

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FPSO ÇEŞİDİ AÇIK DENİZ YAPILARININ
GÜVERTE ÜZERİNDE BULUNAN BORU
HATLARINA ETKİYEN DENİZ YÜKLERİNİN
DİNAMİK ANALİZİ

Teoman KAHRAMAN

Mart, 2011
İZMİR

**FPSO ÇEŞİDİ AÇIK DENİZ YAPILARININ
GÜVERTE ÜZERİNDE BULUNAN BORU
HATLARINA ETKİYEN DENİZ YÜKLERİNİN
DİNAMİK ANALİZİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Kıyı Mühendisliği Bölümü

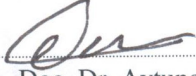
Teoman KAHRAMAN

Mart, 2011

İZMİR

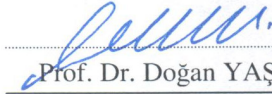
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Teoman KAHRAMAN, tarafından Doç. Dr. Aytunç EREK yönetiminde hazırlanan “FPSO ÇEŞİDİ AÇIK DENİZ YAPILARININ GÜVERTE ÜZERİNDE BULUNAN BORU HATLARINA ETKİYEN DENİZ YÜKLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



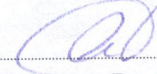
Doç. Dr. Aytunç EREK

Danışman



Prof. Dr. Doğan YAŞAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Yard. Doç. Dr. Çiçek ÖZES

Tez İzleme Komitesi Üyesi



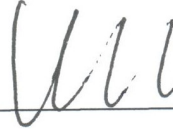
Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Şükrü Turan BEŞİKTEPE

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatımın her aşamasında emeği geçen değerli öğretmenlerime ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teŐekkürlerimle...

Teoman KAHRAMAN

FPSO ÇEŞİDİ AÇIK DENİZ YAPILARININ GÜVERTE ÜZERİNDE BULUNAN BORU HATLARINA ETKİYEN DENİZ YÜKLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ

ÖZ

Açık deniz yapılarının güverterinde, rüzgar, dalga, akıntı v.b dinamik çevre yükleri kaynaklı çok büyük su hareketleri zaman zaman meydana gelmekte ve bu olay güverteyi su basması olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, FPSO çeşidi açık deniz yapılarının işletimleri sırasında karşılaşılan güverteyi su basması olayı kaynaklı deniz yükleriyle, güverte üzerinde bulunan boru hatlarında meydana gelen yer değiştirmeler arasındaki ilişki incelenmiştir. Boru hattında meydana gelen zorlamaları analiz etmek ve yapının davranışlarını inceleyebilmek amacıyla sistemin matematik modeli oluşturulmuş ve bilgisayar destekli uygulama çalışmaları yapılmıştır. Uygulama çalışmalarında farklı malzemelerden imal edilmiş borular için hareket denklemine ait değişkenlerle, boruda meydana gelen yer değiştirme arasındaki ilişki incelenmiştir. Değişkenlerin yer değiştirmeye etkileri karşılaştırıldığında, boru üzerine etkiyen dalga kaynaklı dış akışkan hızının en çok etkiye sahip olduğu görülmektedir. Boru boyu, boru kütlesi ve boru içerisindeki akışkanın hızı da yer değiştirme büyüklüğünü etkileyen diğer önemli etkenlerdir.

Anahtar sözcükler: Açık deniz yapıları, petrol platformları, FPSO, güverteyi su basması, güverte üzerindeki boru hatları

DYNAMIC ANALYSIS OF SEA LOADS ON PIPELINES ON DECK OF FPSO TYPE OFFSHORE STRUCTURES

ABSTRACT

Strong water motions due to green water loading occur above main deck of offshore structures influenced by dynamic sea loads include wind, wave, current etc. occasionally. In this study, it was researched relationship between sea loads due to green water loading and displacement changes on pipelines above main deck of a FPSO type offshore structure in this study. After mathematical model had been defined for analyzing behaviors of the subject pipeline, computer aided case studies were studied. The subject studies include relationships between the displacement values of different kinds of pipe and parameters of the model. The results show that fluid velocity values of wave particulars are the most important one for the displacement when effects of the parameters are investigated. Additionally, length and mass of the pipe and also fluid velocity inside the pipe are other important parameters for the displacement values.

Keywords: Offshore structures, oil rigs, FPSO, green water, pipeline above main deck

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZ	IV
ABSTRACT	V
SEMBOL LİSTESİ.....	VII
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
BÖLÜM İKİ – DİNAMİK ANALİZ	16
2.1 Genel	16
2.2 Hareket denkleminin elde edilmesi	18
2.2.1 FPSO'nun hareketsiz olduğu durum.....	26
2.2.2 FPSO'nun hareketli olduğu durum.....	27
BÖLÜM ÜÇ – UYGULAMA ÇALIŞMALARI	29
3.1 Genel	29
3.2 Uygulamalar	30
3.2.1 Çelik boru için uygulama çalışması.....	31
3.2.2 Alüminyum boru için uygulama çalışması	42
3.2.3 PVC boru için uygulama çalışması	53
3.2.4 CTP boru için uygulama çalışması	64
3.2.5 HDPE boru için uygulama çalışması.....	75
BÖLÜM DÖRT – SONUÇLAR.....	86
KAYNAKLAR	91

SEMBOL LİSTESİ

u	yatay yer değiştirme [m]	ρ	akışkan yoğunluğu [kg/m ³]
y	düşey yer değiştirme [m]	A_I	boru dış kesit alanı [m ²]
t	zaman [s]	A_D	borunun iç kesit alanı [m ²]
L	boru boyu [m]	u^*	akışkan parçacıklarının hızı [m/s]
$(\dot{\quad})$	konuma göre türev	D_d	borunun dış çapı [m]
$(\ddot{\quad})$	zamana göre türev	D_i	borunun iç çapı [m]
E	elastisite modülü [N/m ²]	u	dalga hızı [m/s]
I	atalet momenti [m ⁴]	u_0	dalga genliği [m]
M	akışkanın birim boy kütlesi [kg/m]	θ	dalga frekansı [1/s]
m	borunun birim boy kütlesi [kg/m]	T	boyutsuz zaman
A	akışkan kesit alanı [m ²]	w	boyutsuz yer değiştirme
q	kayma gerilmesi [N/m ²]	β	boyutsuz doluluk oranı
S	çevre uzunluğu [m]	v	boyutsuz hız
F	enine kuvvet [N]	μ	boyutsuz sönüm katsayısı
U	akışkan yer değiştirmesi [m]		
T	boyuna gerilme [N/m ²]		
g	yerçekimi ivmesi [m/s ²]		
Q	enine kayma gerilmesi [N/m ²]		
\mathcal{M}	egilme momenti [Nm]		
c	viskozite katsayısı		
a	sönüm katsayısı		
ν_p	Poission oranı		
\bar{A}	boru iç (akışkan) kesit alanı [m ²]		
\tilde{A}	boru dış kesit alanı [m ²]		
P	iç basınç [Pa]		
r	boru kesit alanı atalet yarıçapı [m]		
H	FPSO'nun düşey hareketi [m]		
b	FPSO'nun düşey hareket genliği [m]		
Ω	FPSO'nun düşey hareket frekansı [1/s]		
f	dalga kuvveti [N]		
C_M	atalet katsayısı		
C_D	direnç (sürükleme) katsayısı		
C_A	ek su kütlesi katsayısı		

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel

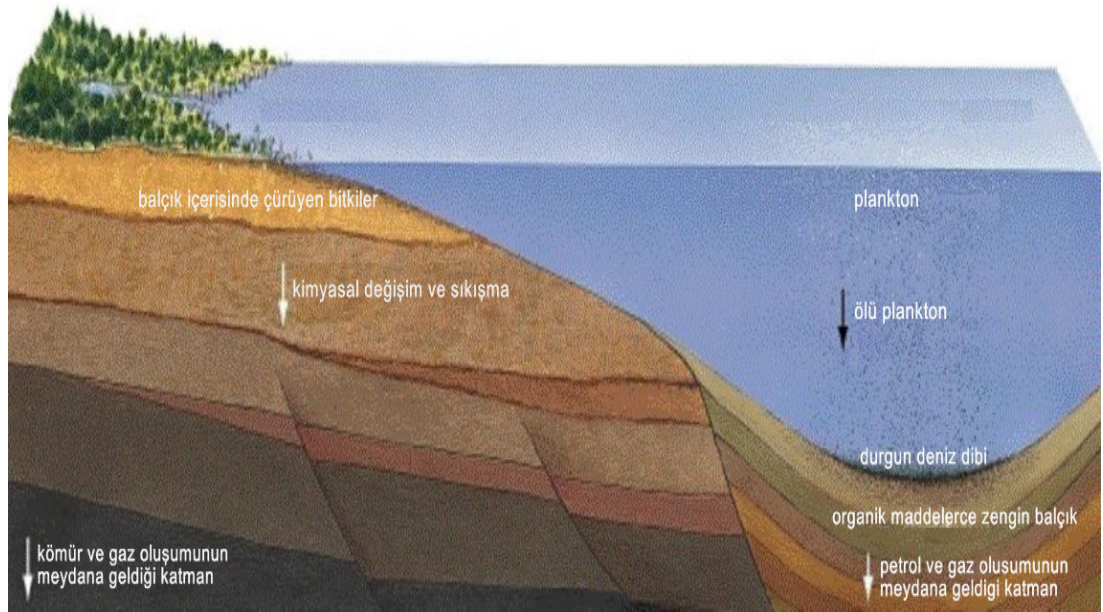
Denizlerin derinliklerinde insan yaşamı için çok önemli besin, maden ve enerji kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynakları daha çok kullanabilmek için açık deniz yapılarının uygulama alanları her geçen gün atmaktadır. Karadeniz ve Ege Denizi karasularımızda son yıllarda hız kazanmış olan petrol ve doğal gaz çalışmaları, araştırma gemileri, petrol platformları ve benzeri açık deniz yapılarının ülke ekonomisi, yatırımları ve endüstrisi açısından önemi ortaya koymaktadır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2002 yılında yayımlanan bir raporda konuyla ilgili aşağıdaki değerlendirme yapılmıştır:

Üç tarafı Karadeniz, Ege Denizi ve Akdeniz ve bir iç deniz olan Marmara Denizi ile çevrili olan Türkiye, yaklaşık 7000 km'lik kıyı uzunluğuna sahiptir. Bir denizci ülkesi olması gereken Türkiye, denizlerindeki enerji, maden ve endüstriyel hammadde kaynaklarını yeterince değerlendirememektedir. Bu kaynaklarından yeterince yararlanabilmek için, deniz ve denizaltı (denizel) ve kıyılara yakın alanlarda bilinen ve olası rezervlerin saptanması ve güncel arama ve işletme teknolojilerinin belirlenmesine yönelik kısa, orta ve uzun vadeli ulusal politikaların oluşturulması gerekmektedir... Türkiye petrol endüstrisi ve üniversiteler olarak, gerek arama ve gerekse üretim alanındaki güncel gelişmeleri yakından izlemeli ve kapasitesini geliştirmelidir...

Sularda yaşayan tek hücreliler, havadaki karbondioksiti ve sudaki hidrojen ve oksijeni alarak basit şekerleri üretirler. Bu canlılar öldüğünde dibe çökerler ve üzerleri çamur, kum ve aluviyonlardan oluşan oksijen geçirimsiz ince tortul tabakayla örtülür. Bu oksijensiz, sıcak ve basınçlı ortamda, bakterilerin de etkisiyle çürüme meydana gelerek zamanla petrol damlacıkları ve gaz kabarcıkları oluşur. Milyonlarca yıl süren bu oluşumun ardından petrol, yerkabuğu hareketlerinin etkisiyle

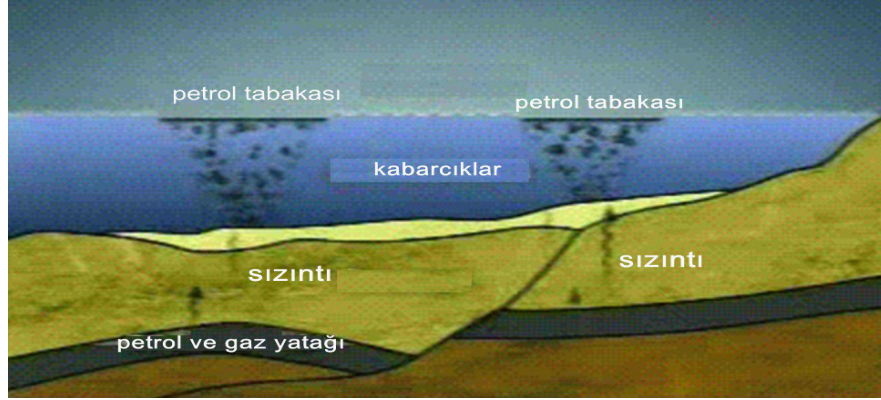
içlerinde oluştukları ana taştan (kaynak kaya) daha gözenekli ve geçirgen ortamlara doğru göç ederek rezervuarlarda (hazne kapağı) birikirler.

Petra (taş) ve oleum (yağ) kelimelerinden türetilmiş ve bir hidrokarbon çeşidi olan petrolün yapısında hidrojen ve karbonun yanında az miktarda azot, kükürt, oksijen, silisyum, demir ve alüminyum vardır. Hidrokarbonların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişiklikler farklı oluşumları meydana getirir (Şekil 1.1).

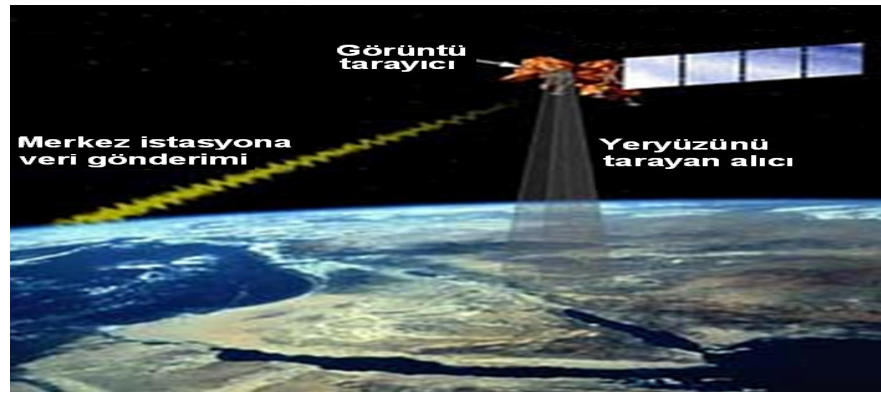


Şekil 1.1 Petrolün oluşumu

Yeryüzünde bulunan her madde güneşten gelen ışınların bir kısmını emmekte ve bir kısmını da kırarak başka yöne yansıtılmaktadır. Bunun yanında her maddenin elektromanyetik spektrumdaki belirli dalga boylarına cevabı farklıdır. Uzaktan algılama teknolojisi bu temel kural üzerine kurulmuştur. Uçak veya uydularda bulunan uzaktan algılama sistemleriyle maddelerin belirli dalga boylarına verdiği cevap ölçülerek bölgenin ayrıntılı bilgileri elde edilir. Günümüzde, bu teknolojiye gelişmeler sayesinde yeraltındaki petrol kaynaklarından sızarak deniz yüzeyine ulaşan gaz kabarcıkları tespit edilebilmektedir.



Şekil 1.2 Denizlerdeki petrol kaynaklarından gaz çıkışı

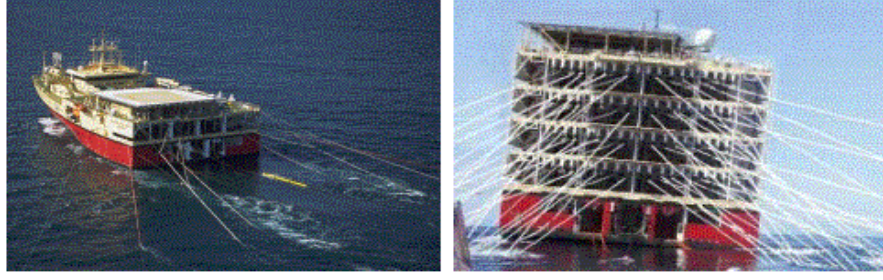


Şekil 1.3 Uydularla yapılan uzaktan algılama

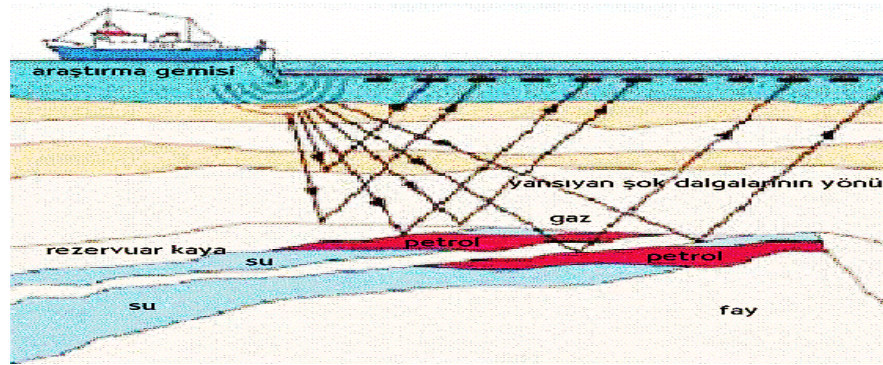


Şekil 1.4 Deniz yüzeyinde gaz çıkışlarından oluşan bölgelerin uydu görüntüsü

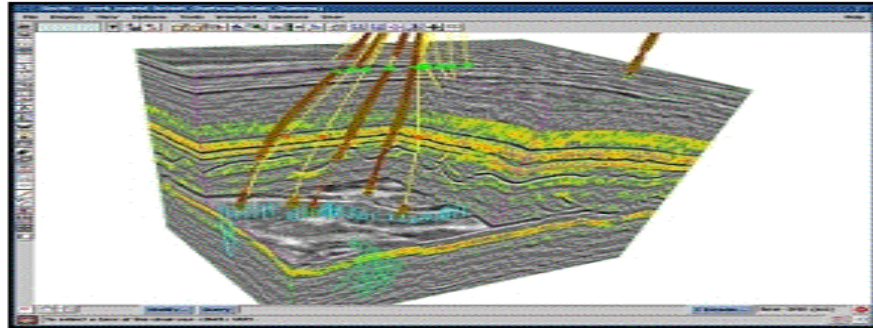
Uzaktan algılama ile elde edilen veriler sonucunda incelenmesine karar verilen bölgede jeolojik ve jeofizik çalışmalara başlanır. Bu çalışmalarda çoğunlukla sismolojik (deprem bilimi) yöntemler kullanılır. Sismik aletlerle donatılmış gemilerde bulunan hava tabancaları yaklaşık 25 metre su derinliğinde sarkıtılarak patlatılır. Oluşan şok dalgaları yeraltına ilerleyerek çeşitli kaya tabakalarından geri yansır. Bu yansımaların hızı, kaya tabakalarının yoğunluğuna göre değişmektedir. Gemilerin arkasında salınan kablolar bu yansımaları kayıt ederler. Bu verilerin uzmanlarca incelenmesi sonucunda olası petrol ve doğal gaz kaynaklarının yeri belirlenir.



Şekil 1.5 Sismik çalışma yapan bir araştırma gemisi



Şekil 1.6 Sismik çalışma

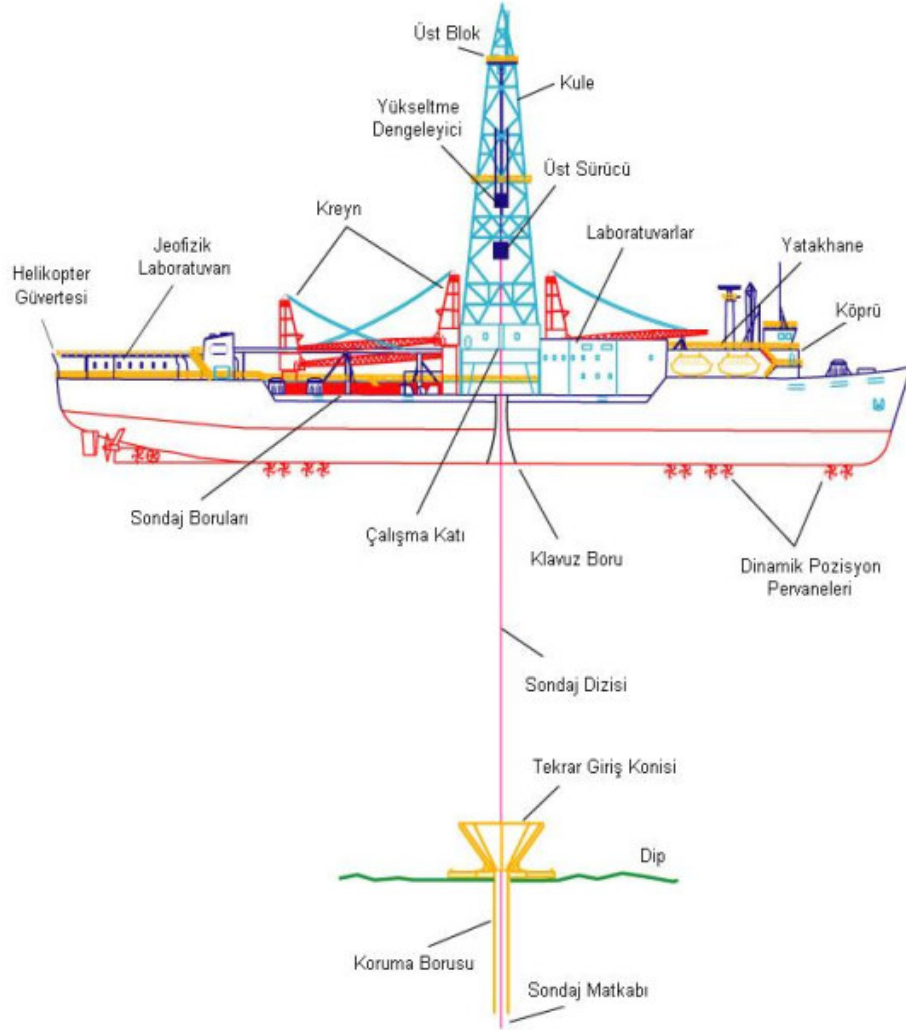


Şekil 1.7 Sismik çalışma sonucu elde edilen yeraltı görüntüsü ve sondaj hatları

Sismik çalışma sonrası petrol olduğu tahmin edilen bölgede sondaj yapılarak ilk kuyu açılır. Sondaj sonucu petrol bulunursa petrolün çıkarılmasına ve yeni kuyuların açılmasına başlanır. Sondaj yapılacak deniz derinliğine göre değişen çok farklı gemi ve petrol platformları kullanılmaktadır.

