



Analysis of Silos with Varying Wall Thicknesses Using the Finite Element Method (FEM) and Optimization of Structural Weight

Gülşah Erdoğan^{1,a} Hüseyin Güran Ünal^{2,b,*}

¹Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 37150, Kastamonu, Türkiye

²Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 37150, Kastamonu, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Research Article</i></p> <p>Received : 13.08.2024 Accepted : 11.10.2024</p> <p><i>Keywords:</i> Steel silo Weight optimization Static analysis Resource efficiency Different wall thicknesses</p>	<p>In this study, 85 silo models with varying sheet thicknesses and support elements were created for grain storage. The silo dimensions were fixed at a diameter of 4.77 meters and a height of 10.5 meters (excluding the roof) by using 1500×3000 mm steel sheets without cutting. The main goal of this study is to optimize the silos to reduce costs by minimizing the amount of structural material, which constitutes a significant portion of the overall cost of steel silos. St44 structural steel was chosen as the material for its weldability, machinability, and cost-effectiveness. To enhance the stability of the silo and minimize potential structural issues, NPU and flat bar support elements were incorporated into the design. The structural analyses of the silo models were carried out using ANSYS finite element software. In the analyses performed with ANSYS, the total deformation, strain, and stress values under static loading conditions were calculated for each silo model. Additionally, the total weight of each design was evaluated. By comparing the data obtained from these analyses, the optimal silo design that offers the best performance and cost balance was determined. It was found that the overall weight could be reduced by 58% by using sufficient support elements without increasing the thickness of the steel sheets during manufacturing. This finding significantly reduces material costs during production and offers an economical solution while maintaining structural performance.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 12(11): 1930-1937, 2024

Farklı Cidar Kalınlıklarına Sahip Siloların Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile Analizi ve Yapı Ağırlığının Optimizasyonu

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Araştırma Makalesi</i></p> <p>Geliş : 13.08.2024 Kabul : 11.10.2024</p> <p><i>Anahtar Kelimeler:</i> Çelik silo Ağırlık optimizasyonu Statik analiz Kaynak verimliliği Farklı duvar kalınlıkları</p>	<p>Bu çalışmada, tahıl depolaması amacıyla farklı sac kalınlıkları ve destek elemanlarına sahip 85 adet silo modeli oluşturulmuştur. Silo boyutları, 1500×3000 mm sac tabakalar kesilmeksizin kullanılarak çapı 4,77 metre ve yüksekliği (çatı hariç) 10,5 olarak belirlenmiş ve araştırma süresince sabit tutulmuştur. Çalışmanın temel amacı, çelik siloların maliyetinin büyük kısmını oluşturan yapı malzemesini azaltarak maliyeti düşürmek için optimizasyon yapmaktır. Oluşturulan modeller için kaynaklanabilirlik, işlenebilirlik ve maliyet yönünden uygun malzeme olarak St44 yapı çeliği seçilmiştir. Silonun stabilitesini artırmak ve olası yapısal sorunları minimize etmek amacıyla, NPU ve lama destek elemanları tasarıma dahil edilmiştir. Oluşturulan silo modellerinin yapısal analizleri ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, her bir silo modeli için statik yükleme koşulları altında oluşan toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, her bir tasarımın toplam ağırlığı da değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılarak, en uygun performans ve maliyet dengesini sağlayan optimum silo tasarımı belirlenmiştir. İmalat sırasında sac kalınlığını arttırmadan, yeterli destek elemanlarının kullanılması ile genel ağırlığın %58 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir. Bu bulgu, imalat sırasında malzeme maliyetlerini önemli ölçüde düşürmekte ve yapısal performansı koruyarak ekonomik bir çözüm sunmaktadır.</p>

^a gulsherdgn@gmail.com

^{ib} <https://orcid.org/0009-0004-1186-5699>

^b guranunal@gmail.com

^{ib} <https://orcid.org/0000-0003-2891-3488>



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Giriş

Silolar, hububat, kömür, cevher gibi kohezyonsuz malzemelerin depolandığı ve korunduğu modern yapıların genel adıdır. En yaygın kullanılanları hububat silolarıdır. Hasat mevsiminde elde edilen ürünlerin yıl boyunca kullanılma ihtiyacı ve üretim ile tüketim miktarlarının yıllar içinde değişkenlik göstermesi, hububatin depolanmasını zorunlu kılmaktadır (Özel, 2007). Silolar günümüzde genellikle çelik konstrüksiyon olarak inşa edilmektedir. Ancak, betonarme, ahşap, alüminyum ve diğer malzemelerden yapılan silolara da rastlanmaktadır. Ekonomik nedenlerle silolar çoğunlukla dairesel olarak tasarlanır. Çeşitli tarım, hayvancılık ve endüstriyel üretim aşamaları, ince cidarlı metal siloların kullanımını diğer depolama yöntemleriyle birleştirmiştir. Beton silo yapılarına kıyasla çelik silolar daha hafiftir. Bu nedenle, ürünü hızlı ve kolay bir şekilde boşaltabilen, çeşitli yapısal mekanizmalar kullanarak yüklerini taşıyabilen, asimetrik yükler altında kolayca deforme olabilen ve eski şekline dönebilen elastik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, çelik silolar uzun süreli veya kısa süreli olarak büyük miktarlarda ürünün depolanması için kullanılır. Son zamanlarda, madencilik, kimya, tarım ve gıda işleme gibi birçok sanayi sektörü tarafından da kullanılmaktadır. Taneli ürünlerin çelik silolarda güvenli ve ekonomik bir şekilde depolanması, ürünün mekaniksel özelliklerine göre hesaplanan gerilmelerle yapılı (Juan ve ark., 2006). Silolarda etkiyen yükler ve taşıyıcı sistem diğer yapı türlerinden farklıdır çünkü depolanan yığın katıların yoğunlukları, akışkanlıkları ve sürtünme gibi özellikleri depolanan materyale göre çok fazla değişkenlik gösterir. Bu nedenle silolar özel olarak tasarlanır ve değerlendirilir (Efe, 2020).

