

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESABI VE ARAYÜZ
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Okan KARABUĞA

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon Programı**

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESABI VE ARAYÜZ
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Okan KARABUĞA

503131212

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Öğr. Gör. Dr. Ali İmre AYDENİZ

ARALIK 2017

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131212 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Okan KARABUĞA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESABI VE ARAYÜZ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Öğr. Gör. Dr. Ali İmre AYDENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Zeynep PARLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Umut KARAGÜZEL
Işık Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Kasım 2017**

Savunma Tarihi : **12 Aralık 2017**



Aileme,





ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmam boyunca tecrübeleri ve bilgileriyle bana yol gösteren, çalışmalarımı inceleyip, katkılarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Öğr. Gör. Dr. Ali İmre Aydeniz'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasına verdiği destekten ötürü Tekfen Mühendislik AŞ'ye teşekkür ederim.

Başta dört yıllık ortak çalışma hayatımız boyunca benden desteğini ve yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Yük. Müh. Burak Tüzüner'e, çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen Tekfen Mühendislik-Teknoloji Departmanı'ndaki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelebilmem için büyük emek sarf eden, elde ettiğim tüm başarılarımda katkısı olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2017

Okan KARABUĞA
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Özeti.....	5
2. BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESAPLAMALARI.....	7
2.1 Tank Cidar Hesabı.....	7
2.1.1 Eksenel gerilme	8
2.1.2 Çevresel gerilme.....	8
2.2 Bir Adım Yöntemi(1FM).....	9
2.3 Değişken Nokta Tasarım Yöntemi(VDPM)	11
2.4 Elastik Analiz ile Kalınlıkların Belirlenmesi.....	14
3. SFY İLE TIMOSHENKO’NUN DENKLEMİNİN ÇÖZÜMÜ	15
3.1 Giriş	15
3.2 Yöntemin Kullanım Alanları ve Uygulamaları	17
3.2.1 Basit kirişte deformasyonun SFY ile hesaplanması	17
3.2.2 Sınır değer probleminin SFY ile çözülmesi.....	22
3.3 Sonlu Farklar Yönteminin Silindirik Tanklar için Uygulanması.....	26
3.4 Çözüm Algoritmasının Oluşturulması.....	32
4. ÇALIŞMA SONUÇLARININ DENEY İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	35
4.1 Deney.....	35
4.2 Sonlu Farklar Çözümü(SFY) ile Karşılaştırmalar	37
5. SFY İLE DİĞER HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	41
5.1 Giriş	41
5.2 Çapı 60m’den Küçük Depolama Tankları.....	42
5.2.1 Tank yüksekliği 12,2m	42
5.2.2 Tank yüksekliği 14,6m	45
5.3 Çapı 60m ile 100m Arasında Olan Depolama Tankları	48
5.3.1 Tank yüksekliği 12,2m	48
5.3.2 Tank yüksekliği 14,6 m	51
5.4 Çapı 100m’den Büyük Depolama Tankları.....	54
5.4.1 Tank yüksekliği 10m	54
5.4.2 Tank yüksekliği 12,2m	57

6. ARAYÜZ VE PROGRAM	61
6.1 Arayüzün Hazırlanması.....	61
6.2 Arayüzün Program Haline Getirilmesi	68
6.3 Programın Kurulumu ve Kullanımı	70
7. SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALAR	75
8. ÇIKARIMLAR VE ÖNERİLER	79
8.1 Çıkarımlar.....	79
8.2 Öneriler	80
KAYNAKLAR.....	81
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞ.....	87



KISALTMALAR

API	: Amerikan Petrol Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BS	: İngiliz Standartları
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
JIS	: Japon Standartlar Enstitüsü
1FM	: Bir Adım Yöntemi
SFY	: Sonlu Farklar Yöntemi
VDPM	: Değişken Nokta Tasarım Yöntemi
GUI	: Grafiksel Kullanıcı Arayüzü



SEMBOLLER

D	: Tank apı
β	: Timoshenko katsayısı
K	: SFY özüm katsayısı
E	: Elastisite modülü
H	: Tank yüksekliği
h	: Donam yüksekliği
g	: Yerçekimi ivmesi
ν	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
R	: Tank yarıçapı
ϵ	: Birim uzama
w	: Deformasyon
σ	: Gerilme
S_y	: Akma gerilmesi
S_T	: Çekme gerilmesi
S_d	: Malzeme için izin verilen tasarım gerilmesi
σ_H	: Çevresel gerilme
σ_L	: Eksenel gerilme
SG	: Sıvı özgül yoğunluğu
JE	: Kaynak faktörü
CA	: Korozyon payı
x	: VDPM katsayı
δ	: VDPM oran
M	: VDPM katsayı
L	: VDPM katsayı
C	: VDPM katsayı
P	: Basınç

P_b	: Buhar basıncı
P_{cl}	: Teorik burkulma yükü
P_{cr}	: Gerçek burkulma yükü
n	: SEY için nokta sayısı
γ	: Özgöl ağırlık
t	: Cidar kalınlığı
t_u	: Üst donam kalınlığı
t_L	: Alt donam kalınlığı
t_{2a}	: VDPM ikinci donam kalınlığı
Δt	: Kalınlık arttırma miktarı
$\Delta x, \Delta y$	: SFY için fark uzunluğu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tank sac malzemelerinin mekanik özellikleri[19].	12
Çizelge 3.1 : Analitik çözüm, SFY çözümü ve Pro-Mechanica çözümü.	21
Çizelge 3.2 : Analitik çözüm ile sonlu farklar çözümü.	25
Çizelge 3.3 : n sayısına bağlı olarak farkın değişimi.	26
Çizelge 4.1 : Tank malzemesinin özellikleri[29,30].	36
Çizelge 4.2 : Kullanılan tankın tasarım özellikleri[12].	37
Çizelge 4.3 : Deney ölçüm sonuçları[12].	37
Çizelge 4.4 : n sayısının gerilme sonucuna etkisi.	39
Çizelge 4.5 : Deney ölçümler ile SFY sonuçlarının kıyaslanması.	39
Çizelge 5.1 : SFY ve diğer hesaplama yöntemleri ile kıyas edilen tanklar.	41
Çizelge 5.2 : Tank1 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	42
Çizelge 5.3 : Tank2 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	43
Çizelge 5.4 : Tank3 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	44
Çizelge 5.5 : Tank4 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	45
Çizelge 5.6 : Tank5 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	46
Çizelge 5.7 : Tank6 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	47
Çizelge 5.8 : Tank7 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	48
Çizelge 5.9 : Tank8 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	49
Çizelge 5.10 : Tank9 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	50
Çizelge 5.11 : Tank10 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	51
Çizelge 5.12 : Tank11 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	52
Çizelge 5.13 : Tank12 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	53
Çizelge 5.14 : Tank13 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	54
Çizelge 5.15 : Tank14 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	55
Çizelge 5.16 : Tank15 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	56
Çizelge 5.17 : Tank16 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	57
Çizelge 5.18 : Tank17 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	58
Çizelge 5.19 : Tank18 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	59



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Tank çiftliği[3].	1
Şekil 1.2 : Burkulma dayanımına, malzeme iç düzensizliğinin etkisi[5].	2
Şekil 1.3 : Düzensizlik oranın ve kalınlığın burkulma dayanımına etkisi[7].	3
Şekil 1.4 : Dikey depolama tankı.	4
Şekil 2.1 : Basınçlı tank.	7
Şekil 2.2 : Eksenel gerilme.	8
Şekil 2.3 : Çevresel gerilme.	9
Şekil 2.4 : Endüstriyel depolama tankı.	10
Şekil 2.5 : Sıvı basıncının dağılımı ve tank cidarının konstrüksiyonu.	11
Şekil 3.1 : Sonlu farklar yöntemi[20].	15
Şekil 3.2 : Geri fark, merkezi fark ve ileri fark yaklaşımları[21].	17
Şekil 3.3 : Basit kirişe SFY uygulanması.	17
Şekil 3.4 : Analitik çözüm ile sonlu farklar çözümü.	26
Şekil 3.5 : Tank cidarının sonlu farklara ayrılması.	27
Şekil 3.6 : Tank mesnet koşulları[16].	31
Şekil 4.1 : 150.000m ³ 'lük petrol depolama tankı[12].	35
Şekil 4.2 : Tank üzerine yerleştirilen strain gageler[12].	36
Şekil 4.3 : Deneydeki tüm ölçümler ile SFY sonuçlarının gösterimi.	40
Şekil 5.1 : Tank1 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	42
Şekil 5.2 : Tank2 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	43
Şekil 5.3 : Tank3 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	44
Şekil 5.4 : Tank4 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	45
Şekil 5.5 : Tank5 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	46
Şekil 5.6 : Tank6 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	47
Şekil 5.7 : Tank7 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	48
Şekil 5.8 : Tank8 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	49
Şekil 5.9 : Tank9 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	50
Şekil 5.10 : Tank10 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	51

Şekil 5.11 : Tank11 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	52
Şekil 5.12 : Tank12 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	53
Şekil 5.13 : Tank13 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	54
Şekil 5.14 : Tank14 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	55
Şekil 5.15 : Tank15 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	56
Şekil 5.16 : Tank16 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	57
Şekil 5.17 : Tank17 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	58
Şekil 5.18 : Tank18 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.	59
Şekil 6.1 : Blank GUI(Default) ile boş bir GUI açılır.	61
Şekil 6.2 : Dosya sekmesinden bu nesnelerin isimleriyle birlikte görülebilir.	62
Şekil 6.3 : Değiştirilebilen metin kutusu “edit text” oluşturulur.	63
Şekil 6.4 : Grafikler ve grafikleri çizdiren buton nesnelerinin eklenmesi.	63
Şekil 6.5 : Donam sayısı değişken metin kutusu buton nesnelerinin oluşturulması.	64
Şekil 6.6 : GUI kodlarının oluşturulması.	64
Şekil 6.7 : Gerilme hesaplama butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi.	66
Şekil 6.8 : Donam sayısı butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi.	66
Şekil 6.9 : 1FM t ₁ kalınlığını hesaplama butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi.	66
Şekil 6.10 : Arayüz.	67
Şekil 6.11 : Açılan pencereden “Application Compiler” seçilir.	68
Şekil 6.12 : “Add main file” satırına .m dosyası yüklenir.	68
Şekil 6.13 : Program açıklamaları.	69
Şekil 6.14 : Arayüz dokümanının eklenmesi.	69
Şekil 6.15 : Package ile program derlenir.	70
Şekil 6.16 : “ARRAYUZ_TEZ_Kurulum” veya “ARRAYUZ_TEZ_windows” tıklanır.	70
Şekil 6.17 : Programın kurulacağı yer seçilir ve istenirse kısayol oluşturulur.	71
Şekil 6.18 : Açılan ekrandan “next” tıklanır.	71
Şekil 6.19 : Kısayol ile program çalıştırılır, program açılış resmi ile başlar.	72
Şekil 6.20 : Program kullanıma hazırdır.	73

BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESABI VE ARAYÜZ TASARIMI

ÖZET

Endüstriyel tesislerde kullanılan en yaygın ekipmanlardan olan dikey silindirik tankların cidar kalınlıkları; konstrüksiyonun emniyeti, malzeme maliyetleri, işçilik maliyetleri, ömür açısından değerlendirilerek tasarlanmalıdır. Kalınlık artışı konstrüksiyonun ağırlığını arttırdığı gibi burkulma açısından da tasarımı zayıflatmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca ince tank cidar kalınlıkları elde edilmelidir.

Tank cidar hesabında yaygın olarak kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. API 650 standardında önerilen bir adım yöntemi(1FM) ve değişken nokta tasarım yöntemi(VDPM) endüstriyel depolama tanklarında cidar kalınlığı hesabı için kullanılmaktadır. Tanktaki çevresel gerilmenin maksimum olduğu yer, tankın taban plakasına kaynak edildiği noktanın üzerinde gerçekleşmesi nedeniyle kalınlık hesaplarında bu yüksekliğin dikkate alınmasıyla daha ince cidar hesapları elde edilir. 1FM yöntemi taban plakasından 1 ft başka bir değişle 0,304m yukarıdan alınarak hesaplanır. Bu yöntem her zaman emniyetli sonuçlar vermektedir. Tank kalınlıkları taşıyabilecekleri yükten daha kalındır. İkinci yöntem olan VDPM ise, bir adım yönteminde alınan mesafeyi ampririk bir ifadeyle hesaplayarak alır. Genellikle 0,304m'den yüksek çıkan bu değeri, daha ince cidar kalınlıklarının elde edilmesini sağlar. VDPM ile yapılan tanklar zaman zaman aşırı gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu nedenle tasarımların sonlu elemanlar analizleri ile kontrolleri gerçekleştirilmelidir. 1FM ve VDPM yöntemleri, ağır tasarımlara ya da emniyetiz tasarımlara neden olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında Timoshenko'nun hidrostatik basınç altındaki dikey silindirik depolama tankları için yazmış olduğu denklemin sonlu farklar yöntemi(SFY) ile çözümü yapılmıştır. Deformasyon ve gerilme değeri incelenerek hali hazırda kullanılan yöntemler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen çözüm koduna arayüz oluşturularak kullanışlı bir yerli tasarım programı haline getirilmiştir.

Sonuç olarak elde edilen arayüz programı ile on sekiz adet tank 1FM, VDPM ve SFY yöntemlerine göre tank cidar kalınlıkları hesaplanmıştır. Cidar kalınlıkları birinci donamda SFY ile 1FM ilk donamlarda ve ara donamlarda oldukça birbirine yakın değeri vermektedir. Farklar %1 ile %4 arasında değişmektedir. SFY sonuçları daha incedir. SFY ile VDPM ilk ve ara donamlarda %6 ile %8 farklar ile birbirine yakındır. Tank çapı 100m'den büyük olan tanklarda yüksekliklerin de artmasıyla VDPM ile SFY çözümleri arası sapmalar bir karakterin dışına çıkmaktadır. Bir sapma genellemesi yapılamamaktadır. SFY ile yapılan çözümleme bazı istisnalar dışında literatürde bulunan diğer tank kalınlığı hesaplama yöntemlerinden olan 1FM'den daha ince donam kalınlıkları vermektedir. Bu durumda burkulma riskinin

azaltılması için daha ince donam kalınlıkları elde edilmiştir. Tank donam kalınlıklarının daha ince çıkması sonucunda, malzeme tasarrufu, saha işleri, işçilik maliyetleri lojistik gibi tasarım, imalat ve inşaat süreçlerinde daha ekonomik ve güvenilir bir çözüm elde edilmiştir. Yapılan çalışma program haline getirilerek, yerli sürekli kullanılabilir program haline getirilmiştir.



CALCULATING THE LARGE STORAGE TANK SHELL THICKNESS AND DESIGNING OF USER INTERFACE

SUMMARY

Shell thicknesses of vertical cylindrical tanks from the most common equipment used in industrial installations has great importance according to safety of construction, material costs, labor costs, life expectancy, etc.. The increase in thickness increases the weight of the construction as well as weakens the design in terms of buckling. For this reason thin shell thicknesses should be obtained as thin as possible.

The calculation of shell thicknesses in pressure and non-pressure tanks is based on the calculation of the shell thickness at which the internal pressure can carry the load. If liquid is stored in the tank, the effect of liquid static height must also be considered. Internal pressure, liquid static pressure and safety factors must be considered together to make calculations. The tank has a cylindrical, spherical or a different geometry.

There are two methods used for common in tank shell thickness calculations. One foot method (1FM) and variable design point method (VDPM) recommended by API 650 standard are used for shell thickness calculation in industrial storage tanks. In the industrial applications of storage tanks, tank shell thickness calculations differ in the above mentioned baselines and thicknesses in terms of tank manufacturing and material cost. Thicknesses are the largest at the bottom of the cylindrical storage tanks and the thickness at the top should be the smallest since there is no load. This makes the tank manufacturing impossible. For this reason, it is necessary to use graded thicknesses. Every step is called a course. The thickness of the course is calculated so that it will bear the liquid pressure which affects it. Each course has different thicknesses so that welded construction could be manufactured. In such a design, it seems that there will be excesses in thickness. In this case, the upper part of the lower unit could carry some amount of the upper unit's load. Thus, the fluid height could be reduced somewhat in the calculation of the course thickness. This value is obtained empirically and used as 1 ft (0,304 m). The value of the liquid height is subtracted by one foot (1 ft) from the value of the course thickness. Thus, the thicknesses calculated are thinner and the total cost is reduced. The second method, VDPM, takes the distance taken in one foot method by calculating it with an empirical expression. This value, which is generally higher than 0,304m, enables thinner shell thicknesses to be obtained. Tanks constructed with VDPM are subject to occasional extreme stresses. For this reason, designs should be inspected with finite element analysis. 1FM and VDPM methods could cause heavy designs or unsafe designs.

In this thesis study, the equation that Timoshenko wrote for storage tanks under hydrostatic pressure of vertical cylindrical tanks was solved with finite difference

method (FDM). Deformation and stress values were examined and compared with the currently used two methods. By creating an interface for the obtained solution code, it has become a useful in house design program.

In cases where the functions are given analytically, it is easy to calculate the function values at the desired points, to find the derivatives of the desired order at certain points of the function, or to calculate the integrals at certain intervals of the function. While some discrete values of the functions are known, such calculations could be approximated using finite difference method (FDM). Even where analytical solutions are evident, higher-order differential equations could be preferred in terms of ease of solution by use of finite differences. Finite difference method, solution of heat propagation equations, electromagnetic force equations, and preferred method with ease of use in nonlinear systems and solution of high order differential equations in places where structural analysis is performed. If the general equation for vertical cylindrical storage tanks is applied to the finite difference method, the fourth-order differential equation is transformed into a set of linear equations.

In order to be able to control the accuracy of this solution by means of an experiment, it is necessary to adapt the thickness of a certain tank to a numerical method. The numerical solution of the design of the tank designed for the solution and the stress values on the tank courses must be found by numerical method. It is seen that the maximum deviation of the calculated error between the model and the experiment is -6,23%. The model we construct by the finite difference method characteristically overlaps with the experimental results although there are deviations.

The solution algorithm which was validated with the experimental results was compared with the other methods used in the literature on eighteen tanks. The first six tanks are recommended diameter values in the API 650 standard. The next six tanks are the tanks previously examined in the literature. The last six tanks are the tanks that are outside the standard used dimensions. 2.8m was selected for the tank course height. The stored liquid water is considered as open tanks to the atmosphere. The thicknesses obtained are shown in charts and graphs. Corrosion allowance is not included. Welding efficiency (JE) is assumed as 1,0.

As a result of the obtained interface program, tank shell thicknesses were calculated according to eighteen tanks 1FM, VDPM and FDM methods. FDM and 1FM are very close to each other in the first course and intermediate courses. The differences of thicknesses are range from 1% to 4%. The FDM results are thinner than 1FM. In the top course, the deviation between the thicknesses is large because the thicknesses that are too small. In other words, if the top course is close to the lower courses' heights, the deviations will be in the same order again. It is possible to make economic designs by changing the heights of the courses. FDM and VDPM are close to each other with 6% to 8% difference in initial and intermediate courses. However, there is still a big deviation as it is in the 1FM. In tanks which tank diameters greater than 100 m, the differences between the VDPM and FDM solutions are out of character by increasing tanks' heights. A deviation generalization is not possible. As a result, the analysis with FDM gives thinner courses' thicknesses result than 1FM methods in the literature. In this case, a more economical solution has been obtained for the risk of buckling in design, manufacturing and construction processes, such as thinner shell thickness, less

material use, field work, labor costs, logistics. The work done is turned into a program and made available continuously.

As a result, in this study, to calculate the shell thicknesses of large storage tanks, the shell deformation equation for vertical cylindrical tanks under hydrostatic pressure of Timoshenko is solved using the finite difference method. The resulting solution code, interface and program have been prepared. Thus, a useful in house design program has been obtained.





1. GİRİŞ

Depolama tankları, su, petrol ve kimyasal ürünlerin işlendiği, depolandığı tesislerde yaygın olarak kullanılan ekipmanlardır. Küçük boyutlardan devasa boyutlara kadar ulaşan, ham veya işlenmiş kimyasal ürünlerin sıvı, gaz, katı ya da karışım olarak depolandığı endüstriyel elemanlardır. Yerüstü ve yer altı olmak üzere dikey silindirik, yatay silindirik, küresel veya dikdörtgen prizma şeklinde tasarlanabilirler. En yaygın olarak kullanılan dikey silindirik tanklardır[1].

Tankların tasarımı sırasında, mukavemet, çevre ve emniyet gereksinimlerinin yanında maliyet de göz önünde tutulur. API 620, API 650, API 653, BS 2594, BS 2654, DIN 4119, EN 14015 gibi uluslararası standartlar ve yönetmelikler, işletmeleri ve mühendislik şirketlerini emniyetli tasarımlar yapmaları hususunda yönlendirmektedirler[2]. Ayrıca çeşitli çevre koruma örgütleri de tank tesislerinin güvenliği konusunda toplumsal çalışmalar da yapmaktadırlar.



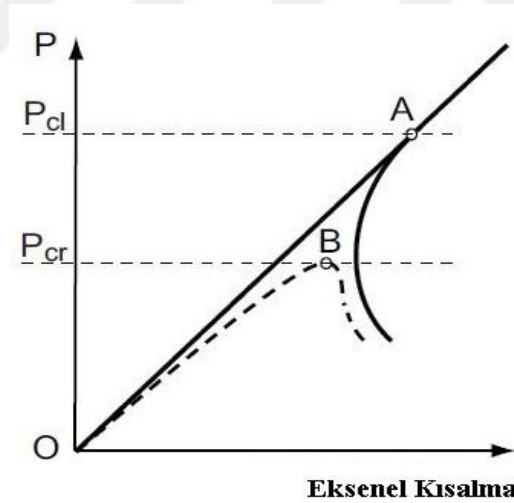
Şekil 1.1 : Tank çiftliği[3].

Şekil 1.1’de bir tank çiftliği fotoğrafı bulunmaktadır[3]. Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan tanklar; düşey-yatay gibi konumlandırılmalarına göre ya da çap-

yükseklik büyüklüklerine göre sınıflandırılabilceği gibi, çatı konstrüksiyon tiplerine göre de konik tavanlı, kubbe tavanlı, üstü açık veya yüzer tavanlı olarak da gruplandırılırlar [4].

Depolama tanklarının tasarımında uygulanan yöntem temel olarak; verilen bir işletme basıncı için, basınçlı kap kalınlığının segment-segment hesaplanması işlemidir. Bu işlem kullanılan hesap yöntemine göre aşırı emniyetli ya da emniyetsiz bölgeye düşme riski doğurmaktadır. Bu riskler nedeniyle, imalatçı firma ya aşırı malzeme kullanımı ile ekonomik bir yükün altına girmekte ya da uygulamada başarısızlığı göze almak zorunda kalmaktadır.

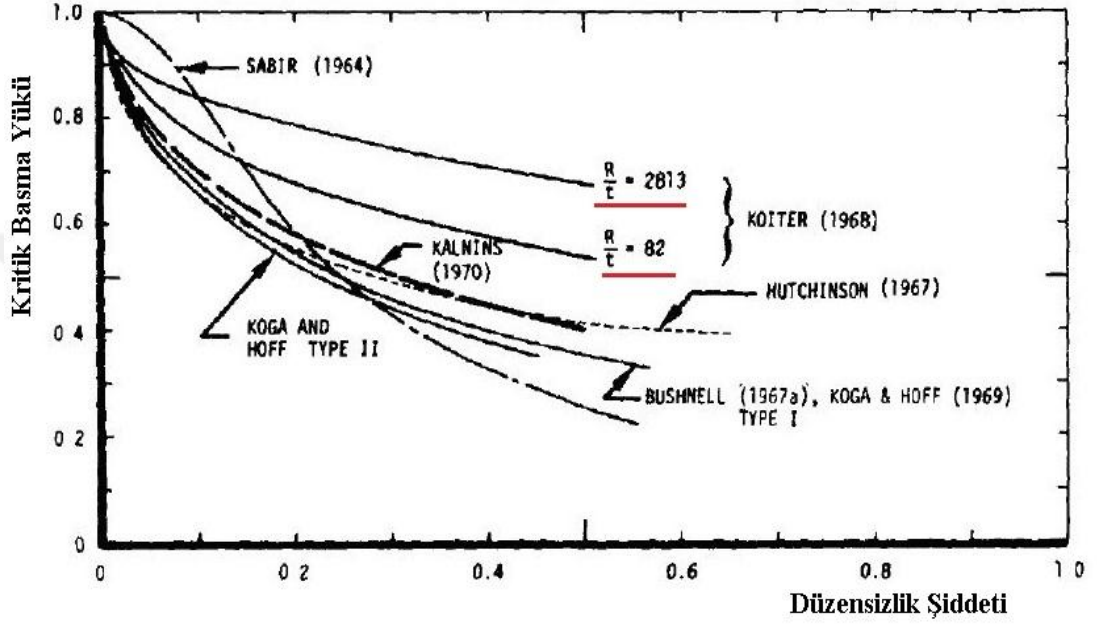
Aşırı malzeme kullanımının ekonomik yönünün dışında bir başka riski de bulunmaktadır. Depolama tankları, silindirik kabuklar olduğu için malzemenin iç düzensizlikleri (hatalar, boşluklar vs) geometrinin ya da konstrüksiyonun beklenmeyen burkulma hasarına uğramasına neden olabilir. Von Karman ve Tsien [5], iç düzensizliklerin malzemenin burkulma dayanımına etkisini inceleyen grafiği aşağıdaki Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Burkulma dayanımına, malzeme iç düzensizliğinin etkisi[5].

Literatür, malzeme içi düzensizliklerin burkulma dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Sürrekli çizgi malzemenin dayanabileceği burkulma yükünü (P_{cl}), kesikli çizgi ise düzensizlikler nedeniyle gerçekten dayanabileceği burkulma yükünü (P_{cr}) göstermektedir. Koiter[6], Von Karman’ın çalışmalarından sonra, malzeme iç düzensizliklerinin burkulma dayanımına etkisini analiz etmiştir.

Malzemenin iç düzensizlikleri, kalınlığa bağlı olarak da araştırılmıştır. Literatürde elde edilen çeşitli çalışmalar Şekil 1.4'deki grafikte gösterilmiştir. Literatürde, kalınlık artışı ile burkulma dayanımının azaldığı bulunmuştur. Grafiğin dikey eksenini P_{cr}/P_{cl} oranını, yatay eksenini ise iç düzensizlik katsayısını göstermektedir. Koiter'in iki farklı R/t oranı ile yaptığı çalışma, kalınlık artışının olumsuz etkisini göstermektedir[7].



Şekil 1.3 : Düzensizlik oranının ve kalınlığın burkulma dayanımına etkisi[7].

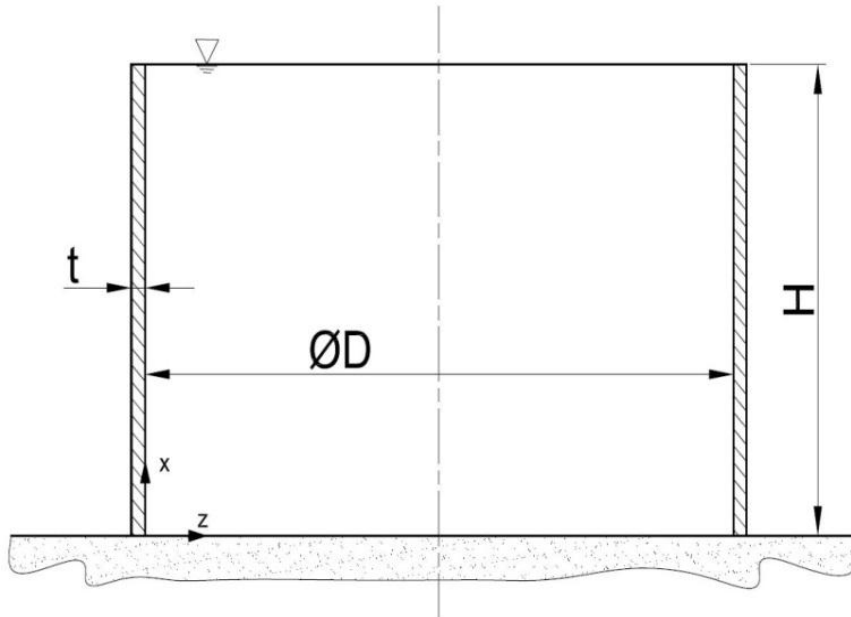
Sıvı depolama tanklarında tasarım, analiz ve imalat konularında araştırmalar günümüzde de sürmektedir. Özellikle deprem, rüzgâr, sıcaklık, korozyon, sıvı basıncının ve buhar basıncının tasarıma etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır[8]. Tasarım maliyetleri, imalat maliyetleri, işletme maliyeti, emniyet, çevre, ürün saklama kapasitesi ve ömrü parametreleri dikkate alındığında sıvı depolama tankları endüstriyel tesislerde en önemli ekipmanlardandır.

1.1 Tezin Amacı

Dikey silindirik depolama tankları tasarımında yaygın olarak kullanılan yöntemler bazı kabuller ve ampirik ifadeler içerdiği için aşırı emniyetli ya da emniyetsiz tasarımlara yol açabilmektedir. Aşırı emniyetli tanklar malzeme maliyetleri, işçilik maliyetleri ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca giriş bölümünde de bahsedildiği üzere cidar kalınlıklarının artması, burkulma dayanımı

açısından sakıncalara da neden olmaktadır. Bunun için tasarımcı mümkün olan minimum tank cidar kalınlığını elde etmelidir. Büyük tanklar için kullanılan yaygın yöntemlerle hesaplanan cidar kalınlıkları bazen gerilme analizleri yapılarak kontrollerden geçirilmelidir. Emniyetsiz olma durumunda tasarım iyileştirilmeleri yapılmalıdır.