Sondaj gemileri, kendi sevk sistemleriyle hareket ederek sondaj çalışması yapılacak bölgeye gidebilmektedirler. Bu gemilerde bulunan dinamik pozisyon sistemi (DPS) sayesinde ağır deniz ve hava şartlarından etkilenmeden sondaj

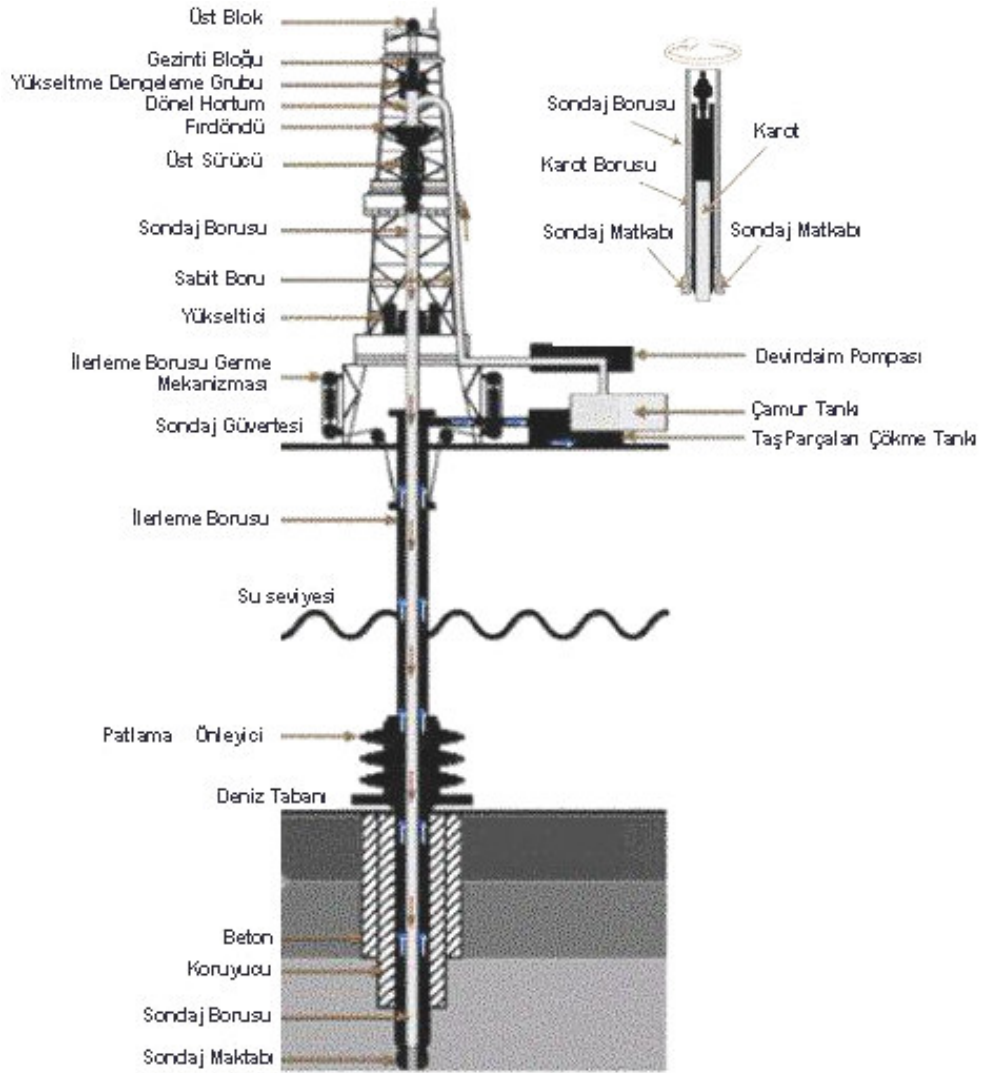
çalışması yapılabilmektedir. Bu sistemdeki bilgisayar kontrollü pervaneler, farklı açılarda ve hızlarda dönerek çevre şartlarında etkilenmeden geminin aynı noktada durması sağlanmaktadır. Bu tür gemiler petrol arama çalışmalarının yanında bilimsel amaçlı olarak pek çok üniversite ve kuruluş tarafından kullanılmaktadır. İklimsel değişim, doğal felaketler, doğal kaynaklar ve derin biyosfer konularında çalışmak üzere bu gemiler kullanılmaktadır.



Şekil 1.8 Sondaj gemisinin genel bölümleri

Sondajın yapılacağı bölgeye gelindiğinde sondaj boruları ile kuyu açılmaya başlanır. Şekil 1.9'da gösterilen sondaj mekanizması ile kuyu açılmakta ve matkabın parçaladığı kayalardan kopan parçalar sondaj borusunda bulunan çamurla birlikte gemiye taşınır. Gemiye aktarılan bu çamur-taş parçalarıyla sondaj yapılan katmandaki

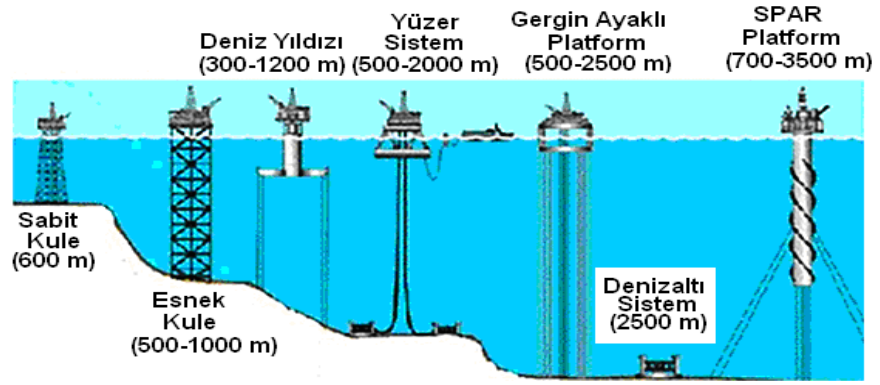
kayaların elektrik direnci, radyoaktivitesi, sıcaklığı, asitliği vb. değerlerini tespit edilir. Bunun yanında sondaj yapılan derinlikten alınan örnekler (karot) biyoloji, jeoloji, jeofizik gibi pek çok bilim dalı için de önemli bir veri kaynağı olmaktadır.



Şekil 1.9 Sondaj mekanizması

Sondaj gemilerinin yanında petrol platformları da gerek ilk kuyu (keşif sondajı) açılması sırasında gerekse daha sonraki üretim çalışmaları ve yeni kuyuların açılması sırasında kullanılan deniz yapılarıdır. Kıyılara yakın bölgelerde ilk petrol üretimi 1870'li yıllarda Hazar Deniz'i kıyısında başlamış ve denizlerdeki ilk çelik platform 1947 yılında 6 metre derinlikte Amerika Birleşik Devletleri'nin güney kıyısında kurulmuştur.

1950'li yıllara kadar açık deniz teknolojisi, gemi inşaatı ve balıkçılık teknolojisiyle sınırlıyken özellikle 1970'lerden sonra ortaya çıkan petrol talebindeki artışın etkisiyle denizaltı doğal kaynaklarını da kullanmak amaçlanmıştır. Bunun sonucu açık deniz endüstrisi ortaya çıkmış ve açık denizlerdeki enerji kaynaklarının araştırılması için yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Petrol yataklarının belirlenmesi amacıyla sondaj gemileri, bulunan yataklardan petrol üretimi yapmak amacıyla da sabit veya yüzer açık deniz yapıları inşa edilmiştir. Petrol arama ve çıkarma çalışmalarında kullanılan açık deniz yapılarının bazıları Şekil 1.10'da görülmektedir.



Şekil 1.10 Açık deniz yapıları

Günümüzde petrolün yaklaşık % 25'i açık deniz yapıları kullanılarak elde edilmektedir ve bu tür enerji kaynaklarının üretimi ve naklinde kullanılan 7000'e yakın açık deniz yapısı vardır. Meksika Körfezi, Kuzey Denizi, Batı Afrika ve Brezilya açıkları bu çalışmaların yoğunlaştığı bölgelerdir. Meksika Körfezi'ndeki çalışmalarda derin su sondajı 3052 metre, petrol üretimi 2500 metre derinliğe kadar gerçekleştirilmiştir.

Teknoloji, yeni petrol rezervlerinin keşfinde ve mevcut rezervlerin işletilmesinde büyük rol oynamaktadır. Kolay bulunabilecek petrol rezervleri büyük ölçüde keşfedilmiş ve tüketilmiş durumdadır. Bu nedenle, bugüne kadar ulaşılamayan denizlerdeki petrol rezervlerin ekonomik olarak keşfi ve çıkarılması için petrol arama ve üretim teknolojisine büyük önem verilmektedir.

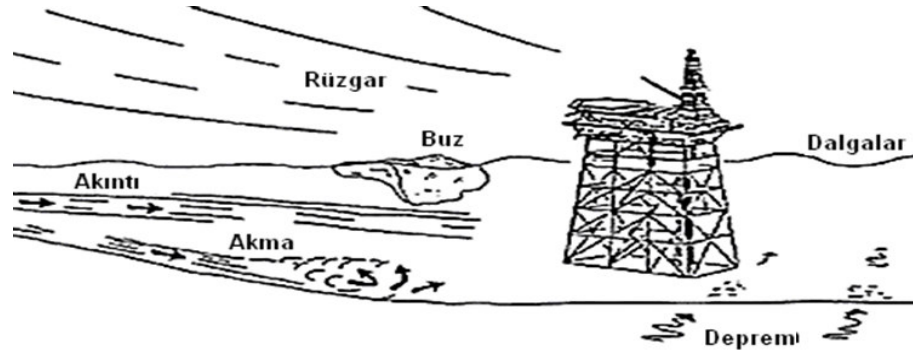
Petrol ile ilgili deniz teknolojisi, rezervuar keşfi, kuyu tamamlanması ve açık deniz yapılarının (araştırma, sondaj ve destek gemileri, platformlar vb.) yapımına kadar çok geniş bir alanı kapsamaktadır. Platformlarda, petrol, kimya, inşaa ve makina mühendisleri; deniz ve hava bilimciler, denizciler ve diğer uzmanlarla birlikte yaklaşık 200 kişi görev yapmaktadır.

Petrol çıkarılacak bölgedeki çevre şartları ve derinliğe bağlı olarak çeşitli açık deniz yapıları inşaa edilmektedir. Bu yapıları, sabit platformlar ve yüzer platformlar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Deniz tabanına sabitlenerek çelik veya beton ayaklar üzerinde duran sabit platformlar, derinlik arttıkça ayaklara etkiyen deniz yüklerinin atması nedeniyle çok büyük yapısal zorlamalara maruz kalırlar. Bu nedenle yüzer sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde platform, yapı dengede duracak biçimde deniz tabanına sabitlenmiş çıpalara bağlı çelik halatlarla gerilerek aşağı doğru çekilir. Petrol platformlarının işlevlerini sona erdirdikten sonra bulunduğu yerden kaldırılma zorunluluğu 1998 yılında getirilmiştir. Bunun sonucu olarak petrol arama ve üretim çalışmalarında yüzer platformların kullanımı yaygınlaşmıştır.

Açık deniz yapılarının şekil ve donanım sistemleri işletimlerdeki gereklilikler nedeniyle gemilerden oldukça farklıdır. Bu farklılıklar bir takım değişik fiziksel olayların ortaya çıkmasına neden olduğu için kuvvet ve hareket genliklerinin analizinde farklı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu yapıların deniz yükleriyle etkileşimi ve ortaya çıkan problemlerin çözümü konusunda bilimsel ve endüstriyel çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Açık deniz yapıları diğer yapılarla kıyasla daha çeşitli çevre yüklerine maruz kalırlar. Bu yüklerin arasında yapının kendi ağırlığı, çalışma yükleri, rüzgar, dalga, akıntı, kar ve buz yükleri sayılabilir (Şekil 1.11). Çevresel etkiler olarak tanımlanan dalga, rüzgar, akıntı yükleri ve bunların elli veya yüzyılda bir ortaya çıkan en büyük değerleri açık deniz yapılarının tasarımında son derece önemlidir. Açık deniz yapılarının işletimleri boyunca maruz kaldıkları deniz ve havanın etkilerinin analizinde hidrodinamik bilim dalından yararlanılmaktadır. Bu yapılarla etkiyen dalga

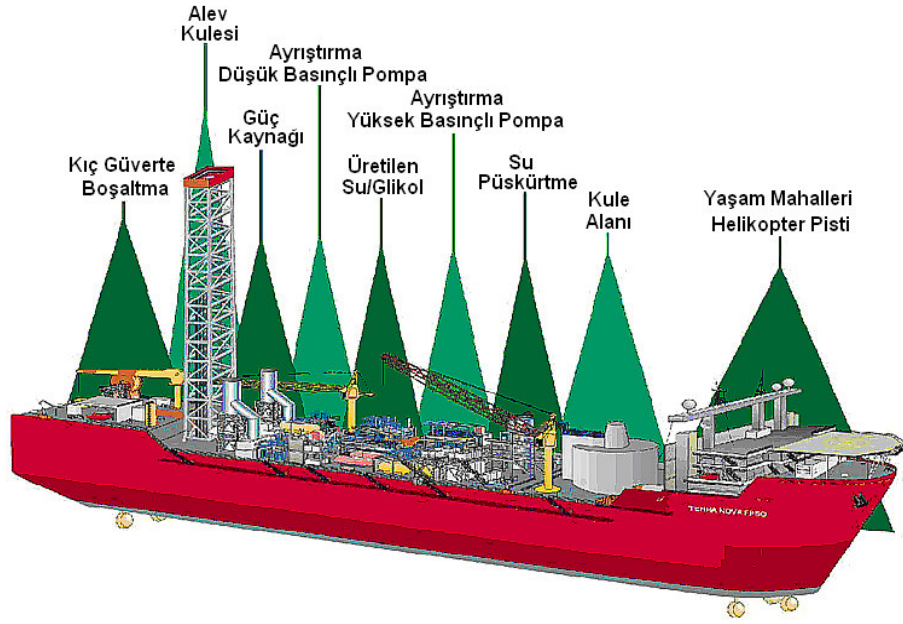
kuvvetlerinin rasgele değişim göstermesi nedeniyle, yapı analizinde bu dinamik kuvvetlerin belirsizliğini dikkate alacak yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 1.11 Açık deniz yapılarına etkiyen çevre yükleri

Açık deniz yapılarının dinamik hareketlerinin analizi, yapı üzerine etkiyen yüklerin hesabı ve sınır şartlarının belirlenmesinde zaman içinde değişim yöntemi kullanılır. Açık deniz yapısı ve çevre yüklerinin bir bütün olarak ele alındığı bu yöntemde çözüm, çok sayıda küçük zaman aralıklarında elde edilmiş hareketlerden meydana gelir. Böylece lineer olmayan hidrodinamik kuvvetler, çevre yükleri, atalet ve demirleme kuvvetleriyle sistem analiz edilir. Matematik modellemede, ağırlık merkezi etrafında hareketler yanında, ağırlık merkezinin hareketleri de dikkate alınarak yatay sürüklenme de modele dahil edilir. Sonuç olarak yapının lineer olmayan hareketlerinin, hidrodinamik yüklerin ve geri getirme kuvvetinin zamana bağlı fonksiyonları elde edilir.

Genellikle gemi şekline sahip FPSO (Floating Production Storage and Offloading / Yüzer Üretim, Depolama ve Nakil) yapılarının güverte üst donanımları Şekil 1.12'dekine benzer bir yapıdadır. Günümüzde, Kuzey Denizi'nde 22, Afrika'da 21, Asya ve Avustralya'da 34, Güney ve Kuzey Amerika'da 13 adet olmak üzere yaklaşık 90 adet FPSO yapısı vardır. Bununla birlikte yaklaşık 30 tane tasarım ve inşaa aşamasında olan FPSO yapısı bulunmaktadır.

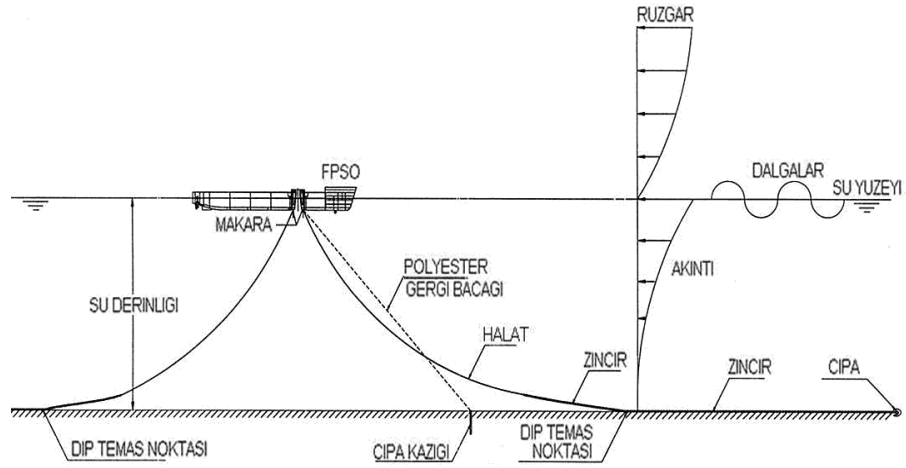


Şekil 1.12 FPSO yapılarında güverte yerleşim planı

Günümüzde şiddetli deniz koşullarının hakim olduğu bölgelerde yeni, normal deniz koşullarının hakim olduğu veya üretim süresi kısa olan bölgelerde mevcut tankerleri dönüştürerek inşa edilen FPSO yapıları kullanılmaktadır. Petrol üretimine kısa sürede en ekonomik şekilde başlanabilme avantajı nedeniyle bu yapıların kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Bu yapıların diğer avantajları kısaca aşağıdaki gibidir:

- İlk yatırım maliyetinin diğer açık deniz yapılarından daha düşük olması
- Kasırga gibi doğal afet vb. durumlarda nakil edilebilmesi
- Üretilen petrolün yapı içerisinde depolanabilmesi ve nakil edilebilmesi
- Özellikle tankerlerden dönüştürülerek inşa edilenlerde kısa sürede işleme geçilebilmesi

Su derinliğine bağlı olarak, FPSO yapılarının zincir veya çelik halatlarla demirlenmesi ağırlık yönünden uygun olmadığı için polyester halatlar veya pervane esaslı dinamik konum sabitleme sistemleri kullanılmaktadır. Bu yapılardaki demirleme sistemi ve yapıya etkiyen çevre yükleri Şekil 1.13’de görülmektedir.



Şekil 1.13 FPSO yapılarında demirleme sistemi ve yapıya etkiyen yükler

FPSO yapılarının dalgardaki davranışları genellikle dalga frekansındaki küçük genlikteki salınımlar ve küçük dalga frekanslarındaki büyük genlikteki boy öteleme, yan öteleme ve savrulma salınımlarıyla tanımlanabilir. Büyük genlikteki salınımlar rezonans hareketleri olup ikinci derece dalga kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca düşük dalga frekansında bu yapıların rezonans bölgesindeki sönüm katsayıları çok düşük derecede olmaktadır. Açık denizde demirleşmiş yapıların rüzgar, dalga ve akıntı kuvvetleri altındaki davranışları lineer olmayan denklemlerle modellenmiş ve zaman bazındaki hareket denklemleri çözülmüştür. Konuyla ilgili çalışmalardan faydalanarak günümüzde farklı analiz yöntemleri geliştirilerek açık deniz yapılarının dinamik çevre yükleri kaynaklı malzeme yorulması, hasar, stabilite sorunları vb. risklerin azaltılmasına yönelik araştırmalar yapılmaktadır.

Çevre yükleri ve açık deniz yapılarının hareketleri etkisiyle güverte üzerinde çok büyük su hareketleri meydana gelir. Literatürde güverteyi su basması (green water loading on deck) veya güverte ıslanması (deck wetness) olarak adlandırılan bu olay, deniz yapıları ve mürettebat için ciddi bir risk olması yanında güverte üzeri ekipmanların işletilebilirliği açısından da önemlidir (Şekil 1.14).

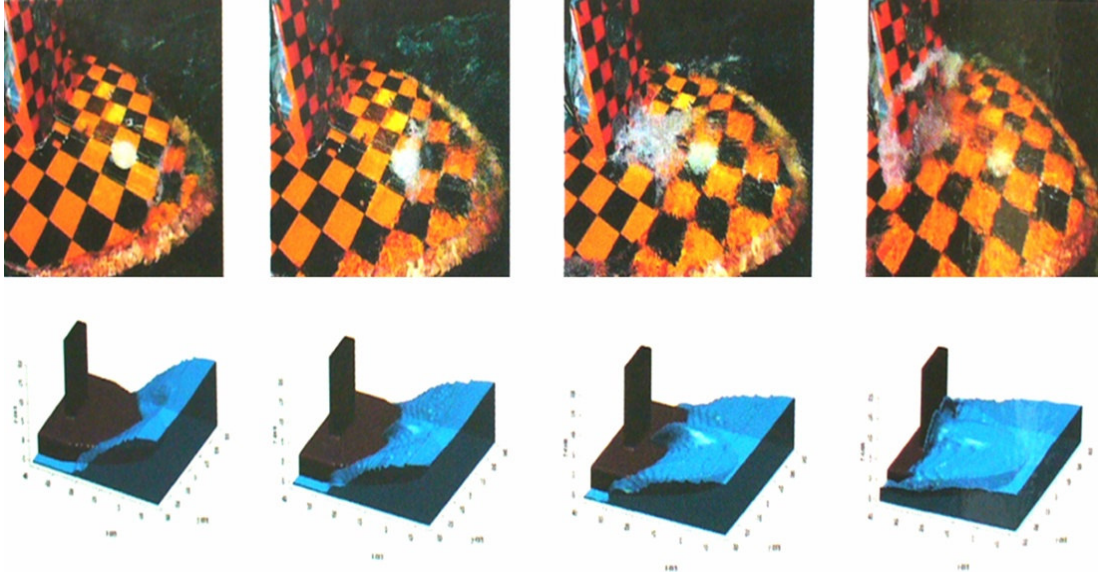


Şekil 1.14 Güverteyi su basması

FPSO yapılarının güverte üzerinde bulunan boru hatları (Şekil 1.15), bu yapıların işletim ömürleri boyunca sürekli olarak kullanılmaktadır. Güverteyi su basması sonucu boru hatlarına etkiyen dinamik çevre yükleri, yapısal yorulma ve hasarlara neden olmaktadır. Bu nedenle FPSO yapılarının tasarım aşamasında güverteyi su basması olayı deney havuzlarındaki modellerle ve/veya bilgisayar destekli matematiksel analiz yöntemleriyle incelenmektedir. (Şekil 1.16)



Şekil 1.15 FPSO yapılarında güverte üstü boru hatları

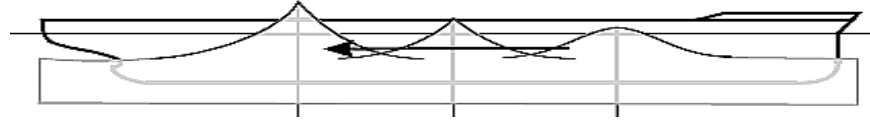


Şekil 1.16 Güverteyi su basması olayının deneysel ve bilgisayar simülasyonu yöntemleriyle analizi

Geliştirilen matematiksel yaklaşımların sonuçları çok etkilediği ve farklı yorumlara neden olduğu görülmektedir. Örneğin, O’Dea ve Walden (1984) tarafından yapılan uygulama çalışmasında lineer dalga yaklaşımına göre matematik model geliştirilmiş ve FPSO yapılarındaki baş kesit açıklığının (flare) artırılması yoluyla güvertenin ıslanmasının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Buna karşın, Lloyd, Salsich ve Zselezky (1985) tarafından yapılan çalışmada lineer olmayan dalgalar için matematik model geliştirilmiş ve tam tersi bir sonuca varılmıştır. Bunun nedeni baş kesit açıklığının iki önemli sonuca neden olmasıdır. Birincisi, baş kesit açıklığının artırılması güverte üzerine gelecek suyun engellenmesine etki edebileceğidir. İkincisi ise baş kesit açıklığının geminin batıp-çıkma hareketindeki etkisi ve başın suya girmesiyle birlikte görülen su yükselmesi olayıdır. Geminin baş kısmının suya girme hızı ile baş kesit açıklığı arasındaki ilişki deney havuzlarında çeşitli modeller test edilerek incelenmiştir.