Yapılarda, sistem elemanlarının geleneksel yöntemlere dayalı çözümlerinde, rijit olarak kabul edildiği bilinmektedir. Bu yaklaşım, yapı sistemindeki yer değiştirmeleri hakkında detaylı bilgi sağlamamaktadır. Ancak sonlu elemanlar metodu, rijit cisim sınırlamasını aşmayı ve bu tür karmaşık problemleri çözmeyi mümkün kılar. Bu nedenle ANSYS, ABAQUS, SAP 65 ve SAP 2000 gibi sonlu elemanlar programlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu programlar, yapısal analizlerde daha doğru sonuçlar elde etmek ve yapı davranışını daha detaylı şekilde incelemek için önemli araçlar sunmaktadır (Gallego ve ark. 2004; Özel, 2007). ANSYS, ürünlerin prototip üretimi yapılmadan önce sanal ortamda test edilmesine fırsat tanır. Bu sayede, daha maliyetli ve zaman alıcı bir süreç olan prototip üretimi yerine, simülasyon tabanlı analizler gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla günümüzde bilgisayar destekli mühendislik yöntemi tercih edilmektedir. Sanal ortamda yapılan 3 boyutlu simülasyonlar sayesinde, yapıların zayıf noktaları tespit edilebilir ve iyileştirmeler yapılabilir. Ayrıca kullanım ömrü hesaplamaları yapılarak olası problemler önceden öngörülebilir. Bu yöntem, yapıların tasarım sürecinde daha verimli ve güvenilir kararlar alınmasına yardımcı olur (Kibar, 2011).

Çelik siloların sonlu elemanlar yöntemiyle analizi üzerine yapılmış çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Kibar, tıbbi fındık depolanması için en uygun silindirik gövdeli, konik çıkış ağızlı çelik silonun boyutlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Üç farklı silo modeli farklı cidar kalınlıklarıyla analiz edilmiştir. Eurocode 1 ve Avustralya

standartlarına göre basınç yükleri hesaplanmış ve ANSYS yazılımıyla gerilmeler değerlendirilmiştir (Kibar, 2011). Zhao ve arkadaşları, büyük çelik siloların rüzgar basıncına maruz kaldığında nasıl burkulma davranışı gösterdiğini incelemiştir. Çalışmada, Eurocode standartlarına göre farklı yük durumları (boş ve dolu silo) için burkulma analizleri yapılmış, özellikle geometrik kusurların burkulma direnci üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Zhao ve ark., 2013). Tang ve arkadaşları, ince metal silindir şeklindeki siloların kompresif duvar sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulma göçmesine karşı yapısal analizlerini yapmıştır. Abaqus sonlu elemanlar analizi kullanılarak, silindirik duvarlı ve profil çelik destekli iki tür çelik silo incelenmiştir (Tang ve ark., 2015). Sondej ve arkadaşları, yatay dalgalı levhalardan oluşan ve dikey ince duvarlı kolon profilleri ile güçlendirilmiş bir çelik silonun yarı-statik stabilite analizini yapmıştır. Analizler, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan burkulma davranışlarını değerlendirerek, eksenel ve eksenel olmayan yüklerin etkilerini incelemiştir. Ayrıca, çeşitli sayısal modeller kullanılarak yapılan sonlu elemanlar simülasyonları ve saha ölçümleriyle elde edilen başlangıç kusurları dikkate alınarak silo boyutlandırması için öneriler geliştirilmiştir (Sondej ve ark., 2016). Zaccari ve Cudemo, bir termal enerji santralinde kullanılan çelik siloların eksantrik boşaltma nedeniyle yaşadığı burkulma göçmesini incelemeyi amaçlamıştır. Eksantrik boşaltma nedeniyle oluşan asimetrik basınçların Avrupa Standardı EN 1991-4'e göre karakterize edilmesi sağlanmış ve bu basınçların yapısal burkulma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, bu tür arızaları en aza indirmek için yapı güçlendirme tasarımlarını ve Avrupa Standardı EN 1993-1-6'ya dayalı öneriler sunmaktadır (Zaccari & Cudemo, 2016). Yıldırım, genel amaçlı bir buğday silosu tasarlayarak, bu buğday silosuna olumsuz etki eden kuvvetleri ve bu kuvvetlere karşı silonun vermiş olduğu tepkileri incelemiştir. Oluşabilecek deformasyonları Statik Analiz, Modal Analiz, Harmonik Analiz, Titreşim Analizi ve Tepki Spektrumu Analizi yöntemleri ile analiz etmiştir (Yıldırım, 2018). Çelik ve Köse, tahıl depolama silolarının sismik analizlerini ele alarak, bu tür yapıların depoladıkları malzemelerle birlikte sismik olaylar sırasında nasıl davrandığını incelemektedir. Özellikle ince cidarlı siloların sismik basınçlar altında kritik burkulma ve patlama riski taşıdığı vurgulanmıştır. Çalışma, silo içindeki tahılların dinamik basınçlarının doğru şekilde simüle edilmesi gerektiğini belirterek, sonlu elemanlar metodu ve ayrık elemanlar metodunun bir arada kullanılmasıyla daha gerçekçi analizler yapılmasını önermektedir (Çelik & Köse, 2020). Efe ve Çelik, farklı çaplara sahip silindirik çelik sıvı depolama silolarının yapısal performansını incelemiştir. Silo yüksekliği sabit tutulurken, üç farklı çapta silolar için rijitlik levhaları kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Statik yük koşulları altında yapılan analizler, levha etkinliklerinin silo çapına göre nasıl değiştiğini ortaya koyan bir çalışmayı ele almışlardır (Efe & Çelik, 2020). Kibar, farklı cidar kalınlıklarına sahip iki çelik silo modelinin yapısal performansını ve yük etkilerini incelemektedir. ANSYS simülasyonları ile farklı cidar kalınlıklarının güvenli depolamada kullanılabilirliğini araştırmıştır (Kibar, 2020). Fawzy ve arkadaşları, buğday silosunun tasarım güvenlik faktörlerini değerlendirerek