Uluslararası kabul edilen standartlardan en yaygın olanı API 650, depolama tanklarının cidar kalınlıklarının hesabı için üç farklı yöntem önermektedir. Birincisi, bir adım yöntemi (one foot method-1FM), gerekli kabuk kalınlığı donam birleşiminden itibaren 0,304m (1ft) mesafede oluşan gerilmeyi hesaplayarak yapmaktadır. Nispeten küçük tanklar için kullanışlı olan bu yöntem tank çapının 60m'yi geçmesiyle maliyetli tasarımlara yol açmaktadır. İkincisi, değişken tasarım noktası yöntemi (variable design point method-VDPM), donam birleşiminden itibaren maksimum gerilmenin oluşacağı mesafeyi 0,304m olarak değil, hesaplayarak bulan bir yöntemdir. Ancak çapı 100m'yi aşan tanklarda bu yöntemin emniyetsiz olma ihtimali vardır[9]. Bu durumda kabullerden ve amprik ifadelerden uzak yeni bir yöntemle tank kabuklarının hesaplanmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Dikey silindirik tanklar için Timoshenko'nun yaklaşımının[10] sayısal olarak çözülmesiyle diğer yöntemlerdeki amprik kabullere ihtiyaç olmadan depolama tankları için cidar kalınlığı ve gerilme dağılımı elde edilebilir.



Şekil 1.4 : Dikey depolama tankı.

$$\frac{d^4w}{dx^4} + 4.\beta^4.w = -\frac{\gamma.(H-x)}{D} \quad (1.1)$$

Bu tez çalışmasında Timoshenko'nun hidrostatik basınç altındaki depolama tankları için yazmış olduğu denklemin sonlu farklar yöntemi ile çözümü yapılacaktır. Deformasyon ve gerilme değerleri incelenerek hali hazırda kullanılan yöntemler ile karşılaştırılması yapılacaktır. Çözüm için kullanılan numerik adımlar bir algoritmaya dönüştürülerek bir bilgisayar programı haline getirilecektir. Elde edilen çözüm koduna arayüz oluşturularak kullanışlı bir yerli tasarım programı haline getirilecek ve tüm kullanıcıların sanayide kolayca ulaşabileceği milli bir yazılım elde edilecektir.

1.2 Literatür Özeti

Azzuni ve Guzey [11], bir adım metodu (1FM), değişken nokta tasarım metodu (VDPM) ile tank cidar kalınlıklarının hesaplandığı tanklarda sonlu elamanlar yardımıyla tank gerilmeleri hesaplanmış ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu iki metodla hesaplanan 27 tank, tank çap, yükseklik ve izin verilen akma dayanımı parametrelerine göre yöntemlerin kullanılabilmesi limitler değerlendirilmiştir. 1FM, API 650 standardında çapı 61m'ye kadar olan tanklarda kullanılabilmesi belirtilmesine karşın, bu çalışmanın sonuçlarında 15m çapa kadar olan tanklarda kullanılması malzeme tasarrufu için uygun olduğu belirtilmiştir. Yine standartta 61m'den büyük çaplı tanklar tanklarda VDPM yöntemi ile tank tasarımı yapmanın uygun olduğu belirtilmesine karşın, 15m'den büyük ve çapı 100'den küçük tanklarda kullanılması tavsiye edilmiştir. Çap değeri 100m'yi aşan tanklarda ise tank kalınlıklarının gerilme analizleri yapılarak tank tasarımının yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Chen ve diğerleri [12], karma silindirik kabuk yöntemi kullanarak oluşturdukları model ile 150.000 m³'lük bir petrol depolama tankının sıvı basıncı altında maruz kaldığı basınç dağılımı hesaplanmıştır. Bu karma yöntemde kısa kabuk metodu ile uzun kabuk metodunun avantajlarının birleştirilmesi yapılmıştır. Uygulaması karışık ama sonuçları gerçeğe yakın olan kısa kabuk yöntemi birinci donam basıncı hesaplanırken kullanılmıştır. Uygulaması kısa kabuk yöntemine göre nispeten basit olan ancak sonuçları hassas olmayan uzun kabuk yöntemi üst donamlara

uygulanmıştır. Oluşturulan model ile 150.000 m³'lük bir petrol depolama tankının gerilme dağılımı hesaplanmıştır. Bu tank üzerinde yapılan deney ile de model sonuçları karşılaştırılmıştır. Model sonuçları ile deney sonuçları % 6,02'lik bir hata ile uyum sağlamaktadır.

Feng ve diğerleri [13], 200.000 m³'lük bir ham petrol depolama tankının optimum kalınlıklarını hesaplamıştır. Üç farklı şema ile oluşturarak, sonlu elemanlar analizi ile bu şemalarda meydana gelen gerilme değerlerini karşılaştırmışlardır. Plaka yüksekliklerini değiştirerek elde edilen tasarımlar ile tank şemaları oluşturulmuştur. Şemalara göre tank kalınlıkları hesaplanması ve minimum malzeme miktarı ile tank kalınlıkları hesaplanmıştır.

Oskouei ve diğerleri [14], çapı 72m, yüksekliği 18,5m olan API 650'ye göre tasarlanan bir depolama tankının cidar üzerindeki gerilme dağılımlarını incelemiştir. Standarttaki daha ince kalınlık veren VDPM yöntemiyle kalınlık hesapları yapılan tankın sonlu elemanlar analizi ile maksimum gerilmenin 6. donamda olduğu görülmüştür. Tank cidar kalınlığı VDPM ile 11,43mm olarak hesaplanan bu bölgede kalınlık artışı yerine ring profiller kaynatılarak donam dayanımı artırılmıştır.

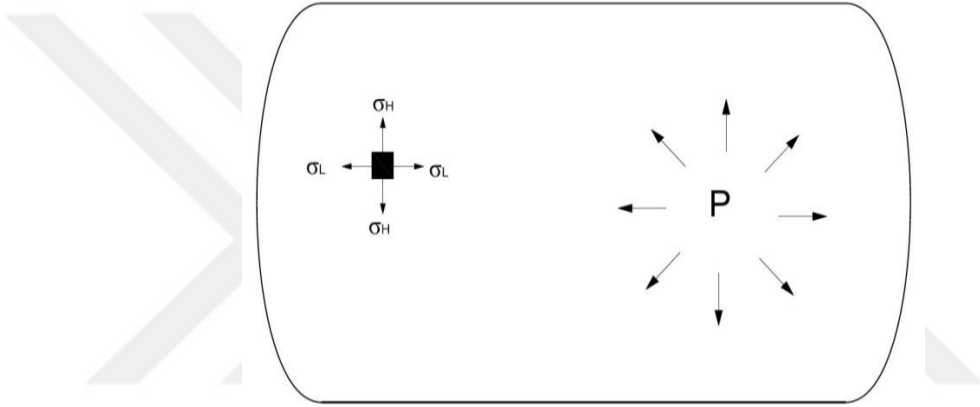
Sanchez ve diğerleri [15], sabit cidar kalınlığına sahip 24,000m³ ve 60,000m³'lük tankların hidrostatik basınç altında yükseklik boyunca deformasyon miktarlarını ve gerilme değerlerini incelemiştir. Maksimum deformasyon değerleri sırasıyla 15 ve 28 mm çıkmıştır. İlk donamda çıkan maksimum deformasyon değerleri, hidrostatik basınç altında ilk donamın en kritik olduğunu göstermiştir.

Zdravkov [16], kapasiteleri sırasıyla 500m³, 10.000m³, 20.000m³ ve 30.000m³'lük olan dört farklı tankı, dört farklı stadandarda göre(API 650, BS 2654, EN 14015, EC-3, 4.2) cidar kalınlıklarının yeterliliğini kontrol edilmiştir. Emniyetsiz olan tanklar için güçlendirici ring profiller hesaplanmıştır. EC-3,4-2 standardı dışındaki standartlara göre hesaplanan cidar kalınlıkları yeterli olduğu görülmüştür. EC-3,4-2 standardına göre yapılacak tanklara ring profiller atılarak cidar yük taşıma kapasiteleri artırılmalıdır.

2. BÜYÜK DEPOLAMA TANKLARININ CİDAR HESAPLAMALARI

2.1 Tank Cidar Hesabı

Basıncılı ve basınçsız tanklarda cidar kalınlığı hesaplamaları en basit haliyle iç basıncın oluşturduğu yükün taşınabileceği cidar kalınlığı hesaplanmasına dayanır.



Şekil 2.1 : Basıncılı tank.

Tank içerisinde sıvı depolanıyorsa, sıvı statik yüksekliğinin etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. İç basınç, sıvı statik basıncı ve emniyet faktörleri birlikte düşünülerek hesaplamalar yapılmalıdır. Tankın silindirik, küresel veya farklı bir geometriye sahip olması, tankın çapı, iç basıncın değeri, statik basınç değeri gerilme değerini değiştirir.

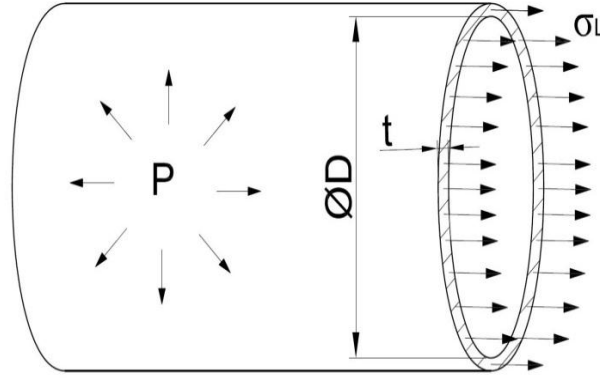
Çevresel(hoop gerilmesi) ve eksenel gerilmeler ile kalınlık hesapları yapılır(Şekil 2.1). Tank çapının cidar kalınlığının 20 katından fazla olduğu tanklar ince cidarlı tanklardır ve gerilme hesapları aşağıdaki gibidir[17].

$$20t < D \quad (2.1)$$

$$10t < R \quad (2.2)$$

2.1.1 Eksenel gerilme

Tank geometrisi Şekil 2.2'deki gibi enine kesit alındığında iç basıncın oluşturduğu yükün, cidar kesit alanı ile dengelenmesiyle hesaplanır. Burada P iç basınç, D tank çapı, t tank cidar kalınlığıdır.



Şekil 2.2 : Eksenel gerilme.

$$\sigma_L \cdot t \cdot \pi D = P \cdot \pi D^2 / 4 \quad (2.3)$$

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D}{4t} \quad (2.4)$$

$$\sigma_L = \frac{P \cdot R}{2t} \quad (2.5)$$

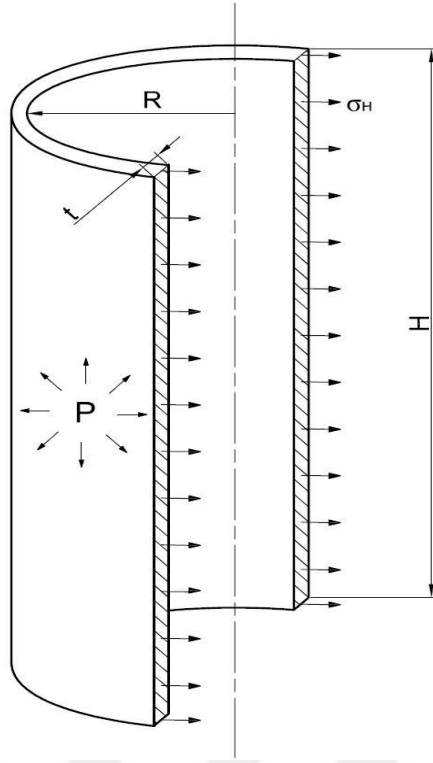
2.1.2 Çevresel gerilme

Tank geometrisi Şekil 2.3'teki gibi boyuna kesit alındığında, serbest cisim diyagramında iç basıncın oluşturduğu yükün, cidar kesit alanı ile dengelenmesiyle hesaplanır. Görüldüğü üzere çevresel gerilme eksenel gerilmenin iki katı çıkmaktadır. Bu nedenle, tank cidar kalınlığı hesabında çevresel gerilme(hoop gerilmesi) hesabı kalınlığı etkileyen gerilmedir. Burada P iç basınç, D tank çapı, H tank yüksekliği, t tank cidar kalınlığıdır.

$$\sigma_H \cdot 2t \cdot H = P \cdot D \cdot H \quad (2.6)$$

$$\sigma_H = \frac{P \cdot D}{2t} \quad (2.7)$$

$$\sigma_H = \frac{P \cdot R}{t} \quad (2.8)$$

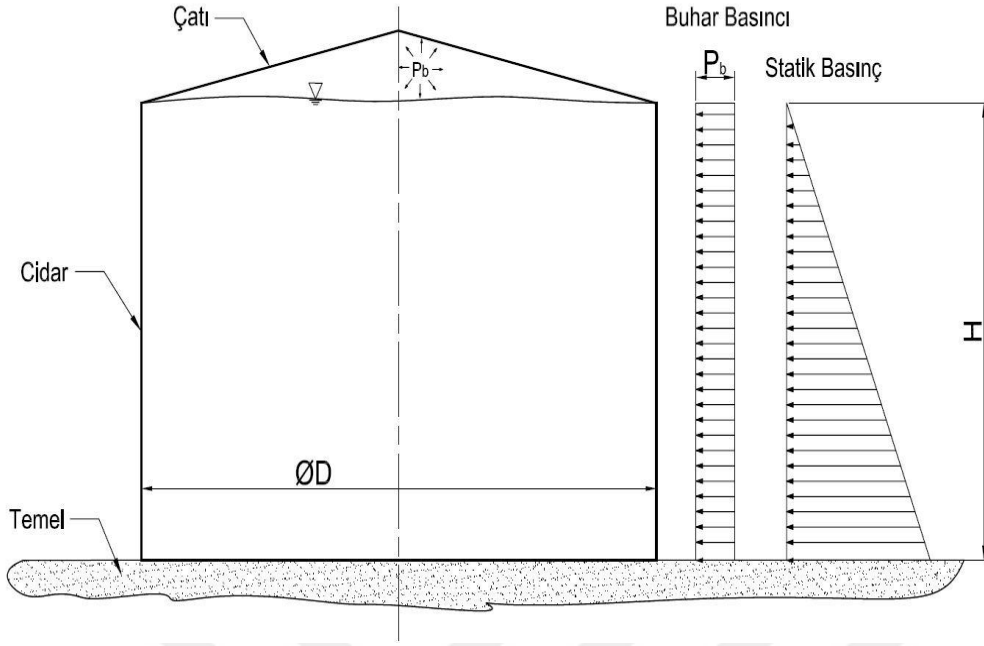


Şekil 2.3 : Çevresel gerilme.

2.2 Bir Adım Yöntemi(1FM)

Depolama tanklarının endüstriyel uygulamalarında(Şekil 2.4) ise tank cidar hesapları yukarıda bahsedilen temele dayansa da tank imalatı ve malzeme maliyet açısından kalınlıklar farklı hesaplanmaktadır.

Silindirik depolama tanklarının alt bölümünde kalınlıklar en büyük, üst noktasında ise kalınlıklar yük olmadığı için en küçük olması gerekir. Bu durum tank imalatını imkânsızlaştırır[18]. Bu nedenle Şekil 2.5'teki gibi kademeli kalınlıklar kullanılmak zorundadır. Her kademeye donam denir. Donam kalınlıkları üzerlerine etkiyen sıvı basıncını taşıyacağı şekilde hesaplanır. Her donam farklı kalınlıklarda olur, böylece kaynaklı imalatı yapılabilen konstrüksiyonlar elde edilir. Böylece donam kalınlık hesaplamasında sıvı yüksekliği bir miktar azaltılabilir. Bu değer ampirik olarak elde edilmiştir ve 1ft (0,304m) olarak kullanılır [19]. Donam kalınlık hesabında sıvı yüksekliğinin değerinden bir adım mesafesi (1ft) çıkarılır. Böylece hesaplanan kalınlıklar daha ince çıkar ve toplam maliyeti azaltır.



Şekil 2.4 : Endüstriyel depolama tankı.

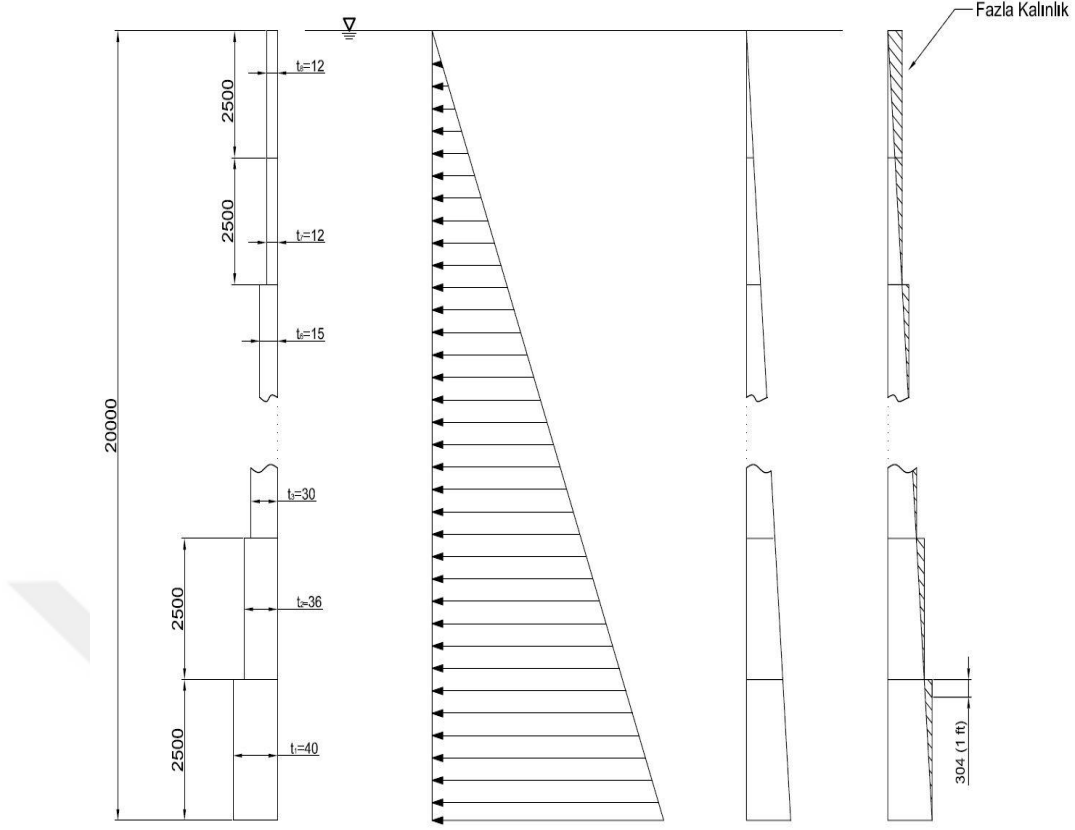
Çevresel gerilme ifadesinde iç basınç yerine sıvı statik basıncı, gerilme ifadesi yerine malzemenin izin verilen akma gerilmesi yazılır. Sıvı yüksekliğinden 1 ft (0,304m) çıkarılıp aşağıdaki ifade elde edilir.

$$t = \frac{4,9D(H - 0,304)SG}{S_d} \quad (2.9)$$

Korozyon payı (CA), depolanan sıvının türüne ve işletme şartlarına göre hesaplanan kalınlığa ilave edilir. Ayrıca ideal bir kaynak yapılamıyorsa, kaynak veriminin (JE) kalınlık hesabına eklenmesi gerekir. Bu durumda kalınlık hesabı:

$$t = \frac{4,9D(H - 0,304)SG}{S_dJE} + CA \quad (2.10)$$

Bu yöntem çapı 61m (200ft)'nin altında olan tankların tasarımında kullanılmaktadır. Bu çapın üzerindeki tanklarda ise bir adım yöntemini kullanmak tasarımda malzeme kullanımının artmasına neden olmakta ve izin verilen malzeme kalınlık limitlerini aşmaktadır. Depolama tanklarında kullanılan ASTM malzemelerin çoğunluğunu 45mm'de sınırlamıştır[19]. Malzeme özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Bu nedenle çapı 61m (200ft)'in üzerindeki tankların tasarımı için farklı bir yaklaşım yapılmaktadır.



Şekil 2.5 : Sıvı basıncının dağılımı ve tank cidarının konstrüksiyonu.

2.3 Değişken Nokta Tasarım Yöntemi(VDPM)

Değişken nokta tasarım yöntemi, bir adım yönteminin kullanılamayacağı kadar büyük olan tanklarda, 1ft(0,304m) mesafesini iterasyon ile hesaplayan bir yöntemdir[19].

$$t = \frac{4,9D(H - x)SG}{S_d} \quad (2.11)$$

Bu yöntemin kullanılması aşağıdaki şarta bağlıdır:

$$D \geq 61m \quad (2.12)$$

Alt donam kalınlığı aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

$$t_1 = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{HSG}{S_d}} \right) \left(\frac{4,9HDSG}{S_d} \right) \quad (2.13)$$

Çizelge 2.1 : Tank sac malzemelerinin mekanik özellikleri[19].

Malzeme	Sınıf	Grup	Minimum Akma(MPa)	Minimum Çekme(MPa)	Sd(MPa)	Kalınlık Sınırı(mm)
A-283	C	1	205	380	137	25,4
A-285	C	1	205	380	137	25,4
A-131,A	A	1	235	400	157	12,7
A-131,B	B	2	235	400	157	25,4
A-36		1	250	490	160	19,05
A-36.Mod		2	250	400	160	38,1
A-131,EH36	EH36	6	360	450	196	44,45
A-573,58	58	3	220	485	147	38,1
A-573,65	65	4	240	380	160	38,1
A-573,70	70	4	290	415	193	38,1
A-516,55	55	3	205	450	137	38,1
A-516,60	60	3	220	485	147	38,1
A-516,65	65	4	240	450	160	38,1
A-516,70	70	4	260	485	173	38,1
A-662,B	B	4	275	450	180	38,1
A-662,C	C	4A	295	485	194	38,1
A-537,1	1	6	345	485	194	44,45
A-537,2	2	6	415	550	220	44,45
A-633,C	C	6	345	485	194	44,45

Kaynak verimi ve korozyon payı eklenirse:

$$t_1 = \left(1,06 - \frac{0,0696D}{H} \sqrt{\frac{HSG}{S_d}} \right) \left(\frac{4,9HDSG}{S_dJE} \right) + CA \quad (2.14)$$

İkinci donam için aşağıdaki oran hesaplanır:

$$\delta = \frac{h_1}{(Rt_1)^{0,5}} \quad (2.15)$$

Hesaplanan değer $\delta \leq 1,375$ ise,

$$t_2 = t_1 \quad (2.16)$$

Hesaplanan değer $\delta \geq 2,625$ ise,

$$t_2 = t_{2a} \quad (2.17)$$

Hesaplanan değer $1,375 \leq \delta \leq 2,625$ ise,

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 \cdot (Rt_1)^{0,5}} \right] \quad (2.18)$$

Kaynak verimi ve korozyon payı eklenirse:

$$t_2 = \left(t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 \cdot (Rt_1)^{0,5}} \right] \right) \frac{1}{JE} + CA \quad (2.19)$$

İkinci donamın kalınlığı bu ifadelerden biriyle belirlenmiş olur. Üçüncü ve üst donamları hesaplamak için yöntemin adını aldığı değişken noktaları hesaplamak gerekmektedir. Üst donam için 2.11 denkleminde t_u kalınlığı hesaplanır, iterasyon için gerekli olan x değerleri hesaplanır[19].

$$x_1 = 0,61(Rt_u)^{0,5} + 320CH \quad (2.20)$$

$$x_2 = 1000CH \quad (2.21)$$

$$x_3 = 1,22(Rt_u)^{0,5} \quad (2.22)$$

Buradaki C katsayısı aşağıdaki ifadeler ile elde edilir:

$$C = [M^{0,5}(M - 1)] / (1 + M^{1,5}) \quad (2.23)$$

$$M = \frac{t_L}{t_u} \quad (2.24)$$

Üst donam için minimum kalınlık hesaplanan x değerlerinin en küçüğü alınarak hesaplanır.

$$t_x = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right) SG}{S_d} \quad (2.25)$$

Elde edilen t_x değeri ile t_u değerine yaklaşıncaya kadar iterasyon devam ettirilir. İstenilen hassasiyet kadar yaklaşıncaya elde edilen kalınlık üst donam yani üçüncü donam kalınlığı olarak kullanılır.

Korozyon payı, depolanan sıvının türüne ve işletme şartlarına göre hesaplanan kalınlığa ilave edilir. Ayrıca ideal bir kaynak yapılamıyorsa, kaynak veriminin kalınlık hesabına eklenmesi gerekir. Bu durumda kalınlık hesabı:

$$t_x = \frac{4,9D \left(H - \frac{x}{1000} \right) SG}{S_d J E} + CA \quad (2.26)$$

Tank çapı 100m'yi aşmasıyla birlikte bu yöntemle elde edilen tanklarda aşırı gerilmeler meydana gelebilmektedir[11]. Bu şartlarda tank tasarımı sayısal analiz yöntemleri ile kontrol edilmeli, daha sonra nihai kalınlıklara karar verilmelidir.

2.4 Elastik Analiz ile Kalınlıkların Belirlenmesi

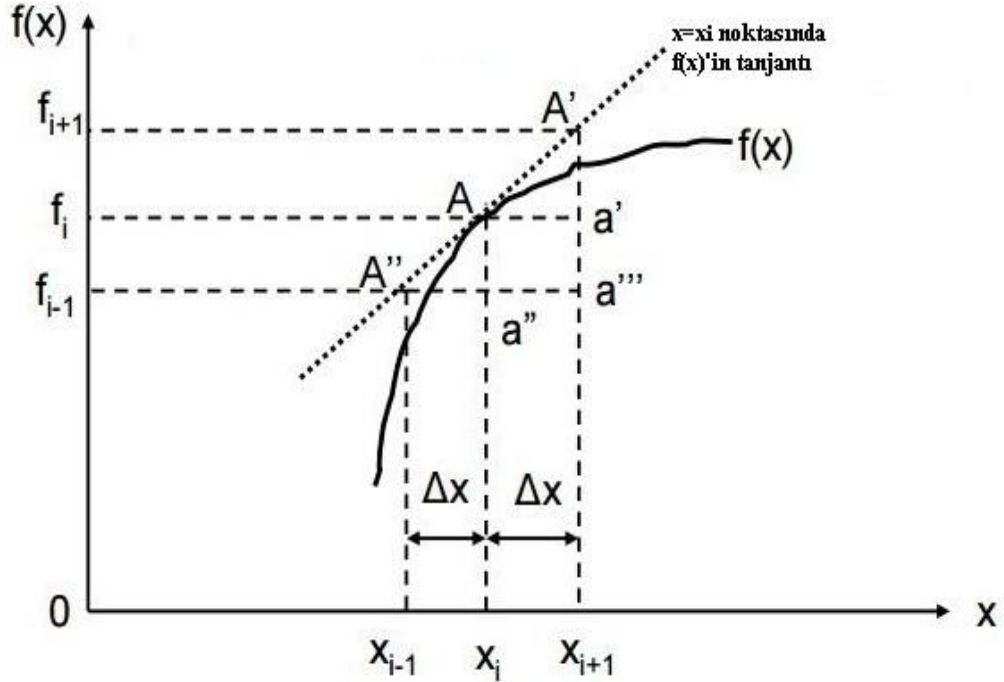
Tank çapı 100m'ye geçtiğinde, bir adım yöntemi, kalınlıkların olması gerekenden daha yüksek çıkmasına neden olduğu için tercih edilmez. Değişken tasarım yöntemi ise güvenilir değildir. Gerekli kalınlıkların daha azının çıkmasına neden olabilir[19]. Bu durumda tankın hasara uğraması, maddi ve manevi kayıplara neden olacaktır. Böyle tanklar için kalınlıkların hesabı, ampirik ifadeler ve kabullerden oluşan yöntemlerin oluşturduğu belirsizliği ortadan kaldıran bir yaklaşımla yapılması gerekir.

3. SFY İLE TIMOSHENKO'NUN DENKLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

3.1 Giriş

Fonksiyonların analitik olarak verildiği durumlarda, istenilen noktalardaki fonksiyon değerlerini hesaplamak fonksiyonun belirli noktalarında istenilen mertebeden türevlerini bulmak ya da fonksiyonun belirli aralıklardaki integrallerini hesaplamak kolaylıkla yapılabilmektedir.

Fonksiyonların bazı ayırık noktalardaki değerleri belli iken bu tür hesaplamalar sonlu farklar aritmetiği kullanılarak yaklaşık olarak yapılabilmektedir. Analitik çözümlerin belli olduğu durumlarda bile, yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerin sonlu farklar kullanımı ile çözüm kolaylığı açısından tercih edilebilmektedir[20].



Şekil 3.1 : Sonlu farklar yöntemi[20].

Diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu farklar yönteminin uygulanması için ilk adım bilinmeyen büyüklüğü temsil eden fonksiyonun ayrıklaştırılmasıdır. Buna göre

bir boyutlu $f(x)$ fonksiyonun eşit Δx aralıklarla n adet ayrık parçalara bölünmesi sonucunda, diferansiyel denklem ayrık hale getirilebilir.