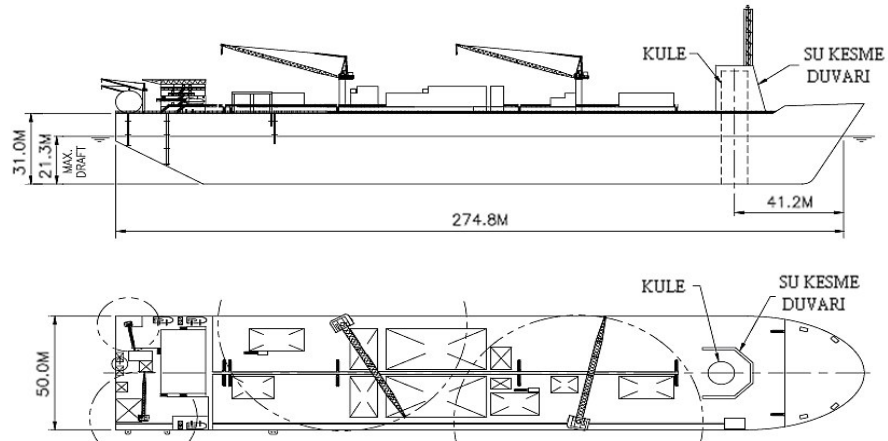
Konuyla ilgili literatür kaynakları, özellikle İngiltere ve Norveç karasularının içinde bulunduğu Kuzey Denizi ve son yıllarda petrol arama çalışmalarda büyük bir ivme kazanmış olan Meksika Körfezi’nde işletilen FPSO yapıları üzerinedir. 2001 yılında hazırlanmış açık deniz teknolojisi raporu kapsamında, İngiltere karasularında işletilen 16 adet FPSO yapısında meydana gelmiş güverteyi su basması olayının MARIN tarafından geliştirilmiş bilgisayar programı “GreenLab” ile analizi

bulunmaktadır. İlgili çalışmada İngiltere ve Norveç karasularında bulunan FPSO yapılarının işletileceği bölgeye sabitlenmesi ve petrolün çıkarılması süreçlerinde meydana gelmiş güverteyi su basması kaynaklı kazalar araştırılarak fribord aşımı konusu üzerine çalışma yapılmıştır. Şekil 1.17’de gösterilen baş, kıç ve borda bölgesinde görülen güverteyi su basması olaylarına karşı yapılan ön analizler yardımıyla yapının yerleştirilmesi aşamasında gerekli su çekimi (draft) miktarının analizi de incelenen konular arasında yer almaktadır.



Şekil 1.17 Gemi bordası boyunca dalga yüksekliği değişimi

Konuyla ilgili Meksika Körfezi’nde işletilen FPSO yapılarına yönelik benzer incelemeler bulunmaktadır. Bununla birlikte dalga, akıntı ve rüzgar özelliklerindeki farklılıklar ve mevsimsel kasırgalar nedeniyle Meksika Körfezi’nde işletilecek FPSO yapılarının tasarımı, inşaatı ve işletilmesi sırasında daha ayrıntılı analizlerin yapılması gerekmektedir. Güverte üzerinde bulunan ekipmanlara ve üst yapıya (Şekil 1.18) hasar verme riski taşıyan su basması kaynaklı dinamik yüklerin analizi sonucunda bu olaya etki eden etkenler Faltinse, Greco ve Landrini (2002) tarafından yapılan çalışmada verilen aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Güverteyi su basması olayına neden olan değişkenlerin çeşitliliği ve dinamik bir sisteme sahip olmaları nedeniyle konunun karmaşıklığı bu tabloda görülmektedir.



Şekil 1.18 FPSO genel yerleşim planı

BÖLÜM İKİ

DİNAMİK ANALİZ

2.1 Genel

Akışkan taşıyan boruların dinamik analizi konusunda yapılan çalışmalarda çeşitli yüzey-kabuk teorilerinden faydalanılarak sistemin hareket denklemi çıkarılmaktadır. Hareket denklemlerindeki diferansiyel denklemlerin çoğu zaman analitik çözümünü bulmak çok zordur. Bu nedenle denklemin sayısal sonuçlarını elde etmek amacıyla bazı kabuller yaparak denklemde sadeleştirme yoluna gidilmekte veya birkaç sayısal hesaplama tekniği ardı ardına kullanılmaktadır. Konuyla ilgili yapılan literatür taramasında elde edilen bilgiler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

Donnell (1934), akışkan taşıyan borulardaki yer değişimleri inceleyebilmek için Yüzey Kabuk Teorisini önermiştir. Bu teoride radyal ve çevresel yer değiştirme için üç adet denge denklemi tanımlanırken, eksenel yöndeki yer değiştirme için iki adet denge denklemi kullanılmıştır. Yüksek çevresel dalga numarası değerlerinin beş ve üzeri olması durumlarında teoriye dayalı sonuçların gerçeğe daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Shkenev (1964), akışkan taşıyan borularda meydana gelen nonlinear titreşimler konusuna yaptığı çalışmada boru içerisindeki akışı lineer olarak modellemiş ve titreşim analizinde nonlinear kabuk teorisi kullanılmıştır.

Abramson ve Kana (1966), önceden yapılmış ve yayınlanmış olan içi boş veya az miktarda akışkan bulunan boruların büyük genlikli titreşim deney sonuçlarını derleyerek yorumlamışlardır. Yapılmış olan bu deneylerde genellikle boru basit mesnetlenmiş, radyal ve boylamsal kuvvetlere maruz kaldığı kabul edilerek titreşim değerleri analiz edilmeye çalışılmıştır.

Kana ve Craig (1968), yapmış oldukları deneylerden elde ettikleri veriler ve Donnell'in nonlinear yüzey kabuk teorisinden yararlanarak, borunun hareket

denklemlerinin elde edilmesinde Galerkin metodunu referans alan teorik sonuçların uygunluğunu göstermişlerdir.

Chiba, Hashimoto ve Sudo (1986), çalışmalarında sallama tablası üzerinde yerleştirdikleri elastik boruyu incelerken tablanın titreşim frekansını sürekli değiştirmişler ve hareket halindeki alanlarda oluşan parametrik rezonansın, sisteme verilen titreşiminin büyüklüğüne ve boru içerisindeki sıvının seviyesine bağlı bir fonksiyon olduğunu tespit etmişlerdir.

Gorman, Reese ve Zang (2000), hidrodinamik basınçtan ve akışkan hızından etkilenen boruların titreşimini incelerken buldukları nonlinear hareket denklemlerini, akışkanın süreklilik ve momentum korunum denklemlerinden türetmişlerdir. Buldukları beş adet kısmi diferansiyel denklemi çözmek için sonlu farklar metodunu kullanmışlardır.

Zou, Cheraghi ve Taheri (2005), akışkanın Poisson oranı, boru yarıçapının boru kalınlığına oranı, akışkanın yoğunluğunun boru duvarının kütle yoğunluğuna oranı, başlangıç gerilimi ve akışkan basıncı gibi değişkenlerin boru üzerindeki titreşime olan etkilerini incelerken ANSYS yazılımını sonlu elemanlar analizinde kullanmışlardır.

Amabili, Sarkar ve Paidoussis (2006), yaptıkları çalışmada Donnell'in yüzey kabuk teorisine Galerkin metodunu uygulayarak elde ettikleri başlangıç değerleri için uygun ortogonal ayrıklaştırma yaparak sistemin zaman serisine göre davranışını incelemişlerdir.

Paidoussis ve Li (1993), mesnetli düz borularda akışkan kuvvetlerini deney sonuçlarıyla yorumlamış, konsol düz boruların lineer ve nonlinear hareketlerini incelemiş, elastik mesnetli sistemler, kütle eklenmiş sistemler, elastik temel, kaos dinamiği, boruların kararsız akış içermesi durumu ve düz olmayan borular üzerinde çalışmışlardır.

Semercigil, Turan ve Lu (1997), konsol borularda titreşim kontrolü için akışkan hareketini kullanmak, koriolis kuvveti etkisinin bir titreşim kontrolü olduğunu kanıtlamak, ayrıca yapısal sonum etkisinin dikkate alınması ve sonlu farklar metodu ile hareket denkleminin çözümü üzerinde çalışmışlardır.

Wang ve Bloom (1999), su altında, eğimli, iç ve dış akışkan etkisi altındaki boru tasarımı, rezonans frekansı hesabı, çalışma koşulları içindeki bazı değişkenlerin tasarımdaki önemi, frekans dağılımı, eğim etkileri, optimum akış hızı, kritik boru boyu, derinlik etkisi üzerinde çalışmışlardır.

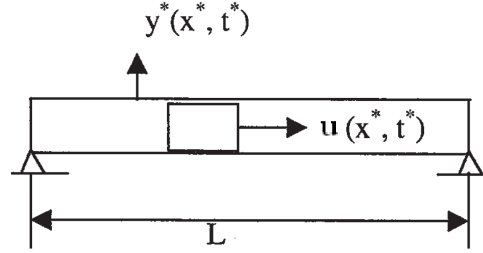
Vakharia ve Faroop (2009), yatay konumdaki boruya etkileyen yükler altında meydana gelen maksimum dikey yerdeğiştirmeyi çeşitli yöntemlerle incelemiştir. Maksimum eğilme gerilmesi teorisine dayanan hesaplama yöntemine göre sistemin analizi yapılmıştır. Bunun yanında, ANSYS bilgisayar programı kullanılarak yapılan analizden yatay boruyu destekleyen ayakların arasındaki mesafenin arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayaklar arasındaki mesafenin arttırılmasıyla boru hattında kullanılan toplam ayak sayısında azalmaya gidilebileceği için yatırım maliyetlerinde tasarruf sağlanabileceği belirtilmiştir.

2.2 Hareket denkleminin elde edilmesi

Mekanik sistemlerin dinamik analizinde öncelikle sistem üzerindeki çevre yüklerinin tanımlanması gereklidir. Boru içerisindeki akışkanın boru çeperine uyguladığı iç basınç, sürtünme kuvveti ve benzeri yükler aksel çökmelere neden olur. Malzemenin elastik bölge sınırları dahilinde şekil değiştirdiği kabulüyle boru bu yükler etkisinde tepki göstererek titreşir ve eski haline dönmeye çalışır.

İki ucundan basit mesnetlenmiş bir borunun dikey yönde eğilmeye zorlandığı durumda Euler kiriş eğilme teorisile borunun titreşim hareketi tanımlanarak denklemi oluşturulur. Titreşim genliğiyle etki eden yüklerin doğru orantılı olduğu hareket denklemini yazılmasında Şekil 2.1’de gösterilmiş L boyunda her iki ucu basit

mesnetlenmiş boru göz önüne alınmış, düşey yer değiştirme (y) ve akışkanın yatay yer değiştirmesi (u) ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Basit-basit mesnetlenmiş boru

Boru üzerindeki yer değiştirmeler konuma ve zamana göre değişim gösteren bir dinamik yapıdadır. Bu çalışmada konuma göre türevler ($'$) ile, zamana göre türevler ise ($*$) ile gösterilmiştir.

Hamilton prensibi, en genel tanımıyla bir sistemin Lagrangian'ının (potansiyel ve kinetik enerjilerinin farkı) belirli bir zaman (t) aralığında entegralinin varyasyonunun sıfır olmasıdır. Bu tanımın matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0 \quad (1)$$

Boru için potansiyel enerji (P.E.) - kırıktan farklı olarak - şekil değiştirme ve aksenal gerilme etkileri düşünülmeden sadece yatay eksen boyunca düşey yer değiştirme faktörü ele alınarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P.E. = \frac{1}{2} E I \int_0^L (y'')^2 dx \quad (2)$$

Boru için kinetik enerji (K.E.) denklemi, “ u ” akışkanın yatay yer değiştirmesini, “ M ” akışkanın birim boy kütlelerini, “ m ” borunu birim boy kütlelerini göstermek üzere aşağıdaki gibidir:

$$K.E. = \frac{1}{2} M \int_0^L [(\dot{u} + u'v + v)^2 + (\dot{y} + y'v)^2] dx + \frac{1}{2} m \int_0^L (\dot{y})^2 dx \quad (3)$$

Sistemin potansiyel ve kinetik enerjilerinin farkını temsil eden Lagrangian (L) denklemi aşağıdaki gibidir:

$$L = \frac{1}{2} M \int_0^L [(\dot{u} + u'v + v)^2 + (\dot{y} + y'v)^2] dx + \frac{1}{2} m \int_0^L (\dot{y})^2 dx - \frac{1}{2} EI \int_0^L (y'')^2 dx \quad (4)$$

Lagrangian'ın zamana bağlı integralinin varyasyonu zaman ve konuma bağlı çift katlı integralin çözümünü gerektirir.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \frac{1}{2} \{ M [(\dot{u} + u'v + v)^2 + (\dot{y} + y'v)^2] + [m (\dot{y})^2] - [EI (y'')^2] \} dx dt = 0 \quad (5)$$

Euler-Lagrange çözümünde kullanılacak fonksiyon aşağıdakidir:

$$f = \frac{1}{2} \{ M [(\dot{u} + u'v + v)^2 + (\dot{y} + y'v)^2] + [m (\dot{y})^2] - [EI (y'')^2] \} \quad (6)$$

“m”, bağımsız değişken sayısı , “n”, bağımlı değişken sayısı ve ‘p’, türev derecesi olmak üzere en genel Euler-Lagrange denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial f}{\partial u_i} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p (-1)^k \frac{\partial^k}{\partial x_j^k} \left(\frac{\partial f}{\partial u_{i,j}^k} \right) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Yatay yer değiştirme (u) ve düşey yer değiştirme (y), sistemin yukarıdaki fonksiyonunda bağımlı değişkenler; konum (x) ve zaman (t) ise bağımsız değişkenlerdir ve Euler-Lagrange denklemi aşağıdaki gibidir:

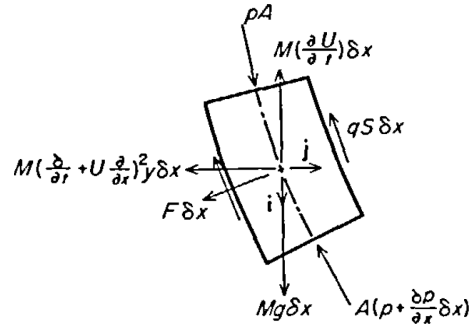
$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial u} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial u'} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{u}} \right) &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{y}} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y''} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Borunun yatay yönde yer değiştirmedeği (u=0) kabul edilerek gerekli türevler alınıp yerine yazılırsa aşağıdaki hareket denklemi elde edilir:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + 2 M v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + (M + m) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + M v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

Yukarıda verilen diferansiyel denkleme ait dört sınır şartı ise basit mesnetlenmiş her iki uçta düşey yer değiştirme (y) ve dönme momentin (y'') olmamasıdır.

Şekil 2.1’de gösterilen boru içerisindeki birim akışkan parçacığına (Şekil 2.2) i-j doğrultularındaki kuvvet dağılımına ait denklemler aşağıdaki gibidir:



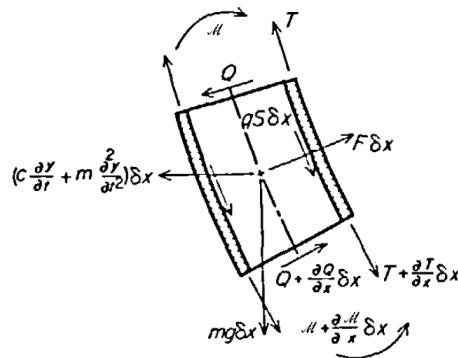
Şekil 2.2 Akışkan parçacığına etkiyen kuvvetler

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} - qS + Mg + F \frac{\partial y}{\partial x} - M \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

$$F + A \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial y}{\partial x} \right) + qS \frac{\partial y}{\partial x} + M \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 y = 0 \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemlerde, “A” akışkanın kesit alanı, “q” boru iç yüzeyindeki kayma gerilmesi, “S” çevre uzunluğu, “M” akışkan birim boy kütlesi, “F” akışkan ve boru iç yüzeyi arasındaki birim boya etkiyen enine kuvvet, “U” akışkan yer değiştirmesidir.

Şekil 2.3’de gösterilen birim boy boruya etkiyen kuvvet ve moment dağılımı aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.3 Birim boy boruya etkiyen kuvvet ve moment dağılımı

$$\frac{\partial T}{\partial x} + qS + mg - F \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + F + \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial y}{\partial x} \right) + qS \frac{\partial y}{\partial x} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - c \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$Q = -\frac{\partial \mathcal{M}}{\partial x} = -\left(E^* \frac{\partial}{\partial t} + E\right) I \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemlerde, “ T ” boyuna gerilme, “ m ” borunun birim boy kütlesi, “ g ” yerçekimi ivmesi, “ Q ” enine kayma gerilmesi, “ \mathcal{M} ” eğilme momenti, “ E ” elastisite modülü, “ c ” viskozite katsayısı ve “ I ” atalet momentidir.

(11), (13) ve (14) no’lu denklemlerden aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\left(E^* \frac{\partial}{\partial t} + E\right) I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left[(T - pA) \frac{\partial y}{\partial x} \right] + M \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 y + c \frac{\partial y}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (15)$$

(10) ve (12) no’lu denklemlerin birleşmesinden ve boru boyunca integralinden ise aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$T - pA = \bar{T} - \bar{p}A(1 - 2\nu_p \delta) + [(M + m)g - M(\partial U / \partial t)](L - x) \quad (16)$$

Enine hareketlerin ortaya çıkardığı aksenal kuvvet:

$$-\frac{EA}{2L} \int_0^L (y')^2 dx - \frac{\eta A}{L} \int_0^L (y' \dot{y}') dx \quad (17)$$

(16) ve (17) no’lu denklemlerin birleşmesinden aşağıdaki denklem elde edilir:

$$T - pA = \bar{T} - \bar{p}A(1 - 2\nu_p \delta) + \left[(M + m)g - M \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) \right] (L - x) - \frac{EA}{2L} \int_0^L (y')^2 dx - \frac{\eta A}{L} \int_0^L (y' \dot{y}') dx \quad (18)$$

Boruya ait hareket denklemi (18) no’lu denklemin (15) no’lu denklemde yerine yazılmasıyla aşağıdaki formülle ifade edilir. Bu denklem, kaynaklar bölümünde verilen Holmes (1977) tarafından Paidoussis ve Issid (1974)’in çalışması referans alınarak ortaya çıkmış ve daha sonra da Jin ve Song (2005) tarafından geliştirilmiştir.

$$\begin{aligned} & \left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \left\{ MU^2 - \bar{T} + \bar{p}A(1 - 2\nu_p \delta) - \left[(M + m)g - M \frac{\partial U}{\partial t} \right] (L - x) \right\} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \\ & - \left[\left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{EA}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + (M + m) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2MU \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + (M + m)g \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemde “ EF ” borunun rijitliği, “ a ” Kelvin-Voight ile modellenen boru malzemesinin sönüm katsayısı, “ ν_p ” Poission oranı, “ g ” yerçekimi ivmesi, “ \bar{T} ” aksenal gerilme, “ \tilde{A} ” borunun en kesit alanı, “ L ” boru boyu, “ m ” borunun birim boy kütlesi, “ M ” akışkan birim boy kütlesi, “ U ” akışkan yer değiştirmesi, “ \bar{A} ” akışkanın kesit alanı, “ P ” iç basınç, “ x ” konum boyutu, “ t ” zaman boyutu ve “ y ” borunun dikey yer değiştirmesidir.

Bu çalışmada FPSO üzerindeki yatay konumdaki bir borunun dinamik analizini ve stabilite sınırları belirlenecektir. Bu konuyla ilgili daha önce yapılan bir çalışmada Spanos, Sofi, Wang ve Peng (2006), FPSO üzerindeki mesnetlerin zamana bağlı ve rasgele hareket ettiğini kabul etmişler ve bu terimi hareket denklemine ekleyerek analiz yapmışlardır. Ancak onların çalışmasında boru malzemesi elastik kabul edilmiş ve lineer hareket denklemleri ile incelemeler yapılmıştır. Yürütülen çalışmada ise konuyla ilgili sistemi daha iyi tanımladığı için nonlineer bir hareket denklemine sahip borunun dinamik analizi yapılacaktır.

FPSO üzerinde, yatay konumdaki, elastik malzemeden yapılmış bir borunun dinamik hareket denklemini elde ederken Holmes (1977) tarafından geliştirilen denklemde aşağıdaki sadeleştirmeler yapılacaktır:

- Borunun yatay oldu duruma göz önüne alınacaktır. Böylece yerçekimi ivmesini içeren terimler gidecektir.
- Poission oranını içeren katkısı çok küçük olduğu için ihmal edilecektir.
- Aksenal zorlamanın olmadığı ve boru içinden geçen akışkan hızının ivmeli bir hareket yapmadığı kabul edilecektir.

Bu durumda içinden akışkan geçen borunun hareket denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + MU^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2MU \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + (M + m) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \left[\left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{E\tilde{A}}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (20)$$

Burada “ y ”, borunun toplam yer değiştirmesidir ve şöyle tanımlanabilir:

$$y(x, t) = y(x, t) + h(t) \quad (21)$$

Bu ifade (20) nolu denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + MU^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2MU \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + (M + m) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \left[\left(1 + a \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{E\tilde{A}}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + P_{eff}(t) \quad (22)$$

Eşitlikteki son terim sistemin hareketinden kaynaklanan mesnet hareketi sonucu ortaya çıkan bir yüküdür ve aşağıdaki gibi bulunur:

$$P_{eff}(t) = -(M + m) \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \quad (23)$$

Denklemden görüldüğü üzere mesnet hareketinden sisteme gelen yük, sistemin toplam kütesine yani boru ve akışkanın toplam kütesine ve hareketin ivmesine bağlıdır. Bu beklenen bir durumdur ve Newton'un hareket kanununa uygun bir terimdir.

Denklemlerin ve çözümlerin malzeme yapısından ve şeklinden bağımsız olabilmesi için boyutsuzlaştırma işlemi yapılır. Boyutsuz ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanır. Boyutsuzlaştırmada kullanılan “r”, kesit alanın atalet yarıçapıdır.

$$w = \frac{y}{r}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad H = \frac{h}{L}, \quad T = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{M + m}}, \quad v = L \sqrt{\frac{M}{EI}} U \quad (24)$$

Yukarıdaki boyutsuz ifadeler hareket denkleminde yerleştirilirse aşağıdaki boyutsuz hareket denklemini elde edilir:

$$\ddot{w} + 2v\sqrt{\beta}\dot{w}' + v^2 w'' + w^{3v} + \mu \dot{w} - w'' \int_0^1 \frac{1}{2} w'^2 dx = \ddot{H} \quad (25)$$

Yukarıdaki denklemden (') konuma göre türevi, (*) zamana göre türevi, “β” doluluk oranını, “μ” ise boyutsuz sönüm katsayısını göstermektedir. Aşağıdaki denklemden doluluk oranı ve boyutsuz sönüm katsayısı verilmiştir:

$$\beta = \sqrt{\frac{M}{M + m}}, \quad \mu = \frac{a}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{M + m}} \quad (26)$$

Elde edilen boyutsuz hareket denklemi nonlinear ve integro-kısmi diferansiyel denklemdir. Ayrıca zamana bağlı bir zorlamaya maruzdur. Bu tür denklemlerin analitik çözümlerinin elde edilmesi pek mümkün olmadığı için Pertürbasyon yöntemi ve Galerkin yöntemi ile yarı analitik çözümler elde edilebilir. Her iki yöntemde bir tür seri toplamı gibidir. Pertürbasyon yönteminde, seri açılımındaki 2-3 terimin alınması uygun çözümleri vermekte, daha fazla terim kullanıldığında ise gerçek çözümden uzaklaşmaktadır. Galerkin yönteminde ise alınan terim sayısı arttıkça tam çözüme yaklaşılmaktadır. Sonsuz terim alınır ise tam çözüm elde edilmektedir. Ancak Galerkin metodu uygulandığında, nonlinear kısmi diferansiyel olan hareket denklemi, alınan terim sayısı kadar adi diferansiyel denklem üretmektedir. Problemin çözümü başlangıç şartları altında elde edilen bu adi diferansiyel sisteminin çözümüyle elde edilir. Bu problemde hareket denklemi nonlinear integro kısmi diferansiyel denklem olduğu için Galerkin yöntemiyle elde edilen adi diferansiyel denklemler de nonlinear olacaktır. Burada çözümü elde etmek için Runge-Kutta metodu kullanılabilir.

