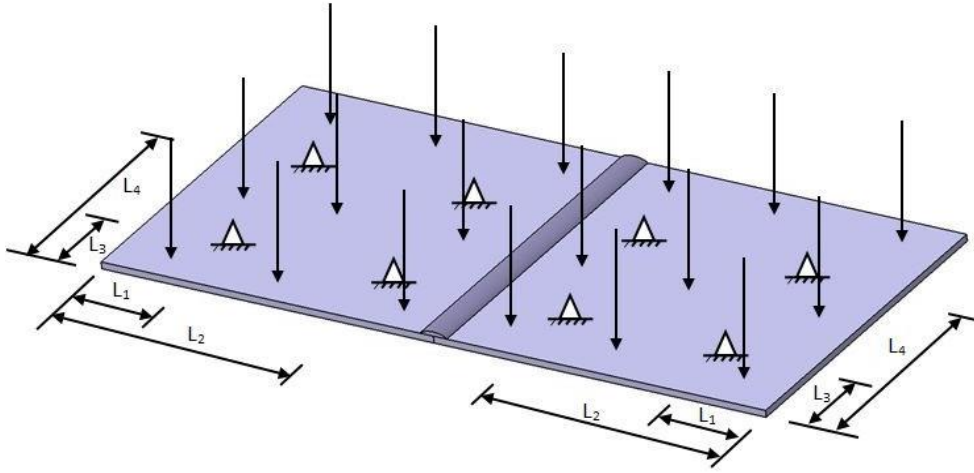


Şekil 13. Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 7. Sac Plakaların Özellikleri

Uzunluk (mm)	1000
Genişlik (mm)	1000
Kalınlık (mm)	5
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	5000
I (mm ⁴)	10416,67

İki sac parçanın kaynak edilecek kenar üzerinde üniform düzgün kaynak dikişi elde edilebilmesi için deformasyonun iki sac parçada eşit ve minimum değerde olması gerekmektedir. Bundan dolayı iki sac parçadaki mesnet yerlerinin konumları aynı seçilmiştir. Önceki sac levha mesnet yerleri optimizasyonu çalışmasında deformasyon olarak parçanın tamamı dikkate alınırken bu örnekte parçaların kaynak yapılacak kenarında meydana gelen deformasyonun minimize edilmesi amaçlanmıştır ve bu doğrultuda dört mesnet noktasının konum optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

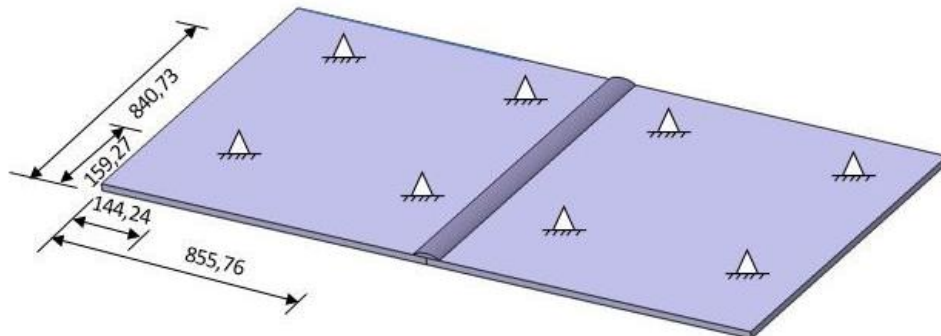


Şekil 14. Kaynak Edilecek İki Sac Parça Modeli

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değeri Tablo 8’de görülmektedir. Elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 2,5 mm olarak bulunmuştur. Bulunan deformasyon miktarları karşılaştırıldığında yapay sinir ağları ile optimizasyon algoritmasının oldukça tutarlı sonuçlar turettiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası elde edilen sac parça modeli Şekil 15’te görülmektedir.

Tablo 8. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	144,24
L_2 (mm)	855,76
L_3 (mm)	159,27
L_4 (mm)	840,73
Deformasyon (mm)	2,21



Şekil 15. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Mesnet Konumları

Sac parçaların kaynak ile birleştirilmesi prosesinde kaynak yapılan bölgenin geometrik doğruluğu, sac parçaların en az deforme olacak şekilde konumlandırılmasına bağlıdır. Optimizasyon sonucunda kaynak edilecek iki sac parçada, mesnet mesafeleri kaynak çizgisine göre simetrik olarak bulunmuştur. Kaynak edilecek iki sac parçada mesnetler kenarlardan %14.42 mesafesinde seçildiğinde kaynak edilecek kenarda minimum deformasyon elde edilecektir. Bu sayede sac parçalar en yüksek doğrulukta kaynak ile birleştirilebilir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yük taşıyan yapılarda hafifliğin yanında en az deformasyon olması genellikle talep edilir. Minimum deformasyon elde edilmesi için deneme-yanılma yöntemleri yerine optimizasyon algoritmaları kullanımı ile daha kısa zamanda daha optimal değerlerin bulunması için kullanılmalıdır. (Zolghadr-Asli vd, 2018; Arora, 2017). Bu çalışmada da Python Scipy kütüphanesindeki SLSQP algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. (Konstantinos ve Marie, 2019).