$f(x)$ Fonksiyonu $x = x_i$ civarında Taylor serisine açılırsa[21]:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(x_i)}{n!} (x - x_i)^n = f(x)|_{x=x_i} + f'(x)|_{x=x_i}(x - x_i) + \dots \quad (3.1)$$

$x_{i+1} - x_i = \Delta x$ olmak üzere $x = x_i + \Delta x$ noktasında Taylor serisi:

$$f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + f'(x_i)\Delta x + \frac{\Delta x^2}{2!}f''(x_i) + \dots \quad (3.2)$$

Birinci mertebe türevi yalnız bırakılırsa ileri fark yaklaşımını elde edilir:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.3)$$

$x_i - x_{i-1} = \Delta x$ olmak üzere $x = x_i - \Delta x$ noktasında Taylor serisi:

$$f(x_i - \Delta x) = f(x_i) - f'(x_i)\Delta x + \frac{\Delta x^2}{2!}f''(x_i) - \dots \quad (3.4)$$

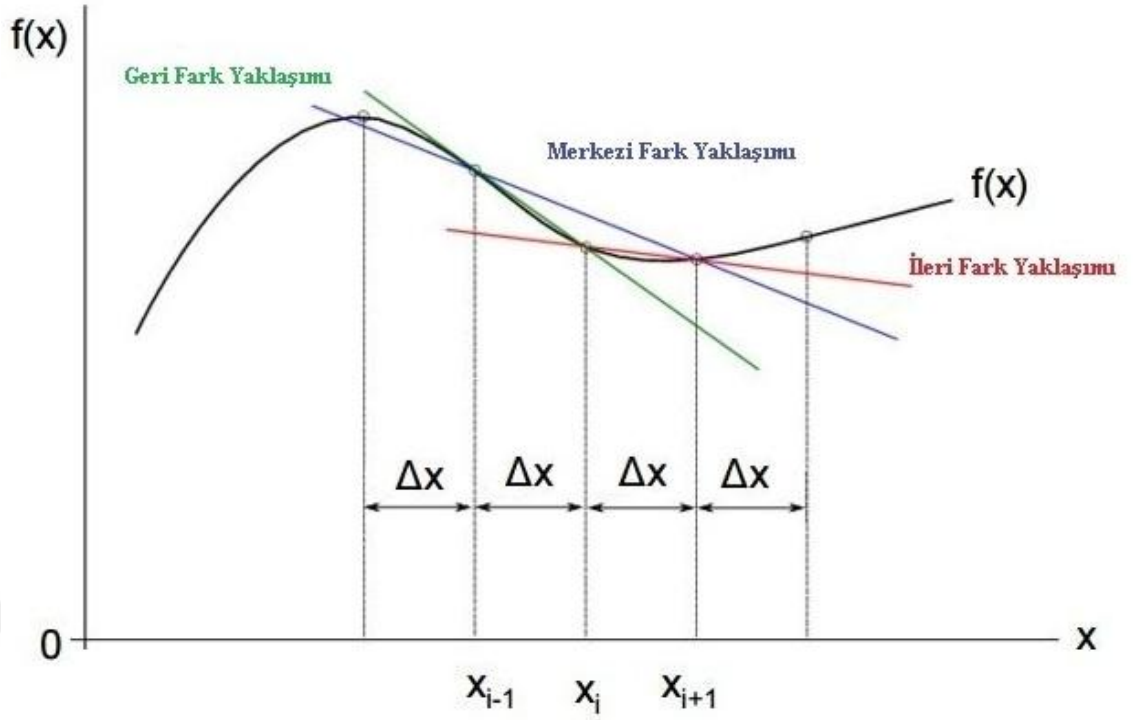
Birinci mertebe türevi yalnız bırakılırsa geri fark yaklaşımını elde edilir:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_i - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.5)$$

İleri farklar(3.3) ile geri farklar(3.5) toplanırsa merkezi farklar formu elde edilir:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (3.6)$$

İleri fark yaklaşımı, geri fark yaklaşımı ve merkezi fark yaklaşımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. İkinci, üçüncü ve yüksek mertebeden diferansiyel denklemler için Taylor serisi açılıp, gerekli eşitlikler çözüm için elde edilebilir. Böylece çözümü zor ve karmaşık olan denklemler, makul bir yakınsaklıkla kolayca ve hızlı bir şekilde çözülebilir[22].



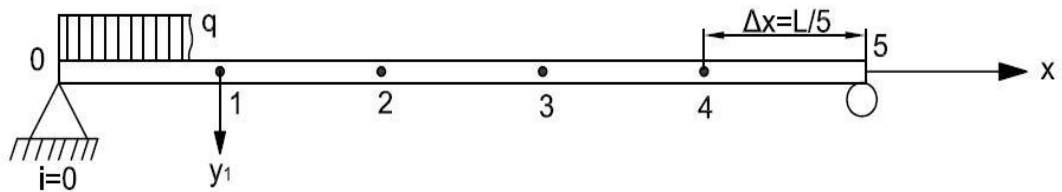
Şekil 3.2 : Geri fark, merkezi fark ve ileri fark yaklaşımları[21].

3.2 Yöntemin Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Sonlu farklar yöntemi, ısı yayılım denklemlerinin çözümü, elektromanyetik kuvvet denklemleri, yapısal analiz yapılan yerlerde, lineer olmayan sistemlerde ve yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanım kolaylığı ile tercih edilen bir yöntemdir[23].

3.2.1 Basit kirişte deformasyonun SFY ile hesaplanması

Şekil 3.3'te verilen L uzunluğunda, üzerinde q yayılı yükü etkileyen basit kirişte deformasyon hesabı sonlu farklar yöntemi ile yapılabilir. Mesnetlerinden bir tanesi sabit, diğeri ise kayıcı mesnettir.



Şekil 3.3 : Basit kirişe SFY uygulanması.

Moment ifadesi:

$$EI \frac{d^2 w}{dx^2} = M \quad (3.11)$$

Kesme kuvveti:

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (3.12)$$

Yayıllı yük:

$$q = \frac{dV}{dx} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki üç denklemden ifadeler birbiri yerine yazıldığında yayıllı yük ifadesi:

$$q = EI \frac{d^4 w}{dx^4} \quad (3.14)$$

Şeklinde elde edilir. İleri ve geri farklar yazılarak dördüncü derece ifade, çözümü için denklem takımları elde edilir.

İleri fark için:

$$w_{(i+1)} = w_{(i)} + \Delta x \frac{dw}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{d^2 w}{dx^2} + \dots \quad (3.15)$$

Geri fark için:

$$w_{(i-1)} = w_{(i)} - \Delta x \frac{dw}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{d^2 w}{dx^2} + \dots \quad (3.16)$$

Denklemlerin farkı alınırsa birinci türev elde edilir,

$$w_{(i+1)} - w_{(i-1)} = 2\Delta x \frac{dw}{dx} + [hata] \quad (3.17)$$

Böylece birinci mertebe türev;

$$\frac{dw}{dx} = \frac{w_{(i+1)} - w_{(i-1)}}{2\Delta x} \quad (3.18)$$

Denklemler toplanırsa ikinci mertebe türev elde edilir;

$$w_{(i+1)} + w_{(i-1)} = 2w_{(i)} + \Delta x^2 \frac{d^2 w}{dx^2} + [hata] \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{w_{(i+1)} - 2w_{(i)} + w_{(i-1)}}{\Delta x^2} \quad (3.20)$$

Üçüncü mertebe türev için, ikinci mertebe türevin türevi alınır,

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{d}{dx} \left[\frac{d^2 w}{dx^2} \right] \quad (3.21)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{1}{2\Delta x} \left[\frac{d^2 w}{dx^2} (i+1) - \frac{d^2 w}{dx^2} (i-1) \right] \quad (3.22)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{1}{2\Delta x} \left[\frac{w_{(i+2)} - 2w_{(i+1)} + w_{(i,j)}}{\Delta x^2} - \frac{w_{(i,j)} - 2w_{(i-1)} + w_{(i-2)}}{\Delta x^2} \right] \quad (3.23)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{1}{2\Delta x} \left[\frac{w_{(i+2)} - 2w_{(i+1)} + 2w_{(i-1)} - w_{(i-2)}}{\Delta x^2} \right] \quad (3.24)$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{w_{(i+2)} - 2w_{(i+1)} + 2w_{(i-1)} - w_{(i-2)}}{2\Delta x^3} \quad (3.25)$$

Dördüncü mertebe türev için, ikinci mertebe türevin ikinci türevi alınır,

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{d^2}{dx^2} \left[\frac{d^2 w}{dx^2} \right] \quad (3.26)$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{\Delta x^2} \left[\frac{d^2 w}{dx^2} (i+1) - 2 \frac{d^2 w}{dx^2} (i) + \frac{d^2 w}{dx^2} (i-1) \right] \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{\Delta x^2} \left[\frac{w_{(i+2)} - 2w_{(i+1)} + w_{(i)}}{\Delta x^2} - 2 \frac{w_{(i+1)} - 2w_{(i)} + w_{(i-1)}}{\Delta x^2} \right. \\ \left. + \frac{w_{(i)} - 2w_{(i-1)} + w_{(i-2)}}{\Delta x^2} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{\Delta x^4} [w_{(i-2)} - 4w_{(i-1)} + 6w_{(i)} - 4w_{(i+1)} + w_{(i+2)}] \quad (3.29)$$

Böylece dördüncü dereceden ifade elde edilmiş olur. Bu ifade denklem 3.14'te yerine yazılır ve i değerleri 1'den 4'e kadar yazılarak doğrusal denklem takımı elde edilir.

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q \quad (3.30)$$

$$\Delta x = L/5 \quad (3.31)$$

i=1 için;

$$\frac{EI}{(L/5)^4} [w_{-1} - 4w_0 + 6w_1 - 4w_2 + w_3] = R_1 \quad (3.30)$$

$$R_1 = qL/5 \quad (3.31)$$

i=2 için;

$$\frac{EI}{(L/5)^4} [w_0 - 4w_1 + 6w_2 - 4w_3 + w_4] = R_2 \quad (3.32)$$

$$R_2 = qL/5 \quad (3.33)$$

i=3 için;

$$\frac{EI}{(L/5)^4} [w_1 - 4w_2 + 6w_3 - 4w_4 + w_5] = R_3 \quad (3.34)$$

$$R_3 = qL/5 \quad (3.35)$$

i=4 için;

$$\frac{EI}{(L/5)^4} [w_2 - 4w_3 + 6w_4 - 4w_5 + w_6] = R_4 \quad (3.36)$$

$$R_4 = qL/5 \quad (3.37)$$

Mesnet noktalarında(x=0, x=L) moment değeri sıfıra eşittir.

$$EI \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad (3.38)$$

$$EI \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{w_{(i+1)} - 2w_{(i)} + w_{(i-1)}}{\Delta x^2} \quad (3.39)$$

i=0 için, $w_0=0$,

$$\frac{w_1 - 2w_0 + w_{-1}}{\Delta x^2} = 0 \quad (3.40)$$

$$w_1 = w_{-1} \quad (3.41)$$

i=5 için, $w_5=0$,

$$\frac{w_6 - 2w_5 + w_4}{\Delta x^2} = 0 \quad (3.42)$$

$$w_6 = -w_4 \quad (3.43)$$

Doğrusal denklem takımı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} 5 & -4 & 1 & 0 \\ -4 & 6 & -4 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 \\ 0 & 1 & -4 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q \\ q \\ q \\ q \end{bmatrix} \frac{(L/5)^3}{EI} \quad (3.44)$$

Yayıllı yük $q=100$ N/m, $L=1$ m, $E=210 \times 10^9$ Pa, çubuk ebatları 20×20 mm olduğu için $I=106,67 \times 10^{-9}$ m⁴ alındığında[24], çözüm aşağıdadır.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,03571 \\ 0,05714 \\ 0,05714 \\ 0,03517 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Aynı zamanda analitik çözümü ve Pro/Mechanica'da sonlu elemanlar ile yapılan sonuçları aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Analitik çözüm, SFY çözümü ve Pro-Mechanica çözümü.

Nokta	Analitik Çözüm	SFY Çözümü	Pro/Mechanica
w_1	0,0360	0,0357	0,0364

Pro/Mechanica çözümünde 394 denklem ile çözüm yapılmıştır, bunun yanında sonlu farklar yöntemi ile sadece 4 denklem ile çözüm elde edilmiştir. Analitik çözüm ile SFY çözümü arasındaki %0,8 fark bulunmaktadır. Analitik çözüm ile Pro/Mechanica

çözümü arasında ise %-1,1 fark bulunmaktadır. MATLAB kodu EK A1’de verilmiştir.

3.2.2 Sınır değer probleminin SFY ile çözülmesi

İkinci dereceden bir diferansiyel denklemin çözümünde, sonlu farklar yöntemi kullanılabilir. Diferansiyel denklem daha önceki sayfalarda anlatıldığı gibi Taylor serisinde ikinci mertebe türeve kadar açılarak ileri fark, geri fark ve merkezi fark denklemleri elde edilir.

İkinci türev denklemden çekilerek, doğrusal denklem sistemi elde edilir[25].

$$8 \frac{d^2y}{dx^2} - 2 \frac{dy}{dx} - y + x = 0 \quad (3.46)$$

$$y(0) = 5 \quad (3.47)$$

$$y(20) = 8 \quad (3.48)$$

Yukarıda verilen diferansiyel denklem ve sınır değerleri ile $\Delta x=2$ alarak çözümünü gerçekleştirelim. Verilen sınır değerlerinden anlaşıldığı üzere x aralığı 0’den 20’ye kadar değişmektedir. $\Delta x=2$ olduğu için, bu aralık on eşit parçaya bölünür ve on bir noktadan oluşur.

Birinci mertebe türev için:

$$\frac{dy}{dx}(x_i) = \frac{y(x_i + \Delta x) - y(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.49)$$

İkinci mertebe türev için

$$\frac{d^2y}{dx^2}(x_i) = \frac{y(x_i + \Delta x) - 2y(x_i) + y(x_i - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (3.50)$$

Birinci mertebe türev(3.49) ile ikinci mertebe türev(3.50) verilen diferansiyel denklemde yerine yazılıp;

$$8 \frac{y(x_i + \Delta x) - 2y(x_i) + y(x_i - \Delta x)}{\Delta x^2} - 2 \frac{y(x_i + \Delta x) - y(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} - y(x_i) + x_i = 0 \quad (3.51)$$

Katsayılar düzenlenirse;

$$y_{i+1} = y(x_i + \Delta x) \quad (3.52)$$

$$y_i = y(x_i) \quad (3.53)$$

$$y_{i-1} = y(x_i - \Delta x) \quad (3.54)$$

3.51 Denklemi tekrar yazılırsa:

$$8 \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} - \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\Delta x} - y_i + x_i = 0 \quad (3.55)$$

Katsayıları düzenlenirse:

$$\left(\frac{8}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta x}\right)y_{i-1} - \left(\frac{16}{\Delta x^2} + 1\right)y_i + \left(\frac{8}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta x}\right)y_{i+1} = -x_i \quad (3.56)$$

$$a = \left(\frac{8}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta x}\right) \quad (3.57)$$

$$b = \left(\frac{16}{\Delta x^2} + 1\right) \quad (3.58)$$

$$c = \left(\frac{8}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta x}\right) \quad (3.59)$$

$$a = 2,5 \quad (3.60)$$

$$b = 5 \quad (3.61)$$

$$c = 1,5 \quad (3.62)$$

$$2,5y_{i-1} - 5y_i + 1,5y_{i+1} = -x_i \quad (3.63)$$

$$x_i = i \cdot \Delta x \quad (3.64)$$

x eksenini 0'dan 20'ye kadar değişmektedir. $\Delta x=2$ olduğu için, bu aralık on eşit parçaya bölünür ve on bir noktadan oluşur. $i=1 \dots 10$

$i=1$ için;

$$2,5y_0 - 5y_1 + 1,5y_2 = -x_1 \quad (3.65)$$

$$x_1 = 2 \quad (3.66)$$

$$2,5y_0 = 12,5 \quad (3.67)$$

$i=2$ için;

$$2,5y_1 - 5y_2 + 1,5y_3 = -x_2 \quad (3.68)$$

$$x_2 = 4 \quad (3.69)$$

$i=3$ için;

$$2,5y_2 - 5y_3 + 1,5y_4 = -x_3 \quad (3.70)$$

$$x_3 = 6 \quad (3.71)$$

...

$i=8$ için;

$$2,5y_7 - 5y_8 + 1,5y_9 = -x_8 \quad (3.72)$$

$$x_8 = 16 \quad (3.73)$$

$i=9$ için;

$$2,5y_8 - 5y_9 + 1,5y_{10} = -x_9 \quad (3.74)$$

$$x_9 = 18 \quad (3.75)$$

$$1,5y_{10} = 12 \quad (3.76)$$

Bu değerlere göre aşağıdaki lineer cebirsel denklem takımı elde edilir:

$$\begin{bmatrix} -b & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & -b & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & -b & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & -b & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & -b & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & -b & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & -b & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & -b & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - 2,5y_0 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 - 1,5y_{10} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Katsayılar yerine yazıldığında:

$$\begin{bmatrix} -5 & 1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2,5 & -5 & 1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,5 & -5 & 1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,5 & -5 & 1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,5 & -5 & 1,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,5 & -5 & 1,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,5 & -5 & 1,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,5 & -5 & 1,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,5 & -5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -14,5 \\ -4 \\ -6 \\ -8 \\ -10 \\ -12 \\ -14 \\ -16 \\ -30 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Bu denklemi sayısal olarak çözen ve analitik çözümle karşılaştıran bir MATLAB programı yazılmıştır. Sonuçlar bir Çizelge 3.2’de ve Şekil 3.4’te gösterilmektedir. MATLAB kodu EK A2’de verilmiştir.

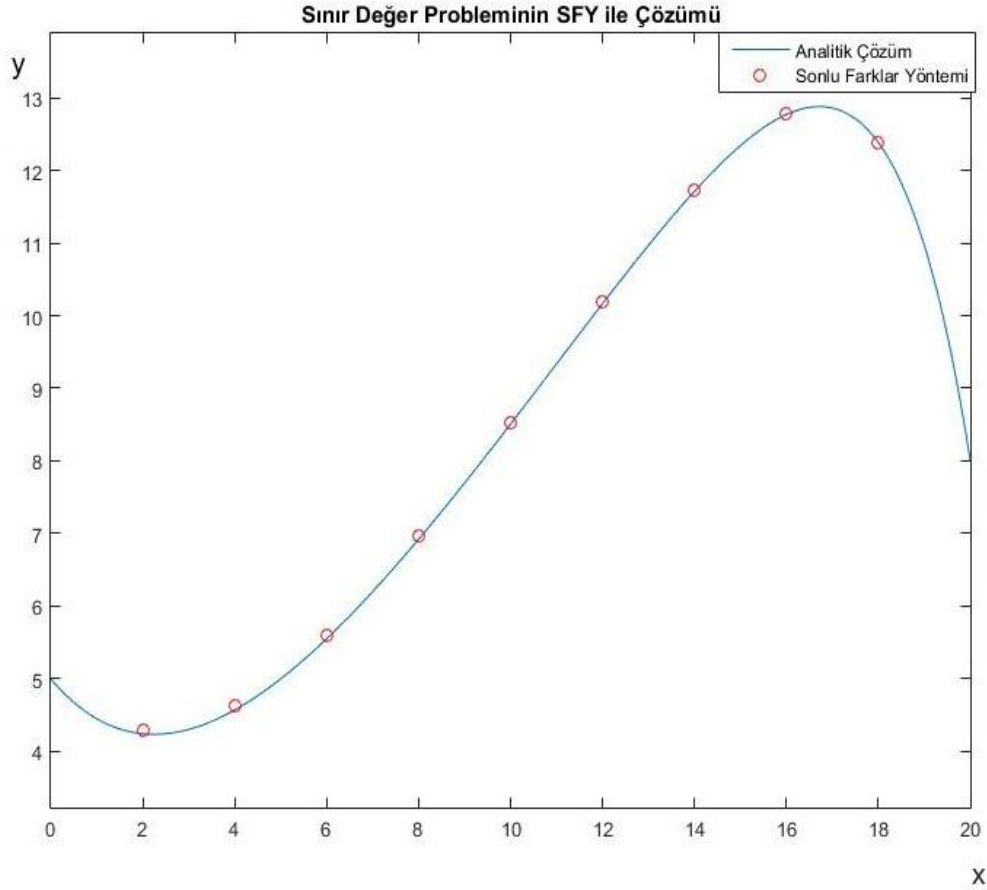
Çizelge 3.2 : Analitik çözüm ile sonlu farklar çözümü.

Nokta	Analitik Çözüm	Sonlu Farklar Çözümü	%Fark
1	4,2448	4,2871	-0,3314
2	4,5720	4,6236	-0,4041
3	5,5529	5,6001	-0,3697
4	6,9225	6,9610	-0,3011
5	8,5069	8,5364	-0,2309
6	10,1645	10,1865	-0,1718
7	11,7112	11,7275	-0,1278
8	12,7685	12,7809	-0,0971
9	12,3816	12,3904	-0,0691

n değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : n sayısına bağlı olarak farkın değişimi.

n	Analitik Çözüm	Sonlu Farklar Çözümü	%Fark	Süre(s)
10	4,5720	4,6236	-0,404	1,917
50	4,5720	4,5728	-0,017	2,163
100	4,5720	4,5722	-0,004	2,520
200	4,5720	4,5721	-0,001	3,021
500	4,5720	4,5721	-0,001	4,830
1000	4,5720	4,5721	-0,001	7,907



Şekil 3.4 : Analitik çözüm ile sonlu farklar çözümü.

3.3 Sonlu Farklar Yönteminin Silindirik Tanklar için Uygulanması

Dikey silindirik depolama tankları için yazılan genel denkleme sonlu farklar yöntemi uygulanırsa, dördüncü derece diferansiyel denklem lineer denklem takımına dönüştürülür ve çözümlemesi yapılabilir. Dikey silindirik tanklar için Timoshenko'nun denklemi:

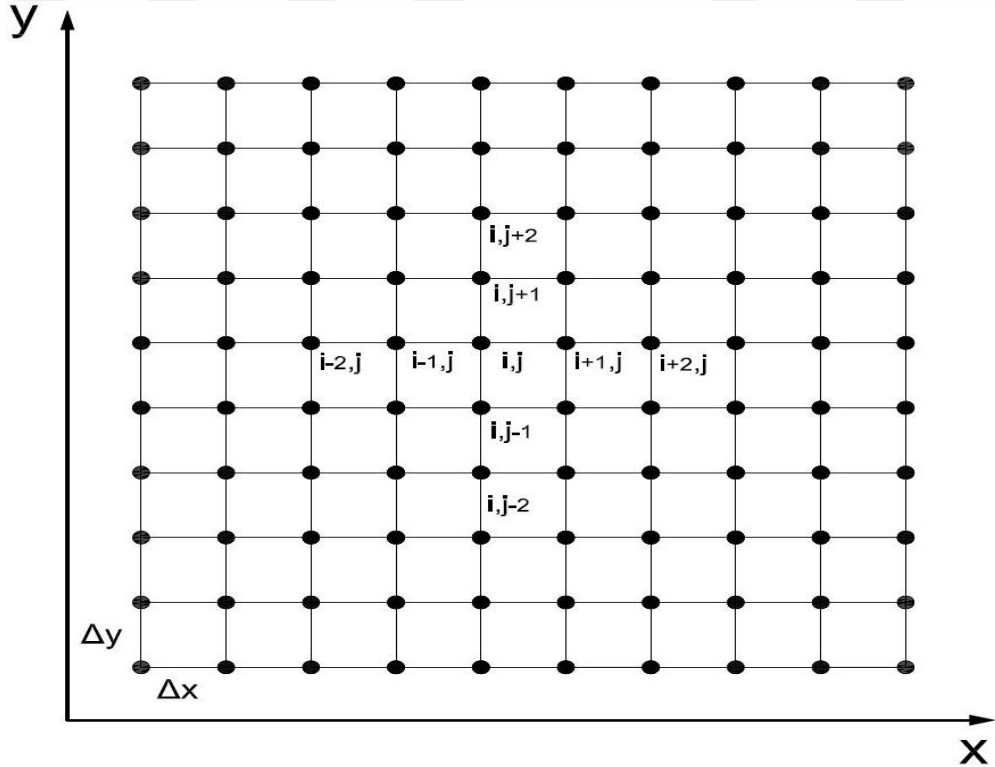
$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4.\beta^4 . w = -\frac{\gamma . (H - y)}{D} \quad (3.79)$$

Deformasyon tank cidarında iki boyutlu olarak $w=w(x,y)$ yazılır, yatay eksen sabit olacağı için $w=w(y)$ şeklinde denklem takımı oluşturulur.

Oluşturulacak model için yapılan kabuller:

- Plaka malzemeleri lineer elastiktir ve Hook yasasına uygun davranır.
- Plaka malzemeleri her bölgede homojen ve izotropiktir.
- Elastik deformasyon karakteri elastiklik modülüne ve poisson oranına uygun olarak davranır.
- Plaka kalınlığı, plakanın diğer boyutlarına(çap yükseklik, uzunluk vs) göre çok küçüktür. Büyük depolama tankları için $R/t > 1000$ [26].
- Plaka kesitinde kayma gerilmeleri ihmalidir.
- Düşünülen depolama tankları için, plakalara en alt noktadan (yükseklik=0) basit mesnetlidir. Deformasyon ve moment değerleri sıfırdır. Düşeyde hareket yoktur. En yüksek bölgede(yükseklik=tank yüksekliği) ise kayıcı mesnetlidir. Deformasyon ve moment sıfır, düşey hareket edebilir.

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi tank cidarı x ve y koordinatlarında eşit aralıklara ayrılıp sonlu farklar yöntemi uygulanır. (i,j) noktası civarında Taylor açılımı yapılırsa;



Şekil 3.5 : Tank cidarının sonlu farklara ayrılması.

$$w_{(i,j+1)} = w_{(i,j)} + \Delta y \frac{dw}{dy} + \frac{\Delta y^2}{2!} \frac{d^2 w}{dy^2} - \dots \quad (3.80)$$

$$w_{(i,j-1)} = w_{(i,j)} - \Delta y \frac{dw}{dy} + \frac{\Delta y^2}{2!} \frac{d^2 w}{dy^2} + \dots \quad (3.81)$$

Denklemlerin farkı alınırsa birinci mertebe türev elde edilir,

$$w_{(i,j+1)} - w_{(i,j-1)} = 2\Delta y \frac{dw}{dy} + [hata] \quad (3.82)$$

Böylece birinci mertebe türev;

$$\frac{dw}{dy} = \frac{w_{(i,j+1)} - w_{(i,j-1)}}{2\Delta y} \quad (3.83)$$

Denklemler toplanırsa ikinci türev elde edilir;

$$w_{(i,j+1)} + w_{(i,j-1)} = 2w_{(i,j)} + \Delta y^2 \frac{d^2 w}{dy^2} + [hata] \quad (3.84)$$

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = \frac{w_{(i,j+1)} - 2w_{(i,j)} + w_{(i,j-1)}}{\Delta y^2} \quad (3.85)$$

Üçüncü mertebe türev için, ikinci türevin türevi alınır,

$$\frac{d^3 w}{dy^3} = \frac{d}{dy} \left[\frac{d^2 w}{dy^2} \right] \quad (3.86)$$

$$\frac{d^3 w}{dy^3} = \frac{w_{(i,j+2)} - 2w_{(i,j+1)} + 2w_{(i,j-1)} - w_{(i,j-2)}}{2\Delta y^3} \quad (3.87)$$

Dördüncü mertebe türev için, ikinci türevin ikinci türevi alınır,

$$\frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{d^2}{dy^2} \left[\frac{d^2 w}{dy^2} \right] \quad (3.88)$$

$$\frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{1}{\Delta y^4} [w_{(i,j-2)} - 4w_{(i,j-1)} + 6w_{(i,j)} - 4w_{(i,j+1)} + w_{(i,j+2)}] \quad (3.89)$$

Dikey silindirik tanklar için Timoshenko'nun denklemi tekrar yazılır ve dördüncü mertebe türev ile diğer katsayılar yerine yazılır:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4 \cdot \beta^4 \cdot w = -\frac{\gamma \cdot (H - y)}{D} \quad (3.90)$$

$$\frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{1}{\Delta y^4} [w_{(i,j-2)} - 4w_{(i,j-1)} + 6w_{(i,j)} - 4w_{(i,j+1)} + w_{(i,j+2)}] \quad (3.91)$$

$$\beta^4 = \frac{E \cdot t}{4R^2 D} = \frac{3(1 - \nu^3)}{R^2 t^2} \quad (3.92)$$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^3)} \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta y^4} [w_{(i,j-2)} - 4w_{(i,j-1)} + 6w_{(i,j)} - 4w_{(i,j+1)} + w_{(i,j+2)}] \\ + 4\beta^4 w_{(i,j)} = -\frac{\gamma \cdot (H - y_j) 12(1 - \nu^3)}{E \cdot t^3} \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} w_{(i,j-2)} - 4w_{(i,j-1)} + (6 + 4\beta^4 \Delta y^4) w_{(i,j)} - 4w_{(i,j+1)} + w_{(i,j+2)} \\ = -\frac{\gamma \cdot (H - y_j) 12(1 - \nu^3)}{E \cdot t^3} \Delta y^4 \end{aligned} \quad (3.95)$$

Katsayıları sadeleştirip düzenlersek,

$$aw_{(i,j-2)} + bw_{(i,j-1)} + cw_{(i,j)} + dw_{(i,j+1)} + ew_{(i,j+2)} = K(H - y_j) \quad (3.96)$$

$$a = 1 \quad (3.97)$$

$$b = -4 \quad (3.98)$$

$$c = 6 + 4\beta^4 \Delta y^4 \quad (3.99)$$

$$d = -4 \quad (3.100)$$

$$e = 1 \quad (3.101)$$

$$K = -\frac{\gamma \cdot 12(1 - \nu^3)}{E \cdot t^3} \Delta y^4 \quad (3.102)$$

$$y_j = j \cdot \Delta y \quad (3.103)$$

Tank yüksekliği 0'dan H'ya kadar değişmektedir. Bu aralık n eşit parçaya bölünür ve n+1 noktadan oluşur(j=0...n). Her bir nokta için elde edilen lineer denklem yazılır:

j=1 için;

$$y_1 = \Delta y \quad (3.104)$$

$$aw_{(i,-1)} + bw_{(i,0)} + cw_{(i,1)} + dw_{(i,2)} + ew_{(i,3)} = K(H - \Delta y) \quad (3.105)$$

j=2 için;

$$y_2 = 2\Delta y \quad (3.106)$$

$$aw_{(i,0)} + bw_{(i,1)} + cw_{(i,2)} + dw_{(i,3)} + ew_{(i,4)} = K(H - 2\Delta y) \quad (3.107)$$

j=3 için;

$$y_3 = 3\Delta y \quad (3.108)$$

$$aw_{(i,1)} + bw_{(i,2)} + cw_{(i,3)} + dw_{(i,4)} + ew_{(i,5)} = K(H - 3\Delta y) \quad (3.109)$$

j=4 için;

$$y_4 = 4\Delta y \quad (3.110)$$

$$aw_{(i,2)} + bw_{(i,3)} + cw_{(i,4)} + dw_{(i,5)} + ew_{(i,6)} = K(H - 4\Delta y) \quad (3.111)$$

...

j=n-2 için;

$$y_{n-2} = (n - 2)\Delta y \quad (3.112)$$

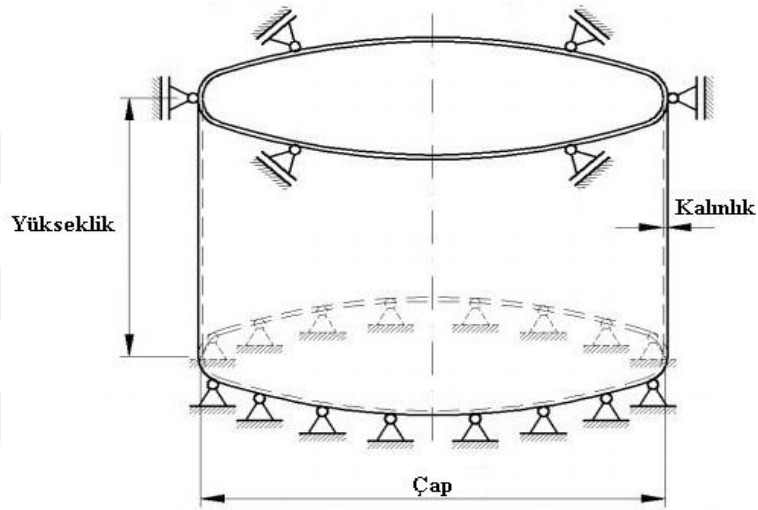
$$\begin{aligned} &aw_{(i,n-4)} + bw_{(i,n-3)} + cw_{(i,n-2)} + dw_{(i,n-1)} + ew_{(i,n)} \\ &= K(H - (n - 2)\Delta y) \end{aligned} \quad (3.113)$$

j=n-1 için;

$$y_{n-1} = (n - 1)\Delta y \quad (3.114)$$

$$\begin{aligned} aw_{(i,n-3)} + bw_{(i,n-2)} + cw_{(i,n-1)} + dw_{(i,n)} + ew_{(i,n+1)} \\ = K(H - (n - 1)\Delta y) \end{aligned} \quad (3.115)$$

Tankın mesnetleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Mesnet noktalarında(j=0, j=n) moment değeri sıfıra eşittir.