Bu çalışmada, mesnetin iki farklı ivmeli hareketini ve borunun mesnetlenme şartlarını dikkate alarak lineer olmayan kısmi türevli diferansiyel denklemin çözümü için Galerkin yöntemini kullanılmıştır. Galerkin yöntemi bir tür sonlu elemanlar yöntemidir. Çözüm, zamana ve konuma bağlı fonksiyonların çarpımının toplamına eşittir. Ancak bu yöntemde şekil fonksiyonu, klasik sonlu elemanlardan farklı olarak sınır şartlarını sağlayan sürekli bir fonksiyondur. Nonlinear hareket denkleminin Galerkin çözümü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$w(X, T) = \sum_{n=1}^m q_n(T) Y(X) \quad (27)$$

Hareket denkleminde bu çözüm yerine yazılırsa “artakalan” diye isimlendirilen bir ifade elde edilir. Galerkin yöntemi, artakalan teriminin bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılıp tanım aralığı boyunca integralinin sıfıra eşit olmasını gerektirir. Bu durumda N tane adi diferansiyel denklem elde edilir. Eğer sistem lineer ise elde edilen adi diferansiyel denklemler de lineerdir. Artakalan fonksiyonunu yazmak için Galerkin çözüm önerisi boyutsuz hareket denklemindeki yerine konulur.

Aşağıdaki denklemde görülen türev ifadeleri sadece zamana göre türevleri göstermektedir. Galerkin yönteminde bu ifadenin bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılıp tanım aralığına integralinin alınması gerekir. Ağırlık fonksiyonu olarak $\sin(i\pi x)$ seçilmiştir. Burada N terimini bir alındığında bir kesim, iki alındığında iki kesim Galerkin yöntemini uygulamış olur. Eğer N değeri sonsuz alınırsa tam sonuç elde edilmiş olur. Ancak bu problemde N=2 almak yeterince doğru sonuç verecektir. Bu durumda iki tane nonlinear adi diferansiyel denklem çıkacaktır.

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N \ddot{q}_n(T) Y_n(X) + 2v\sqrt{\beta} \sum_{n=1}^N \dot{q}_n(T) Y_n'(X) + v^2 \sum_{n=1}^N q_n(T) Y_n''(X) + \sum_{n=1}^N q_n(T) Y_n^{(iv)}(X) \\ & + \mu \sum_{n=1}^N \dot{q}_n(T) Y_n(X) - \sum_{n=1}^N q_n(T) Y_n''(X) * \int_0^1 \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N q_n(T) Y_n(X) \right)^2 dx = R(X, T) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\int_0^1 R(X, T) Y_k(X) dx = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N$$

Yukarıdaki hareket denkleminde ait iki farklı durumun inceleneceği ileriki bölümlerde, FPSO'nun güverte üzerinde bulunan boru hatlarına gelen çeşitli dinamik yükler göz önüne alınarak matematik model geliştirilecektir.

2.2.1 FPSO'nun hareketsiz olduğu durum

FPSO'nun ve dolayısıyla deniz yüzeyinin hareketsiz olduğu durumdur. Sistemde zorlama olmadığı için bu durum içinden akışkan geçen borunun doğal değerlerini verecektir. Bu durumda hareket denklemi:

$$\ddot{w} + 2v\sqrt{\beta}\dot{w}' + v^2 w'' + w^{(iv)} + \mu \dot{w} - w'' \int_0^1 \frac{1}{2} w'^2 dx = 0 \quad (29)$$

Galerkin çözümünde N=2 için aşağıdaki adi diferansiyel denklem sistemi elde edilir:

$$\begin{aligned} & -\frac{16}{3} v\sqrt{\beta} q_2' - v^2 q_1 \pi^2 + \pi^4 q_1 + q_1 \pi^4 q_2^2 + 2 q_1 \pi^4 \mu q_2' q_2 + q_1'' + \frac{1}{4} q_1^3 \pi^4 + \mu q_1' \pi^4 + \frac{1}{2} q_1^2 \pi^4 \mu q_1' = 0 \\ & \frac{16}{3} v\sqrt{\beta} q_1' - 4v^2 q_2 \pi^2 + 16 q_2 \pi^4 + 4 q_2^3 \pi^4 + q_2'' + 2 q_2 \pi^4 \mu q_1' q_1 + 8 q_2^2 \pi^4 \mu q_2' + q_2 \pi^4 q_1^2 + 16 \mu q_2' \pi^4 = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

2.2.2 FPSO'nun hareketli olduğu durum

Dalgalı deniz şartlarında FPSO'nun bu deniz hareketine uyumlu olarak harmonik hareket ettiği durumdur. Güverteyi su basması olayının olmadığı, dolayısıyla denizden direkt boruya bir etkinin bulunmadığı durumda hareket denkleminde zorlama terimi olarak sadece FPSO'nun ivmesinden kaynaklanan hareket vardır. FPSO'nun hareket denklemini (H) veren aşağıdaki fonksiyonda, "b" FPSO'nun hareket genliğini, "Ω" hareketin frekansını göstermektedir.

$$H = b \cos(\Omega t) \quad (31)$$

FPSO'nun hareket ettiği ve içinden akışkan geçen borunun hareket denklemi:

$$\ddot{w} + 2v\sqrt{\beta}\dot{w}' + v^2 w'' + w^{2v} + \mu \dot{v} - w'' \int_0^1 \frac{1}{2} w'^2 dx = \ddot{H} \quad (32)$$

Galerkin çözümünde N=2 için aşağıdaki adi diferansiyel denklem sistemi elde edilir:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{12} \frac{1}{\pi} (48 b \cos(\Omega t) \Omega^2 - 64 v \sqrt{\beta} q2' \pi + 12 q1 \pi^5 q2^2 + 12 \mu q1' \pi^5 - 12 v^2 q1 \pi^3 \\ & + 3 q1^3 \pi^5 + 24 q1 \pi^5 \mu q2' q2 + 6 q1^2 \pi^5 \mu q1' + 12 q1 \pi^5 + 12 q1'' \pi) = 0 \\ & \frac{16}{3} v \sqrt{\beta} q1' + 8 q2^2 \pi^4 \mu q2' + 16 \mu q2' \pi^4 + q2 \pi^4 q1^2 \\ & - 4 v^2 q2 \pi^2 + 4 q2^3 \pi^4 + q2'' + 16 q2 \pi^4 + 2 q2 \pi^4 \mu q1' q1 = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

Güverte üzerindeki borunun güverteyi su basması olayı sonucu dalga etkisi altında kalması durumunda ise yukarıda verilen hareket denkleminde Morison kuvveti zorlama terimi olarak eklenir. Dalga boyunun yapının karakteristik uzunluğuna (boru için borunun çapı) oranının 0,2'den küçük olduğu durumlarda, denizel yükü veren ve akışkan partiküllerinin yapıya uyguladığı hidrodinamik yüklerin hesaplanmasında kullanılan Morison denklemi aşağıdaki gibidir:

$$f = C_M \rho A_I \left(\frac{\partial u^*}{\partial t^*} - \frac{\partial^2 y}{\partial t^{*2}} \right) + A_I \frac{\partial^2 y}{\partial t^{*2}} + \frac{1}{2} C_D \rho A_D \left(u^* - \frac{\partial y}{\partial t^*} \right) \left| u^* - \frac{\partial y}{\partial t^*} \right| \quad (34)$$

Morison denklemindeki “ C_M ” atalet katsayısı, “ ρ ” dıştaki akışkanın yoğunluğu, “ A_I ” boru dış kenarına göre toplam alanı, “ C_D ” direnç (sürüklenme) katsayısı, “ A_D ” borunun suyla temas eden yüzeyinin birim alanı, “ u^* ” akışkan partiküllerinin hızıdır. Denklemden ilk terim atalet kuvvetinden, ikinci terim sürüklenme kuvvetinden gelmektedir ve birim boru boyuna dıştaki akışkandan gelen kuvveti verir.

Dalga hızını (u) tanımlayan aşağıdaki denklemde, “ u_0 ” dalga genliği, “ θ ” dalga frekansıdır. Hareket denkleminde yapıldığı şekilde benzer bir boyutsuzlaştırma dış akıştan kaynaklanan etkileri veren Morison denkleminde uygulandığında aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\bar{f} = C_M \sqrt{\beta_1} \frac{\partial u}{\partial t} - C_A \sqrt{\beta_1} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C'_D \left(a_1 u - a_2 \frac{\partial w}{\partial t} \right) \left| a_1 u - a_2 \frac{\partial w}{\partial t} \right|$$

$$u = u_0 \cos(\theta t) \quad (35)$$

$$\beta_1 = \frac{\rho A_I}{m} \quad C'_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_D \frac{L^3}{EI} \quad a_1 = \sqrt{\frac{EI}{\rho L^2 A_I}} \quad a_2 = \sqrt{\frac{EI}{m L^2}}$$

“ β_1 ” boyutsuz bir sayıdır ancak diğerleri değildir. Bununla birlikte $C'_D a_1^2$, $C'_D a_2^2$, $C'_D a_1 a_2$ çarpımları boyutsuz sayı olacaktır.

Yapılan literatür taraması ışığında bir sonraki bölümde yer alan uygulama çalışmalarında, atalet katsayısı (C_M) için 2,0, direnç katsayısı (C_D) için 0,3 ve ek su kütlesi katsayısı (C_A) için 1,0 değerleri kullanılacaktır.

Güverteyi su basması olayı sonucu dalga etkisindeki borunun hareket denklemini yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki gibidir:

$$\ddot{w} + 2v\sqrt{\beta_1}\dot{w}' + v^2 w'' + w^{(3)} + \mu \delta \dot{w} - w'' \int_0^1 \frac{1}{2} w'^2 dx = \ddot{H} + \bar{f} \quad (36)$$

$$\ddot{w} + 2v\sqrt{\beta_1}\dot{w}' + v^2 w'' + w^{(3)} + \mu \delta \dot{w} - w'' \int_0^1 \frac{1}{2} w'^2 dx = \ddot{H} + C_M \sqrt{\beta_1} \frac{\partial u}{\partial t} - C_A \sqrt{\beta_1} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C'_D \left(a_1 u - a_2 \frac{\partial w}{\partial t} \right) \left| a_1 u - a_2 \frac{\partial w}{\partial t} \right|$$

Hareket denklemlerinin bilgisayar destekli analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen sayısal çözümleri bir sonraki bölümdeki uygulama çalışmalarında yorumlanacaktır.

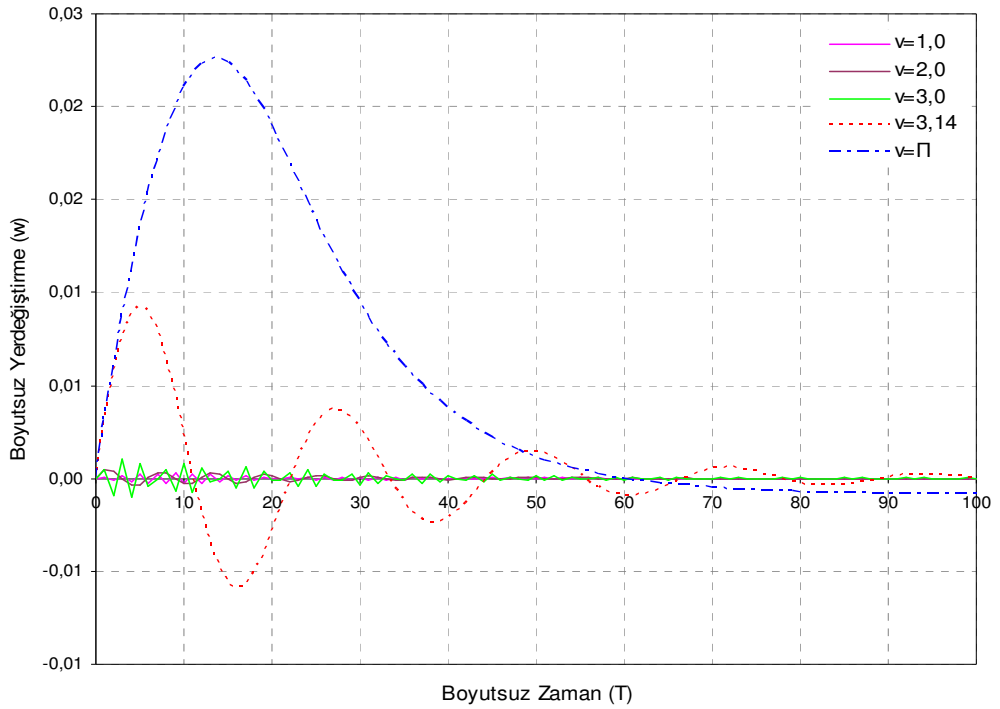
BÖLÜM ÜÇ

UYGULAMA ÇALIŞMALARI

3.1 Genel

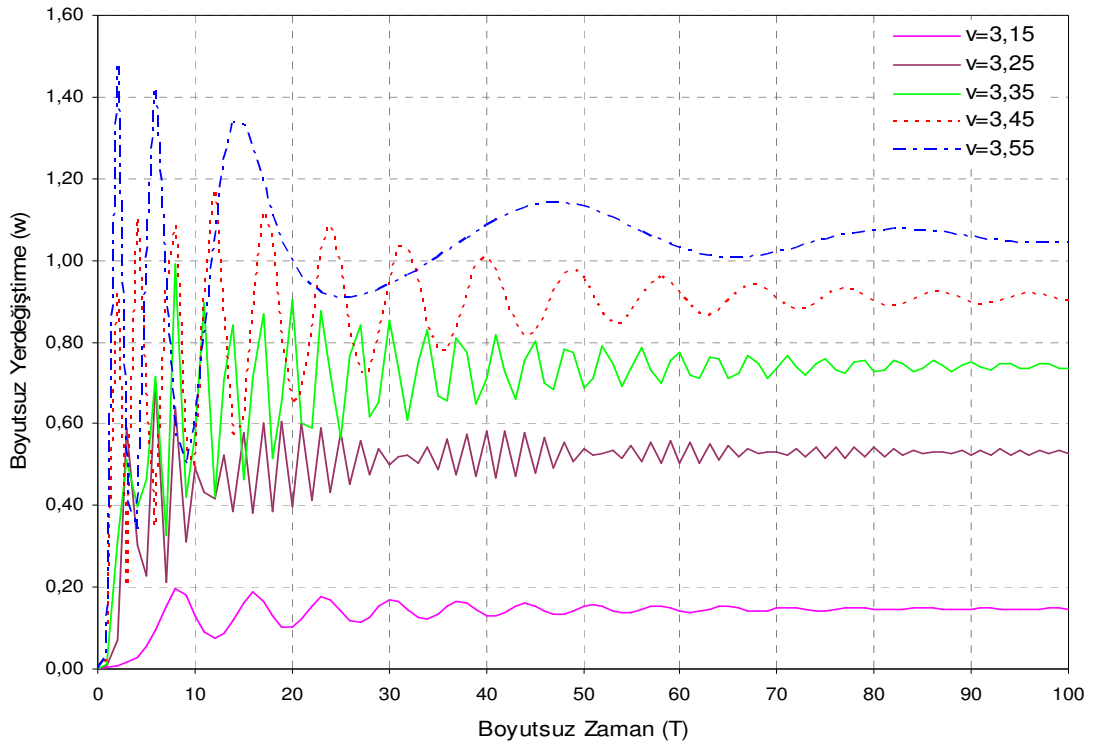
Bu bölümde, FPSO çeşidi açık deniz yapılarının güverte üzerinde bulunan boru hatlarına etkileyen deniz yüklerinin dinamik analizi için MAPLE bilgisayar programıyla Bölüm 2’de verilen hareket denkleminin uygulama çalışmaları yapılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar yorumlanmıştır.

Bölüm 2.2.1’de hareket denklemi verilen boruya, deniz yüzeyinin hareketsiz olması nedeniyle dışardan bir zorlama kuvveti etki etmemektedir. Sayısal sonuçların elde edilmesiyle hazırlanan Şekil 3.1’de $T=100$ zamanı için farklı hız değerlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi boyutsuz akışkan hızı (v) π sayısına ulaştığında, boyutsuz yer değiştirme değerinde ani bir değişim meydana gelmekte ve sönüm gerçekleşmemektedir.



Şekil 3.1 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Boyutsuz akışkan hızının π 'den büyük olması durumunda ise Şekil 3.2'de görüleceği gibi sonum meydana gelmemekte ve sistem stabilitesini kaybetmektedir. Örneğin boyutsuz akışkan hızının 3,55 değerinde boyutsuz yer değiştirme değeri 1,5 dolaylarındadır. Oysa borunun boyutsuz büyüklüğü 1'e eşit olduğu için böyle bir salınım olamaz ve sistem çöker. Bu nedenle, sistemin stabil çalışabilmesi için boru içindeki akışın boyutsuz hız değeri basit-basit mesnet şartları için π 'den küçük olmalıdır.



Şekil 3.2 π 'den büyük boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

3.2 Uygulamalar

Bölüm 2.2.2'de hareket denklemi verilen boruya, FPSO yapısının dalgalı denizdeki hareketinden kaynaklanan yüke ek olarak, güverteyi su basması sonrası boru üzerine etki eden dalga yükü de etki etmektedir. Boruya etki eden bu yüklerin analiziyle hesaplanan boyutsuz yer değiştirme değerleri aşağıdaki uygulama çalışmalarında verilmiştir.

Uygulama çalışmalarında dış çap değerleri aynı alınan çelik, alüminyum, PVC, cam takviyeli plastik (CTP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (High Density Polyethylene, HDPE) malzemeden imal edilmiş borular ayrı ayrı ele alınarak sonuçlar yorumlanmış ve daha sonra da birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

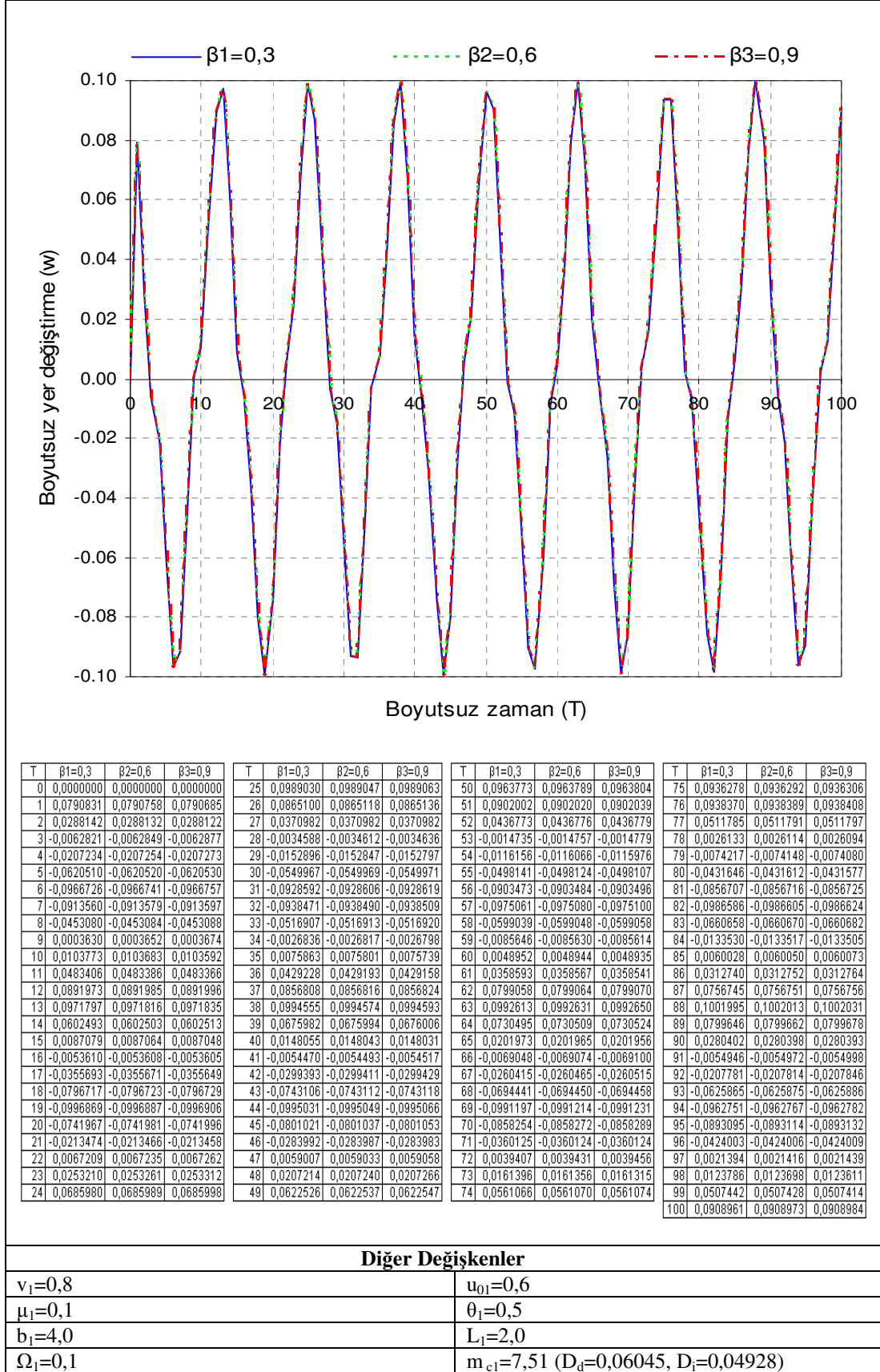
3.2.1 Çelik boru için uygulama çalışması