Literatürde giriş ve sac parça üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde girişlerin şekil parametrelerinin optimize edilmesi (Jaskot, A., 2021; Kayabekir, 2018), girişe takviye edici malzemeler ile deplasman azaltılması için optimizasyon çalışması (Silva ve Meireles, 2018), sac plakaların güçlendirilmesi için kullanılan nervür elemanın konum optimizasyonu (Y. C. Lam ve S. Santhikumar, 2003) ve talaşlı imalat işlemi sırasında parçada minimum deformasyon için konum optimizasyonları (Kaya, 2006) gibi farklı yöntemler kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fakat literatürde yük taşıyan yapıların tasarımında genellikle ürün veya yapının şekil parametreleri gibi birçok yöntem kullanılarak optimize edilmeye çalışılmakta (Jaskot, A., 2021; Kayabekir, 2018; Jang vd., 2009; Kaya, 2006) ancak mesnet yerlerinin optimizasyonu ile minimum deformasyonun elde edilmesi ile ilgili çalışmalar yetersizdir. Görülen bu eksikliğin, bu çalışma ile giderilmesi ile literatüre katkıda bulunulacağı düşünülmektedir. Birçok endüstri alanında kullanılan giriş ve sac plaka yapılarda mesnet konumlarının optimizasyonu bu çalışmanın ana konusudur. Bu çalışmada iki mesnetli giriş, üç mesnetli giriş, sac plaka ve kaynak edilecek iki sac plaka örnekleri üzerinde mesnet konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon problemi çözümlerinde, seçilen çözüm algoritmasına bağlı olarak çok sayıda iterasyon gerekirken ve bu durumda çok sayıda amaç ve kısıt fonksiyonu hesaplanması gerekmektedir. (Köroğlu, 2013) Bu çalışmada olduğu gibi, sonlu elemanlar modelinin kullanıldığı durumlarda ise optimizasyon probleminin çözümünde güçlü bir bilgisayar alt yapısı gerekir. Sonlu elemanlar modeli yerine geçen vekil model kullanmak, bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. (Gürel, 2016) Bu çalışmada yapay sinir ağları vekil model olarak kullanılmıştır. Vekil modellerin sonlu elemanlar modelleri ile korelasyon değerleri yaklaşık %99 mertebesinde bulunmuş ve optimizasyon probleminin tanımlanmasında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Örnek problemler için çözümler gerçekleştirildiğinde, optimum mesnet konumlarında minimum deformasyon durumu için giriş ve sac plaka üzerinde oluşan maksimum deformasyon değerlerinin farklı konumlarda aynı değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle optimizasyon algoritması, yapı üzerinde oluşan maksimum deformasyonu azaltmak için, düşük deformasyon olan bölgelerdeki deformasyonların artmasına izin vererek deformasyonları dengelemeye çalışmıştır. Yapı üzerinde homojen bir deformasyon dağılımının olması yönünde bir sonuç elde edilmiştir. Bir diğer sonuç, yüklemelerin ve geometrinin simetrik olması durumunda mesnet konumlarının da simetrik çıkmasıdır. Yapılar üzerinde farklı noktalarda oluşan maksimum deformasyon değerleri, mesnet konumlarının simetrik durumu için elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuç olmakla beraber, optimum mesnet yerlerinin belirlenmesi ancak optimizasyon probleminin çözülmesi ile elde edilmiştir.

Sonuçta bu çalışmada, bu tür sistemleri tasarlayan mühendislerin kullanabileceği referans değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu tür yapıların tasarımında birer tasarım kriteri olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında verilen bursiyer desteğine teşekkür ederiz (Proje No: 118C136 ve 118C100).