yeterli olup olmadığını belirlemek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sızıntı nedeniyle yaşanan çökme olayı üzerinden yapılan sayısal analizle, güvenlik faktörlerinin her çelik halka için normalize edilerek, tasarımın dayanıklılığı incelenmiştir (Fawzy ve ark., 2021). Gandia ve arkadaşları, silolarda maksimum normal basınçları değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanmıştır. Çalışmada, farklı duvar sürtünme katsayıları ve özgül ağırlıklar dikkate alınarak 3D FEM modelleri oluşturulmuştur (Gandia ve ark., 2021). Anil ve Lakshmi, çeşitli endüstrilerde kullanılan çelik siloların statik ve dinamik analizini incelemiştir. Çelik siloların, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş yapılarını değerlendirerek, depolama koşullarında maruz kaldıkları statik ve dinamik yüklemeye etkileri analiz edilmiştir. Analiz, siloların geometri, malzeme ve sınır koşullarının idealize edilerek yapılmıştır. Özellikle rüzgar ve deprem gibi yüklerin silo stabilitesini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir (Anil & Lakshmi, 2022). Rehman ve Wang, çeşitli yüklemeye koşullarına sahip özel bir çelik silonun tasarımını ve analizini ele almışlardır. İnceledikleri silolar Hindistan standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Silonun levha gerilmesini, kontur çizgilerini, kritik destekleri, giriş uç kuvvetlerini ve çelik malzeme ihtiyaçlarını belirlemeyi amaçlamışlardır (Rehman & Wang, 2023). Abdelbarr ve arkadaşları, kare ve dikdörtgen siloların tasarımında duvar esnekliğini dikkate alacak şekilde mevcut tasarım yaklaşımını değiştirmiştir. Duvar genişliği-kalınlık oranı ve silo boyutlarının duvar-dolum basıncına etkisi incelenmiş, mevcut rijit duvar varsayımlarının geçerliliği sorgulanmış ve yarı rijit ile esnek duvarlar için daha doğru basınç tahminleri yapabilen yeni bir Janssen tekniği ayarlaması önerilmiştir. Bu yeni yaklaşımın doğruluğu, çeşitli sonlu elemanlar modelleri ile test edilmiştir (Abdelbarr ve ark., 2024). Warayth, çelik siloların güçlendirmesi konulu bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada çelik siloyu GFRP malzemesi ile güçlendirilip, sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanarak dinamik analizi incelemiştir (Warayth, 2024).

Yapılan çalışmada, başlangıç olarak tüm katmanlarında aynı kalınlıkta sac kullanılan bir referans silo tasarımı oluşturulmuştur. Bu tasarımın statik analizi gerçekleştirilmiş ve toplam ağırlığı hesaplanmıştır. Referans silo, sonraki tasarımların değerlendirilmesinde esas alınmıştır. Sonraki aşamalarda, silonun gövde kalınlıkları üst katmanlara doğru kademeli olarak inceltilmiş ve yapısal stabiliteyi artırmak amacıyla çeşitli destek elemanları eklenmiştir. Toplamda 85 farklı silo tasarımı oluşturulmuş ve her biri, referans silo ile statik performans ve ağırlık açısından karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda, optimum silo tasarımı belirlenmiştir. Önceden yapılmış olan çalışmalarda, silonun her katmanında farklı sac kalınlıkları ve destek elemanları kullanılarak yapılan çözümlere rastlanmamıştır. Genellikle tek tip sac kalınlığı kullanılarak analizler yapılmıştır.

Kar yükü, rüzgar yükü, deprem yükü hesaplamalara dahil edilmeden, sadece siloya doldurulan tahılın ağırlığı dikkate alınarak, farklı yapı kalınlıkları ve destekleme elemanları kullanılarak silo ağırlığını düşürmek için çözümler yapıldığı bu çalışma ile silo üreticilerinin daha hafif ve daha düşük maliyetle silo üretebilmeleri için gerekli bazı yapısal çözümlerin sektörün dikkatine sunulması amaçlanmaktadır.

Materyal ve Metot

Silo Boyutları ve Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada, tahıl depolaması amaçlanan bir çelik silo tasarlanmış ve bu silonun hafifletilebilmesi için optimizasyon denemeleri yapılmıştır. Silo tasarımları SolidWorks 2024 programı kullanılarak yapılmıştır. Silo boyutları için belirlenen ölçüler ve depolanacak olan tahıl yoğunluğu Çizelge 1’ de verilmiştir. Silo dış boyutları araştırma süresince sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. Silo özellikleri

Table 1. Silo specifications

Özellik	Değer
Silo gövde yüksekliği	10,5 m
Silo çapı	4,77 m
Silo kapasitesi	187 m ³
Tahıl yoğunluğu	720 kg/m ³
Depolanacak tahıl miktarı	134.640 kg