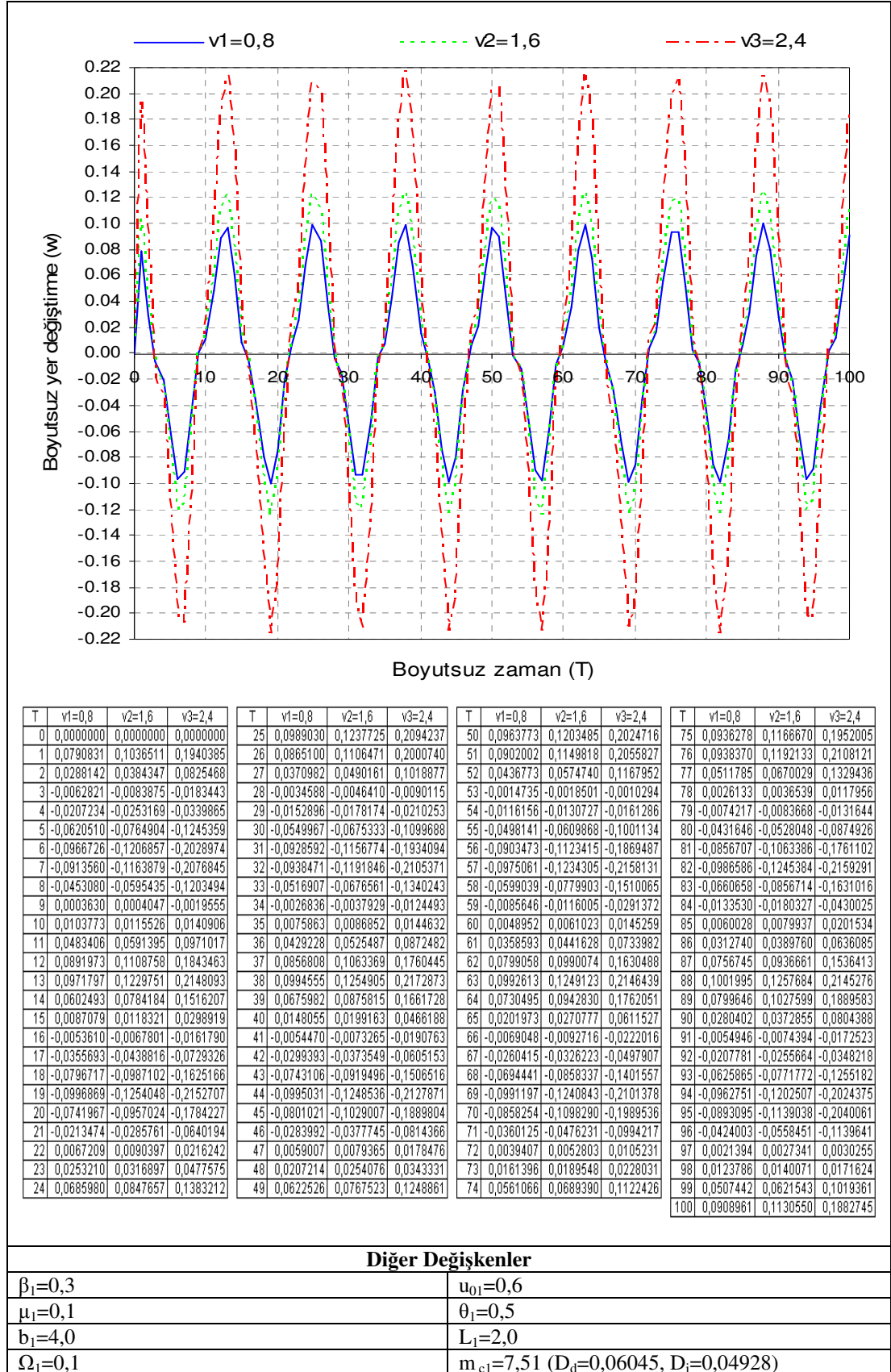
FPSO yapılarının güverte üzerinde genelde çelik malzemeden imal edilmiş boru hatları bulunmaktadır. Bu bölümdeki uygulama çalışmalarında, yoğunluğu 7800 kg/m^3 , elastisite modülü $211 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olan üç farklı kalınlıkta çelik boru kullanılmıştır. Tablo 3.1’de verilen boru karakteristikleri, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standards Institute, ANSI) tarafından sınıflandırılmış Sch 80 tipi çelik boru kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.1 Çelik boru karakteristikleri

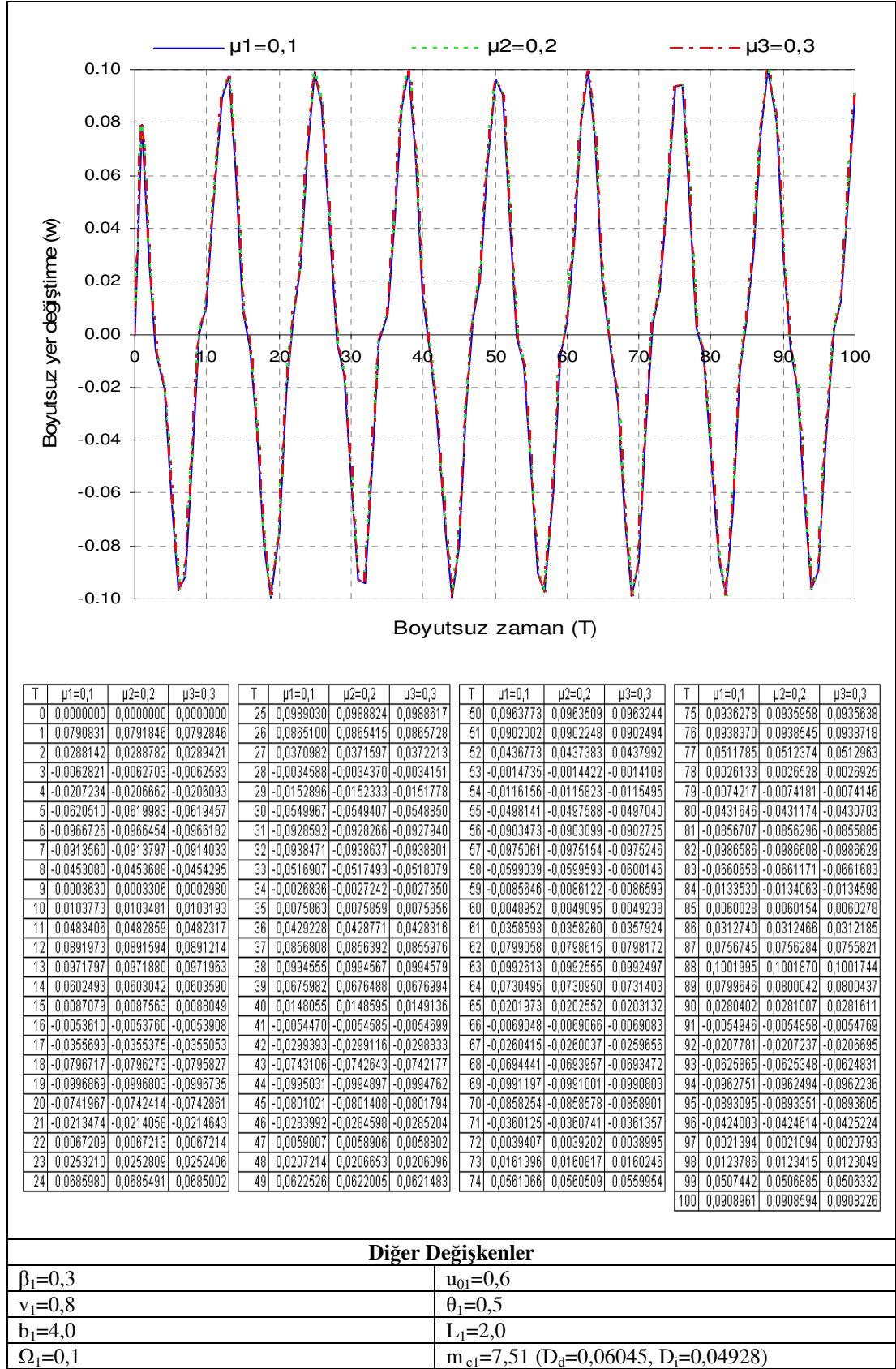
	Birim	1 no’lu boru	2 no’lu boru	3 no’lu boru
Borunun dış çapı (D_d)	m	0,06045	0,11430	0,16840
Borunun iç çapı (D_i)	m	0,04928	0,09728	0,14630
Borunun birim boy kütlesi (m)	kg	7,51	22,06	42,61

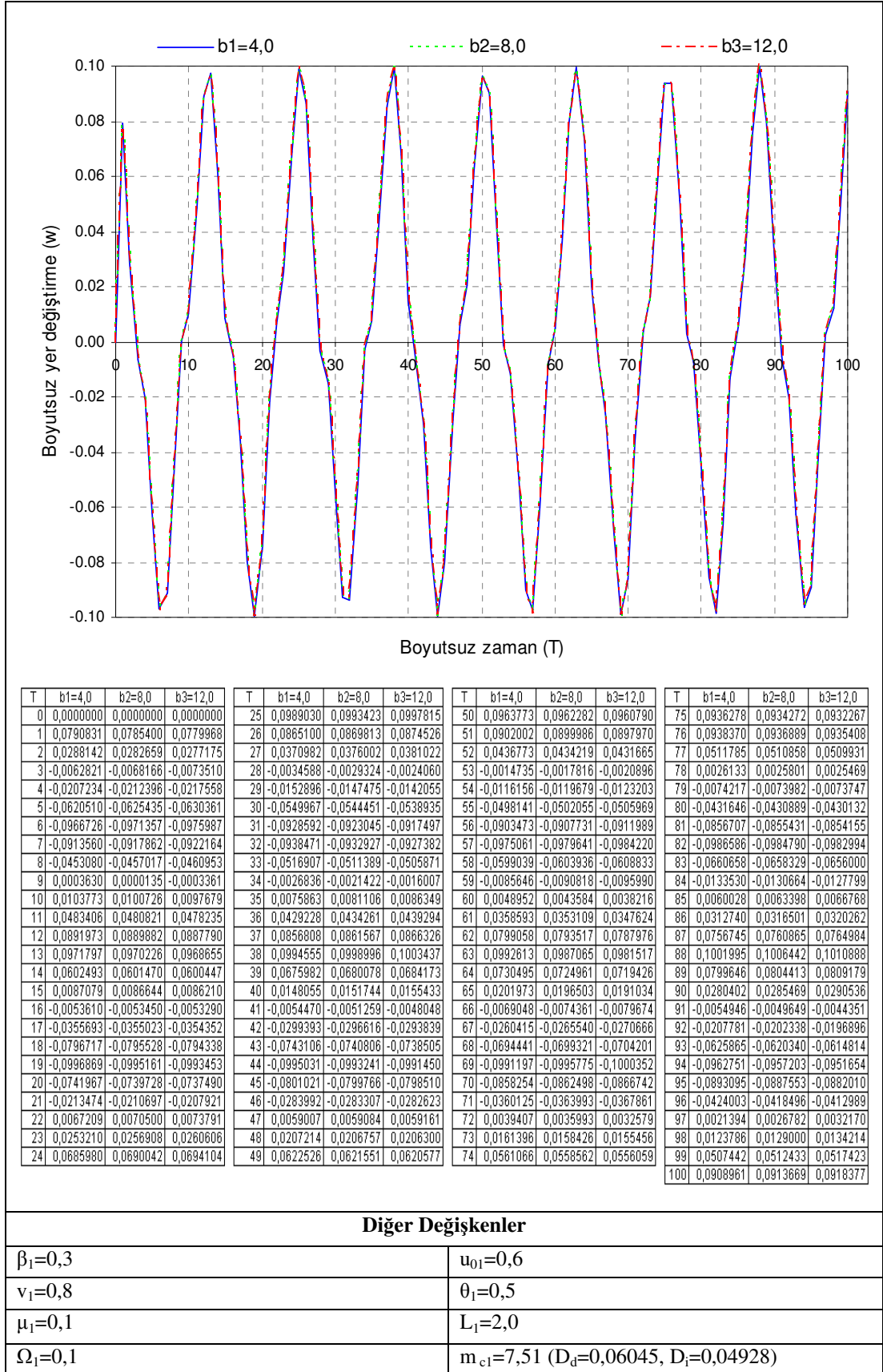
Hareket denklemindeki değişkenlerin her biri için üç farklı değer alınarak yapılan dinamik analiz çalışmalarından elde edilen boyutsuz yer değiştirme değerleri ve karakteristikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 3.3 Boyutsuz doluluk oranı (β) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

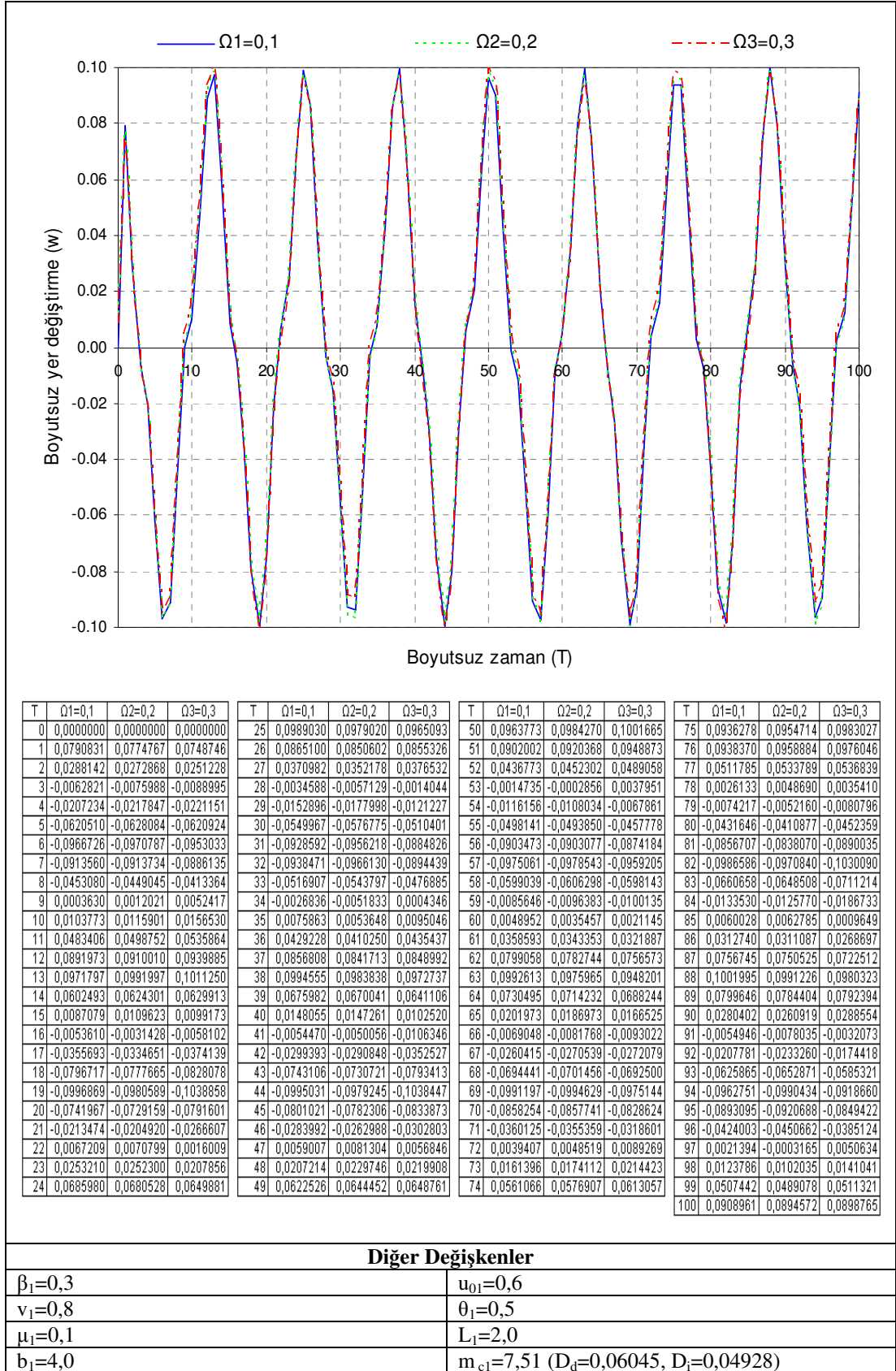


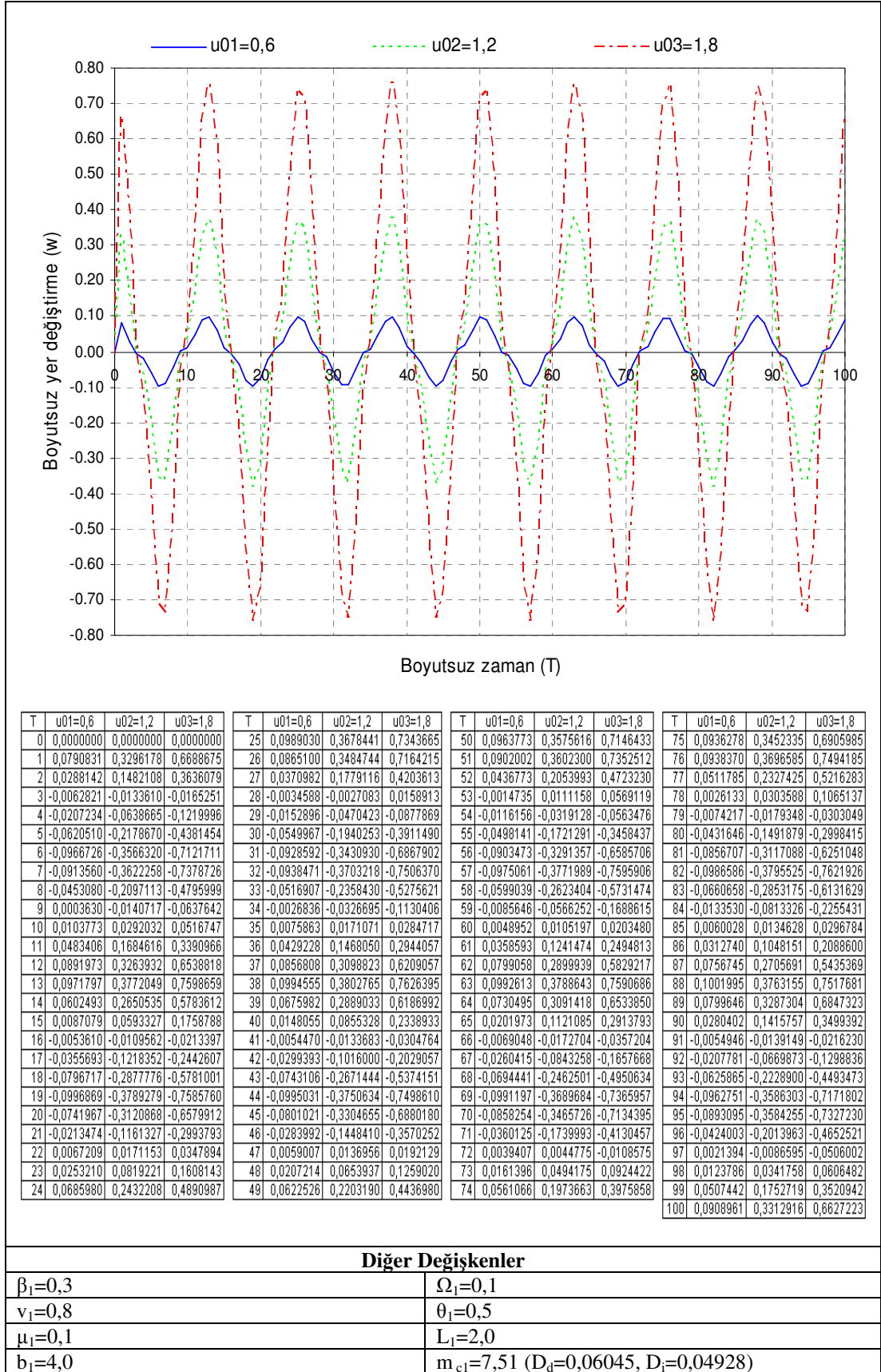
Şekil 3.4 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

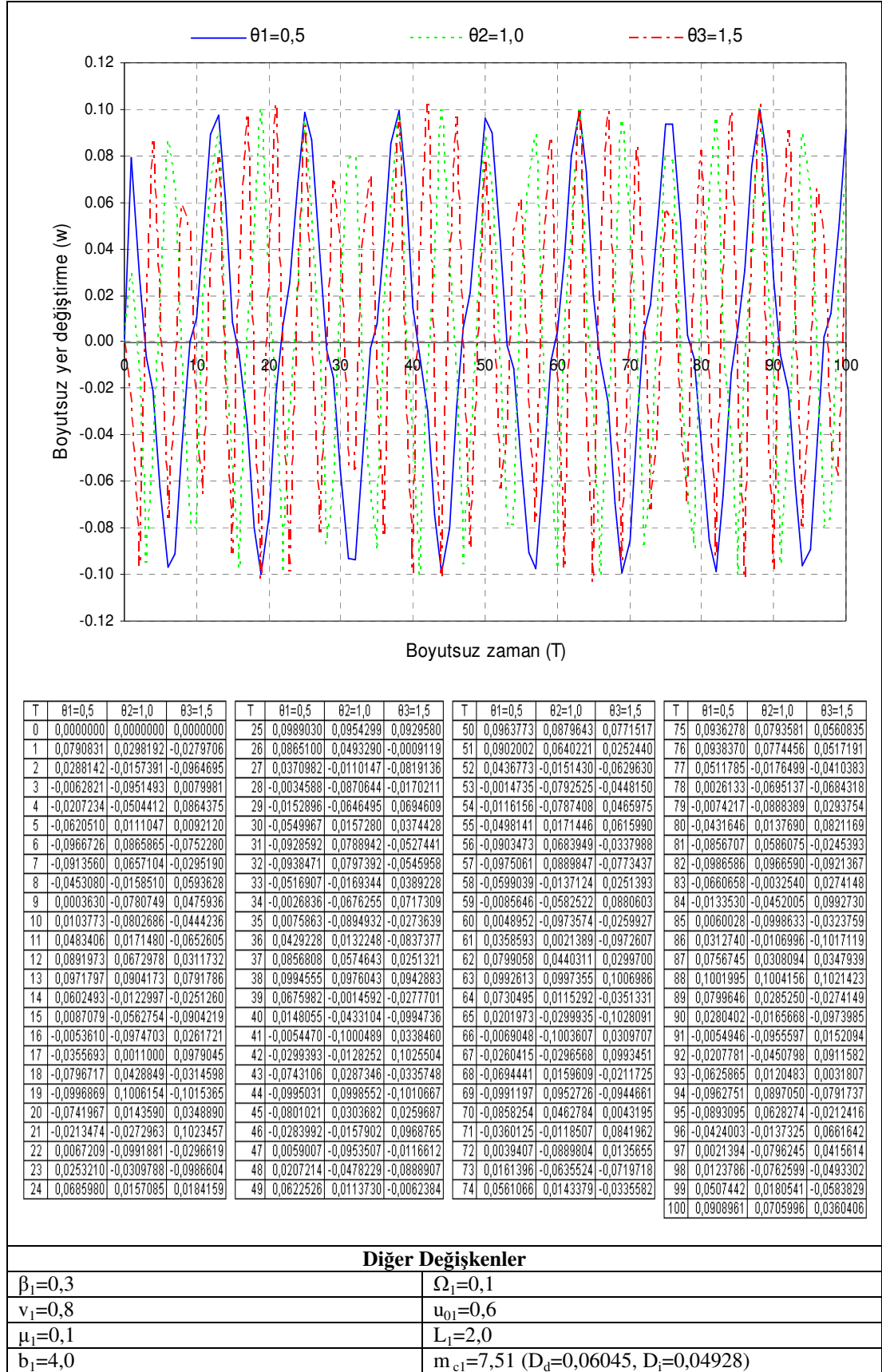
Şekil 3.5 Boyutsuz sönüm katsayısı (μ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