Şekil 3.6 : Tank mesnet koşulları[16].

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{w_{(j+1)} - 2w_{(j)} + w_{(j-1)}}{\Delta y^2} \quad (3.116)$$

j=0 için, $w_0=0$,

$$\frac{w_1 - 2w_0 + w_{-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (3.117)$$

$$w_1 = -w_{-1} \quad (3.118)$$

j=n için, $w_n=0$,

$$\frac{w_{n+1} - 2w_n + w_{n-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (3.119)$$

$$w_{n+1} = -w_{n-1} \quad (3.120)$$

Bu değerlere göre aşağıdaki lineer cebirsel denklem takımı elde edilir:

$$\begin{bmatrix} c-a & d & e & 0 & 0 & 0 \\ b & c & d & e & 0 & 0 \\ a & b & c & d & \dots & 0 \\ 0 & a & b & c & & 0 \\ 0 & 0 & a & b & & 0 \\ & \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & b-d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ \vdots \\ w_{n-2} \\ w_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(H - \Delta y) \\ K(H - 2\Delta y) \\ K(H - 3\Delta y) \\ K(H - 4\Delta y) \\ K(H - 5\Delta y) \\ \vdots \\ K(H - (n-2)\Delta y) \\ K(H - (n-1)\Delta y) \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

3.4 zm Algoritmasının Oluşturulması

Elde edilen lineer cebirsel denklem takımının çözülebilmesi ve uygun tank cidar kalınlıklarının bulunabilmesi için denklem takımı verilen başlangıç kalınlığı ile deneme yanılma yöntemi ile çözülmesi gereklidir. Böylece deformasyon hesaplanıp, malzeme akma sınırlarının altında kalan değerinde kalınlık hesabı yapılabilir. Bunun için çözüm algoritması aşağıdaki gibi yapılır:

- Cidar kalınlığı hesaplanacak tank çapı, yüksekliği ve donam yükseklikleri tanımlanır,
- Tank yüksekliği n noktaya ayrılır, n+1 nokta ve n adet Δy farkı elde edilir,
- Malzeme zellikleri tanımlanır, elastiklik modülü, poisson oranı, yer çekim ivmesi, çizelgede 2.2'deki tablodan malzeme akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri tanımlanır, API 650 standardına uygun olarak izin verilen akma dayanım değeri $\min(S_y \cdot 2/3; S_T \cdot 5/7)$ şeklinde hesaplanır,
- Denklemin zm döngüsünün çalıştırılabilmesi için bir başlangıç cidar kalınlığına ihtiyaç var, bunun için, kodun içine bir başlangıç kalınlığı tanımlanır,
- Tanımlanan başlangıç kalınlığıyla birlikte, Timoshenko'nun denkleminde yer alan, β ve D katsayıları hesaplanır,
- a,b,c,d,e katsayılarından oluşan katsayılar matrisi hesaplanır,
- Başlangıç kalınlığına göre her bir nokta için deformasyonlar hesaplanır,
- Hook yasasına göre, deformasyon, yarıçap ve elastiklik modülü kullanılarak gerilmeler hesaplanır.
- En büyük gerilme ile malzeme için izin verilen akma dayanım değeri karşılaştırılır,

- Eğer gerilme değeri malzemenin izin verilen akma değerinin altında ise, başlangıç kalınlığı, $\Delta t=0,00025$ m azaltılarak, döngü tekrar çalıştırılır.
- Δt kadar azaltılan cidar kalınlığı ile çözüm işlemlerindeki üstteki adımlar tekrar edilir, gerilme değeri malzemenin izin verilen akma değerinin üstüne çıktığı değerden bir önceki değer tank cidarı için kalınlık değeri olarak yazılır.
- Hesaplama tamamlandıktan, gerilme dağılımı grafiği çizdirilir.

Ticari olarak satın alınabilen sac kalınlıkları 0,25mm aralıklarla sipariş verilebilir [27]. Bu durumda $\Delta t=0,00025$ m olarak alınır. Bu kalınlık artışı kurulan iterasyonda malzemenin izin verilen akma değeri sınırında kalacağı şekilde minimum kalınlık hesaplanırken kullanılır.

MATLAB kodları EK A3'te verilmiştir.



4. ÇALIŞMA SONUÇLARININ DENEY İLE KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Deney

Chen ve diğerleri [12]'nin deney çalışmasında Şekil 4.1'de fotoğrafı verilen, Çin'de yapılan 150.000m^3 kapasiteli, petrol depolama tankı üzerinden yük altında gerçekleşen gerilme değerleri incelenmiştir.

Tank çapı 100m; toplam yüksekliği ise 20,180m'dir. Tank yapımı tamamlandıktan sonra, hidrostatik test yapılarak, tank temel oturması ölçümleri yapılmış. Ölçümler sonucu elde edilen veriler, tasarım standardının sınırları içerisinde kaldığı tespit edilmiştir. Böylece tank cidarında yapılacak gerilme ölçümlerde, temel oturmasından kaynaklanacak hatalar ihmal edilmiştir.

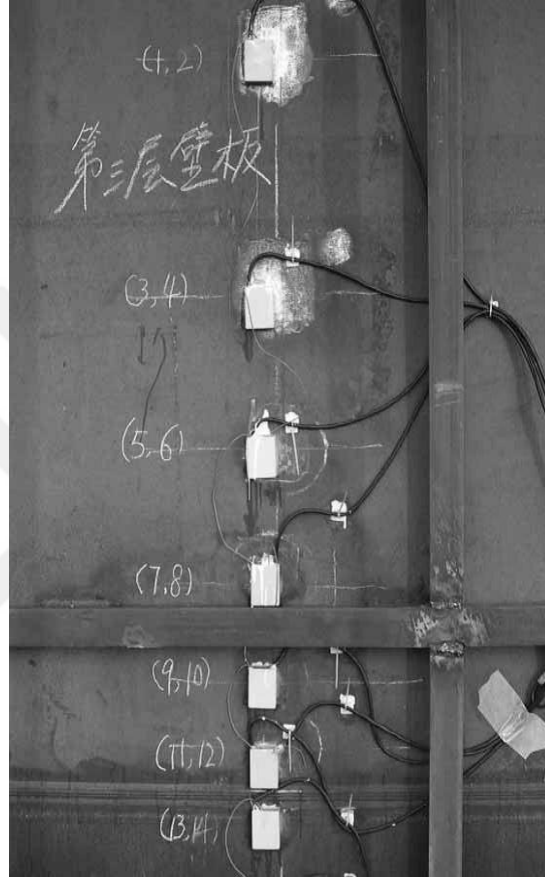


Şekil 4.1 : 150.000m^3 'lük petrol depolama tankı[12].

Tankın su doldurulması kademe kademe yapılmıştır ve 13 gün sürmüştür. Tam dolum yapıldıktan sonra 3 gün tank tam dolu olarak bekletilmiştir. Toplam test süresi 16 gün sürmüştür. Strain gauge'ler taban plakasının üzerinden, ilk iki donam üzerine

tank dışından yerleştirilmiştir. Strain gauge'ler Şekil 4.2'deki fotoğrafta görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.

Güneş ışınlarından ve sıcaklık değişimlerinin etkilerinin ölçümlere etkisini en aza indirebilmek için, her gün sabah 9'da hassasiyet kontrolü için kalibre edilmiştir. Su seviyesi maksimuma geldiğinde her 24 saatte bir ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.2 : Tank üzerine yerleştirilen strain gageler[12].

Söz konusu tankta kullanılan donam malzemeleri JIS standardına göredir[28]. Bu malzemelerin literatürdeki mekanik özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.1'deki gibidir[29,30]. Depolama tankının diğer büyüklükleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tank malzemesinin özellikleri[29,30].

Malzeme	Mekanik Özellikler		
	Kalınlık (mm)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi(MPa)
SPV 490 Q	5-50	490	610
16MnR	3-16	345	510
Q235-B	0-16	235	370

Çizelge 4.2 : Kullanılan tankın tasarım özellikleri[12].

		Donam Numarası	h(mm)	t(mm)	Malzeme
Tank Donamları		1	2980	40	SPV 490 Q
		2	2680	33	SPV 490 Q
		3	2680	26	SPV 490 Q
		4	2680	22	SPV 490 Q
		5	2680	17	SPV 490 Q
		6	2680	12	SPV 490 Q
		7	2660	12	16MnR
		8	2660	12	Q235-B
Köşebent			L100x10		Q235-B
Taban Plakası	Ring Plakası		Ring Plaka Genişliği 2000, Kalınlık 23mm		SPV 490 Q
	Taban Merkez Plakası		Kalınlık 11 mm		Q235-B

Yapılan ölçümlerin sonucunda Çizelge 4.3'te verilmiştir[12].

Çizelge 4.3 : Deney ölçüm sonuçları[12].

x (mm)	σ_H (MPa)	σ_L (MPa)
277	5,2	-129,1
424	36,1	-66,4
801	88,8	12,4
1023	132,4	19,7
1328	164,4	72,8
1630	201,0	78,6
1920	178,3	54,5
2216	208,7	51,7
2530	237,7	55,4
2732	221,5	42,8
2950	251,3	33,0
3006	246,5	58,7
3097	237,5	81,8
3102	243,7	46,7
3390	264,6	46,4

4.2 Sonlu Farklar Çözümü(SFY) ile Karşılaştırmalar

Deney ile sayısal çözümün kıyas edilebilmesi için, sayısal çözümün algoritmasının değiştirilmesi gereklidir. Çalışmada, sayısal çözüm ile yeni tasarlanan bir tankın cidar kalınlıkları hesabı yapılması hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda denklemler kurulup, algoritma hazırlanmıştır. Bu çözümün doğruluğunu, literatürde bulunan deney verileri ile kontrol edebilmek için, kalınlıkları belli bir tankın, başka

bir deyişle tasarımı yapılmış bir tankın sayısal yöntemle uyarlanması gerekmektedir. Burada tasarlanmış tankın sayısal çözüme uyarlanması ile tank donamları üzerindeki gerilme değerleri sayısal yöntemle bulunmuştur. Böylece tasarımı ve imalatı yapılmış bir tankın, deney ile ölçülen gerilme değerleri, sayısal çözüm ile hesaplanmıştır.

Bunun için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- Donam gerilmeleri hesaplanacak tank çapı, yüksekliği ve donam yükseklikleri tanımlanır,
- İlk iki donam kalınlığı girilir,
- Tank yüksekliği n noktaya ayrılır, $n+1$ nokta, n adet Δy farkı elde edilir,
- Malzeme özellikleri tanımlanır, elastiklik modülü, poisson oranı, yer çekim ivmesi,
- Mevcut donam kalınlığı ile Timoshenko'nun denkleminde yer alan, β ve D katsayıları hesaplanır,
- a, b, c, d, e katsayılarından oluşan katsayılar matrisi hesaplanır,
- Her bir nokta için deformasyonlar hesaplanır,
- Hook yasasına göre, deformasyon, yarıçap ve elastiklik modülü kullanılarak gerilmeler hesaplanır.

Yukarıdaki algoritma ile deney yapılan tankın değerleri girilerek MATLAB programında hesaplama yaptırılır. MATLAB kodları EK A4'te verilmiştir.

Tank cidarını n eşit parçaya ayırıp n tane fark elde edilir. Hassas çözümün yapılabilmesi için, n sayısının büyük olması gerekmektedir. Ancak belli bir n değerinden sonra elde edilen sayısal değerlerin büyük oranda değişmeyeceği açıktır. Ayrıca, nokta sayısının artması, çözüm süresini de etkileyebilmektedir. Çizelge 4.4'te programlama içindeki yazılan n değerlerine göre çözüm süreleri ve maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır. Burada çözüm süresini etkileyen değerler n sayısına bağlı olarak oluşturulan denklem sayısına bağlıdır. Ayrıca kullanılan bilgisayarın özelliklerine de doğrudan bağlıdır. Burada kullanılan bilgisayar özellikleri 16GB RAM, i7 6700HQ 2.60 GHz işlemci ve işletim sistemi olarak Windows 10 Home'dur.

Çizelge 4.4'teki değerler incelendiğinde nokta sayısı 250 ve üstü değerler için hesaplanan gerilme değeri 248,1 MPa'ya yakınsadığı görülmektedir. Daha yüksek n sayılarında ise sonuç yaklaşık olarak aynı çıkmaktadır. Nokta sayısını arttırmak çözüm için elde edilen denklem sayısını ve çözüm süresini arttırırken elde edilen gerilme değerini değiştirmemektedir.

Çizelge 4.4 : n sayısının gerilme sonucuna etkisi.

n	Çözüm Süresi(s)	Maksimum Gerilme(MPa)
10	0,011	235,9
50	0,011	244,3
100	0,144	246,4
250	0,161	248,1
1000	0,201	248,1

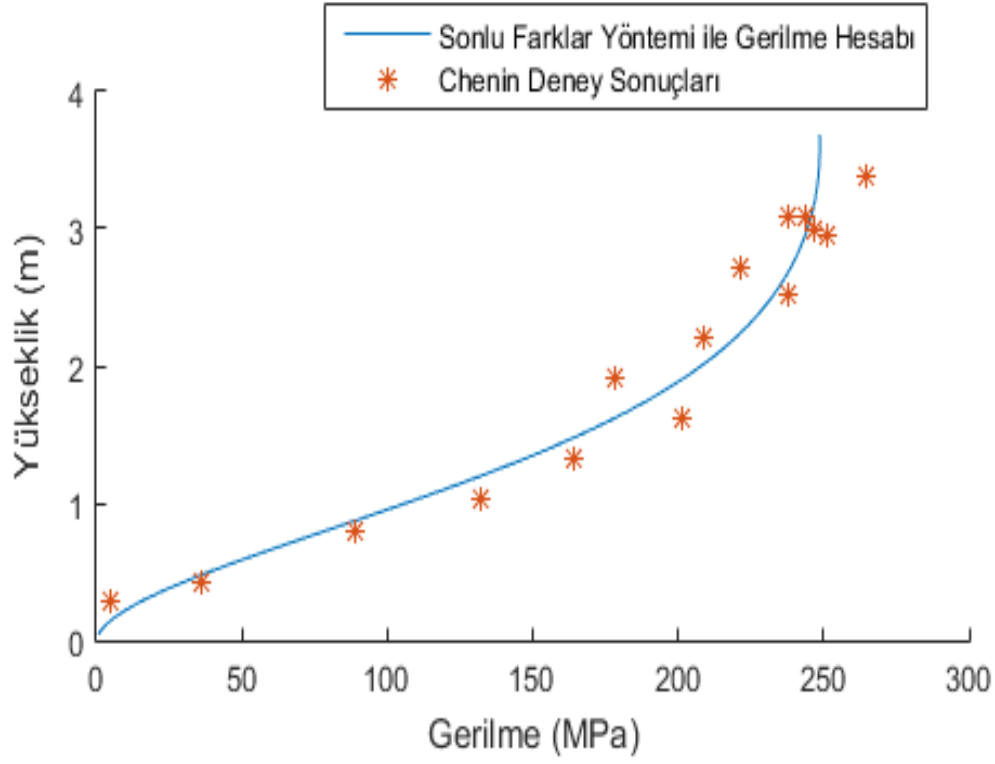
Bu nedenle programın içinde yazılacak nokta sayısı 2520 olarak yazılmıştır. Çözüm gerçekleştirilip, deneyde ölçülen noktalar ile kıyaslandığında aşağıdaki Çizelge 4.5'te elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 : Deney ölçümler ile SFY sonuçlarının kıyaslanması.

y (mm)	σ(MPa)		$\Delta\sigma$(%)
	Ölçüm Değerleri	Sonlu Farklar ile Hesaplanan Değerler	Maksimum Sapma
2950	251,3	243,6	-3,06
3006	246,5	245,3	-0,05
3097	237,5	245,9	3,50
3102	243,7	246,1	0,01
3390	264,6	248,1	-6,23

Deneyin tüm ölçüm değerleri ile sonlu farklar hesabının tüm değerleri bir grafik üzerinde Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Deney ile oluşturulan model arasındaki hata hesaplandığında maksimum sapmanın -%6,23 olduğu görülmektedir. Sonlu farklar yöntemi ile oluşturduğumuz model deney sonuçları ile sapmalar olmasına rağmen karakteristik olarak örtüşmektedir. MATLAB Kodları EK-A4'te verilmiştir.

Depolama Tankı Gerilme Dağılımı



Şekil 4.3 : Deneydeki tüm ölçümler ile SFY sonuçlarının gösterimi.

5. SFY İLE DİĞER HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 Giriş

Deney sonuçları ile validasyonu yapılan çözüm algoritması, literatürde kullanılan diğer yöntemlerle ile 18 tank üzerinde kıyas edilmiştir. Kıyas edilen tank boyutları aşağıdaki Çizelge 5.1'deki tabloda verilmiştir. İlk altı tank API 650 standardında tavsiye edilen tank çap değerleridir.

Çizelge 5.1 : SFY ve diğer hesaplama yöntemleri ile kıyas edilen tanklar.

Tank	Tank Çapı (m)	Tank Yüksekliği(m)
Tank1	21	12,2
Tank2	30	12,2
Tank3	48	12,2
Tank4	21	14,6
Tank5	30	14,6
Tank6	48	14,6
Tank7	64	12,2
Tank8	79,2	12,2
Tank9	91,4	12,2
Tank10	64	14,6
Tank11	79,2	14,6
Tank12	91,4	14,6
Tank13	120	10
Tank14	135	10
Tank15	150	10
Tank16	120	12,2
Tank17	135	12,2
Tank18	150	12,2

Tank7 ile Tank12 tankları arasındaki tanklar ise Azzuni ve Guzey'in[11] incelediği tanklardır. Çizelge 5.1'deki son altı tank ise standart kullanılan boyutların dışına çıkılan tanklardır. Tankların donam yükseklikleri(h) için 2,8m seçilmiştir. Korozyon payı dâhil edilmemiştir. Kaynak verimleri 1,0 olarak alınmıştır. Depolanan sıvı su, atmosfere açık tanklar olarak düşünülmüştür. Elde edilen kalınlıklar çizelgeler ve grafiklerde gösterilmiştir.

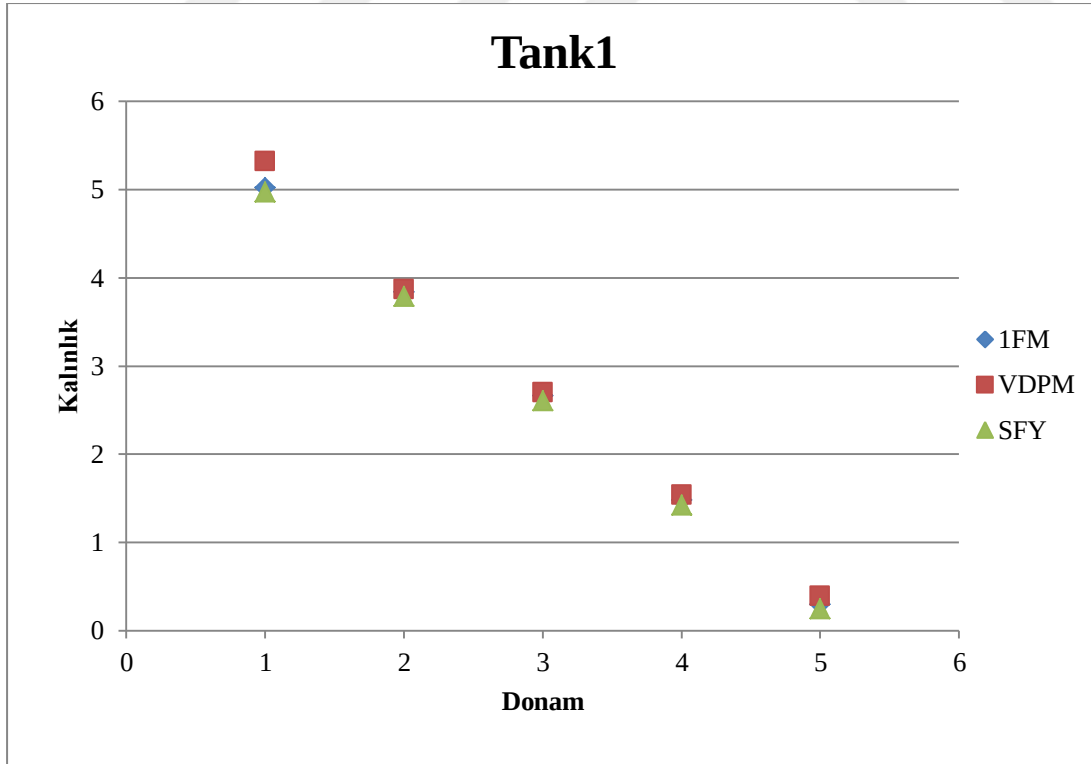
5.2 Çapı 60m'den Küçük Depolama Tankları

5.2.1 Tank yüksekliği 12,2m

Çizelge 5.2 : Tank1 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank1					
Donam	1FM	VDPM	SFY	% Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	5,024	5,321	4,971	1,05	6,58
2	3,842	3,865	3,789	1,38	1,97
3	2,660	2,700	2,607	1,99	3,44
4	1,478	1,539	1,425	3,59	7,41
5	0,296	0,39	0,243	17,91	37,69

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 21m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.1'de verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %6,58'lik farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,91 ve %37,69 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 4. Donamda SFY ile VDPM arasında %7,41'lik fark çıkmaktadır.

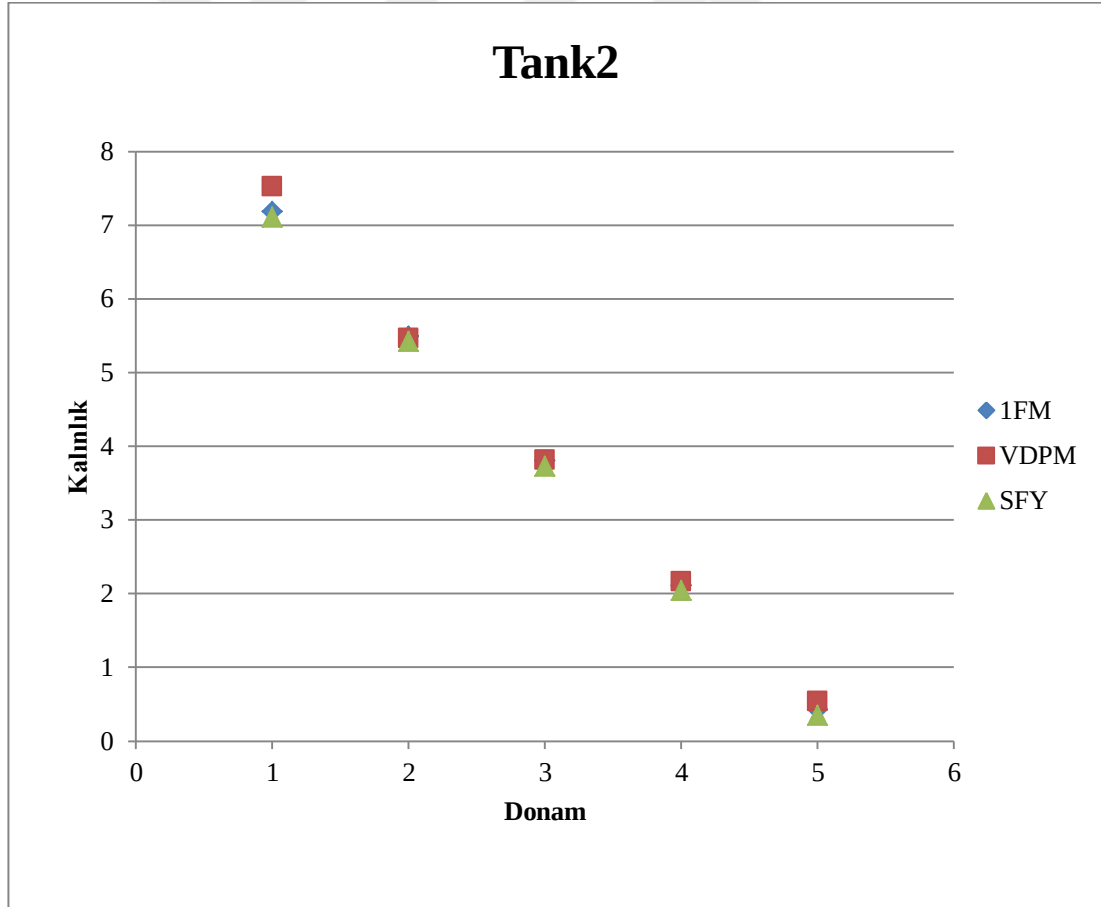


Şekil 5.1 : Tank1 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.3 : Tank2 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank2					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	7,177	7,517	7,102	1,05	5,52
2	5,488	5,458	5,413	1,37	0,82
3	3,800	3,805	3,724	2,00	2,13
4	2,111	2,160	2,036	3,55	5,74
5	0,422	0,537	0,347	17,77	35,38

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 30m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.2'de verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %5,52'lik farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,77 ve %35,38 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 4. Donamda SFY ile VDPM arasında %5,74'lik fark çıkmaktadır.