Taşınabilir sac ölçüsünün 1500×3000 mm olarak seçildiği bu tasarımda, sacların zayıf vermeden optimum düzeyde kullanımı sağlanmıştır. Bu boyutlarda her sırada 5 sac levha kullanılarak silonun çapı ve yüksekliği hesaplanmıştır. Sacların her sırada 5 levha olarak kullanılması sonucunda silonun çapı 4,77 metre olarak hesaplanmıştır. Silo yüksekliği, her bir sac levhanın 1500 mm yüksekliğinde olduğu ve toplamda 7 kat kullanıldığı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, çatı hariç 4,77 metre çapında ve 10,5 metre yüksekliğinde bir silo tasarlanmıştır. Bu tasarım, sacların en verimli şekilde kullanılması ve minimum malzeme zayıfı ilkeleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Çelik silo üretiminde kullanım yerine ve ortam koşullarına göre farklı çelik türleri tercih edilmektedir. Silo malzemesi olarak, piyasada kolaylıkla bulunabilen, yaygın olarak kullanılan ve TS EN 1993-1-1 standardına uygun olan St44 yapı çeliği kullanılacaktır. Malzemenin kimyasal özellikleri, akma-çekme dayanımlarını, kaynak edilebilirliği, kaynak işçiliğini ve malzemenin işlenebilirliğini etkilemektedir. Malzeme seçiminde; akma-çekme dayanımları, kaynak edilebilirlik, korozyon direnci ve fiyat dikkate alınmıştır. Seçilen sac malzemenin ve destek elemanlarının özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Mühendislik tasarımlarında malzemelerin maksimum izin verilen gerilmelerini belirlemek için emniyet katsayısına karar verilmelidir. St44 çeliğinin kopma dayanımı göz önünde bulundurularak, emniyet katsayısı 2,5 olarak belirlenmiş ve emniyet gerilmesi 17-18 MPa olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2. Sac malzeme ve destek elemanı özellikleri

Table 2. Sheet material and support element specifications

Özellik	Değer
Malzeme	St44
Akma Dayanımı (MPa)	275
Çekme Dayanımı (MPa)	430-580
% Uzama	23
Yoğunluk (g/cm ³)	7,85

SolidWorks Programı ile Silo Modelleme

Sadece sac levhalardan imal edilen silolar

Silo tasarımında kullanılacak boyutlar ve malzeme belirlendikten sonra, SolidWorks yazılımında modelleme gerçekleştirilmiştir. İlk modelleme aşamasında, tüm katlar için 5 mm kalınlığında sac levhalar kullanılmıştır. Kullanılan sac levhaların boyutları 1500×3000 mm olup, silo yedi kattan oluşmaktadır (Şekil 1).

Destek elemanlı imal edilen silolar

Tasarlanacak olan farklı silo modellerinde gövde kalınlıkları değiştirilecektir. Emniyeti sağlamak ve optimum sonuçları elde etmek için destek elemanları kullanılması planlanmaktadır. Destek elemanlarının adetlerine karar verilirken, gövdede kullanılan sacların kaynak dikişi hatları dikkate alınmıştır. Kullanılacak olan destek elemanları ve adetleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Destek elemanları 2 grupta kullanılmıştır. NPU profiller silonun yüksekliği boyunca 5,10 ve 15 adet dikine yerleştirmiştir. Lama demirleri ise silo çapında bükülürük yatay ekseninde silo sacının etrafına 7 ve 14 adet olarak sarılmıştır. Destek elemanları kullanılarak modellenen silo örnekleri Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 3. Destek elemanları ve adetleri

Table 3. Support elements and quantities

Destek Elemanı	Adet
NPU50 NPU30	5
	10
	15
Lama 6×80 mm	7
Lama 5×50 mm	14

ANSYS Programı ile Silo Analizi

ANSYS programında analiz yapmak için bazı temel adımları uygulamak gerekmektedir. Bunlar, model oluşturmak veya CAD programlarında çizilmiş olan verileri almak, modelleri basitleştirmek, hataları gidermek, kaliteli mesh oluşturmak, malzeme özelliklerini tanımlamak, sınır şartlarını belirlemek, uygulanacak olan yüklemeleri tanımlamak, çözüm parametrelerini belirlemek, sonuçları incelemek ve yorumlamaktır.

Yapı çeliği, ANSYS'in hazır malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Bu kütüphane, yapı çeliği gibi yaygın olarak kullanılan malzemeler için doğrulanmış ve standart özellikler sunmaktadır. Bu özellikler arasında malzemenin elastisite modülü, Poisson oranı, akma dayanımı ve yoğunluk gibi parametreler yer alır. Analizlerde başka parametreler dikkate alınmamıştır.

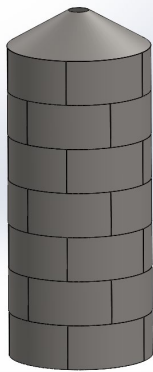
Mesh, analiz edilen yapının geometrisine uygun olarak düzgün bir şekilde dağıtılmalıdır. Çok yoğun bir mesh, çözüm süresini önemli ölçüde artırırken, çok seyrek bir mesh de çözümün doğruluğunu düşürebilir. Kaliteli bir mesh, bu iki faktörü dengeleyerek doğru sonuçlar elde etmeye olanak sağlar.

Analizin doğruluğu ve verimliliği için farklı mesh boyutları ve tipleri denenerek optimum mesh bulunmuştur. Farklı mesh yoğunluklarıyla yapılan analizler sonucunda çözümün değişmediği bir noktada mesh boyutu sabitlenmiştir. Aynı geometri üzerinde farklı yoğunluklarda mesh oluşturularak analiz tekrarlanmıştır. Mesh boyutu küçüldükçe çözüm daha hassas hale gelir, ancak bir noktadan sonra çözümde önemli bir değişiklik olmaz. Bu noktaya ulaşıldığında en uygun mesh boyutu seçilmiştir. Farklı eleman tipleri (dörtgen, tetrahedral, hexahedral) kullanılarak çözüm doğruluğu ve çözüm süresi açısından karşılaştırma yapılmıştır. Mesh yoğunluğu ve tipi açısından yapılan bu çalışmalar sonucunda, çözümün doğruluğunu fazla etkilemeyen ama hesaplama süresini minimize eden optimum mesh yapısı belirlenmiştir. Yapılan analizlerde malzemenin her üç boyutu da önemli olduğu ve sac kalınlıkları dikkate alındığı için Solid elemanlar kullanılmıştır.