KAYNAKLAR

Abbasi, B. and Mahlooji, H., (2012). Improving response surface methodology by using artificial neural network and simulated annealing. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3461-3468. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.036>

- Aderiani, A.R., Warmefjord, K., Söderberg, R., Lindkvist, L. and Lindau, B., (2020). Optimal design of fixture layouts for compliant sheet metal assemblies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 2181-2201. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05954-y>
- Ahmad, Z., Sultan, T., Asad, M., Zoppi, M. and Molfino, R., (2018). Fixture layout optimization for multi point respot welding of sheet metals. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(4), 1749-1760. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0331-5>
- Alteyeb, M.S. and Jolgaf, M., (2017, September). Optimization of cantilever beam for minimum weight using finite element analysis. First Libyan Conference on Metal Casting and Processing Technologies. FLCMCPT2017.
- Arora, J.S., (2017). Introduction to Optimum Design. Elsevier, UK, 945.
- Arslan, İ., (2019). Python ile Veri Bilimi. Pusula, İstanbul, 406.
- Darshan, S., Varik, A., Katti, A.N., Singh, A.K. and Kamath R.R., (2013). Size and topological optimization of cantilever beam. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(5), ISSN:2231-5381.
- Gürel, D.B. (2016). Cevap yüzeyi yöntemi kullanılarak stevia özü içeren düşük kalorili böğürtlen reçeli formülasyonunun belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi. T.C. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı. Tekirdağ 71s.
- Jang, G.W., Shim, H.S. and Kimi, Y.Y., (2009). Optimization of support locations of beam and plate structures under self-weight by using a sprung structure model. *Journal of Mechanical Design*, 131(2), 021005. <https://doi.org/10.1115/1.3042154>
- Jaskot, A. (2017). Steel cantilever beam optimization with ANSYS software. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, t. 27 (177), Politechnika Częstochowska. <https://doi.org/10.17512/znb.2021.1.11>
- Kaya, N., (2006). Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms. *Computers in industry*, 57, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.05.001>
- Kayabekir, A.C. (2018). Yapı mühendisliğinde metasezgisel algoritmalar ile optimizasyon uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. T.C. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 101s.
- Keras (2022). <https://keras.io> Accessed 18,12,2022.
- Konstantinos, V., Marie-Ange, D. (2019). Benchmarking multivariate solvers of scipy on the noise-less testbed. - The Genetic and Evolutionary Computation Conference, Jul 2019, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1145/3319619.3326891>
- Köroglu, S.A. (2013). Gemi yapısal dizaynında vekil model kullanımı. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı. İstanbul 130s.
- Kraft, D., (1998). A Software package for sequential quadratic programming. DLR German Aerospace Center – Institute for Flight Mechanics, Köln, 33.
- Lam, Y. C., Santhikumar, S. (2003). Automated rib location and optimization for plate structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25(1), 35–45. <https://doi.org/10.1007/s00158-002-0270-7>
- Li, B. and Melkote, S.N., (1999). Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization. *International Journal of Machine Tools &Manufacture*, 39, 871-883. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00072-8)
- Li, B., Tang, H., Yang, X. and Wang, H., (2006). Quality design of fixture planning for sheet metal assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 690-697. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0385-2>
- Lipovetsky, S., (2009). Pareto 80/20 law: derivation via random partitioning. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 40, 271-277. <https://doi.org/10.1080/00207390802213609>
- Lu, C. and Zhao, H.W., (2015). Fixture layout optimization for deformable sheet metal workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 85-98. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6647-0>

- Prabhakaran, G., Padmanaban, K.P. and Krishnakumar, R., (2007). Machining fixture layout optimization using fem and evolutionary techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 1090-1103. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0441-6>
- Selvakumar, S., Arulshri, K.P., Padmanaban, K.P. and Sasikumar, K.S.K., (2013). Design and optimization of machining fixture layout using ann and doe. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1573-1586. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4281-2>
- Scipy (2022). <https://docs.scipy.org> Accessed 15.08.2022.
- Silva, H. M., and de Meireles, J. F. B. (2018). Design optimisation of internally reinforced beams subjected to bending loading. *Advanced Engineering Forum*, 28, 18–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.28.18>
- Simpson, T.W., Poplinski, J.D., Koch, P.N. and Allen, J.K., (2001). Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations. *Engineering with Computers*, 17, 129-150. <https://doi.org/10.1007/PL00007198>
- Viana, F.A.C., (2015). A tutorial on latin hypercube design of experiments. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(5), 1975-1985. <https://doi.org/10.1002/qre.1924>
- Waia, C.M., Rivai, A. and Bapokutty, O., (2013). Modelling optimization involving different types of elements in finite element analysis. *Materials Science and Engineering*, 50(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/50/1/012036>
- Yang, B., Wang, Z., Yang, Y., Kang, Y. and Li, C., (2017). Optimization of fixture locating layout for sheet metal part by cuckoo search algorithm combined with finite element analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 1-10. <https://doi.org/10.1177/168781401770>
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., Chu, X., (2018). Advanced optimization by nature-inspired algorithms., *Studies In Computational Intelligence*, Vol. 720, Ed.: Bozorg-Haddad, O., Singapore, p. 166. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5221-7>