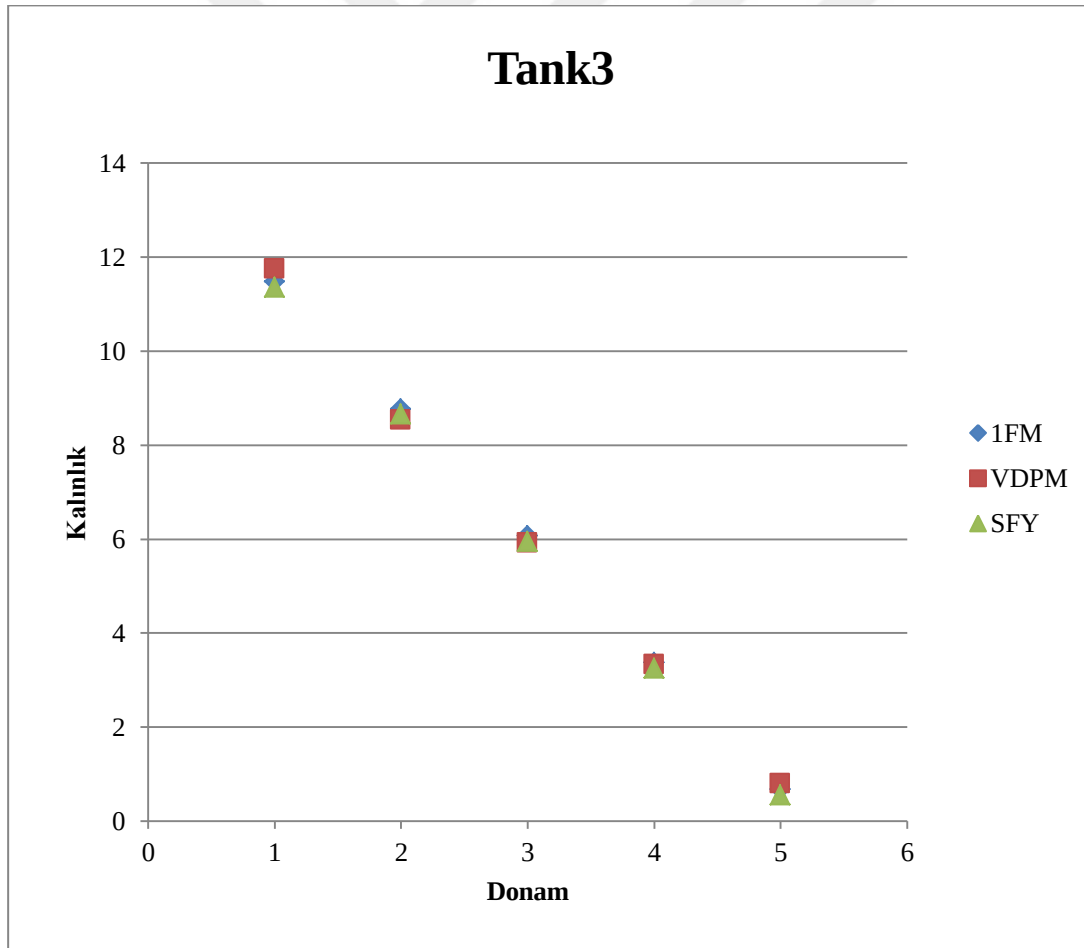


Şekil 5.2 : Tank2 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.4 : Tank3 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank3					
Donam	1FM	VDPM	SFY	% Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	11,483	11,758	11,363	1,05	3,36
2	8,781	8,537	8,661	1,37	-1,45
3	6,079	5,925	5,960	1,96	-0,59
4	3,377	3,334	3,257	3,55	2,31
5	0,675	0,802	0,555	17,78	30,80

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 48m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.4’te gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.3’te verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %3,36’lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,78 ve %30,80 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır.



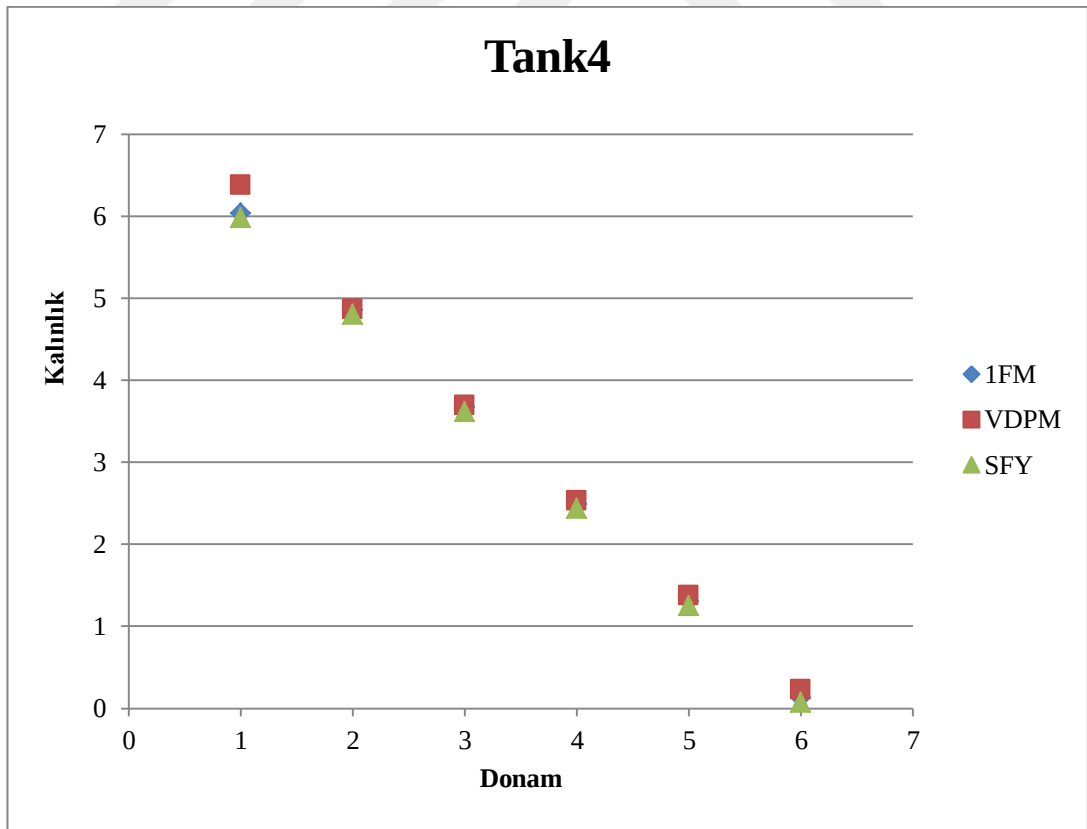
Şekil 5.3 : Tank3 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

5.2.2 Tank yüksekliği 14,6m

Çizelge 5.5 : Tank4 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank4					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	6,037	6,382	5,984	0,88	6,24
2	4,855	4,865	4,802	1,09	1,29
3	3,673	3,698	3,620	1,44	2,11
4	2,491	2,533	2,438	2,13	3,75
5	1,309	1,374	1,256	4,05	8,59
6	0,127	0,228	0,074	41,73	67,54

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 21m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.4'te verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %6,24'lik farkla yaklaşmaktadır. Ancak 6. Donamda bu farklar sırasıyla %41,73 ve %67,54 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 5. Donamda SFY ile VDPM arasında %8,59'lik fark çıkmaktadır.

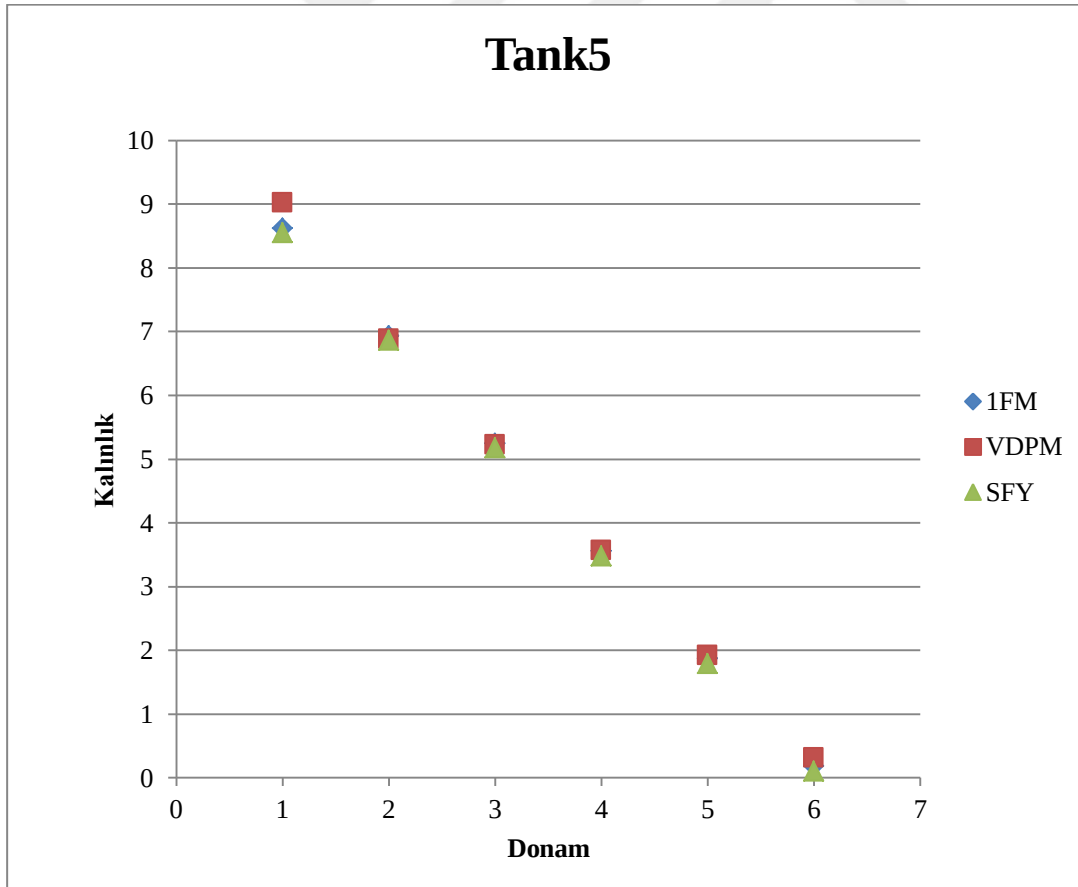


Şekil 5.4 : Tank4 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.6 : Tank5 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank5					
Donam	1FM	VDPM	SFY	% Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	8,624	9,025	8,550	0,86	5,26
2	6,935	6,880	6,860	1,08	0,29
3	5,247	5,222	5,172	1,43	0,96
4	3,558	3,569	3,483	2,11	2,41
5	1,870	1,925	1,795	4,01	6,75
6	0,181	0,312	0,106	41,44	66,03

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 30m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.5'te verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %0,86 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %5,26'lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 6. Donamda bu farklar sırasıyla %41,44 ve %66,03 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 5. Donamda SFY ile VDPM arasında %6,75'lik fark çıkmaktadır.

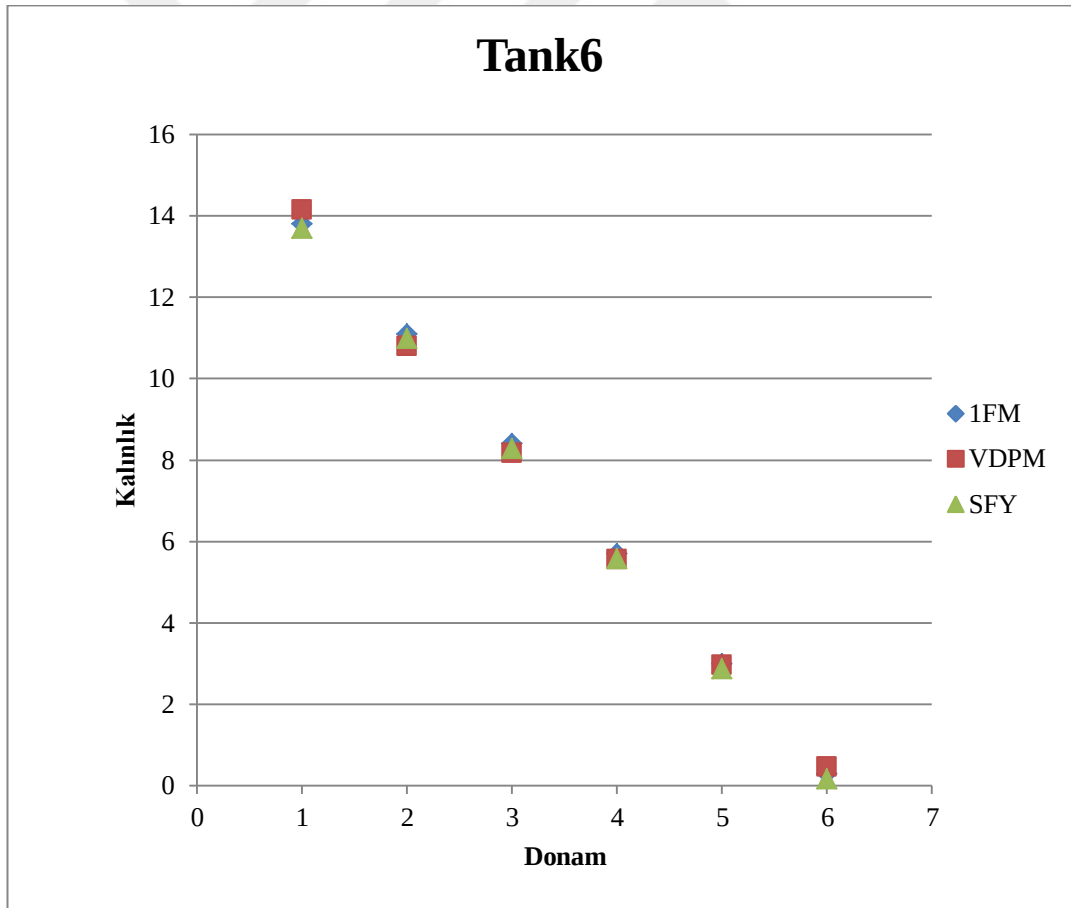


Şekil 5.5 : Tank5 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.7 : Tank6 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank6					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	13,798	14,145	13,678	0,87	3,30
2	11,097	10,787	10,977	1,08	-1,76
3	8,395	8,163	8,275	1,43	-1,37
4	5,693	5,553	5,573	2,11	-0,36
5	2,991	2,967	2,871	4,01	3,24
6	0,290	0,456	0,170	41,38	62,72

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 48m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.6’da verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %0,87 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %3,30’lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 6. Donamda bu farklar sırasıyla %41,38 ve %62,72 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır.



Şekil 5.6 : Tank6 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

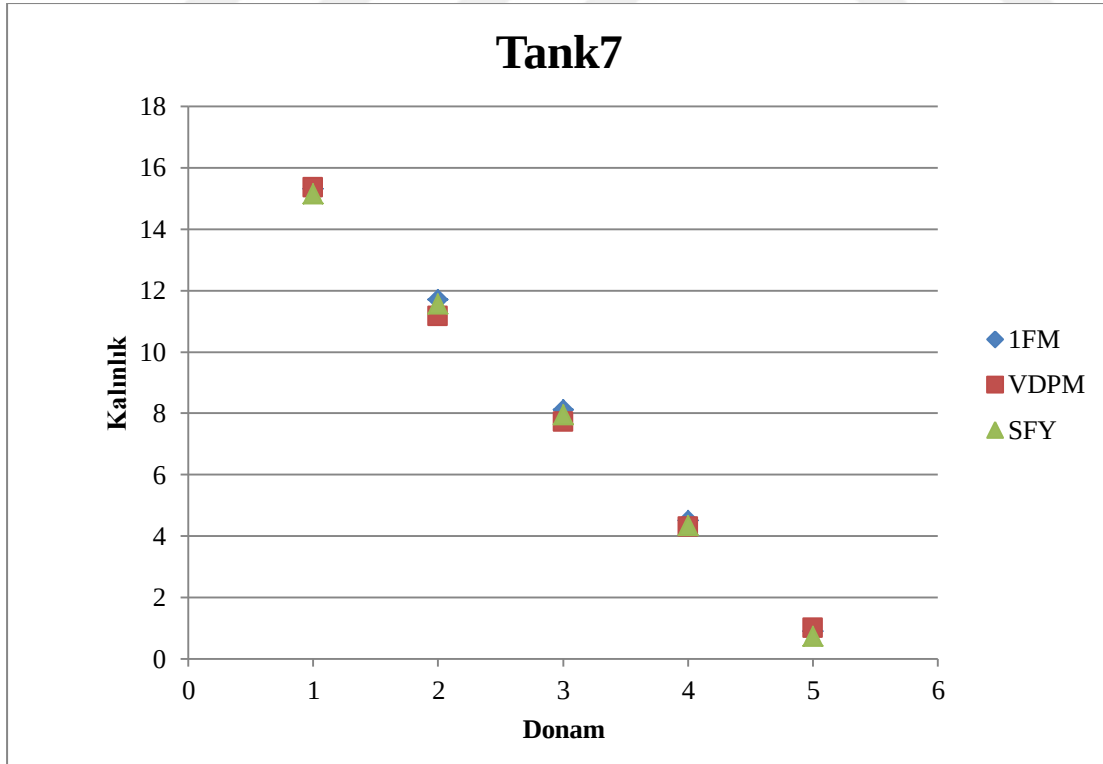
5.3 Çapı 60m ile 100m Arasında Olan Depolama Tankları

5.3.1 Tank yüksekliği 12,2m

Çizelge 5.8 : Tank7 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank7					
Donam	1FM	VDPM	SFY	% Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	15,310	15,356	15,150	1,05	1,34
2	11,708	11,156	11,548	1,37	-3,51
3	8,105	7,712	7,945	1,97	-3,02
4	4,503	4,306	4,343	3,55	-0,86
5	0,901	1,006	0,741	17,76	26,34

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 64m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.8’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.7’de verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %1,34’lük farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,76 ve %26,34 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 4. Donamda VDPM ile SFY birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir.

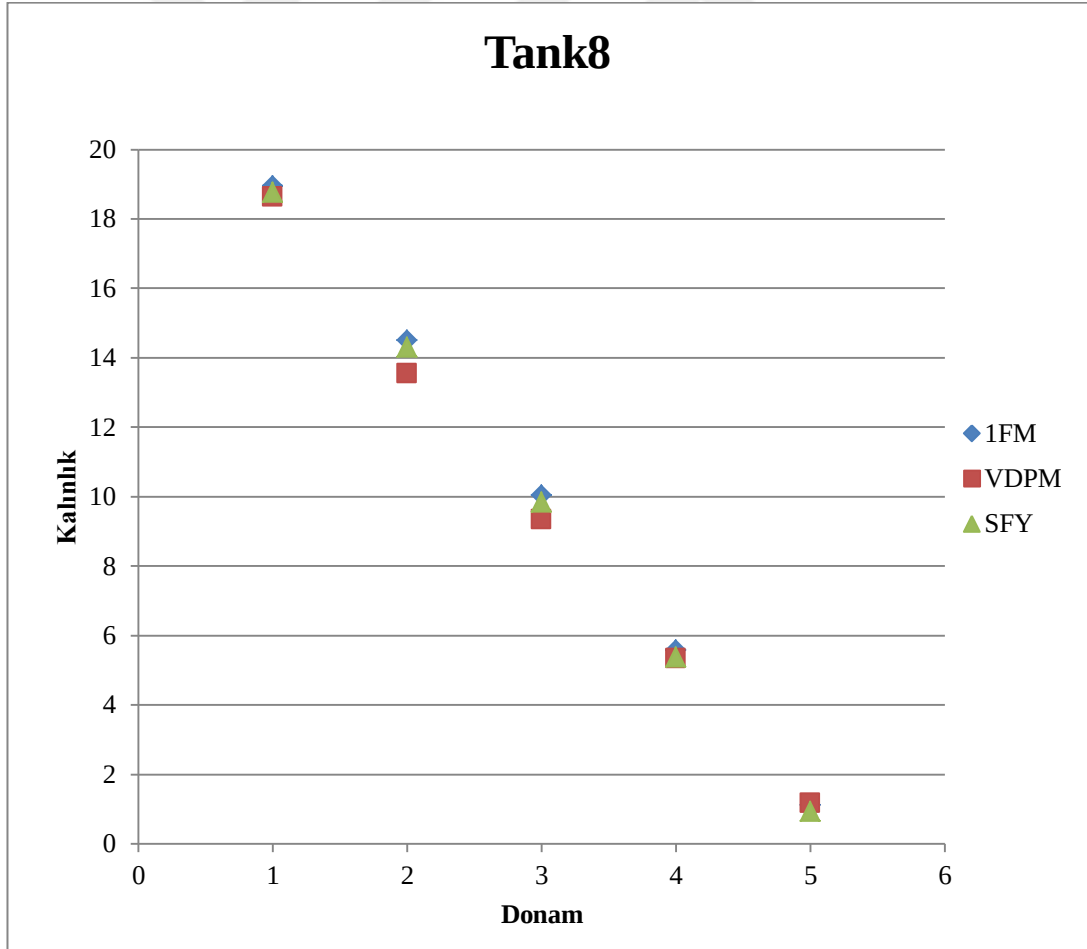


Şekil 5.7 : Tank7 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.9 : Tank8 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank8					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	18,946	18,627	18,748	1,05	-0,65
2	14,488	13,543	14,290	1,37	-5,52
3	10,030	9,327	9,832	1,97	-5,41
4	5,572	5,328	5,374	3,55	-0,86
5	1,115	1,173	0,917	17,76	21,82

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 79,2m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.9’da gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.8’de verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-0,65’lik farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,76 ve %21,82 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır. 1. ve 4. Donamda VDPM ile SFY birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir.

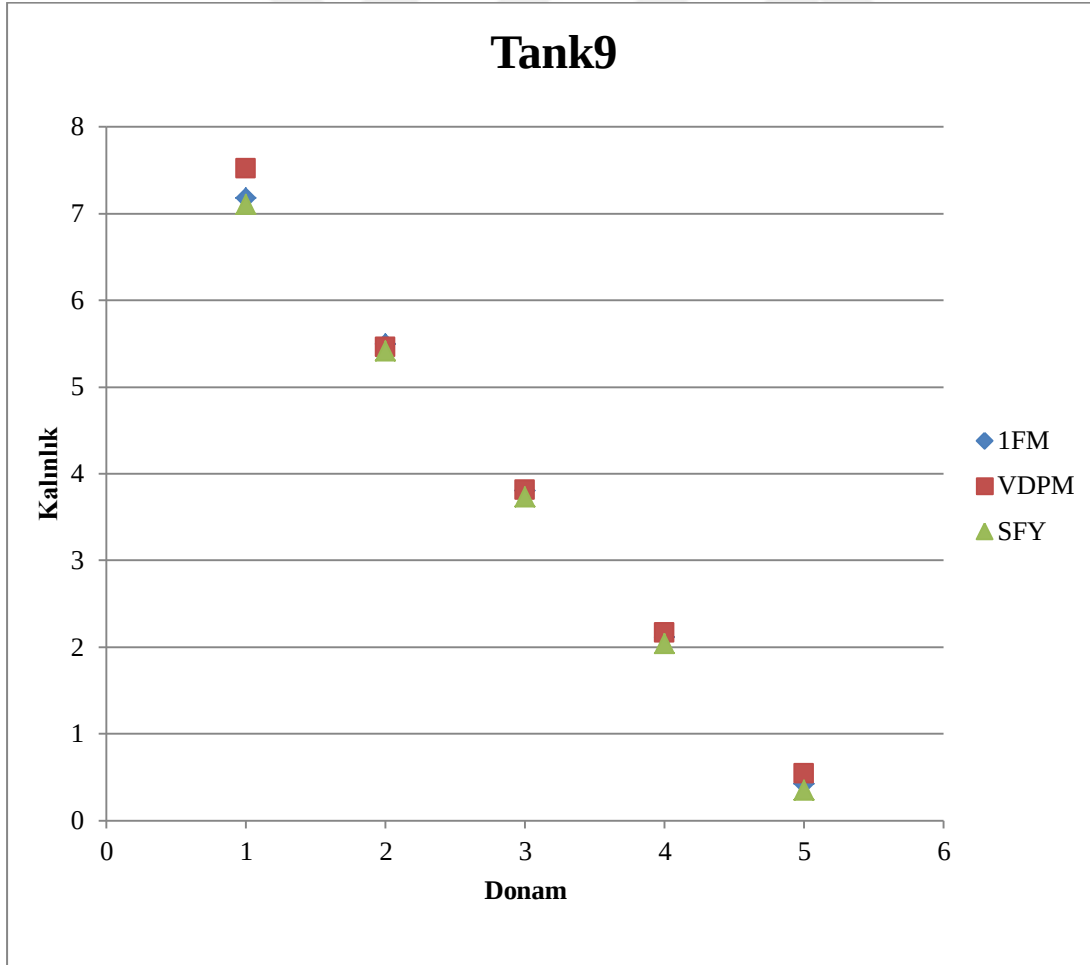


Şekil 5.8 : Tank8 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.10 : Tank9 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank9					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	21,865	21,147	21,636	1,05	-2,31
2	16,720	15,406	16,492	1,36	-7,05
3	11,575	10,571	11,345	1,99	-7,32
4	6,431	5,825	6,202	3,56	-6,47
5	1,286	1,293	1,058	17,73	18,17

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 91,4m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.9'da verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-2,31'lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,73 ve %18,17 olmaktadır. Ara donamlarda ise 1FM'ye yakın, VDPM ile %-7,32'lik sapmalar görülmektedir.



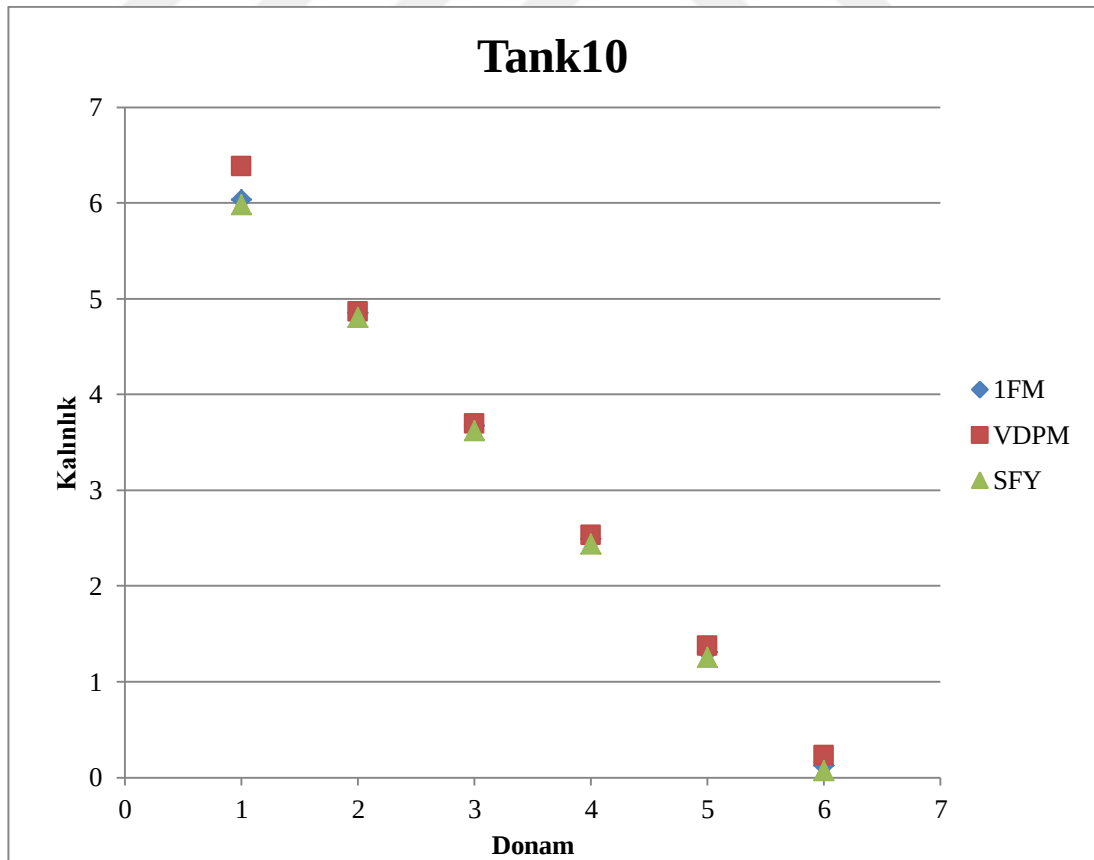
Şekil 5.9 : Tank9 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

5.3.2 Tank yüksekliği 14,6 m

Çizelge 5.11 : Tank10 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank10					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	18,398	18,509	18,238	0,87	1,46
2	14,795	14,126	14,635	1,08	-3,60
3	11,193	10,662	11,033	1,43	-3,48
4	7,591	7,222	7,431	2,11	-2,89
5	3,988	3,825	3,828	4,01	-0,08
6	0,386	0,562	0,226	41,45	59,79

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 64m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.11’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.10’da tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %0,87 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %1,46’lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla çok daha yüksek çıkarak %41,45 ve %59,79 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır

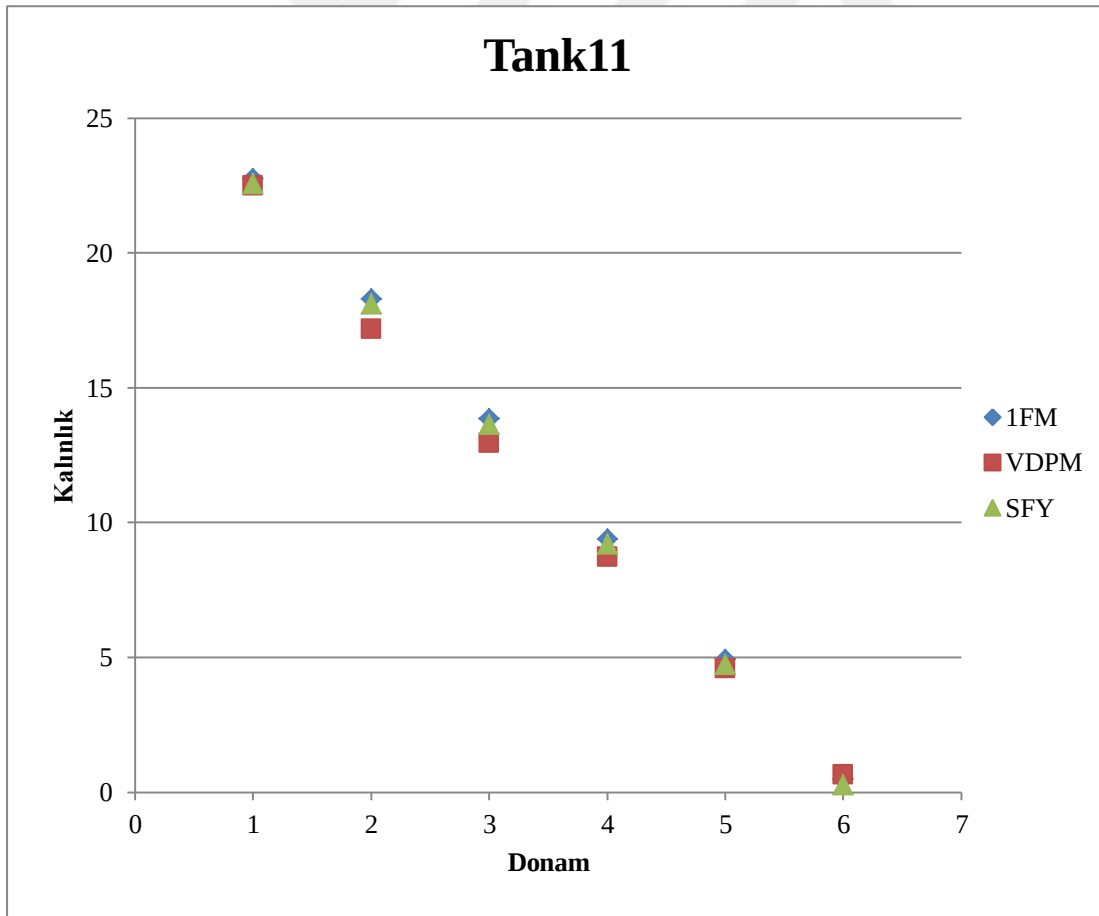


Şekil 5.10 : Tank10 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.12 : Tank11 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank11					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	22,767	22,493	22,569	0,87	-0,34
2	18,309	17,185	18,111	1,08	-5,39
3	13,851	12,951	13,653	1,43	-5,42
4	9,393	8,729	9,196	2,10	-5,35
5	4,936	4,586	4,738	4,01	-3,31
6	0,478	0,656	0,280	41,42	57,32

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 79,2m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.12’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.10’da verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %0,87 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-0,34’lik farkla yaklaşmaktadır. Ancak 6. Donamda bu farklar sırasıyla %41,42 ve %57,32 olmaktadır. Ara donamlarda ise diğer iki yöntemin arasında değerler çıkmaktadır.