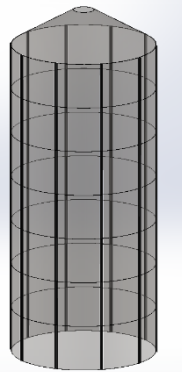
ANSYS programında silo statik analizi

Statik analiz, bir yapı üzerindeki sabit veya zamanla değişmeyen yüklerin etkisini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Silolar, genellikle uzun süreler boyunca sabit bir şekilde dolu veya boş kaldığından, bu tür yüklerin analizi önemli hale gelir. Silo içindeki malzemenin ağırlığı gibi sabit yükler, silo yapısında gerilme, deformasyon ve stabilite üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Statik analiz, silo duvarlarında ve temelinde oluşan gerilme ve deformasyonları hesaplayarak, malzemenin mukavemet sınırlarını aşabilecek kritik bölgeleri tespit etmeye olanak sağlar. Böylece bu bölgelerde daha fazla inceleme yapılabilir veya gerektiğinde güçlendirme çalışmaları planlanabilir. Ayrıca statik analiz, sabit yük durumlarına odaklandığı için dinamik etkileri göz ardı eder ve silo tasarımının güvenli bir şekilde yapılmasına, tehlikeli gerilme bölgelerinin tespitine ve yapısal stabilitenin değerlendirilmesine olanak tanır.

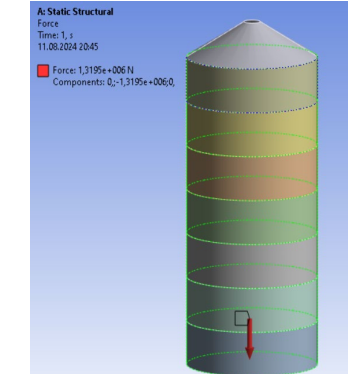
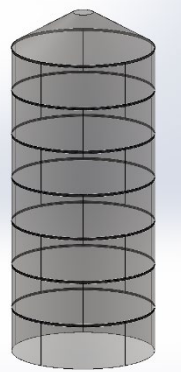
Silo tasarımı yapılırken silonun altı sac levhayla kapatılmıştır ve silo tabanının zemine oturduğu bölgeye sabit destek (fixed support) uygulanmıştır. Böylece yapının zeminle tamamen sabit olduğu varsayılmıştır. Silo içerisindeki malzeme, yapı üzerinde önemli yükler oluşturur. Silo içindeki malzemenin ağırlığı düşey yönlü bir kuvvet (Force) olarak uygulanmıştır.



Şekil 1. Silo modeli
Figure 1. Silo model



Şekil 2. Destek elemanlarına sahip silo modelleri
Figure 2. Silo models with support structures



Şekil 3. Siloya uygulanan kuvvet
Figure 3. Force applied to the silo

Çizelge 4. Silo 5 statik analiz sonuçları

Table 4. Static analysis results of Silo 5

	Kat Kalınlık (mm)	Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5	5,0	6.182,05	0,46143	0,000087	17,47
	5,0				
	5,0				
	5,0				
	5,0				
	5,0				

Çizelge 5. Silo 5.3 statik analiz sonuçları

Table 5. Static analysis results of Silo 5.3

	Kat Kalınlık (mm)	Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
Silo 5.3	1,5	3.797,50	0,68873	0,000088	17,6
	1,5				
	2,5				
	3,0				
	3,5				
	4,5				
5,0					

Tasarımı yapılan, tüm gövdesinde sac kalınlığı 5 mm olan silonun ANSYS programında statik analizi yapılmıştır. Analiz kapsamında silo ağırlığı, toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Silo, toplam 134.640 kg tahıl depolama kapasitesine sahiptir. Uygulanan yükler silonun iç hacminin tahıl ile doldurulması durumunda elde edilen ağırlık olarak kabul edilmiştir. Statik analiz sırasında siloya düşey yönde 1.319.472 N kuvvet uygulanmıştır (Şekil 3). Kar yükü, rüzgâr yükü, deprem yükü gibi kuvvetler bu çalışma sırasında hesaba katılmamıştır.

Bulgular ve Tartışma

Öncelikle belirlenen dış boyutlarda tüm katları 5 mm'lik sactan imal bir silo tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Yapılan analizde maksimum gerilme değeri 17,47 MPa bulunmuştur. Emniyetli gerilme ile uyumu sebebiyle bu silo referans olarak kabul edilmiştir. Tasarımda yapılacak düzenlemeler ile tavsiye edilen emniyet gerilmesi olan 17-18 MPa değerinin üzerine çıkmadan silo hafifletilmeye çalışılmıştır. Referans silo ağırlığımız 6.182,05 kg olarak belirlenmiştir (Çizelge 4). Silolar, ilk katmanlarındaki başlangıç sac kalınlıklarından yardım alınarak kodlanmıştır. Bu silo Silo 5 olarak adlandırılmıştır.