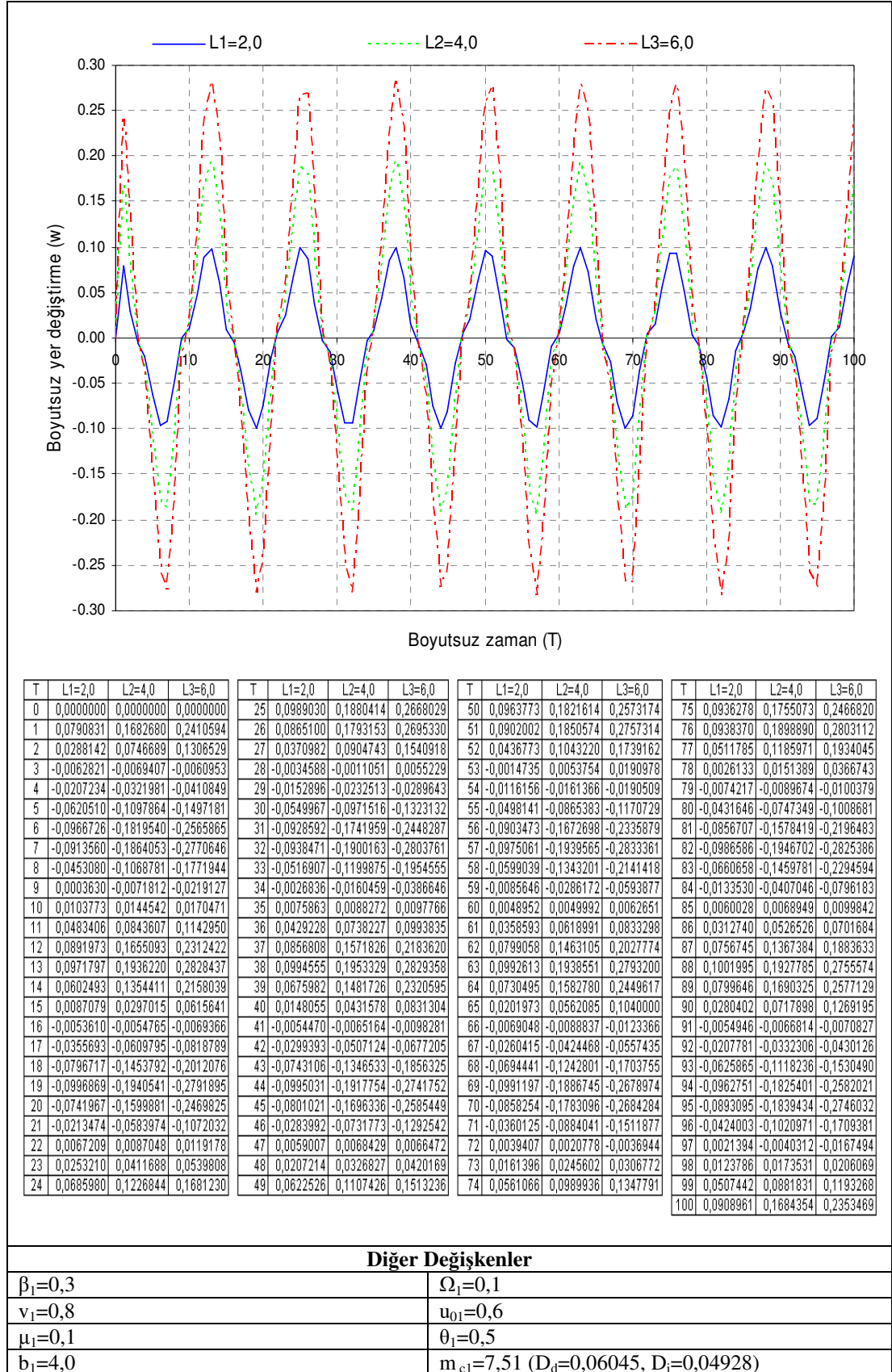


Şekil 3.6 FPSO'nun hareket genliği (b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

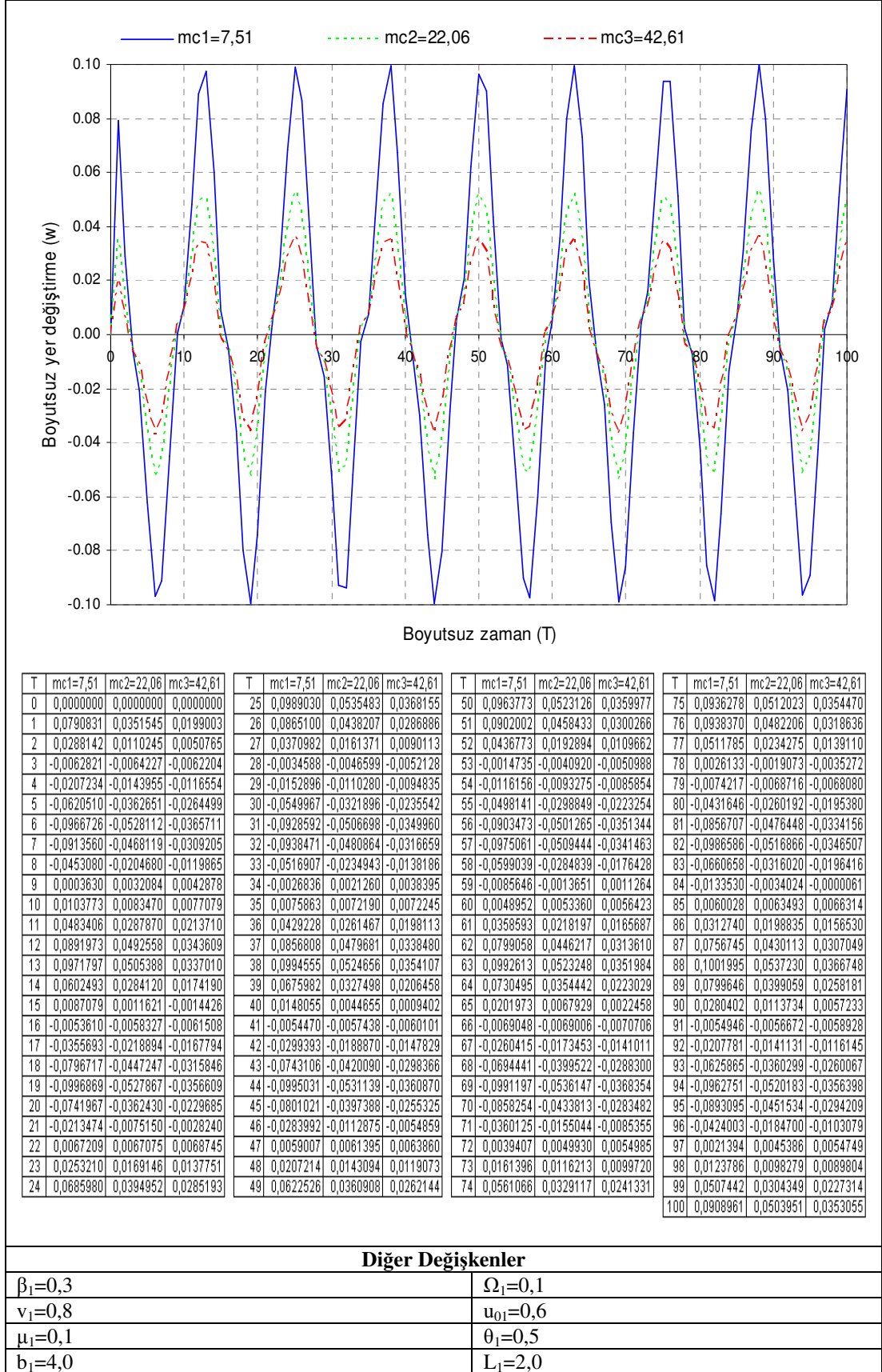
Şekil 3.7 FPSO'nun hareket frekansı (Ω) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.8 Dalga genişliği (u_0) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.9 Dalga frekansı (θ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

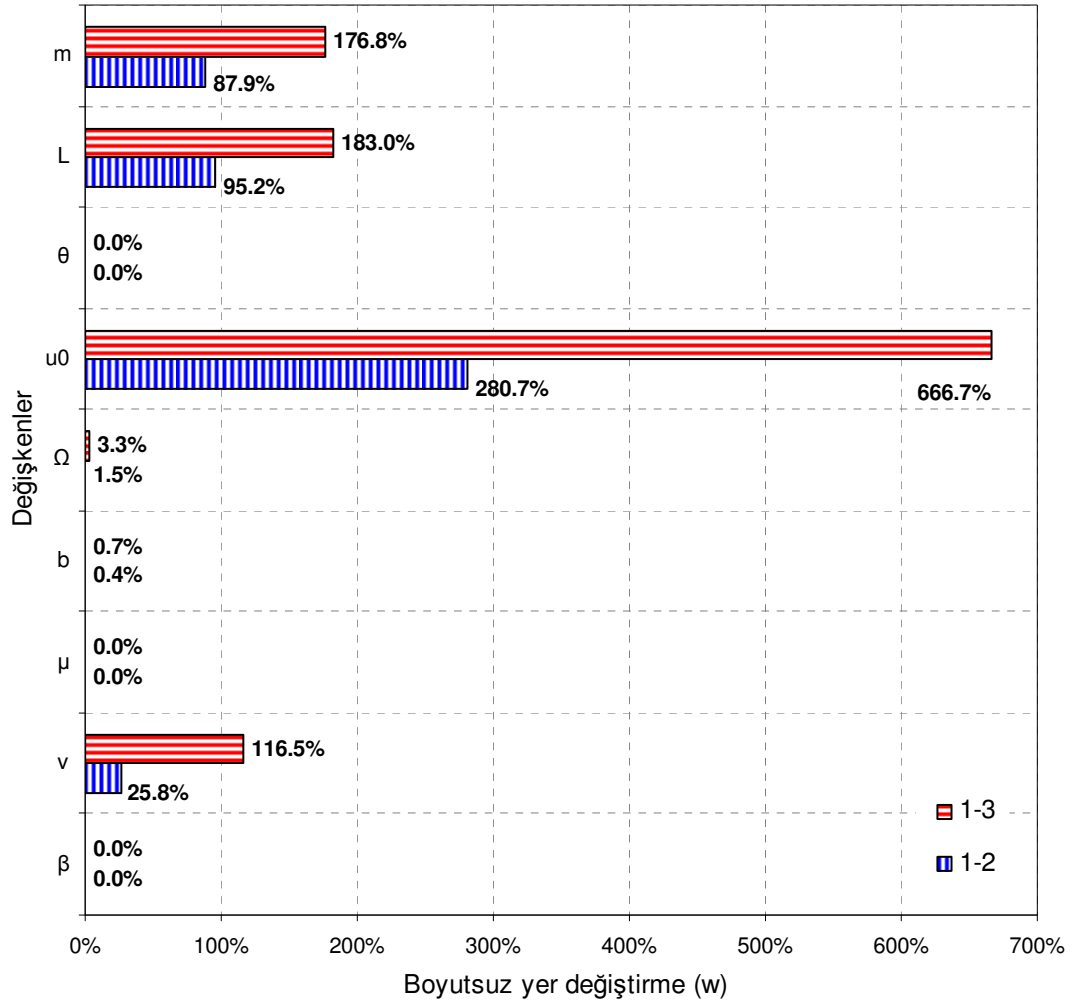


Şekil 3.10 Boru boyu (L) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)



Şekil 3.11 Çelik boru için birim boy kütle (mc) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.3 - Şekil 3.11 arası verilen hareket denkleminde ait değişkenlerin aldıkları büyüklüklerle boyutsuz yer değiştirme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için oransal karşılaştırma sonuçları Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere, boyutsuz yer değiştirme değerini en çok boruya etki eden dalga yükü kaynaklı akışkan zerreciklerinin hızı (Şekil 3.8) etkilemektedir. Boru boyu (Şekil 3.10), boru kütlesi (Şekil 3.11) ve boru içerisindeki akışkanın hızı da (Şekil 3.4) yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir.



Şekil 3.12 Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirme (w) değerine etkisi

3.2.2 Alüminyum boru için uygulama çalışması

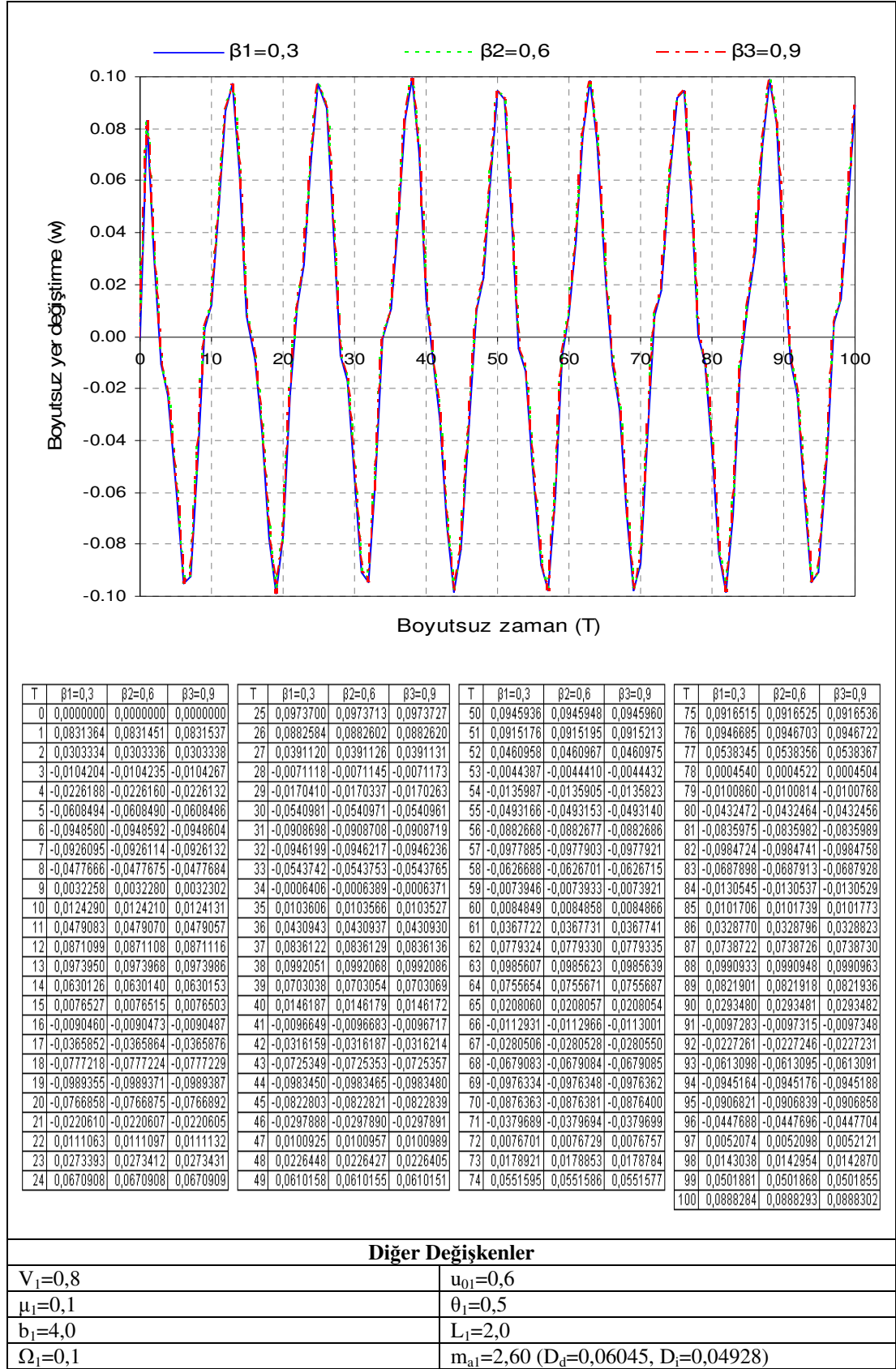
Hafif olmaları ve yüzeyleri üzerinde paslanma meydana gelmemesi nedeniyle deniz yapılarının özellikle güverte üstü kısımlarında alüminyum yapılar inşa edilmektedir. İmalat ve kaynak teknolojisindeki gelişmeler sonucunda alüminyum boruların kullanım alanı artmıştır.

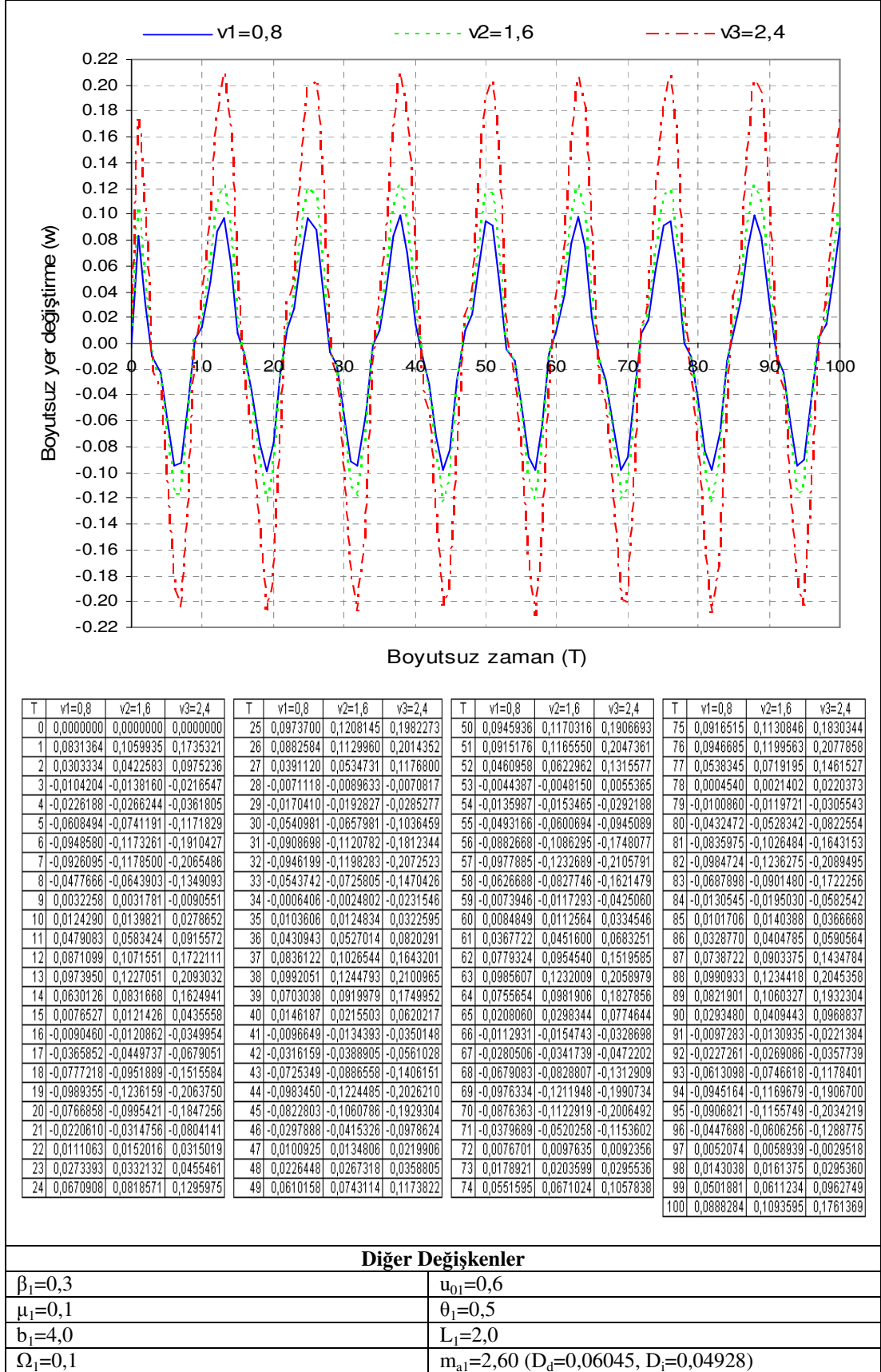
Bu bölümdeki uygulama çalışmalarında, yoğunluğu 2700 kg/m^3 , elastisite modülü $70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olan üç farklı kalınlıkta alüminyum boru kullanılmıştır. Tablo 3.2’de verilen boru karakteristikleri, Amerikan Test ve Malzeme Standartları Odası (American Society for Testing and Materials, ASTM) tarafından sınıflandırılmış 6061-T6 Sch 80 tipi boru kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.2 Alüminyum boru karakteristikleri

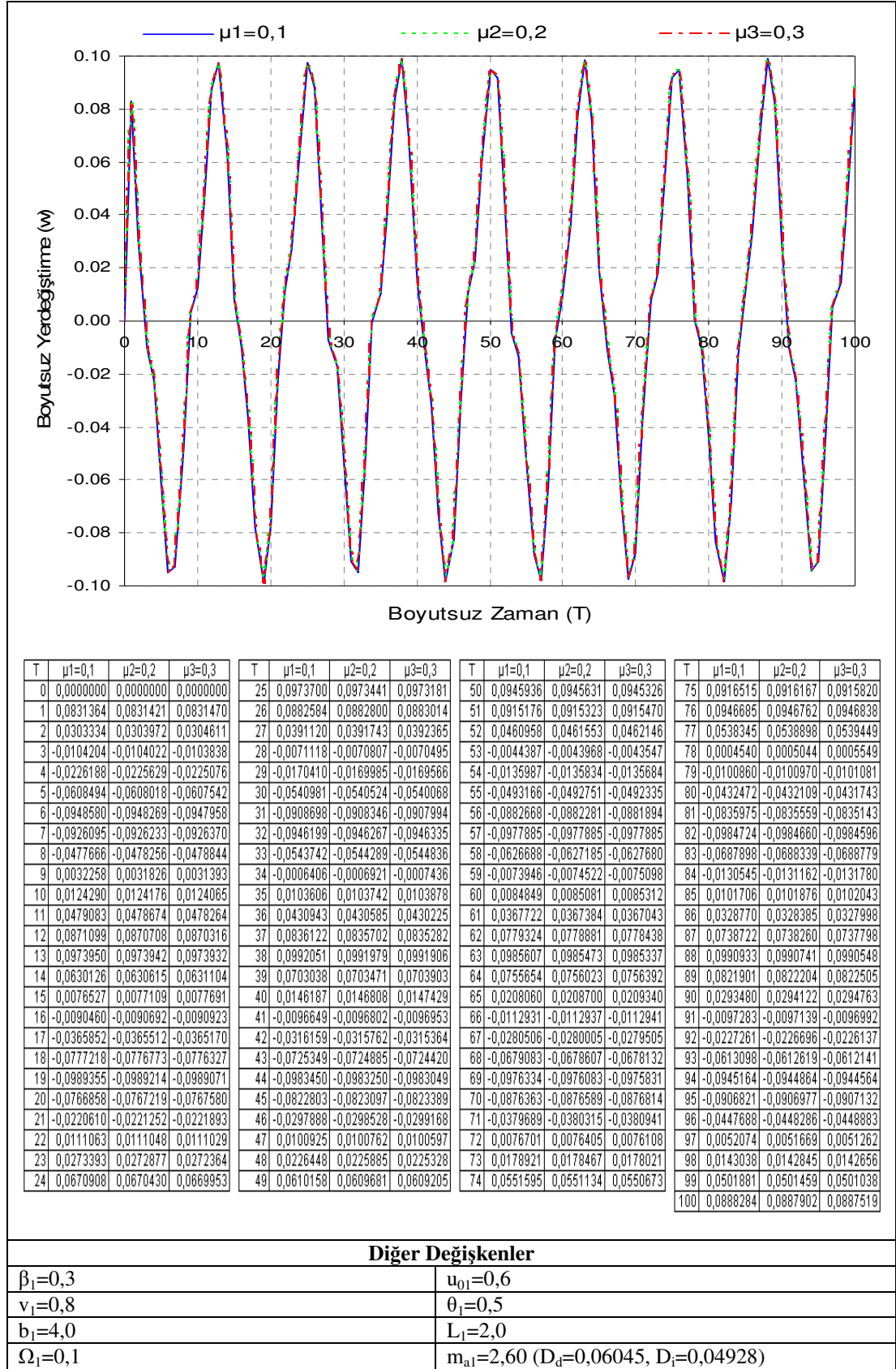
	Birim	1 no’lu boru	2 no’lu boru	3 no’lu boru
Borunun dış çapı (D_o)	m	0,06045	0,11430	0,16840
Borunun iç çapı (D_i)	m	0,04298	0,09728	0,14630
Borunun birim boy kütlesi (m)	kg	2,60	7,64	14,75