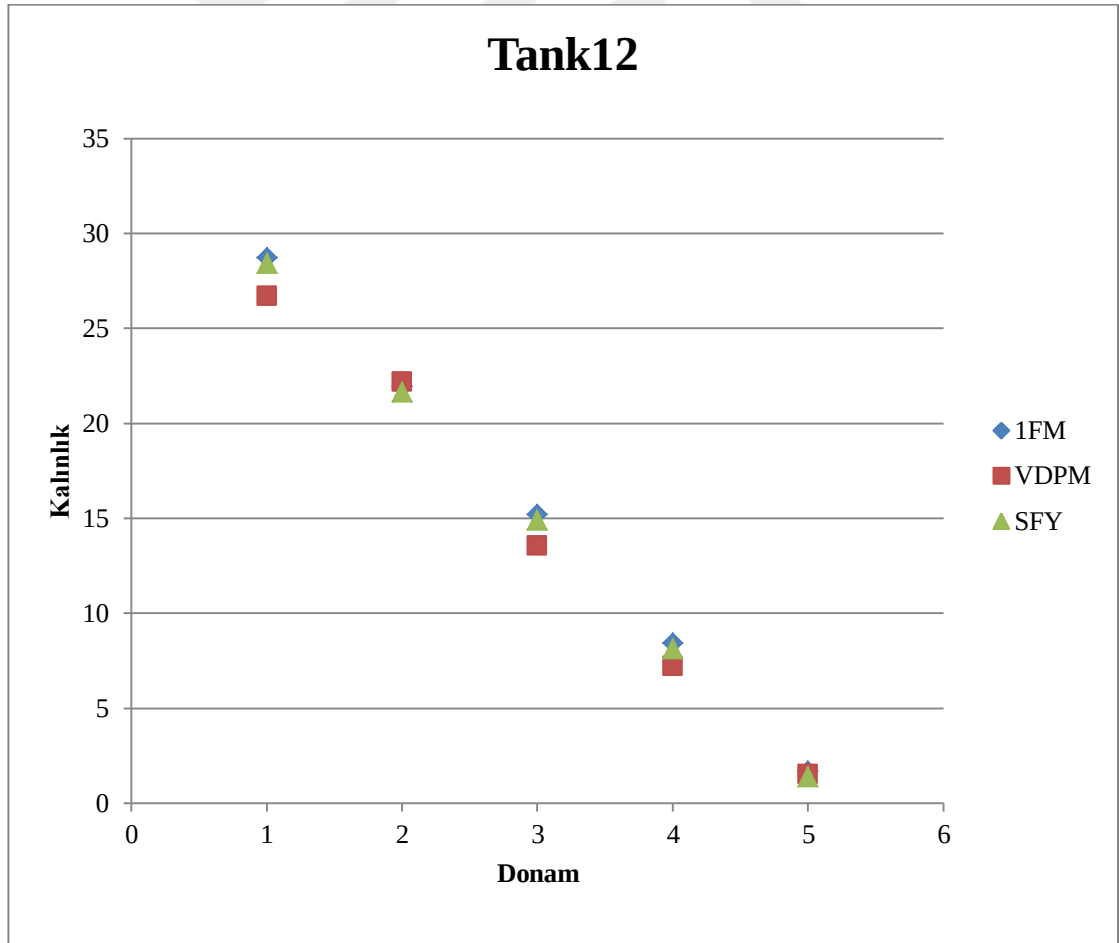


Şekil 5.11 : Tank11 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.13 : Tank12 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank12					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	26,274	25,576	26,046	0,87	-1,84
2	21,13	19,826	20,901	1,08	-5,42
3	15,985	14,828	15,757	1,43	-6,27
4	10,841	9,885	10,612	2,11	-7,35
5	5,696	5,159	5,467	4,02	-5,97
6	0,551	0,701	0,323	41,38	53,92

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 91,4m ve 14,6m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.13'te gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.12'de tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye %0,87 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-1,84'luk farkla yaklaşmaktadır. Ancak 6. Donamda bu farklar sırasıyla %41,38 ve %53,92 olmaktadır. Ara donamlarda ise 1FM'ye yakın, VDPM ile %-7,35'lik sapmalar görülmektedir.



Şekil 5.12 : Tank12 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

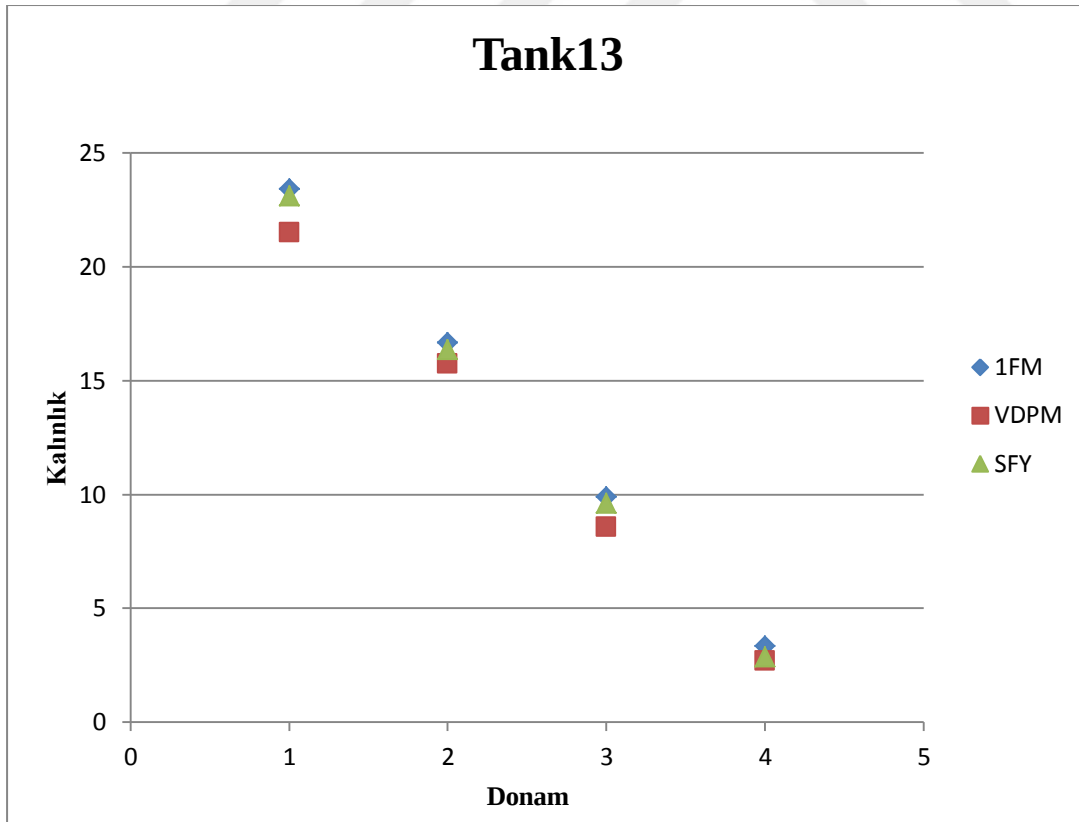
5.4 Çapı 100m'den Büyük Depolama Tankları

5.4.1 Tank yüksekliği 10m

Çizelge 5.14 : Tank13 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank13					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	23,399	21,492	23,099	1,28	-7,48
2	16,645	15,736	16,345	1,80	-3,87
3	9,890	8,552	9,590	3,03	-12,14
4	3,316	2,680	2,836	14,48	-5,82

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 120m ve 10m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.14'de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.13'de tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye yine %1,28 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-7,48'lik farkla yaklaşmaktadır. 4. Donamda 1FM ile fark %14,48, VDPM ile olan fark ise % -5,82 olmaktadır. Ara donamlarda ise yine 1FM'ye yakındır, 3. Donamda ise VDPM ile %-12,14'lik bir sapma görülmektedir.

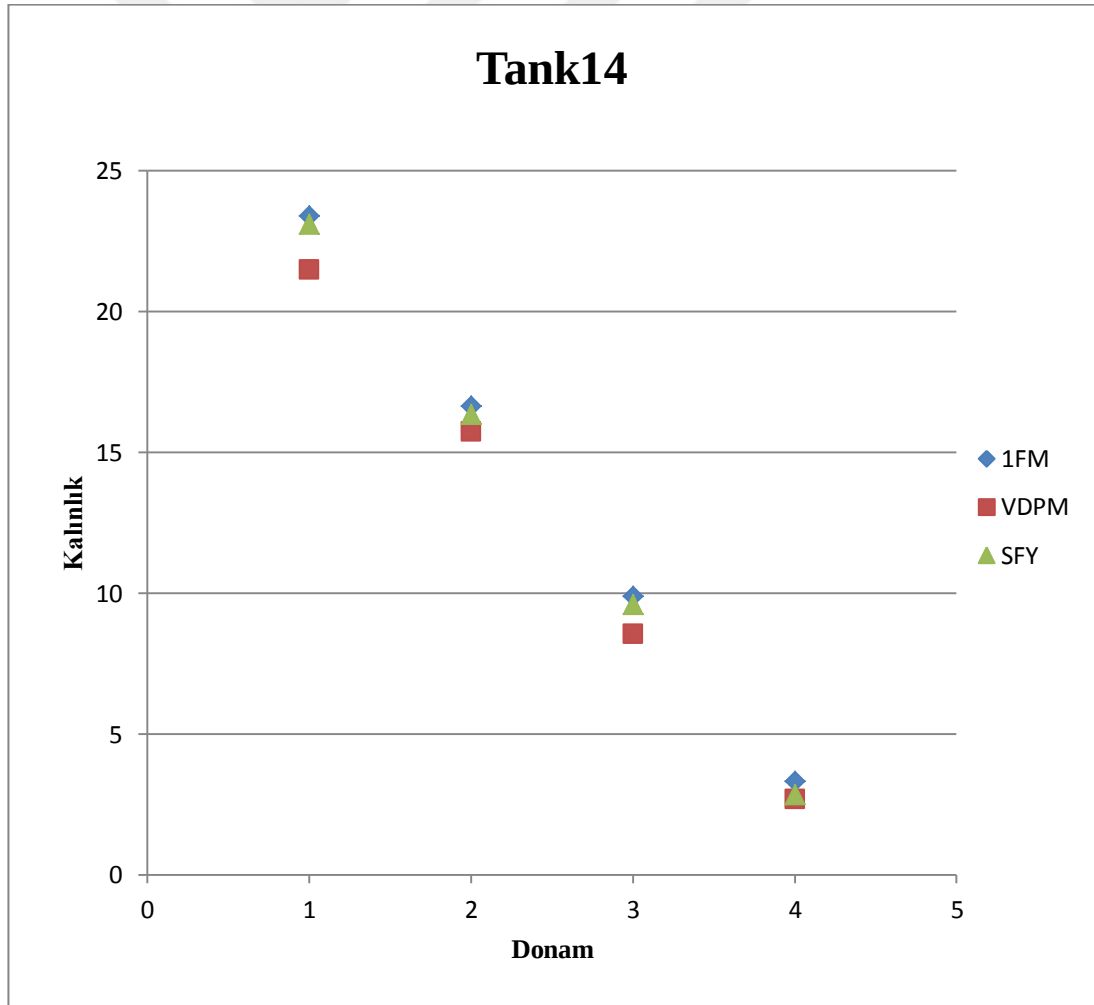


Şekil 5.13 : Tank13 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.15 : Tank14 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank14					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	26,324	23,605	25,987	1,28	-10,09
2	18,725	18,895	18,388	1,80	2,68
3	11,127	9,467	10,789	3,04	-13,96
4	3,528	2,882	3,191	9,55	-10,72

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 135 m ve 10m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.15'te gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.14'te tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM'ye yine %1,28 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-10,09'lık farkla yaklaşmaktadır. Ancak 4. Donamda 1FM ile fark %9,55, VDPM ile olan fark ise % -10,72 olmaktadır. Ara donamlarda ise yine 1FM'ye yakındır. 3. Donamda VDPM ile %-13,96'lık sapma görülmektedir.

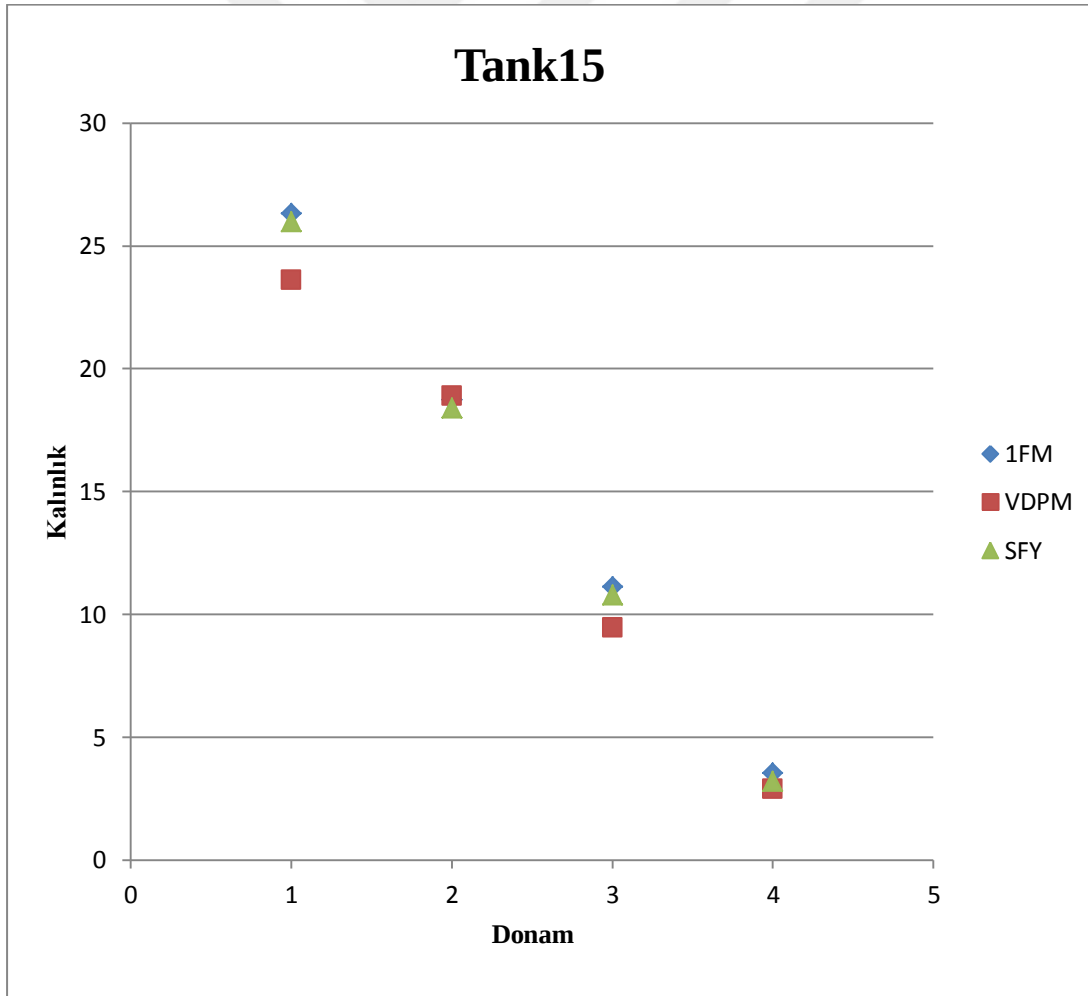


Şekil 5.14 : Tank14 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.16 : Tank15 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank15					
Donam	1FM	VDPM	SFY	% Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	29,249	25,600	28,874	1,28	-12,79
2	20,806	21,835	20,431	1,80	6,43
3	12,363	10,350	11,988	3,03	-15,83
4	3,920	3,062	3,545	9,57	-15,77

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 150m ve 10m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.16’da gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.15’te tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye yine %1,28 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-12,79 farkla yaklaşmaktadır. 4. Donamda 1FM ile fark %9,57, VDPM ile olan fark ise %-15,77 olmaktadır. Ara donamlarda ise yine 1FM’ye yakındır, ancak VDPM ile sapmalar görülmektedir.



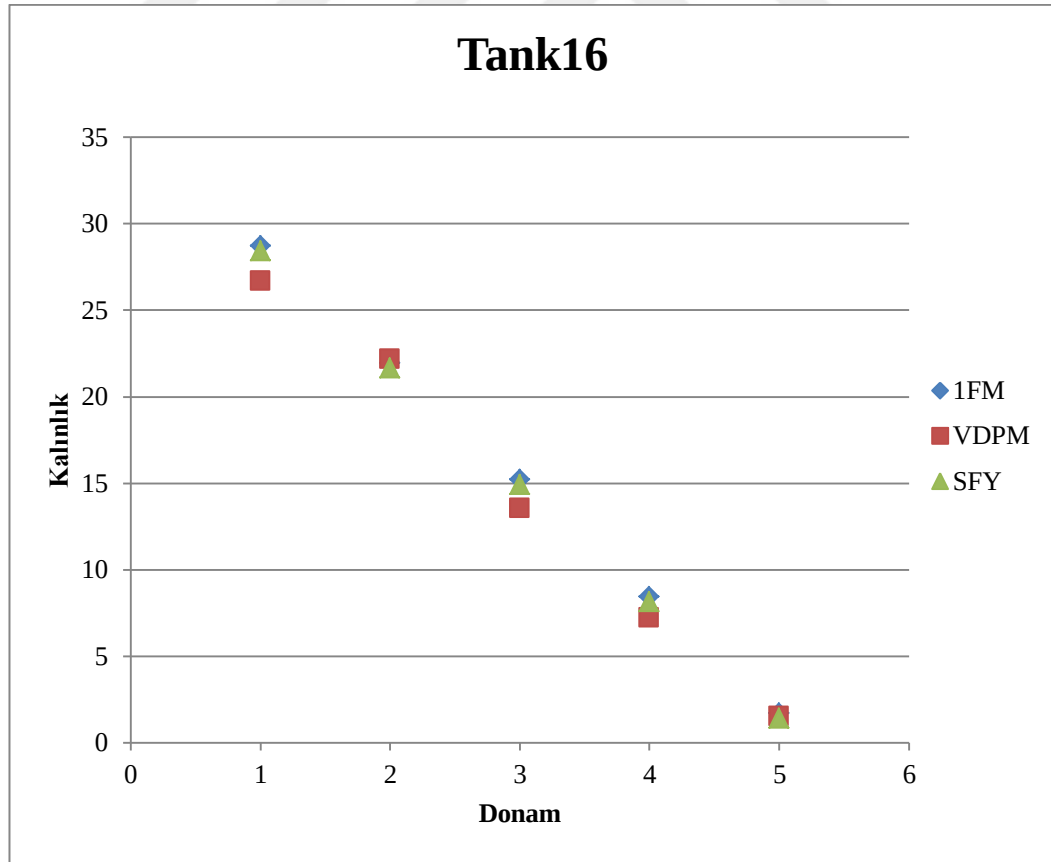
Şekil 5.15 : Tank15 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

5.4.2 Tank yüksekliği 12,2m

Çizelge 5.17 : Tank16 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank16					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	28,706	26,691	28,406	1,05	-6,43
2	21,952	22,176	21,652	1,37	2,36
3	15,198	13,546	14,898	1,97	-9,98
4	8,443	7,229	8,143	3,55	-12,64
5	1,689	1,523	1,389	17,76	8,80

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 120m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.17’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.16’da tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-6,43’lük farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,76 ve %21,82 olmaktadır. Ara donamlarda ise 1FM ile yakın VDPM ile 2. donamda yakın değer çıkmaktadır, diğer donamlarda ise %-12,64’e varan hatalar çıkmaktadır.

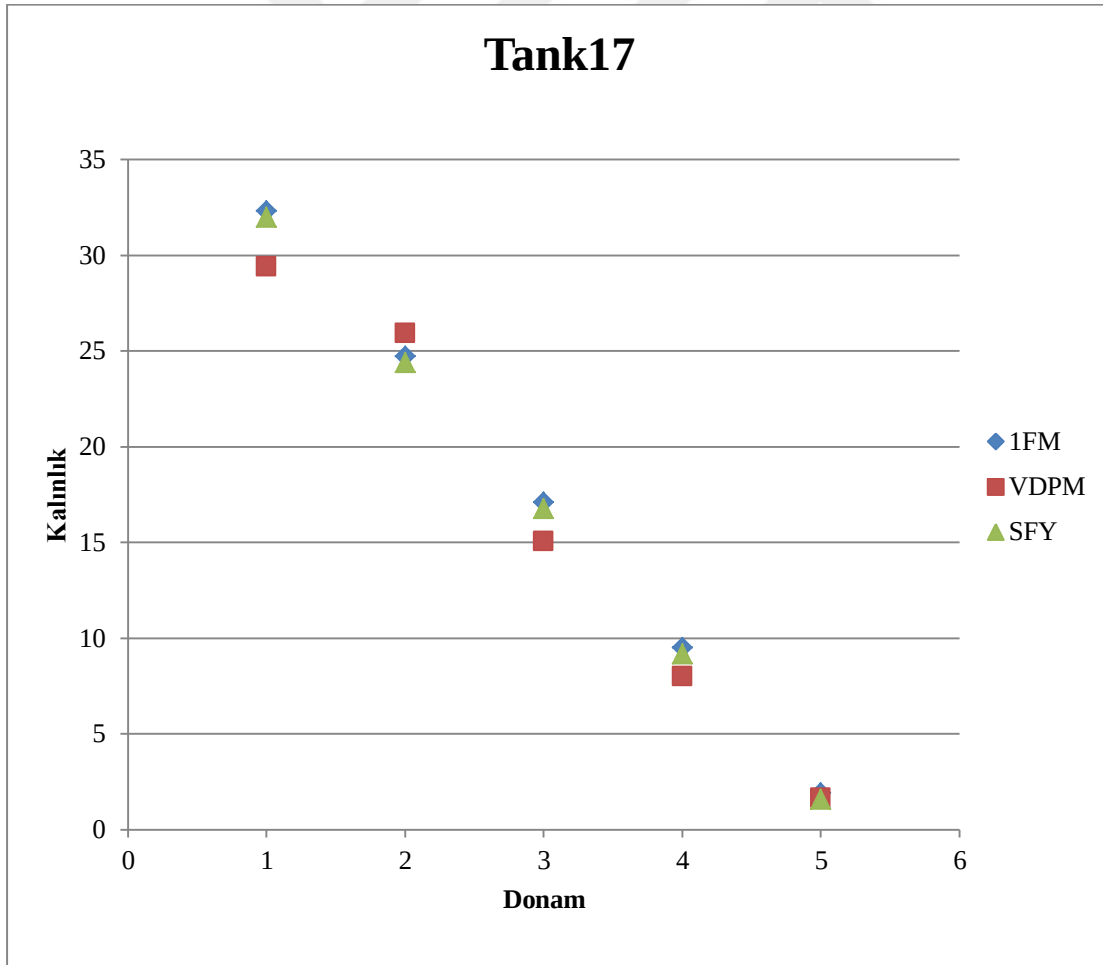


Şekil 5.16 : Tank16 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.18 : Tank17 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank17					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	32,295	29,394	31,957	1,05	-8,72
2	24,696	25,912	24,358	1,37	6,00
3	17,097	15,044	16,760	1,97	-11,41
4	9,499	7,980	9,161	3,56	-14,80
5	1,900	1,619	1,562	17,79	3,52

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 135m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.18’de gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.17’de tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-6,43’lük farkla yaklaşmaktadır. Ancak 5. Donamda bu farklar sırasıyla %17,79 ve %3,52 olmaktadır. Ara donamlarda ise 1FM ile yakın VDPM ile ise %-14,80’e varan hatalar çıkmaktadır.

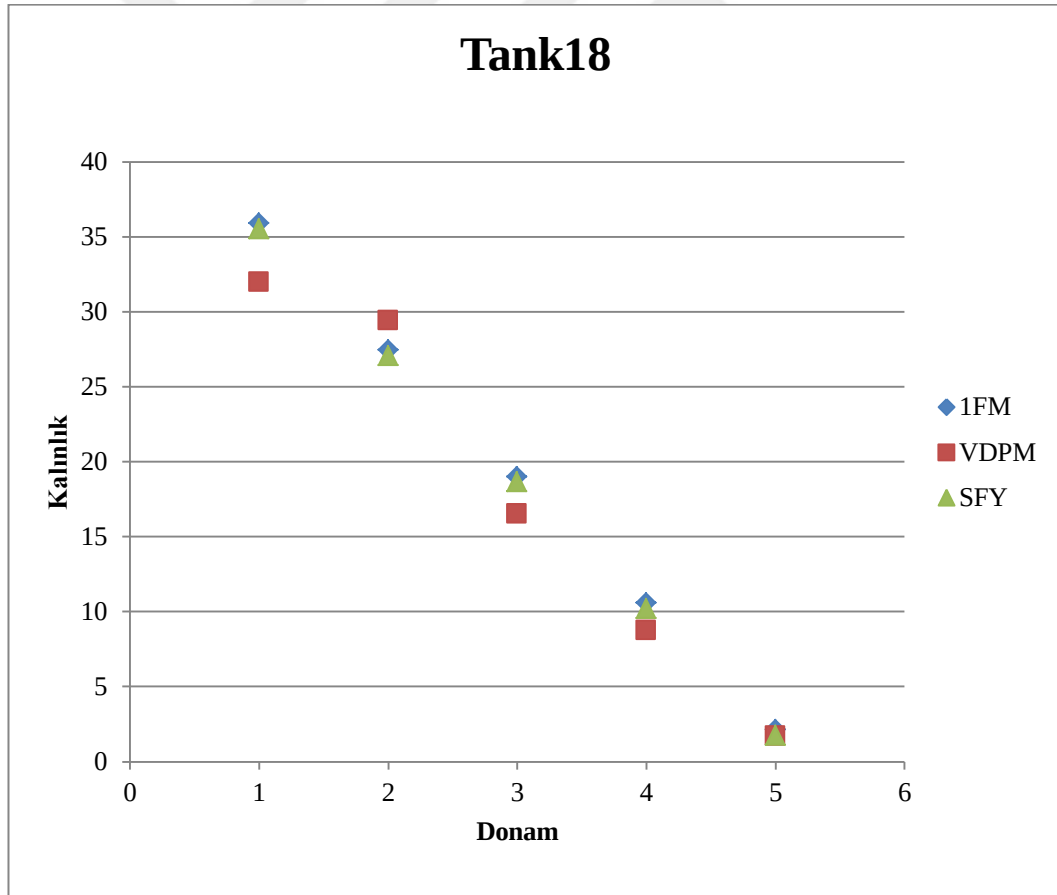


Şekil 5.17 : Tank17 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Çizelge 5.19 : Tank18 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.

Tank18					
Donam	1FM	VDPM	SFY	%Fark (1FM)	% Fark (VDPM)
1	35,883	31,956	35,508	1,05	-11,12
2	27,440	29,404	27,065	1,37	7,95
3	18,997	16,502	18,622	1,97	-12,85
4	10,554	8,722	10,179	3,55	-16,70
5	2,111	1,701	1,736	17,76	-2,06

Çap ve yükseklik değerleri sırasıyla 150m ve 12,2m olan tankta hesaplanan kalınlıklar yukarıdaki Çizelge 5.19’da gösterilmiştir. Hesaplanan kalınlıklar aşağıdaki Şekil 5.18’de tek bir grafik üzerinde verilmiştir. Tankın 1. Donamında SFY ile hesaplanan kalınlıklar 1FM’ye %1,05 farkla yaklaşmaktadır. VDPM ile %-11,12’lik farkla yaklaşmaktadır. 5. Donamda VDPM ile %-16,70 fark olmaktadır. 6. Donamda 1FM ile %17,76 fark olmaktadır. Ara donamlarda 1FM ile yakın sonuçlar çıkarken, VDPM ile sonuçlar sapmalar göstermektedir.