Devam eden analizlerde destek elemanı kullanmadan sac kalınlıkları inceltilerek emniyet gerilmesinin üzerine çıkılmadan çözümlenmeler yapılmıştır. Kademeli olarak yukarı doğru 5 mm'den 1,5 mm'ye kadar inilmiştir. Bu doğrultuda Silo 5.3'ün uygunluğu tespit edilmiştir (Çizelge 5). Silo ağırlığı 3.797,50 kilograma düşürülmüştür.

Sonrasında silonun ilk katında kullanılan sac kalınlığı 4 mm'ye indirilmiş ve bu yeni tasarımlar ANSYS programı kullanılarak birçok farklı sac kalınlığı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, sac levha kalınlıkları üst katmanlara doğru kademeli olarak inceltildiği için siloların gerilme değerleri referans değer 17,47 MPa'nın üzerine çıkmış (30,56 MPa) ve bu durum üst katmanlarda

gerilme ve deformasyon değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Bu olumsuz etkileri dengelemek ve yapısal bütünlüğü korumak amacıyla tasarıma destek elemanları eklenmiştir. Destek elemanları kullanılarak yapılan düzenlemeler sayesinde, gerilme değerleri emniyetli seviyelere çekilmiş ve siloların güvenliği sağlanmıştır. Yapılan düzenlemelerin ardından, analiz sonuçları Çizelge 6'da detaylı olarak sunulmuştur.

Tasarlanan Silo 4.4 adlı modeller arasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının 5 numaralı silo olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında (Silo 4.4-5), gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 3.008,75 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu doğrulanmıştır. Referans emniyetli gerilmenin (17-18 MPa) altında 11,39 MPa değeri ile bu grubun en hafif silosu tasarlanmıştır (Şekil 4).

Bu doğrultuda, tasarlanan silonun ilk katında bulunan sac kalınlığı 3 mm'ye düşürülmüş ve bu yeni tasarımlar ANSYS programı kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 7'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tasarlanan Silo 3.3 adlı modelde ağırlık 2.384,50 kg'a düşürülse de oluşan gerilme 36,97 MPa ile emniyetli gerilmenin üzerinde tespit edildiğinden, destek elemanlı analizlere devam edilmiş ve sonrasında yapılan değerlendirme sonucunda, optimum silo tasarımının Silo 3.3-5 olduğu belirlenmiştir. Bu silo tasarımında, gövde için 10 adet NPU 30 profil kullanılmış ve silonun toplam ağırlığı 2.567,20 kg olarak hesaplanmıştır. Destek elemanları kullanıldığında yapılan statik analizler sonucunda, silonun güvenli olduğu (7,31 MPa) doğrulanmıştır (Şekil 5).

Denemeler sırasında Silo 3.3'ün gövde kalınlıkları için yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarım sürecinde, silo gövdesine ek destek sağlamak amacıyla 7 adet 5×50 mm lama demiri ve 5 adet NPU 30 profil beraber kullanılmıştır.

Çizelge 6. Silo 4.4 Statik analiz sonuçları

Table 6. Static analysis results of Silo 4.4

Silo 4.4	Kat Kalınlık (mm)	Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	2.826,05	0,94631	0,000153	30,56
1,5					
2,0					
2,0					
3,0					
4,0					

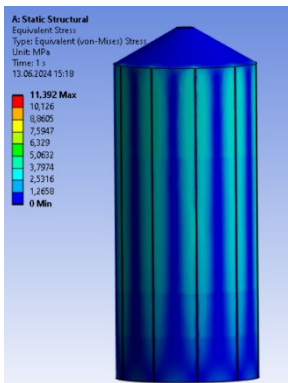
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	3.028,70	0,06539	0,000094	17,79
2	NPU 50	10	3.231,35	0,01509	0,000039	7,43
3	NPU 50	15	3.434,00	0,00676	0,000023	4,18
4	NPU 30	5	2.917,40	0,00669	0,000094	18,46
5	NPU 30	10	3.008,75	0,02572	0,000060	11,39
6	NPU 30	15	3.100,10	0,00662	0,000030	4,72
7	Lama 6×80 mm	7	3.220,22	0,00570	0,000015	2,92
8	Lama 6×80 mm	14	3.614,39	0,00114	0,000006	1,12
9	Lama 5×50 mm	7	3.031,36	0,00591	0,000015	2,98
10	Lama 5×50 mm	14	3.236,67	0,00131	0,000007	1,30

Çizelge 7. Silo 3.3 statik analiz sonuçları

Table 7. Static analysis results of Silo 3.3

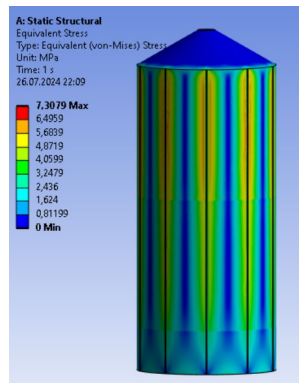
Silo 3.3	Kat Kalınlık (mm)	Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	1,5	2.384,50	1,1214	0,000185	36,97
1,5					
1,5					
2,0					
2,0					
3,0					

Silo No	Destek Elemanı	Adet	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
1	NPU 50	5	2.587,15	0,07864	0,000083	16,67
2	NPU 50	10	2.789,80	0,01939	0,000033	6,56
3	NPU 50	15	2.992,45	0,00663	0,000021	3,32
4	NPU 30	5	2.475,85	0,07912	0,000093	18,02
5	NPU 30	10	2.567,20	0,01948	0,000040	7,31
6	NPU 30	15	2.658,55	0,00803	0,000023	4,26
7	Lama 6×80 mm	7	2.778,67	0,00635	0,000017	3,42
8	Lama 6×80 mm	14	3.172,84	0,00132	0,000007	1,45
9	Lama 5×50 mm	7	2.589,81	0,00659	0,000017	3,48
10	Lama 5×50 mm	14	2.795,12	0,00146	0,000008	1,57