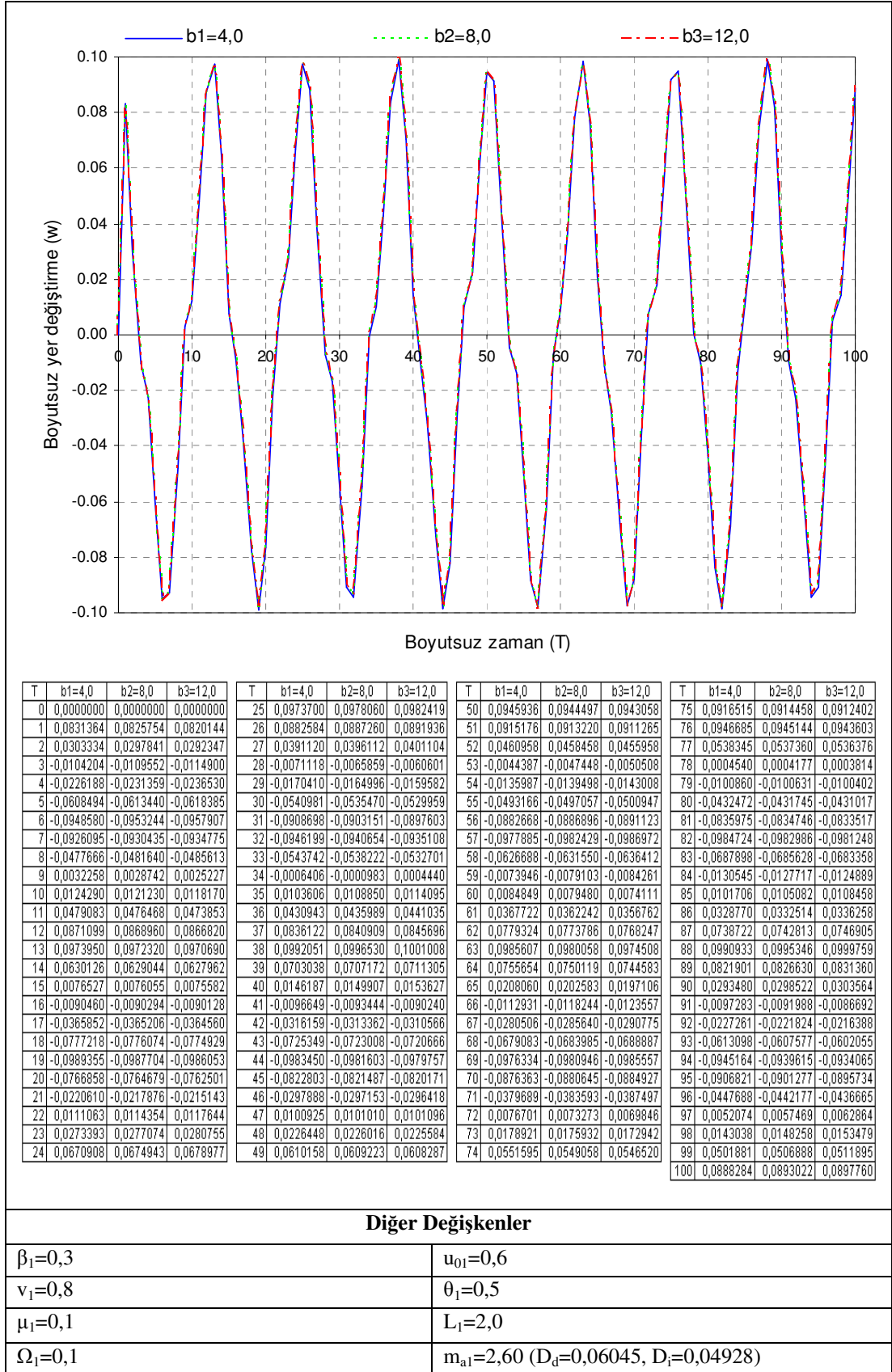
Hareket denklemindeki değişkenlerin her biri için üç farklı değer alınarak yapılan dinamik analiz çalışmalarından elde edilen boyutsuz yer değiştirme değerleri ve karakteristikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 3.13 Boyutsuz doluluk oranı (β) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

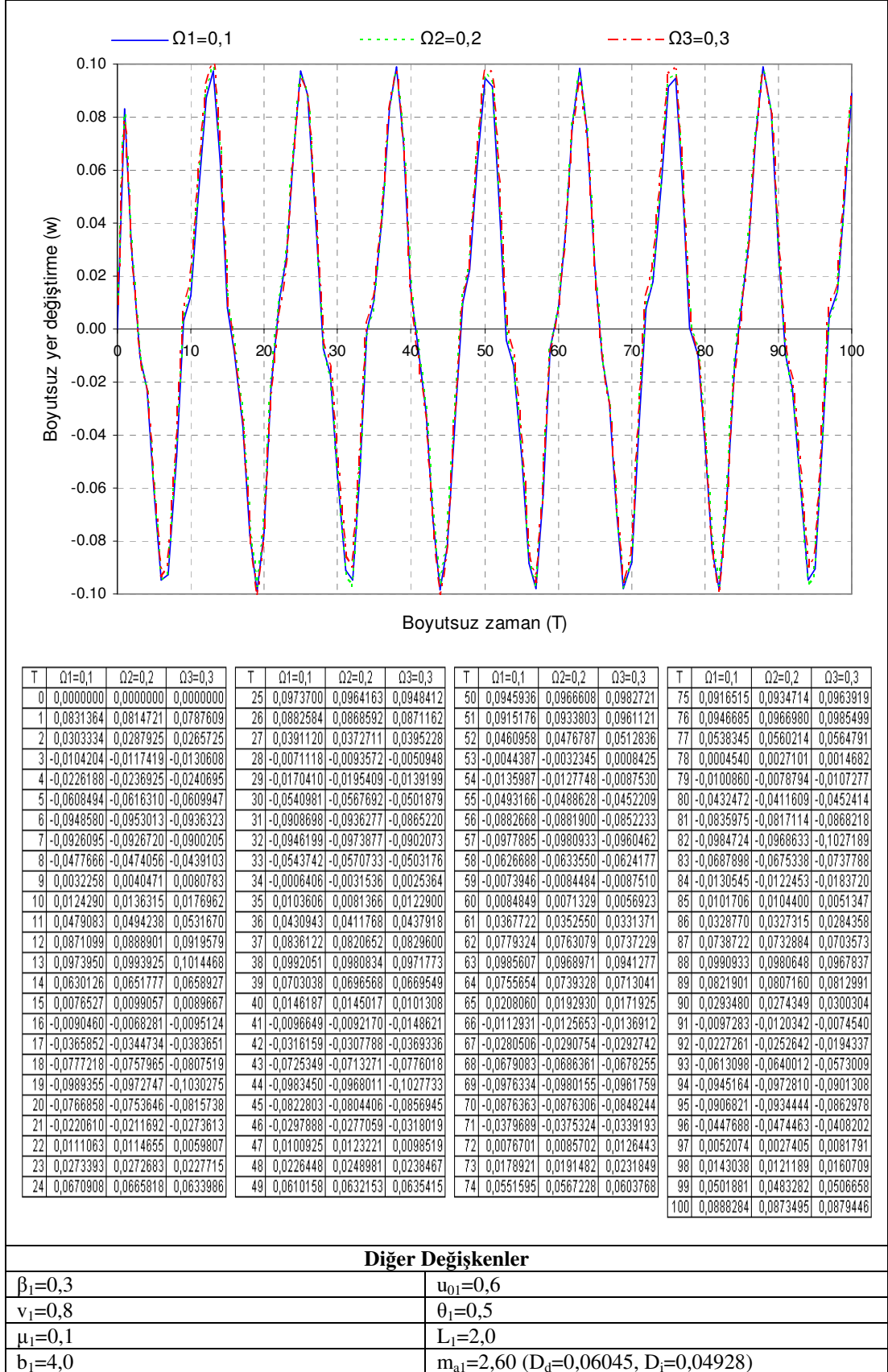


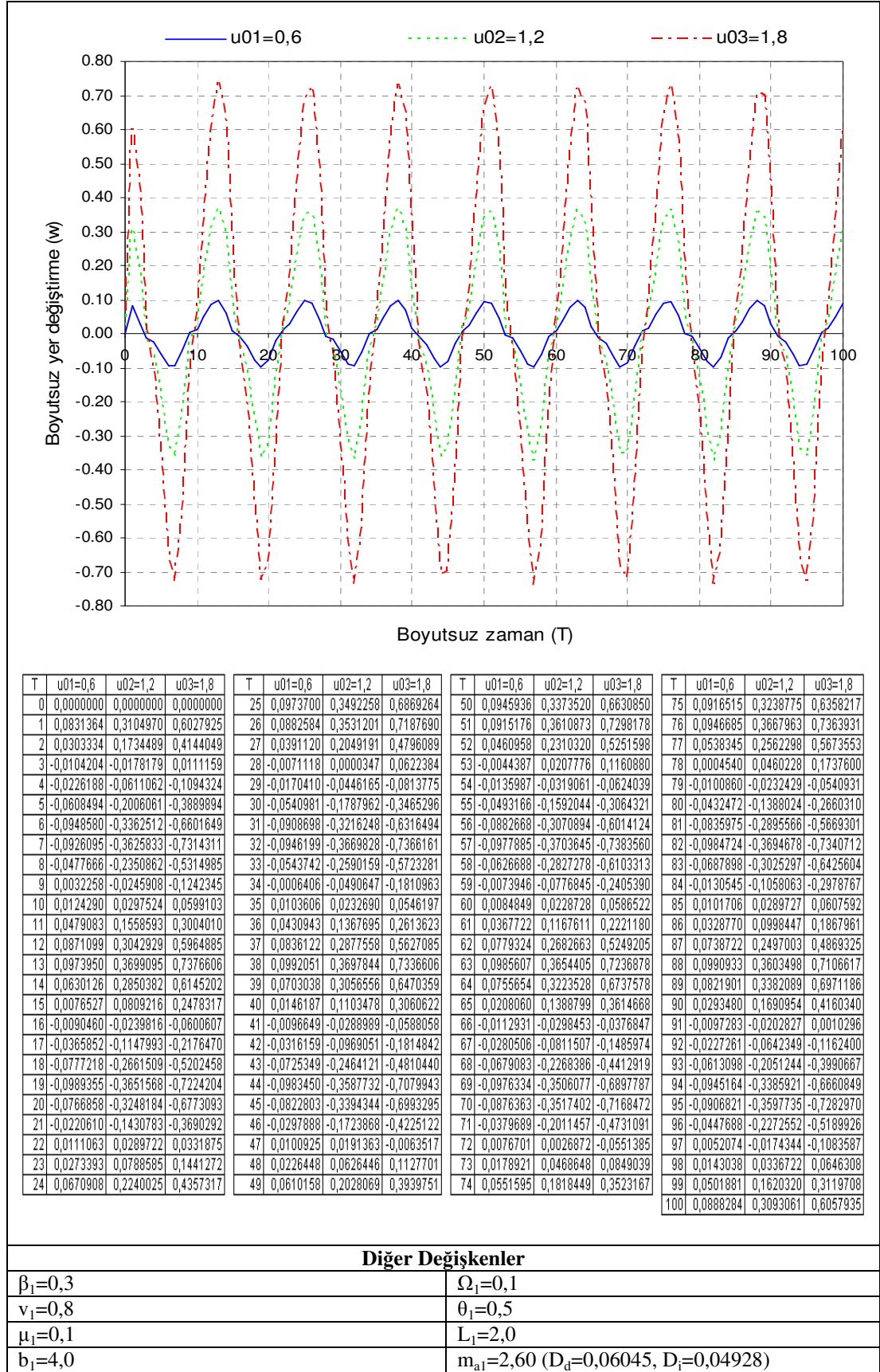
Şekil 3.14 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

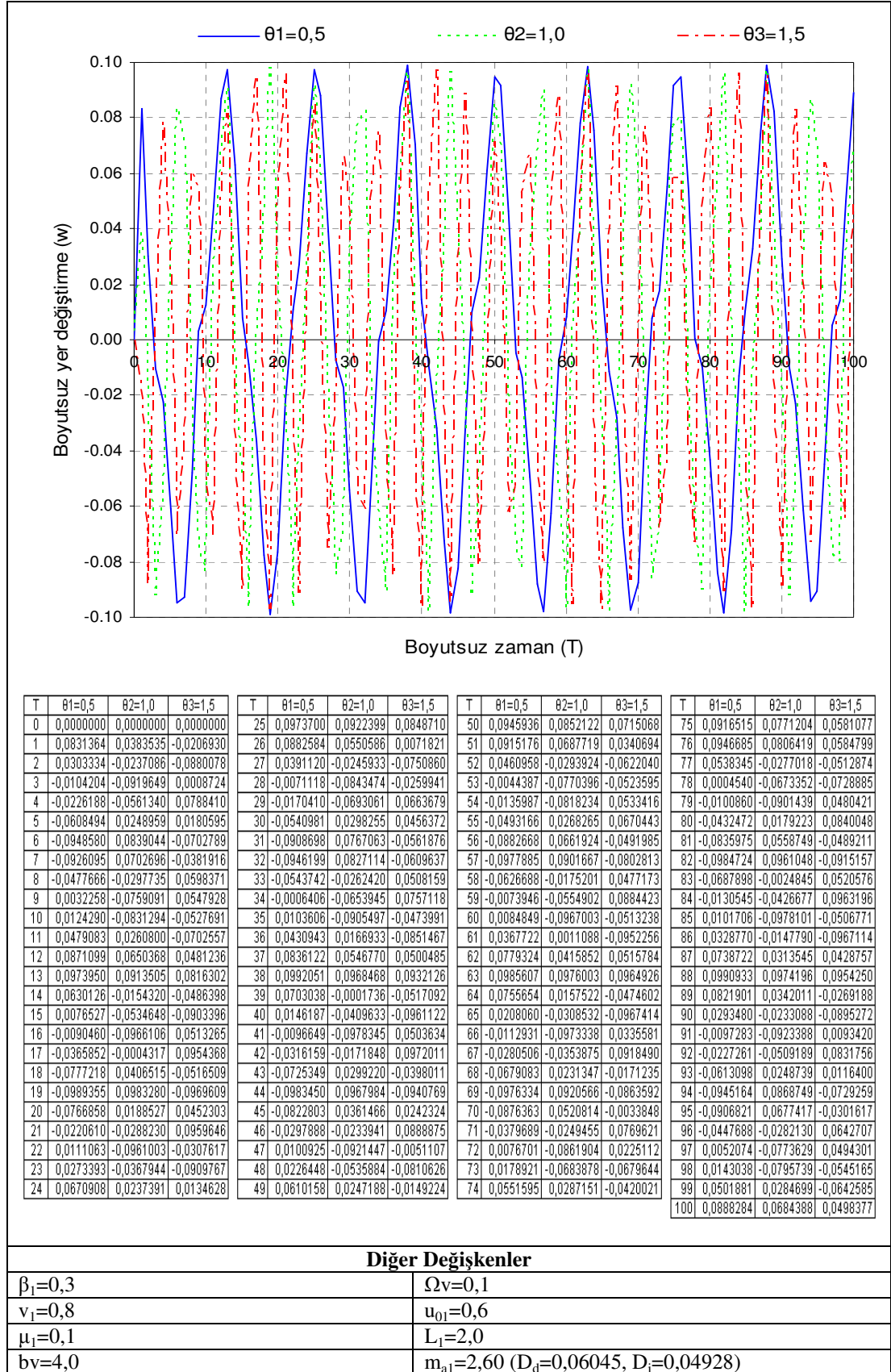
Şekil 3.15 Boyutsuz sönüm katsayısı (μ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

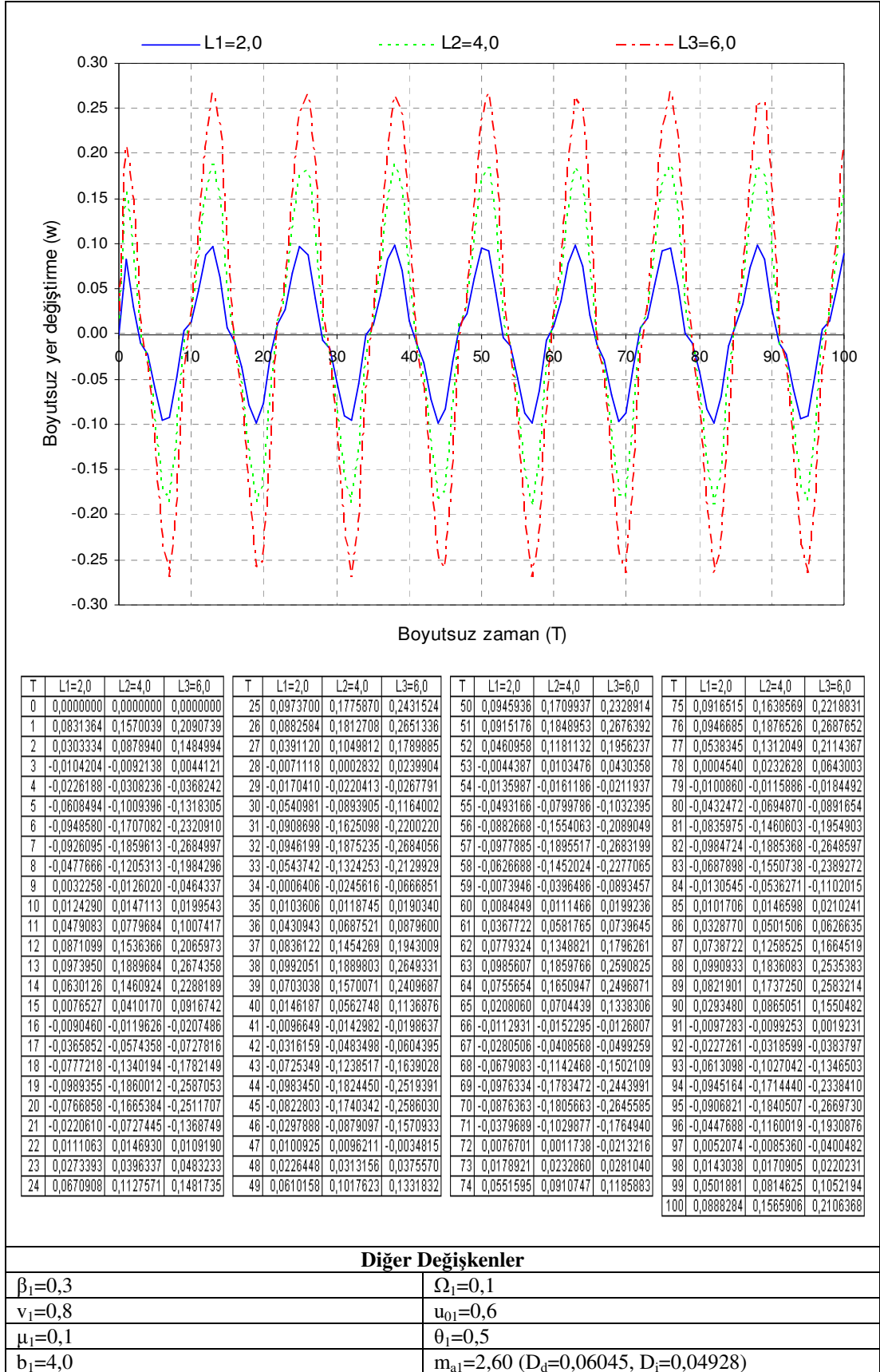


Şekil 3.16 FPSO'nun hareket genliği (b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

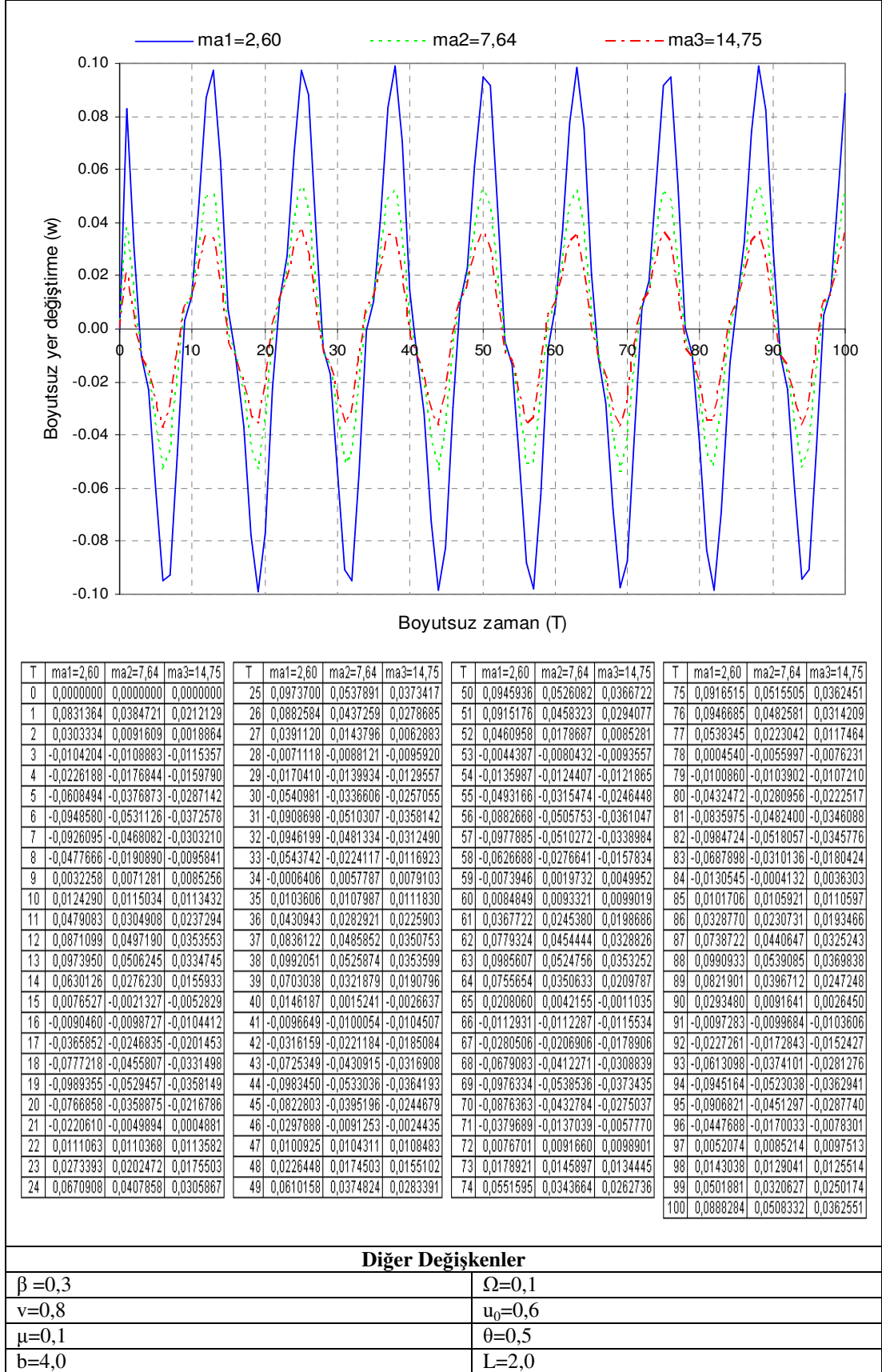
Şekil 3.17 FPSO'nun hareket frekansı (Ω) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.18 Dalga genliği (u_0) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

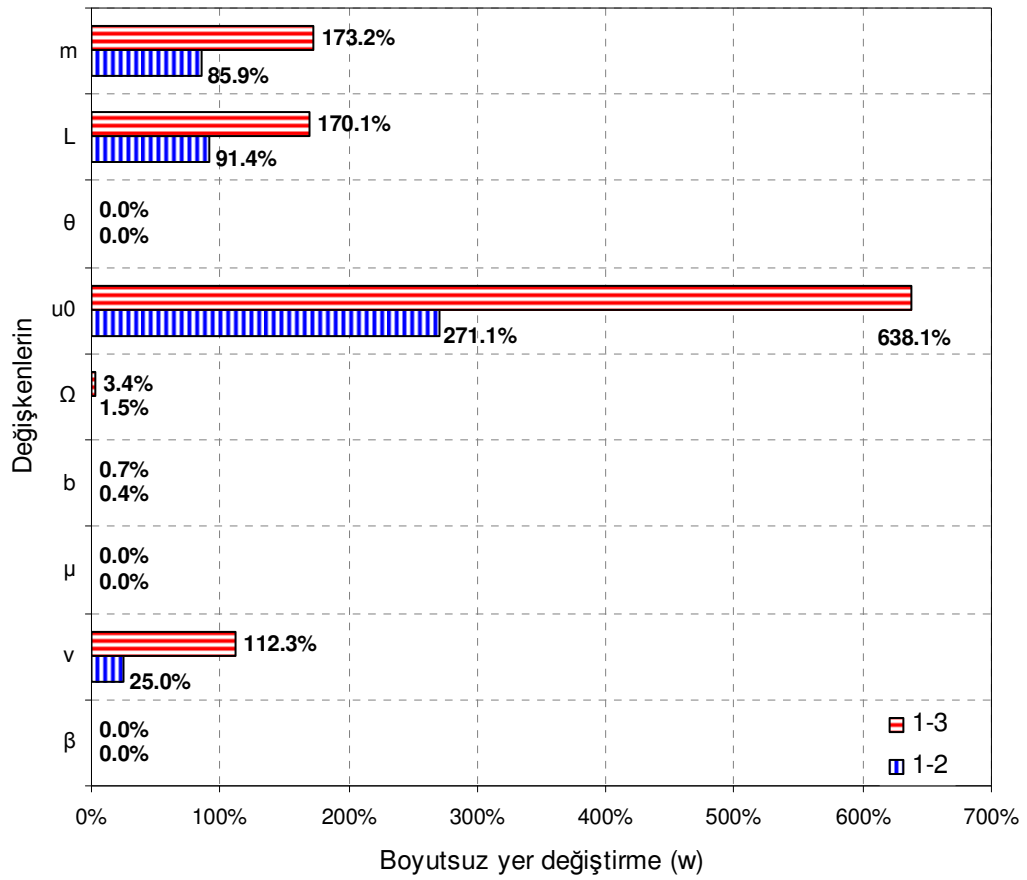
Şekil 3.19 Dalga frekansı (θ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)



Şekil 3.20 Boru boyu (L) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.21 Alüminyum boru için birim boy kütlesi (m_a) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.13 - Şekil 3.21 arası verilen hareket denkleminde ait değişkenlerin aldıkları büyüklüklerle boyutsuz yer değiştirme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için oransal karşılaştırma sonuçları Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Şekil 3.22’de görüldüğü üzere, boyutsuz yer değiştirme değerini en çok boruya etki eden dalga yükü kaynaklı akışkan zerreciklerinin hızı (Şekil 3.18) etkilemektedir. Boru boyu (Şekil 3.20), boru kütlesi (Şekil 3.21) ve boru içerisindeki akışkanın hızı da (Şekil 3.14) yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir.