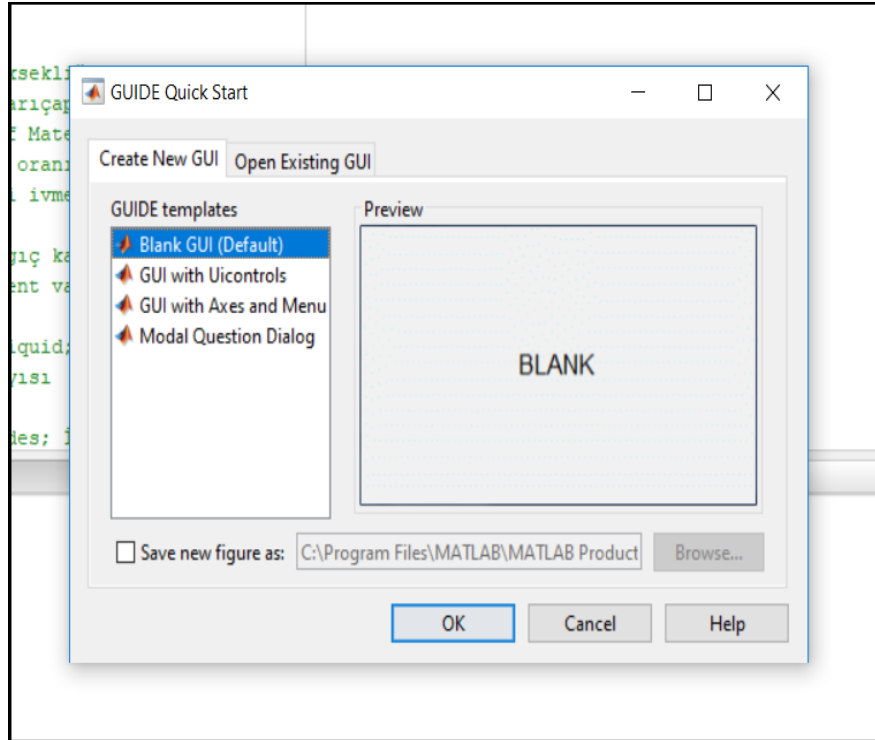
Şekil 5.18 : Tank18 için 1FM, VDPM ve SFY ile donam kalınlıkları.



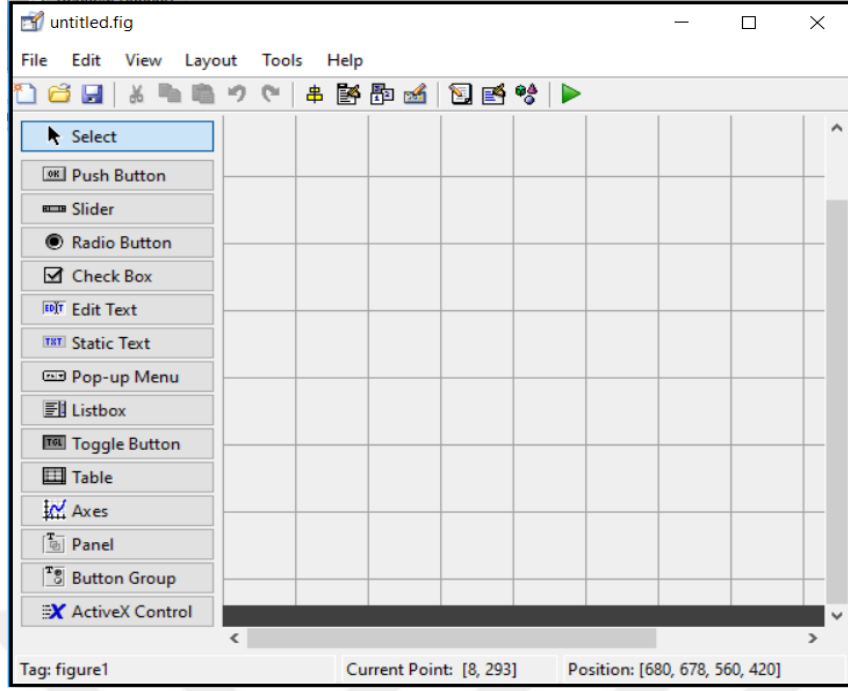
6. ARAYÜZ VE PROGRAM

6.1 Arayüzün Hazırlanması

Yapılan çözümün ve karşılaştırmalı olarak hesaplama yapılan yöntemlerin pratik olarak mühendislik problemlerinde kullanılabilmesi için, kullanışlı bir arayüze ihtiyaç vardır. Bunun için yine MATLAB’de bir GUI(Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) oluşturuldu. Komut satırına “guide” komutu yazılarak GUI penceresi açılır. Açılan GUIDE penceresinde yeni bir GUI (blank GUI, Şekil 6.1) seçimi yapılır. Açılan GUI ekranında tıkla ve sürükle-bırak tekniği ile GUI arayüzüne, Şekil 6.2’deki nesneler (sabit metin kutuları, değiştirilebilir metin kutuları, butonlar, liste kutuları, grafikler, paneller vs.) eklenir. Eklenen nesnelerin yatayda ve düşeyde hizalanması, tab sırasının değiştirilmesi, görsel ayarlar üzerinde değişiklikler yapılması da bu ortamın kullanıcılarına sunduğu avantajlardır.



Şekil 6.1 : Blank GUI(Default) ile boş bir GUI açılır.



Şekil 6.2 : Dosya sekmesinden bu nesnelerin isimleriyle birlikte görülebilir.

Sabit metin oluşturmak için “static text” nesnesi seçilir, sağ tıklanıp “inspector property” seçilir. “String” satırında ekranda görünmesini istenilen isim yazılır. Şekil 6.3’te “Tank Parametreleri” yazılmıştır. Bu özellikler tablosundan yazı fontu, büyüklüğü, rengi, sağa-merkeze-sola hizalamalar, yazının bulunduğu zemin rengi vs. özellikleri değiştirilebilir.

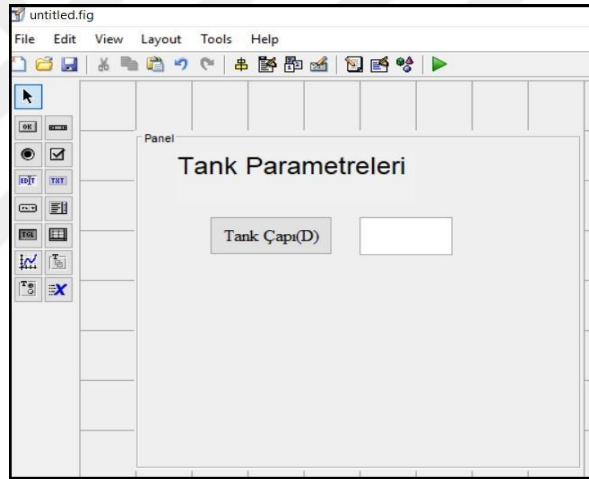
Kullanıcı tarafından girilebilen değiştirilebilen metin kutusu oluşturmak için öncelikle bu metin kutusunun bir açıklaması gereklidir. Sabit ismi olan bu açıklama yine “static text” nesnesi ile yapılır. “inspector property”den, “String” satırında ekranda görünmesini istenilen isim yazılır. Burada “Tank Çapı(D)” yazılmıştır. Buradaki sabit metnin tag ismine İngilizce karakterler ile “Tank_Capi” ismi verilir, böylece ileride hazırlanacak değiştirilebilir metin kutusu ile kod içindeki bağlantısı kurulurken bulması kolay olacaktır. Değiştirilebilir metin kutusu için “edit text” nesnesi kullanılır(Şekil 6.3). “inspector property”den tag ismi “edit_ Tank_Capi” olarak girilir. String arayüzde görünen ismi olduğu için boş bırakılır, böylece kullanıcı tank çapının metin kutusuna girebilir.

Layout(yerleşim) üzerinde grafik göstermek için, “axes” nesnesi seçilir. Şekil 6.4’te iki tane grafik eklenmiştir. Yine özellikler menüsünden, tag numaraları verilir: “Tank_Cizim” ve “Gerilmeyi_Dagilimi”(Şekil 6.4). Eklenen grafiklerin çizdirilebilmesi için, çalıştır butonu eklenmeli. Bunun için nesnelerden “push button”

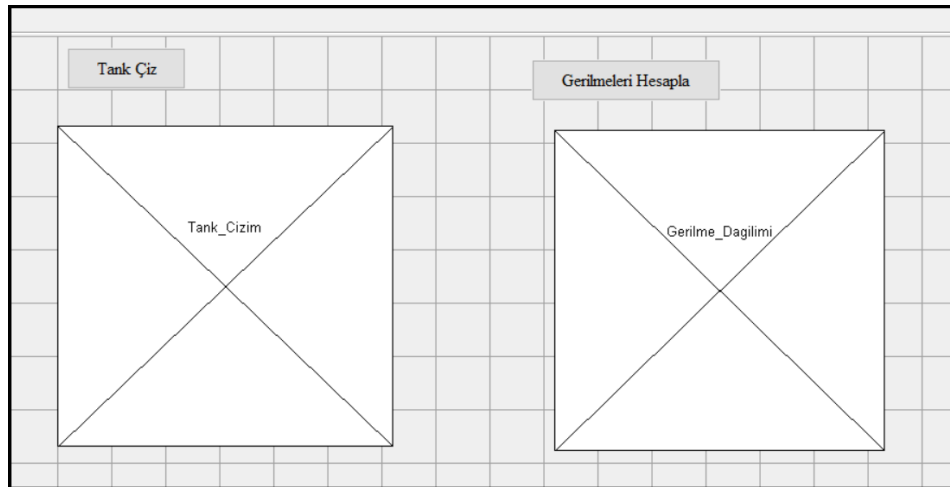
seçilir. Butonlara daha önce sabit metinde yapıldığı gibi isim verilir: “Tank Çiz” ve “Gerilmeyi Hesapla”. Butonların tag numaralarına “edit_ Tank_Ciz” ve “edit_ Gerilmeyi_Hesapla” yazılır, böylece kod içinde buton ve grafikler kolayca eşleştirilebilir.

Sabit metin kutusu, değiştirilebilir metin kutusu, buton nesneleri tekrarlanarak Şekil 6.5’teki “Donam Sayısı” değerleri hesaplanarak ekranda gösterileceği arayüz nesnesi yapılır.

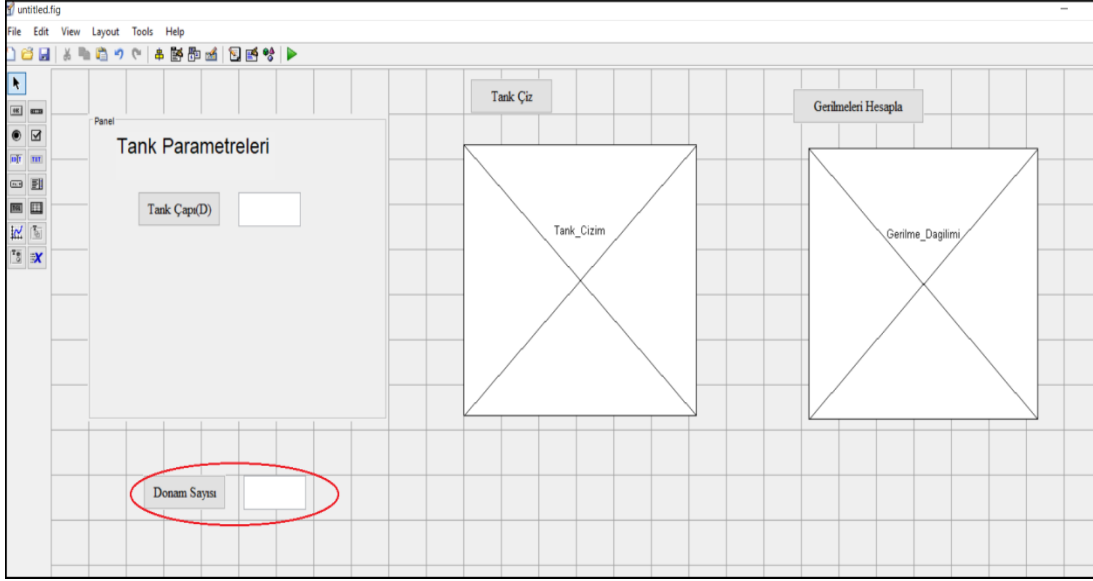
Kodlamanın içerisindeki istenilen tüm parametreler, hesaplanan sonuçlar ve grafikler arayüz ekranında gösterilebilir. GUI ekranında gösterilmek istenen değerler hazırlandıktan sonra yerleşim üzerinde Şekil 6.6’da, sağ tık-View Callbacks-CreateFcn komutu ile nesnelerin MATLAB çalışma dosyası içerisindeki karşılık gelen kodları oluşturulur.



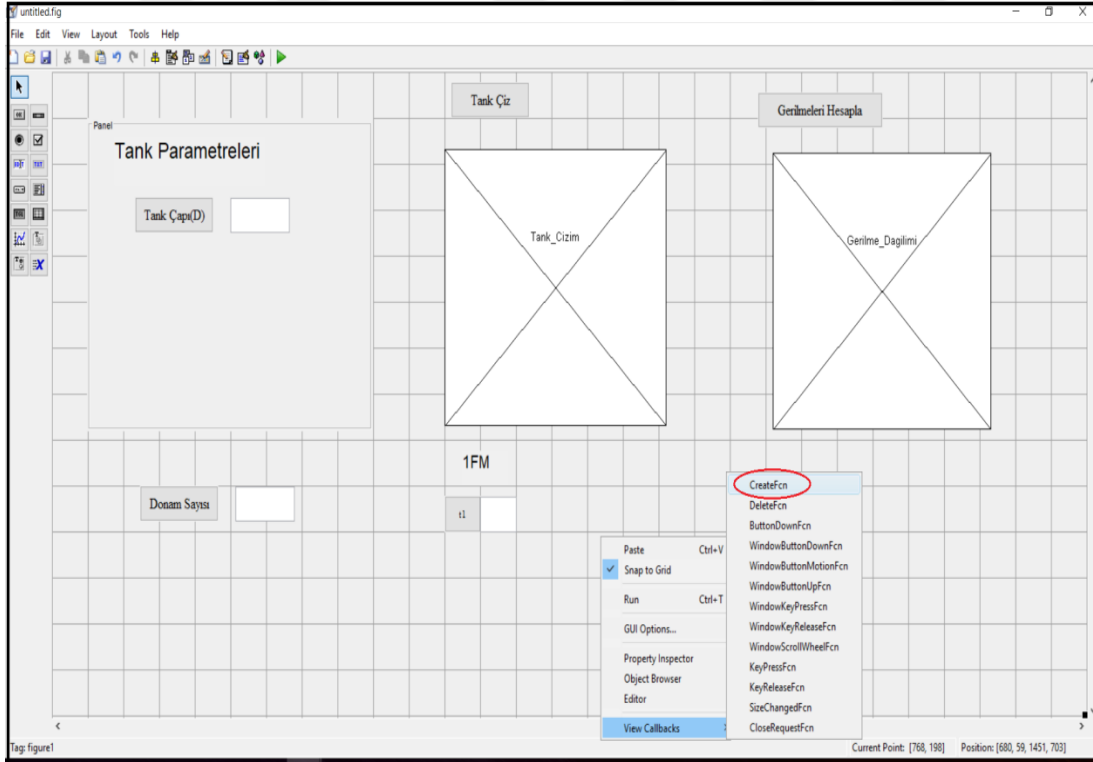
Şekil 6.3 : Değiştirilebilir metin kutusu “edit text” oluşturulur.



Şekil 6.4 : Grafikler ve grafikleri çizdiren buton nesnelerinin eklenmesi.



Şekil 6.5 : Donam sayısı değişken metin kutusu buton nesnelerinin oluşturulması.



Şekil 6.6 : GUI kodlarının oluşturulması.

GUI fonksiyon kodları oluşturulduktan sonra, MATLAB .m dosyası içerisinde kodların karşılıkları oluşturulmalıdır. Kullanıcının arayüz ekranında girdiği değerlerin koda çalıştırılabilmesi ve bu değerlerle hesaplanan sonuçların arayüz ekranında gösterilmesi için bu işlemin tüm nesneler için yapılması gerekmektedir.

Callbacks ile oluşturulan kodlar Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Bu satırdan itibaren MATLAB kodu içerisinde tank çapının kullanılacağı tüm değerleri Tank_Capi değişkeni ile değiştirdiği kontrol edildi. Böylece kullanıcının tank çapına girdiği değerler program içinde direkt kullanılacaktır.

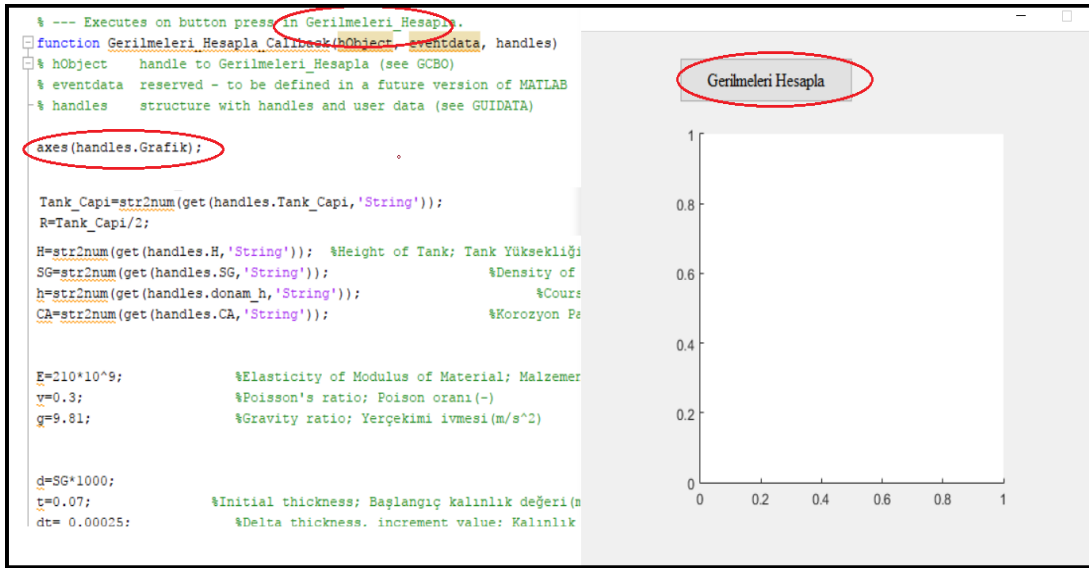
Tank çizimi için, tag isimleri kontrol edildikten sonra, “executes on button press in Tank_Ciz” fonksiyonun altında burada çizilecek grafiğin fonksiyonu yer almalıdır. Sonuç grafiğinin ekranda gösterilmesi için “axes(handles.Tank_Ciz)” komutu yer almalıdır.

Gerilmelerin hesaplanması için yine tank çiziminde yer alan adımlar yinelenir. Şekil 6.7’de görülmektedir.

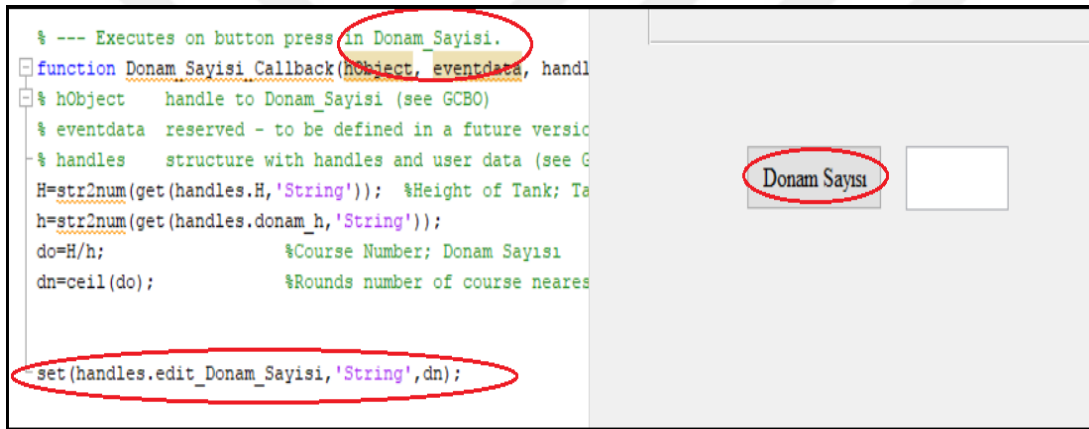
Şekil 6.8’de donam sayısının hesaplanması gösterilmiştir. “executes on button press in Donam_Sayisi” fonksiyonun altında donam sayısını hesaplayan program yerleştirilir. Program sonuna ise “set(handles.edit_Donam_Sayisi, ‘String’, dn)” komutu eklenir. Böylece donam sayısı butonuna basıldığında, değişken metin kutusunda programın hesapladığı donam sayısı(dn) değeri gösterilir.

Şekil 6.9’da ise 1FM yöntemi ile t_1 kalınlığının hesaplanması gösterilmiştir. Yine “executes on button press in tfm1” fonksiyonun altında 1FM yöntemine göre kalınlık hesaplayan program yerleştirilir. Program sonuna ise “set(handles.edit_tfm1, ‘String’, tfm1)” komutu eklenir. Böylece 1FM sabit metin kutusu altında bulunan t_1 butonuna basıldığında, değişken metin kutusunda programın hesapladığı kalınlık(t_1) değeri gösterilir.

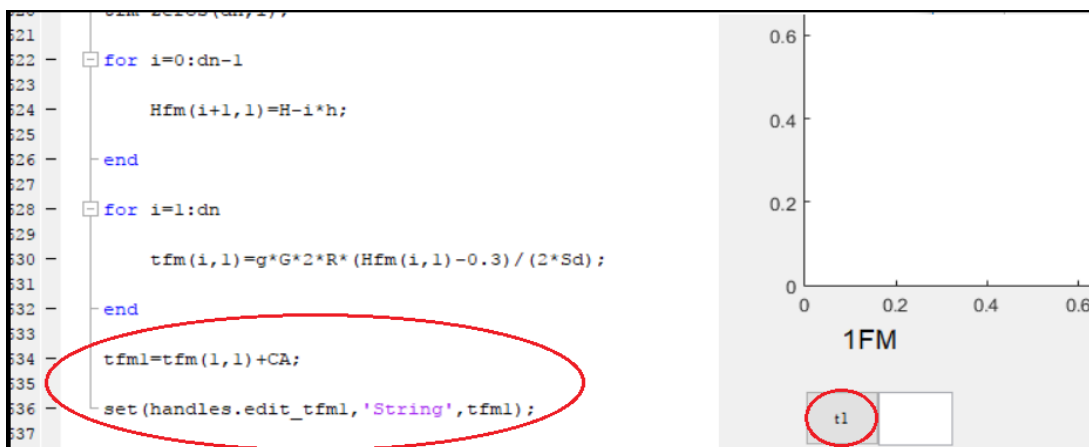
Yapılan işlemler GUI ekranında gösterilmesi planlanan tüm nesneler için tekrar edilir. Buton ve fonksiyon eşleştirilmeleri yapılır. Şekil 6.10’da bu tez için hazırlanan MATLAB GUI ekranı gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Gerilme hesapla butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi



Şekil 6.8 : Donam sayısı butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi.



Şekil 6.9 : 1FM t_1 kalınlığını hesaplama butonu ile kod fonksiyonun eşleştirilmesi.

ARAYUZ_TEZ

Tank Parametreleri

Tank Çapı (D)

metre (m)

Tank Yüksekliği (H)

metre (m)

Donam Yüksekliği (h)

metre (m)

Korozyon Payı (CA)

milimetre

Sıvı Özgöl Ağırlığı

Donam Sayısı

Tank Hacmi

metreküp

Tank Çiz

Sonuçlar

Gerilmeyi Hesapla

Çıkış

1FM

t1

t2

t3

t4

t5

t6

t7

t8

t9

VDPM

t1

t2

t3

t4

t5

t6

t7

t8

t9

SFY

t1

t2

t3

t4

t5

t6

t7

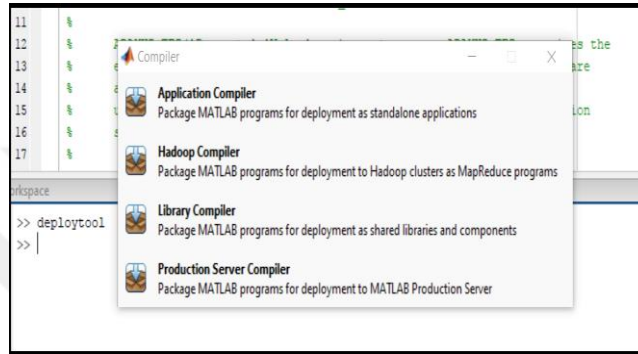
t8

t9

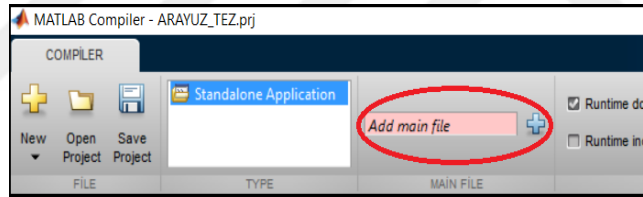
Şekil 6.10 : Arayüz.

6.2 Arayüzün Program Haline Getirilmesi

Arayüzü hazırlanan MATLAB kodlarını, pratik olarak kullanabilmek için .exe uzantısına dönüştürülür. Böylece hazırlanan çalışma farklı bilgisayarlarda, farklı kullanıcılar tarafından kullanılabilir. Bunun için ilk önce arayüzü hazırlanan .m dosyası açılır ve komut satırına “deploytool” yazılır. Açılan derleyici ekranında(Şekil 6.11) “Application Compiler” seçimi yapılır. Şekil 6.12’de görüldüğü gibi “add main file” sekmesine .m dosyası eklenir.



Şekil 6.11 : Açılan pencereden “Application Compiler” seçilir.

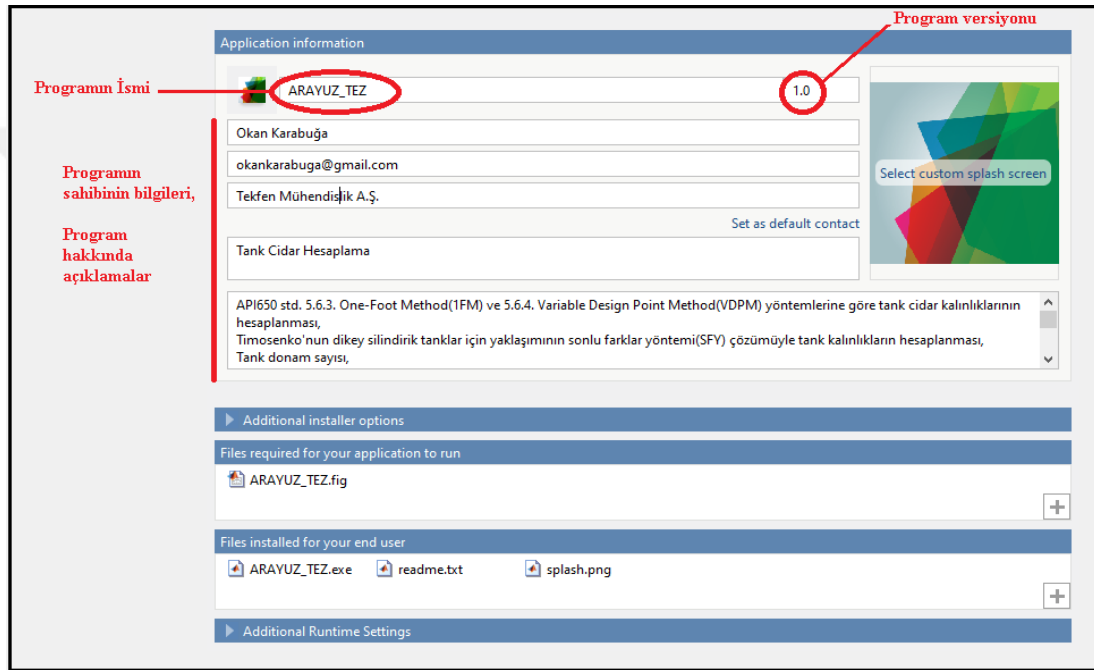


Şekil 6.12 : “Add main file” satırına .m dosyası yüklenir.

Şekil 6.13’de açılan ekranda, programın ismi, programın versiyonu, program üzerinde tasarruf hakkına sahip kişi veya kurumların iletişim bilgileri yazılır. Program hakkında açıklamalar eklenir. Bu çalışmada eklenen açıklamalar aşağıdaki gibidir:

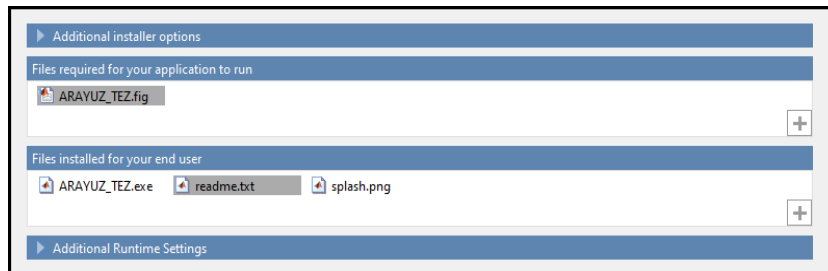
- ARAYUZ_TEZ 1.0,
- Okan Karabuğa,
- Tekfen Mühendislik A.Ş.,
- Tank Cidar Hesaplama,
- API 650 std. 5.6.3. One-Foot Method(1FM) ve 5.6.4. Variable Design Point Method(VDPM) yöntemlerine göre tank cidar kalınlığının hesaplanması,

- Timoshenko'nun dikey silindirik tanklar için yaklaşımının sonlu farklar yöntemi(SFY) çözümüyle tank kalınlıklarının hesaplanması,
- Tank donam sayısı,
- Tank hacmi,
- Tank cidarında gerilme dağılımı,
- 1FM kalınlıklar,
- VDPM kalınlıklar,
- SFY kalınlıklar,

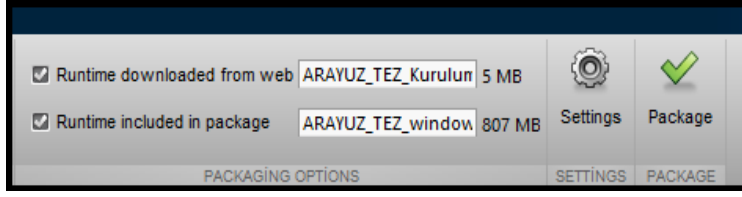


Şekil 6.13 : Program açıklamaları.