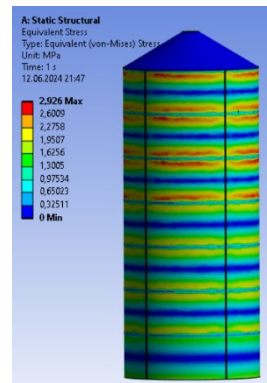
Şekil 4. Silo 4.4-5 gerilme değerleri

4.4-5



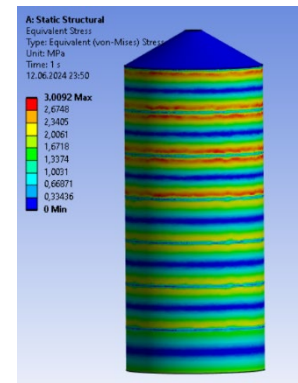
Şekil 5. Silo 3.3-5 gerilme değerleri

3.3-5



Şekil 6. Silo3.3-11 gerilme değerleri

3.3-11



Şekil 7. Silo 3.3-12 gerilme değerleri

3.3-12

Figure 4. Stress values of SiloFigure 5. Stress values of SiloFigure 3. Stress values of SiloFigure 1. Stress values of Silo

Çizelge 8. Silo 3.3-11 ve Silo 3.3-12 numaralı siloların statik analiz sonuçları

Table 8. Static analysis results of Silos 3.3-11 and 3.3-12

Silo No	Kat Kalınlık (mm)		Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
	3.3	1,5	1,5	2.384,50	1,1214	0,000185
	1,5					
	2,0					
	2,0					
	2,0					
	3,0					
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
11	NPU 30	5	2.681,16	0,00591	0,000014	2,93
	Lama 5×50 mm	7				
Silo No	Destek Elemanı	Adet	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)
12	Lama 3×50 mm	3	2.542,88	0,00599	0,000016	3,01
	Lama 4×50 mm	2				
	Lama 5×50 mm	2				

Çizelge 9. Tasarlanan siloların statik analiz sonuçları ve ağırlık değişimleri

Table 9. Static analysis results and weight variations of the designed silos

Silo No	Toplam Silo Ağırlık (kg)	Toplam Deformasyon (mm)	Gerinim (mm/mm)	Gerilme (MPa)	Hafifleme Oranı (%)
Silo 5 (Referans)	6.182,05	0,46143	0,000087	17,47	0
Silo 5.3	3.797,50	0,68873	0,000088	17,60	38,57
Silo 4.4	2.826,05	0,94631	0,000153	30,56	54,29
Silo 4.4-5	3.008,75	0,02572	0,000060	11,39	51,33
Silo 3.3	2.384,50	1,12140	0,000185	36,97	61,43
Silo 3.3-5	2.567,20	0,01948	0,000040	7,31	58,47
Silo 3.3-11	2.681,16	0,00591	0,000014	2,93	56,63
Silo 3.3-12	2.542,88	0,00599	0,000016	3,01	58,87

Bu yeni tasarım, önceki versiyonlardan farklı olarak, NPU 30 profil ve 5×50 mm lama demiri aynı anda kullanılarak güçlendirilmiştir. Toplam silo ağırlığı 2681,16 kg olurken, maksimum gerilme 2,93 MPa (Şekil 6) tespit edilmiştir. Silo 3.3-11 olarak adlandırılan tasarımın statik analiz sonuçları ve silo toplam ağırlıkları Çizelge 8'de verilmiştir.

Bir diğer denemede Silo 3.3'e yukarı doğru kesiti azalacak şekilde ek yerlerine 2 adet 5×50 mm, 2 adet 4×50 mm ve 3 adet 3×50 mm lama takviyesi yapılarak Silo 3.3-12 elde edilmiştir. Toplam ağırlık 2.542,88 kg olurken, maksimum gerilme 3,01 MPa (Şekil 7) olarak tespit edilmiştir (Çizelge 8).

Sonuç ve Öneriler

Çelik silo tasarımlarının tahıl depolaması için optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, silo tasarımları, SolidWorks 2024 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve sonrasında ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile statik analizler yapılmıştır. Bu analizlerde toplam deformasyon, gerinim ve gerilme değerleri dikkate alınarak emniyetli silo tasarımları belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, emniyetli çıkan silolar arasından toplam ağırlık, toplam deformasyon, gerinim, gerilme değerleri ve maliyet gibi kriterler göz önünde bulundurularak optimum silo seçimi yapılmıştır.

ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile statik analizleri yapılan tüm silolar arasından seçim kriterleri değerlendirildiğinde modellenen Silo 3.3-12'nin uygun silo olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Seçilen silonun toplam ağırlığı 2.542 kg'dır. Referans olarak alınan Silo 5'e göre %58,87 hafifletilmiş ve emniyet gerilmesi de düşürülmüştür (Çizelge 9). Silo gövdesinde emniyeti sağlamak için çeşitli boyutlarda lama demirleri kullanılmıştır. Bu destek elemanları sayesinde silo toplam deformasyon değeri 0,00599 mm, gerinim değeri 0,000016 mm/mm ve gerilme değeri 3,01 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Silo 3.3-12'nin tahıl depolama amacıyla kullanılacak çelik silolar arasında hem emniyetli hem de ekonomik bir seçenek olduğunu göstermektedir. Silo 3.3-12'nin düşük deformasyon ve gerinim değerleri, yapının sağlamlığını ve uzun ömürlülüğünü artırırken, düşük gerilme değerleri de yapının güvenli bir şekilde kullanılabilmesini teyit etmektedir.