Gösterilen bölümden program açılış resmi eklenir. Program arayüzünde çalışacak, tezin 6.1 bölümünde hazırlanan ARAYUZ_TEZ.fig dokümanı yüklenir. İstenirse readme.txt dokümanı eklenir (Şekil 6.14). Bu işlemlerin ardından Şekil 6.15'teki "Package" komutu ile programlar derlenir.



Şekil 6.14 : Arayüz dokümanının eklenmesi.



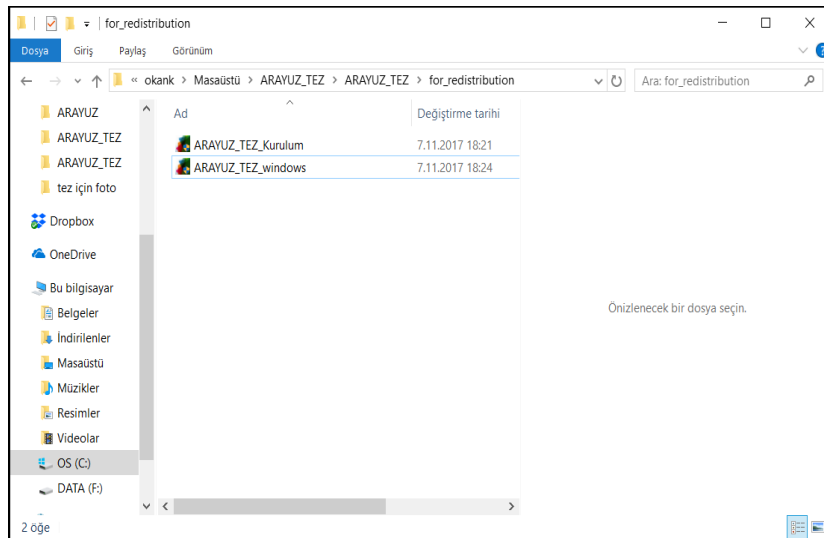
Şekil 6.15 : Package ile program derlenir.

Derleme komutundan sonra, programın kod uzunluğuna, bilgisayar özelliklerine bağlı olarak bir süre beklenir. Derleme sırasında herhangi bir problem çıkmaması için, kod .m dosyası ile arayüz .fig dosyasının aynı isme sahip olması gerekir. Bunun yanı sıra kod içindeki .fig ile bağlantılı olan her komut aynı isimlerden oluşmalıdır.

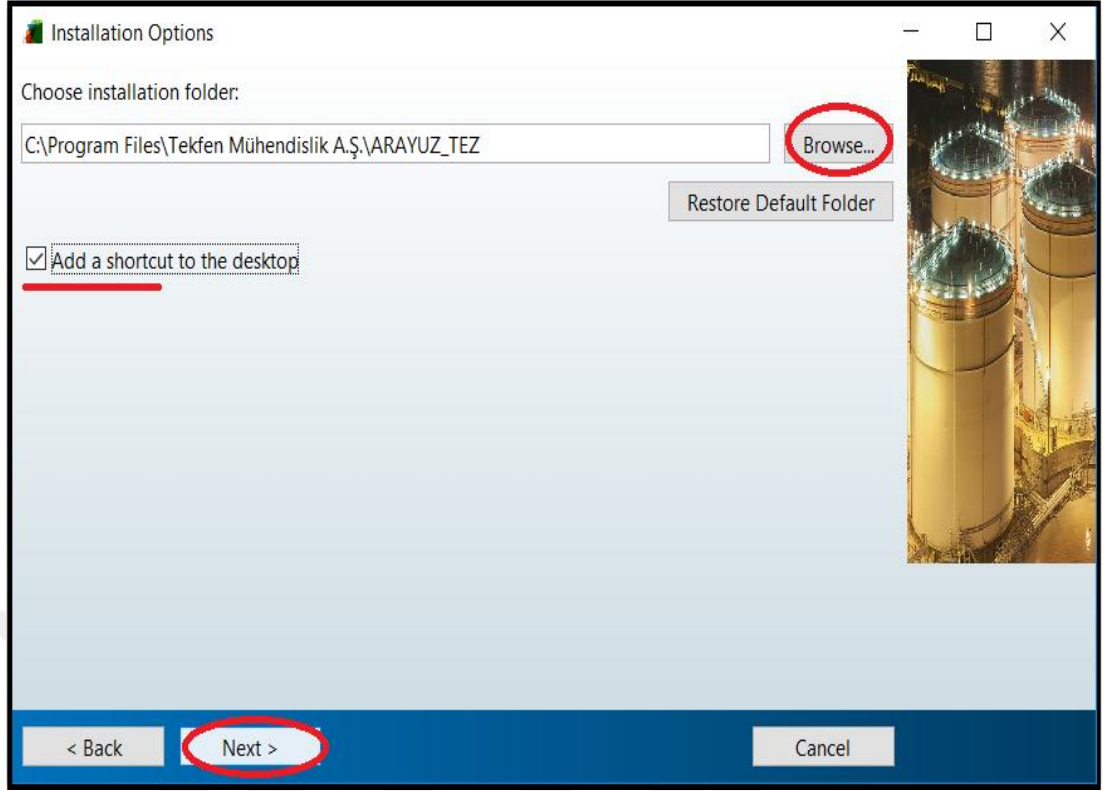
Derleme tamamlandıktan sonra oluşturulan dosyalar: “for_redistribution” dosyasında “ARAYUZ_TEZ Kurulum” “ARAYUZ_TEZ windows” yani kurulum dosyası bulunmaktadır. “for_redistribution_first_only” dosyasında program kısayolu readme.txt ve program açılış resmi bulunmaktadır. “for_testing” dosyasında ise test amaçlı ARAYUZ.exe, readme.txt, kısayol simgesi ve program açılış resmi bulunmaktadır. Programın kurulum dosyaları EK A5’te verilmiştir.

6.3 Programın Kurulumu ve Kullanımı

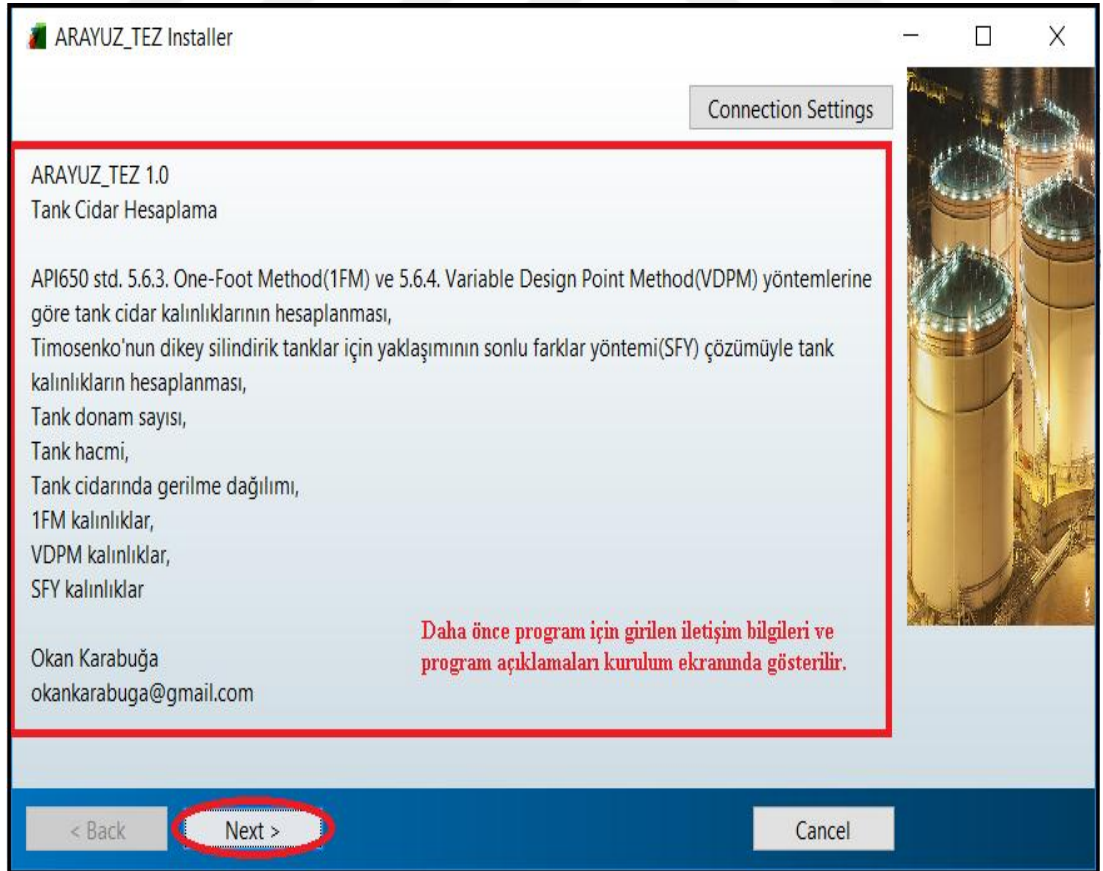
Hazırlanan program farklı ortamlarda “ARAYUZ_TEZ_Kurulum” MATLAB olan bilgisayarlar için, “ARAYUZ_TEZ_windows” MATLAB olmayan bilgisayarlar için kurulabilir. Kurulum için devam eden sayfalardaki adımlar yapılır.



Şekil 6.16 : “ARAYUZ_TEZ_Kurulum” veya “ARAYUZ_TEZ_windows” tıklanır.

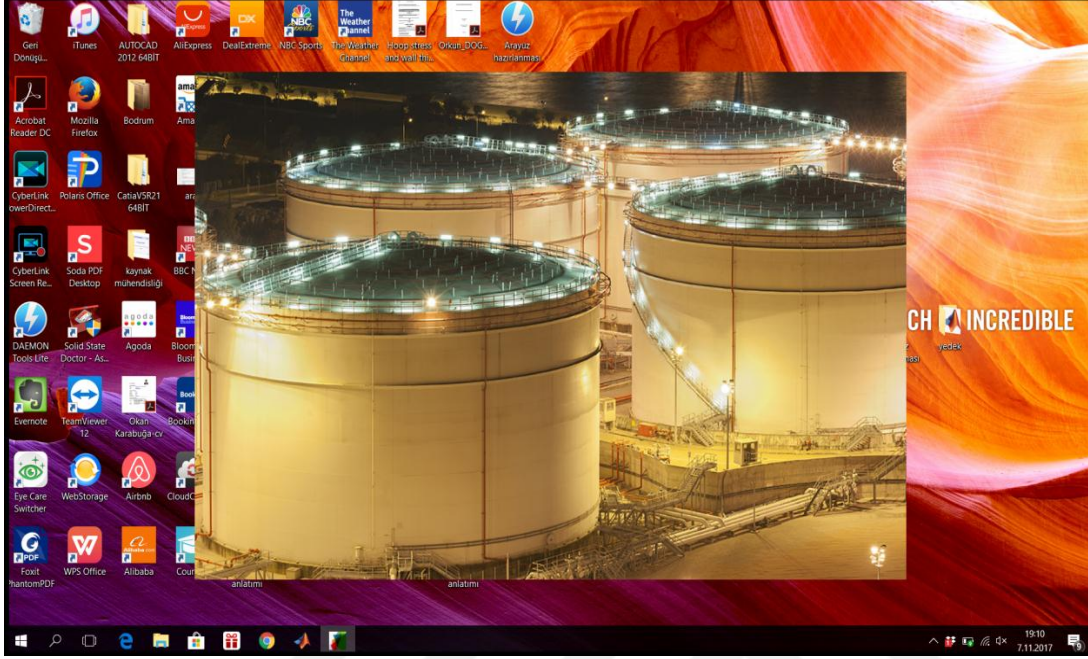


Şekil 6.17 : Programın kurulacağı yer seçilir ve istenirse kısayol oluşturulur.



Şekil 6.18 : Açılan ekrandan “next” tıklanır.

Program .exe haline dönüştürülürken girilen açıklamalar, bu ekranda kullanıcının bilgisine sunulur. Yukarıdaki Şekil 6.18’de gösterilen kırmızı dikdörtgenin içerisinde açıklamalar gösterilmiştir.



Şekil 6.19 : Kısayol ile program çalıştırılır, program açılış resmi ile başlar.

ARAYUZ_TEZ

Tank Parametreleri

Tank Çapı (D) metre (m)

Tank Yüksekliği (H) metre (m)

Donam Yüksekliği (h) metre (m)

Korozyon Payı (CA) milimetre

Sıvı Özgöl Ağırlığı

Donam Sayısı

Tank Hacmi metreküp

Sonuçlar

Tankı Çiz

Gerilmeyi Hesapla

Çıkış

1FM

t1	
t2	
t3	
t4	
t5	
t6	
t7	
t8	
t9	

VDPM

t1	
t2	
t3	
t4	
t5	
t6	
t7	
t8	
t9	

SFY

t1	
t2	
t3	
t4	
t5	
t6	
t7	
t8	
t9	

Şekil 6.20 : Program kullanıma hazırdır.



7. SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALAR

Çapları 21m ile 150m arası değişen toplam 18 tankın literatürdeki iki yöntem ve hazırlanan sonlu farklar yöntemi ile çözüm yapan program ile cidar kalınlıklarının hesapları yapıldı.

Tank çapı 60m'den küçük olan tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %1,05'lik farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM farkı üst donamlara çıkıldıkça artmaktadır. En üst donamda ise fark %17'lik farklarla sapmaktadır. SFY çözümü daha ince cidar kalınlıkları vermektedir.
- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %6,58'e (örneğin; Tank1) varan farkla birbirine yakın çıkmaktadır. İkinci donamda bu fark %0,82'ye (örneğin; Tank2) kadar düşmektedir. Diğer donamlarda ise bu sapmalar farklılık göstererek üst donama doğru artmaktadır. En üst donamda ise %37'ye (örneğin: Tank1) varan farklılıklarla sapmaktadır. SFY ile VDPM karşılaştırıldığında, SFY bazı donamlarda ince bazı donamlarda kalın sonuçlar vermektedir.

Tank çapı 60m'den küçük olan, yüksekliği 12,2m'den 14,6m'ye arttırılmış tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %0,88 (örneğin; Tank4) farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM sapmalarının farkı üst donamlara çıkıldıkça artmaktadır. En üst donamda ise fark %41'lik farklar çıkmaktadır. SFY çözümü daha ince sonuçlar vermektedir.
- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %6,24'e (örneğin; Tank4) varan farkla birbirine yakın çıkmaktadır. İkinci donamda bu fark %0,29'ye (örneğin; Tank5) kadar düşmektedir. Diğer donamlarda ise bu sapmalar farklılık göstererek üst donama doğru artmaktadır. En üst donamda ise %37'ye varan farklılıklarla sapmaktadır. SFY ile VDPM

karşılaştırıldığında, SFY bazı donamlarda ince bazı donamlarda kalın sonuçlar vermektedir.

Tank çapı 60m'den büyük 100m'den küçük olan tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %1,05'lik farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM farkı üst donamlara çıkıldıkça artmaktadır. En üst donamda ise %17'lik farklarla sapmaktadır. SFY çözümü daha ince sonuçlar vermektedir.
- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %1,34'e (örneğin; Tank7) varan farkla birbirine yakın çıkmaktadır. Sapmalar ara donamlarda ve en üst donamda artmaktadır. 2. ve 3. Donam sapmalarının mertebeleri aynıdır: Tank7 %-3; Tank8 %-5, Tank9 %-7. En üst donamlarda ise bu sapmalar %26'ya (örneğin; Tank7) varan farklılıklarla sapmaktadır. SFY ile VDPM karşılaştırıldığında, SFY en üst donamlarda ince kalınlık sonuçları vermektedir. Diğer donamlarda ise VDPM'den daha kalındır.

Tank çapı 60m'den büyük 100m'den küçük olan, yüksekliği 12,2m'den 14,6m'ye arttırılmış tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %0,87'lik farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM farkı üst donamlara çıkıldıkça sapmalar artmaktadır. Son donamda ise %41'lik farklarla sapmaktadır. SFY çözümü daha ince sonuçlar vermektedir.
- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %1,84'lük farkla birbirine yakın çıkmaktadır. 2., 3. ve 4. Donam sapmalarının mertebeleri aynıdır: Tank10 %-3; Tank11 %-5, Tank12 %-6. En üst donamda ise %59'a (örneğin; Tank10) varan farklılıklarla sapmaktadır. SFY ile VDPM karşılaştırıldığında, SFY en üst donamlarda ince kalınlık sonuçları vermektedir. Diğer donamlarda ise VDPM'den daha kalındır.

Tank çapı 100m'den büyük olan tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %1,28'lik farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM farkı üst donamlara çıkıldıkça sapmalar artmaktadır. Son donamda ise fark %14,48'e (örneğin; Tank13) varan farklarla sapmaktadır. SFY çözümü daha ince sonuçlar vermektedir.

- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %-12,7'ye (örneğin; Tank15) varan farkla birbirinden sapmaktadır. Aradaki ve en üstteki donamlarda ise farklar değişken çıkmaktadır. Bir genelleme yapılması söz konusu değildir. Tank14'te %2,68 ile yaklaştığı donam kalınlığı varken; Tank15'te ise %-15,77 ile saptığı donam kalınlığı bulunmaktadır.

Tank çapı 100m'den büyük olan, yüksekliği 10m'den 12,2m'ye arttırılmış tanklarda;

- SFY çözümü ile 1FM çözümü alt donamlarda %1,05'lik farkla yakın çıkmaktadır. SFY ile 1FM farkı üst donamlara çıkıldıkça sapmalar artmaktadır. Son donamda ise fark %17'lik farklarla sapmaktadır. SFY çözümü daha ince sonuçlar vermektedir.
- SFY çözümü ile VDPM çözümü alt donamlarda %-11,12'ye (örneğin; Tank18) varan farkla birbirinden sapmaktadır. Aradaki ve en üstteki donamlarda ise farklar değişken çıkmaktadır. Yine burada da genelleme yapılması söz konusu değildir. Tank18'te 5. donam olan en üst donamda %-2,06 ile yaklaştığı donam kalınlığı varken; aynı tankın 4. Donamında ise %-16,70 ile saptığı donam kalınlığı bulunmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada, büyük depolama tanklarının cidar kalınlıklarının hesaplanması için, Timoshenko'nun hidrostatik basınç altındaki düşey silindirik tanklar için cidar deformasyon denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen çözüm kodu, arayüz ve program MATLAB'da hazırlanmıştır. Böylece yerli kullanışlı bir tasarım programı elde edilmiştir.

Elde edilen sonlu farklar çözüm kodu ile literatürde yapılmış olan deney sonuçları 4. bölümde kıyaslanmıştır.



8. ÇIKARIMLAR VE ÖNERİLER

8.1 Çıkarımlar

SFY ile 1FM ilk donamlarda ve ara donamlarda oldukça birbirine yakın değerler vermektedir. Farklar %1 ile %4 arasında değişmektedir. SFY sonuçları daha incedir. En üst donamda ise kalınlıklarda arasındaki sapma artmaktadır, sebebi ise çok küçük çıkan kalınlıkların yüzde olarak sapma hesaplandığında büyük çıkmasıdır. Diğer bir değişle en üst donamlar alt donam yüksekliklerine yakın olursa sapmalar yine aynı mertebede çıkacaktır. Donam yükseklikleri değiştirilerek ekonomik tasarımlar yapmak mümkündür.

SFY ile VDPM ilk ve ara donamlarda %6 ile %8 farklar ile birbirine yakındır. Ancak yine en üst donamda 1FM'de olduğu gibi büyük sapmalar olmaktadır. Tank çapı 100m'den büyük olan tanklarda yüksekliklerin de artmasıyla VDPM ile SFY çözümleri arası sapmalar bir karakterin dışına çıkmaktadır. Bir sapma genellemesi yapılamamaktadır.

SFY hesaplamasından kaynaklanan hataların da sonuç üzerinde etkisi olabilir. Yüksek dereceden fonksiyonlar hesaplanırken kullanılan serilerde alınan terim sayısına bağlı olarak kesme hataları oluşabilir. Bunun dışında yapılan işlemlerde gerçel sayılarda virgülden sonra alınan rakam sayısı da yuvarlatma hatalarına neden olabilir. Tüm denklemlerde bu hataların toplanarak arttığı düşünüldüğünde sayısal çözümlerin tam sonuçlar vermemesi anlaşılabilir.

Sonuç olarak SFY ile yapılan çözümleme literatürde bulunan diğer tank kalınlığı hesaplama yöntemlerinden olan 1FM'den daha ince donam kalınlıkları sonuçları vermektedir. Bu durumda burkulma riski için, cidar kalınlığının daha ince çıkması, daha az malzeme kullanımı, saha işleri, işçilik maliyetleri lojistik gibi tasarım, imalat ve inşaat süreçlerinde daha ekonomik bir çözüm elde edilmiştir. Yapılan çalışma program haline getirilerek, sürekli kullanılabilir hale getirilmiştir.

8.2 Öneriler

Literatürde bulunan iki yöntem ile yapılan tank kalınlığı hesaplarından VDPM ile olan hesapların gerçekleştirilmeden önce, emniyetsiz tasarımlara neden olmaması için sonlu elamanlar analizi yapılmalıdır. Tank cidarındaki gerilmeler tank yüksekliği boyunca incelenmelidir. Bunun yanı sıra bu tez çalışmasında yapılan SFY çözümü veya 1FM ile tank tasarımlarının emniyetli yapılması mümkündür. SFY bir miktar daha hafif konstrüksiyonlar elde edilmesini sağlar.

Bu tez çalışmasında yapılan çözüme bir arayüz tasarlanmıştır. Bu sayede pratik olarak kullanılabilir bir çalışma haline gelmiştir. Burada yapılanların yanı sıra daha çok parametrenin eklenmesiyle arayüz programın geliştirilmesi yapılabilir. Bu çalışmada donamlar arası kaynak dikişlerinin verimleri 1,0 olarak düşünülmüştür. Kaynak verimi programa giriş yapılabilir (örneğin; JE: 0,85). Sıvı buhar basıncı veya tank çalışma basıncı girilebilir böylece sadece açık tanklar için değil kapalı bir başka deyişle çatıya sahip tanklar için de hesaplamalar yapılabilir. Tanklar için vakum basıncı girilebilir. Malzeme kütüphanesi girilerek, farklı malzemelerin seçimleri yapılır. Tankların çalışma sıcaklıkları da arayüzden girilebilir yapılabilir, sıcaklıklara bağlı olarak malzeme akma dayanımları hesaplanıp daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Program içerisine yardım butonu eklenebilir: tank konstrüksiyonu, malzeme mekanik özellikleri, tank cidar hesaplama yöntemleri gibi konularda kullanıcının faydalanabileceği bilgiler eklenebilir. Tank tonajı butonu eklenerek, güncel çelik fiyatlarının da kullanıcı girişiyle tasarımı yapılan tanklar için maliyet çalışması yapılabilir. Tüm hesap sonuçları word dosyasına yazılabilecek şekilde programa kod ve arayüz nesneleri eklenebilir. Böylece hızlı, kullanımı kolay ve sonuç odaklı depolama tankları tasarımı yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Myers, P. E.** (1997). Aboveground storage tanks, *McGraw-Hill*, New York.
- [2] **Long, B. ve Garner, B** (2004). Guide To Storage Tanks And Equipment, *Professional Engineering Publishing*.
- [3] **Url-1** <<http://theamericanenergynews.com/wp-content/uploads/2016/07/Oil-products.jpg> >, alındığı tarih: 13.11.2017.
- [4] **API Standard 620** (2013). Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks, *American Petroleum Institution*.
- [5] **Von Karman, T. ve Tsien, H.** (1941). The buckling of thin cylindrical shells under axial compression, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 303-312.
- [6] **Koiter, W. T.** (1963). The effect of axisymmetric imperfections on the buckling of cylindrical shells under axial compression, *Proc. K. Ned. Akad. Wet., Lockheed Missiles and Space Co. Rep.*, California.
- [7] **Kaplan, A.** (1974). Buckling of spherical shells, *Thin Shell Structures, Theory, Experiment, and Design*, 248-288. New Jersey.
- [8] **Chang, J.I. ve Lin, C.C.** (2005). A study of storage tank accidents, *Journal of Loss Prevention in The Process Industries* 19 (2006), 51–59.
- [9] **He, W., Liu L., ve Yang, J.** (2009). Reliability analysis on shell design of large oil storage tanks, *The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Transfer Engineering, Berlin*.
- [10] **Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger** (1959), Theory of plates and shells, *McGraw-Hill Book Company Inc.*, 466–487 New York.
- [11] **Guzey, S. ve Azzuni, E.** (2015). Comparision of shell design methods for cylindrical liquid storage tanks, *Engineering Structures* 101, 621-630.
- [12] **Chen, Z.P., Duan, Y.Y., Shen, J.M., Jiang, J.K.** (2007). A simplified method for calculating the stress of a large storage tank wall, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 119-127.

- [13] **Feng, W., Chen, Z., Shen, X., Zhou, F. ve Fan, H.** (2013). Optimization analysis on the structure parameters of a $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ultra-large tank for crude oil storage tank, *Proceedings of The ASME 2013 Pressure Vessels And Piping Conference PVP 2013*.
- [14] **Oskouei, A.N ve Naghani, E.N.** (2014). Mechanical behavior investigation for an atmospheric storage tank according to apı 650 under loads using FEM, *Journal Of Current Research In Science, Vol.2, No:5, 664-672*.
- [15] **Sanchez, N.S., Salas, C.C ve Dominguez, A.M.** (2004). Structural behaviour of liquid filled storage tanks of large capacity placed in seismic zones of high risk in Mexico, *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Kanada* 101.
- [16] **Zdravkov, L.A.** (2009). Check of shell of cylindrical aboveground steel tanks for loss of stability, *University of Architecture, Sofia*.
- [17] **Türkel, V., Oğur, A. Ve Anık, S.** (2008). Küresel tankların dizayn ve imalatının bilgisayar yardımıyla incelenmesi, *İGDAŞ UGETAM, İstanbul*.
- [18] **Acar, O.** (2009). Petrol depolama tanklarının imalatı montajı ve kaynaklı bağlantılarının tahribatsız muayenesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya*.
- [19] **API Standard 650** (2013). Welded steel tanks for oil storage, *American Petroleum Institution*.
- [20] **Choi, D.** (2009). A Finite Diifference Element Method for Thin Elastic Shells, *Universit'e de Caen, Caen*.
- [21] **Elso, M.I.** (2012). Finite difference method studies on the stability behavior of cylindrical shells under axial and radial uniform and non-uniform loads, *Hochshule Niederrhein, Krefeld, Almanya*.
- [22] **LeVeque, R.J.** (2007). Finite difference methods for differential equations, *University of Washington Seattle, Washington*.
- [23] **Mackerle, J.** (1996). Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, *Int. J. Pres. Ves & Piping* 69 (1996), *Elsevier Science Limited*, 279-339, Linkiiping, Sweden.
- [24] **Url-2** < <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mech335/beamfdeg1.htm>>, alındığı tarih: 13.11.2017.
- [25] **Khun G. ve Mang H.** (1989). Discretization methods in structural mechanics *IUTAM/IACM Symposium, Viyana, Avusturya*.
- [26] **Yang, L., Chen, Z., Cao, G., Yu, C., Guo, W.** (2013). An analytical formula for elasticelasticeplastic instability of large oil storage tanks, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 101, 72-80.

- [27] **Url-3** < <http://www.nssmc.com/en/index.html>>, alındığı tarih: 13.11.2017.
- [28] **JIS B 8501**, Welded steel tanks for oil storage, *Japanese Industrial Standard*, Tokyo, Japonya
- [29] **Url-4** <<http://gangsteel.net/product/Pressure/g3115/SPV490/STEEL/PLATE.html>>, alındığı tarih: 13.11.2017.
- [30] **Url-5** <http://www.x_nsteel.com/gb-713/16mnr.html>, alındığı tarih: 13.11.2017.





EKLER

EK A1: Basit Kirişte Deformasyonun SFY MATLAB Kodu

EK A2: Sınır Değer Probleminin SFY MATLAB Kodu

EK A3: Timoshenko'nun Denkleminin SFY MATLAB Kodu

EK A4: Deney Tankının SFY MATLAB Kodu

EK A5: Program



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Okan KARABUĞA

Doğum Yeri ve Tarihi: Burdur – 01.10.1990

E-Posta: okankarabuga@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

Yüksek Lisans : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makina Fakültesi, Konstrüksiyon Programı

MESLEKİ DENEYİM:

2013 yılından itibaren Tekfen Mühendislik-Teknoloji Departmanı'nda Makina Mühendisi olarak çalışmaktadır.