Bu süreçte elde edilen veriler, silo tasarımında kullanılan malzeme kalınlıklarının ve destek elemanlarının kritik önemde olduğunu vurgulamaktadır. Optimum tasarımın belirlenmesi, mühendislik uygulamalarında yapısal güvenliğin ve performansın sağlanması için gereklidir.

Düz tabanlı silolar, dolum ve boşaltım sırasında içindeki malzemenin ağırlığı ile desteklenen yapılar olduğundan, statik yükler (malzeme ağırlığı) analizde öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Düz tabanlı silolarda,

dolum sırasında malzeme genellikle duvarlara eşit şekilde dağılır. Bu yüzden dolum ve boşaltım sırasındaki dinamik yüklerin etkisi, başlangıç aşamasında ihmal edilmiştir ve dolum sırasındaki etkiler daha az kritik olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan analizler ve alınan önlemler, silo tasarımının güvenliğini artırmak ve toplam ağırlığı minimuma indirerek verimliliği maksimize etmek adına önemli bir adım oluşturmaktadır. Optimizasyon çalışmasında en önemli maliyetin silo malzemesi olması sebebiyle ağırlık azaltma üzerinde durulmuştur fakat eklenecek destek elemanlarının bir miktar işçilik masraflarını artıracığı da unutulmamalıdır. Analiz kapsamında statik yüklere ve malzeme ağırlığına odaklanılmıştır. Dış yükler bu aşamada göz ardı edilmiştir. Yapılacak yeni çalışmalarda kar yükü-rüzgar yükü-deprem yükü gibi dış kuvvetlerin etkisinin de beraber incelenmesi yerinde olacaktır. Bu çalışma ile silo üreticilerinin daha hafif ve daha düşük maliyetle çelik silo üretebilmeleri için gerekli destek elemanı takviyeli bazı yapısal yenilikçi çözümler ortaya konmuş, sektöre yeni tasarımlar için ışık tutulmaya çalışılmıştır.

Bilgi

Teşekkür

Bu yayın, Gülşah Erdoğan'ın, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı bünyesinde yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasının bir kısmından yararlanılarak hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abdelbarr, M. H., Ramadan, O. M., Hilal, A., Sanad, A. M., & Abdalla, H. A. (2024). Current design of rectangular steel silos: limitations and improvement. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 77.
- Anil, N. E., & Lakshmi, P. (2022). Comparative study of finite element analysis of steel silos with rectangular and stiffeners. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 10, 1-9.
- ANSYS Inc. (2024). ANSYS Mechanical User's Guide.
- Çelik, A. İ., & Kose, M. M. (2020). Çelik Tahıl Depolama Silolarının Sismik Analizi Üzerine Genel Bir Değerlendirme Ve Yeni Analiz Yaklaşımları. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 501-520.
- Efe, M. E., & Çelik, D. (2020). Rijitleştirme Levhaları ile Güçlendirilmiş Silindirik Çelik Siloların Yapısal Davranışının İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 1124-1139.
- Efe, M. E. (2020). *Hidrodinamik Etki Altındaki Silo Tipi Çelik Yapıların Sıvı Çalkantısına Bağlı Yapısal Davranışın İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- Fawzy, M. A., Adel, A., & Shawky, M. M. (2021, August). Case Study: Numerical Analysis of Collapsed Steel Tower Silo to Quantify the Design Safety Factors. In *The International Undergraduate Research Conference* (Vol. 5, No. 5, pp. 219-227). The Military Technical College.
- Gallego, E., Goodey, R. J., Ayuga, F., & Brown, C. J. (2004). *Some practical features in modelling silos with finite elements*. ASABE Meeting Presentation Paper No. 044150.
- Gandia, R. M., Gomes, F. C., de Paula, W. C., & Aguado, P. J. R. (2021). Influence of specific weight and wall friction coefficient on normal pressures in silos using the Finite Element Method. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 29(Continua), 192-203.
- Juan, A., Moran, J.M., Guerra, M.I., Couto, A., Ayuga, F., & Aguado, P.J. (2006). Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: Comparison with ENV 1993. *Thin-Walled Structures*, 44, 1192-1200.
- Kibar, H. (2011). Tombul Fındık Depolamasında Tane Özelliklerine Bağlı Olarak ANSYS Programıyla Optimum Silo Tasarımı. OMÜ. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Samsun*.
- Kibar, H. (2020). Farklı Cidar Kalınlıklarına Sahip Buğday Silosunda Doldurma ve Boşaltma Koşullarına Bağlı Olarak Gerilme Dağılımının Simülasyonu. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 6(3), 517-537.
- Özel, K. (2007). *Çelik Hububat Silolarının Tasarım Esasları* (Yüksek Lisans Tezi). Konya Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rehman, K. U., & Wang, K. (2023). Analysis and Design of Steel Silo using STAAD. ProV8i. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 20-28.
- SolidWorks Corporation. (2024). SolidWorks Simulation User's Guide.
- Sondej, M., Iwicki, P., Wójcik, M., & Tejchman, J. (2016). Stability analyses of a cylindrical steel silo with corrugated sheets and columns. *Steel and Composite Structures*, 20(1), 147-166.
- Tang, Z., Zhou, D., Peng, C., & Wu, W. (2015). The structural analysis of steel silos with cylindrical-wall bearing and profile-steel bearing. *Stavební obzor-Civil Engineering Journal*, 24(2).
- Warayth, M. O. M. (2024). *Çelik siloların GFRP ile güçlendirilmesinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Yaldıran, F. (2018). *Bir buğday silosunun ANSYS programı kullanılarak analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Zaccari, N., & Cudemo, M. (2016). Steel silo failure and reinforcement proposal. *Engineering failure analysis*, 63, 1-11.
- Zhao, Y., Cao, Q. S., & Su, L. (2013). Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures*, 73, 337-349.