Şekil 3.22 Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirme (w) değerine etkisi

3.2.3 PVC boru için uygulama çalışması

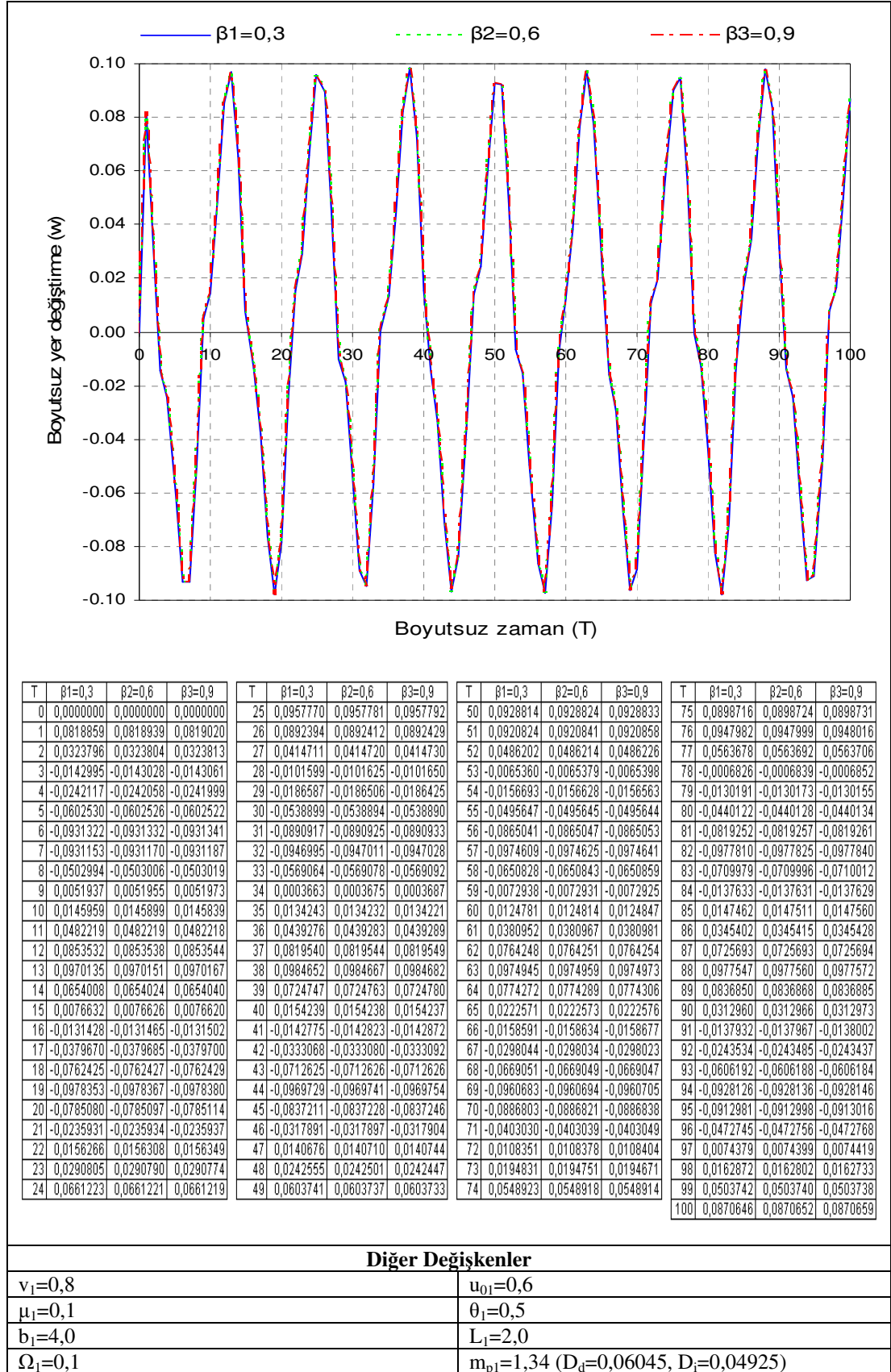
Plastik üretim teknolojilerindeki gelişmeyle birlikte polietilen grubu hammaddeden imal edilen boruların kullanım alanları yaygınlaşmıştır. Çelik ve alüminyumdan daha hafif olmaları yanında, kimyasal maddelere karşı dayanıklı, paslanmaz, çatlama ve darbe mukavemetlerinin yüksek olması ve kolay şekil verilebilme avantajları nedeniyle tercih edilmektedirler.

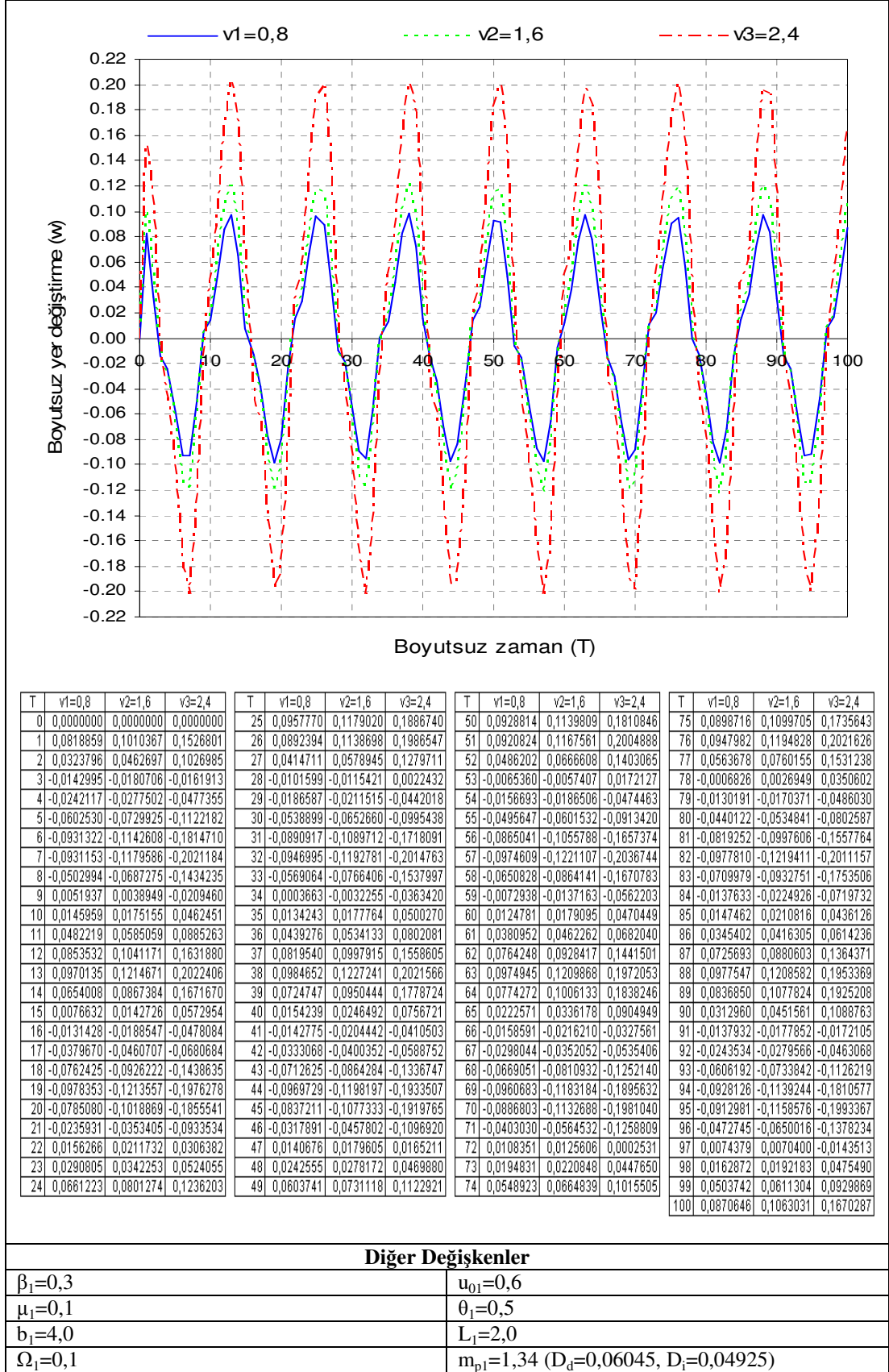
Bu bölümdeki uygulama çalışmalarında, yoğunluğu 1390 kg/m^3 , elastisite modülü $3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olan üç farklı kalınlıkta PVC boru kullanılmıştır. Tablo 3.3’de verilen boru karakteristikleri, ASTM tarafından sınıflandırılmış D1785 Sch 80 tipi boru kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.3 PVC boru karakteristikleri

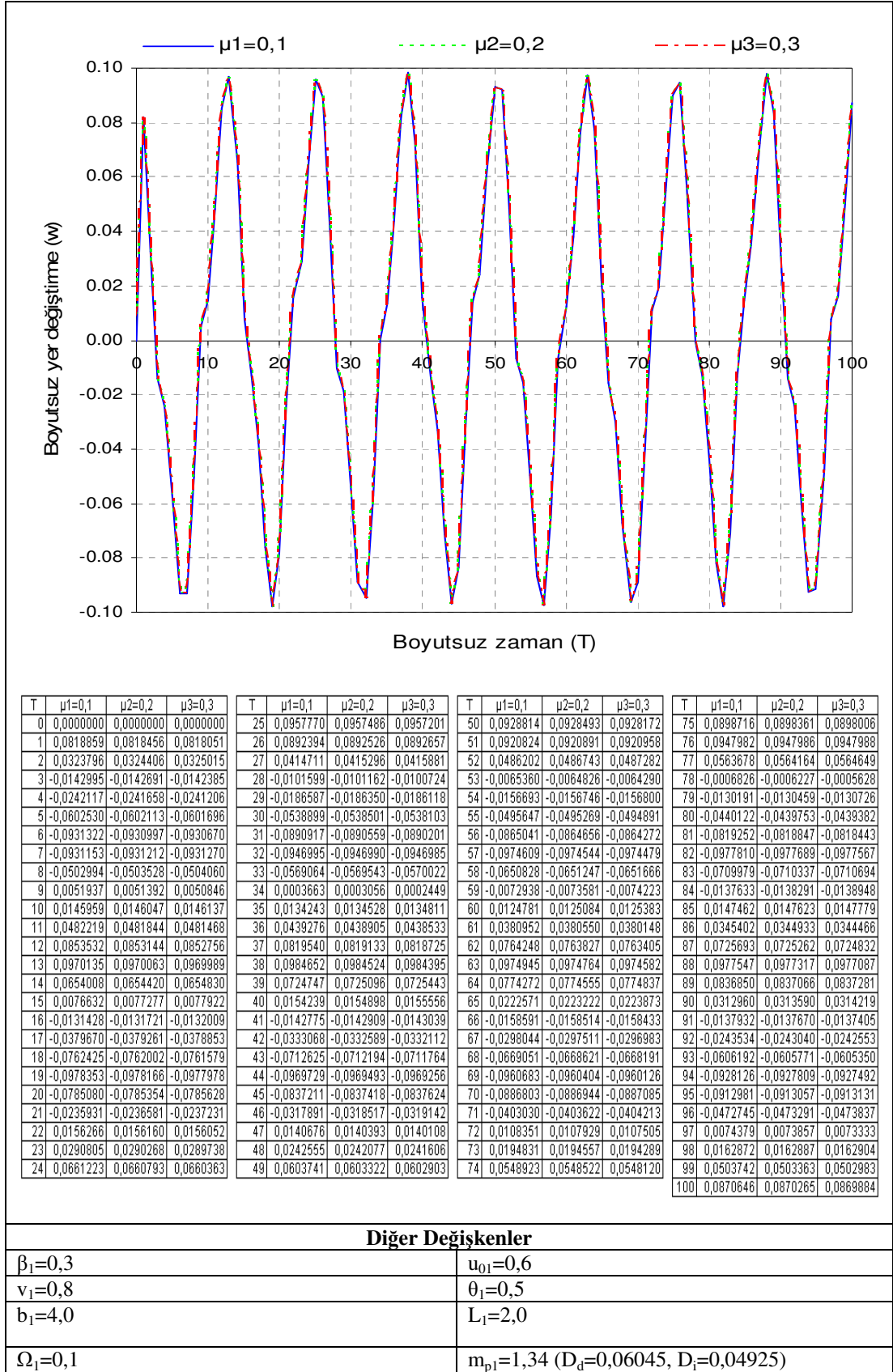
	Birim	1 no’lu boru	2 no’lu boru	3 no’lu boru
Borunun dış çapı (D_a)	m	0,06045	0,11430	0,16840
Borunun iç çapı (D_i)	m	0,04925	0,09718	0,14633
Borunun birim boy kütlesi (m)	kg	1,34	3,95	7,58

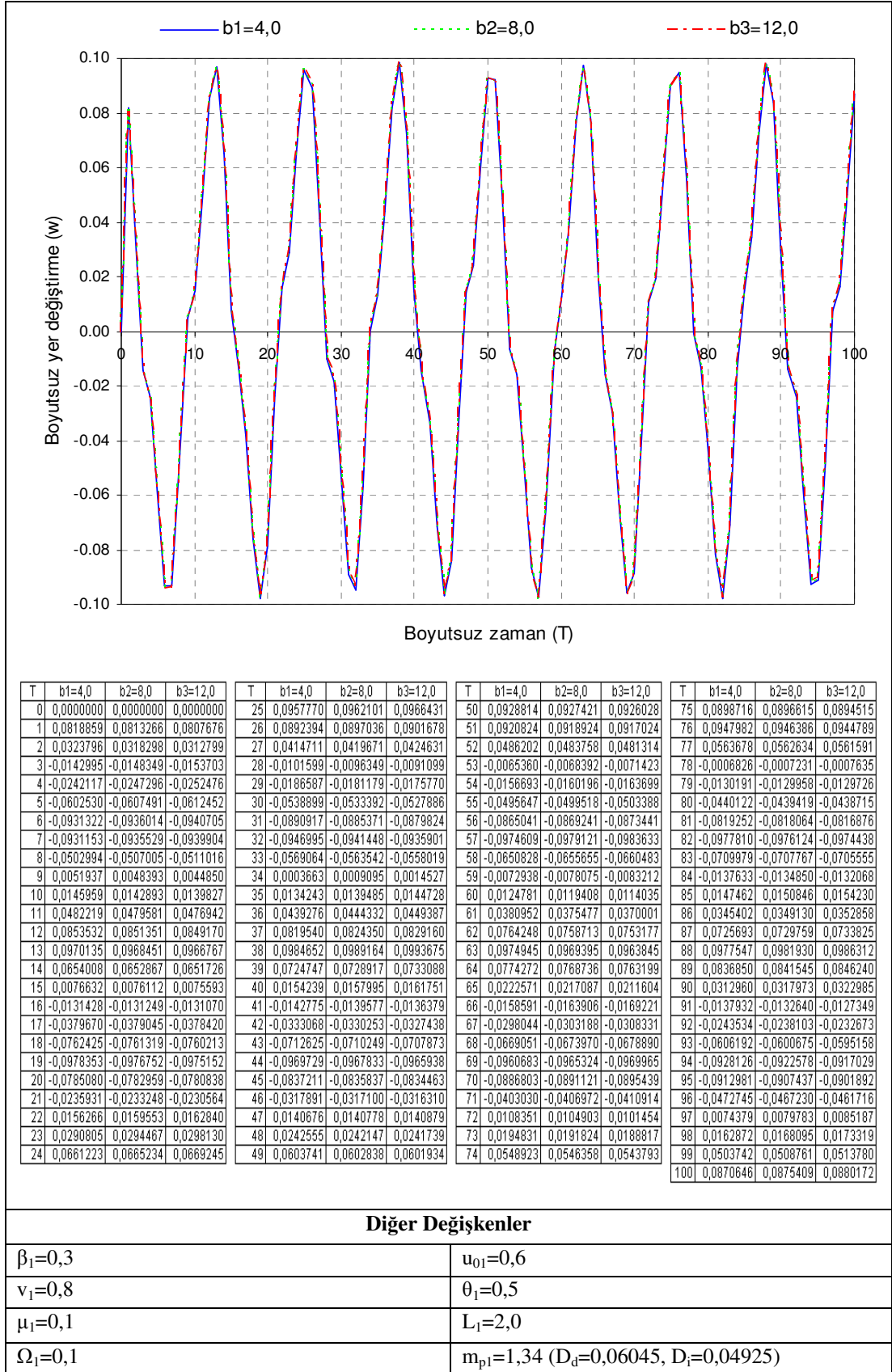
Hareket denklemindeki değişkenlerin her biri için üç farklı değer alınarak yapılan dinamik analiz çalışmalarından elde edilen boyutsuz yer değiştirme değerleri ve karakteristikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 3.23 Boyutsuz doluluk oranı (β) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

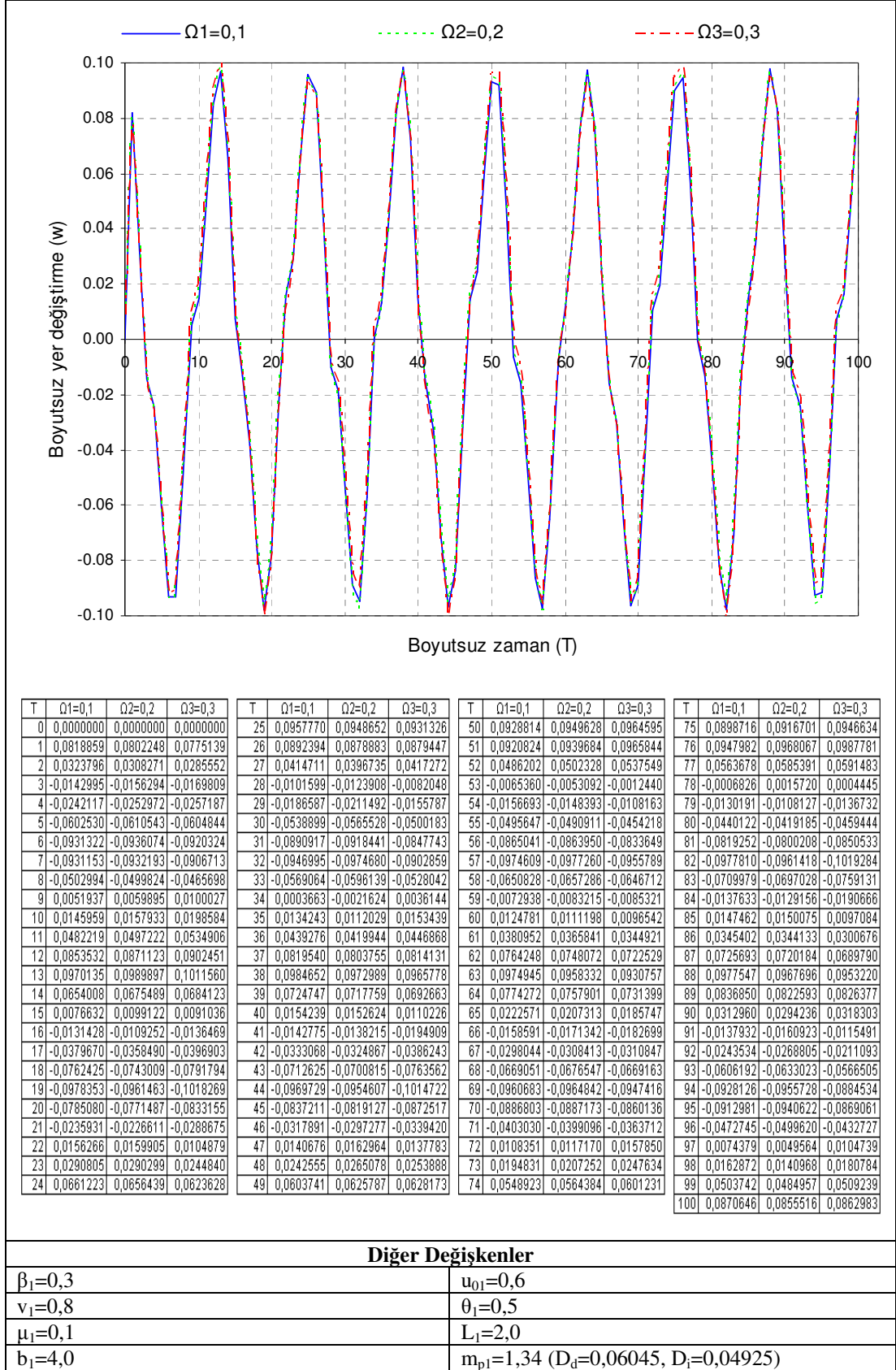


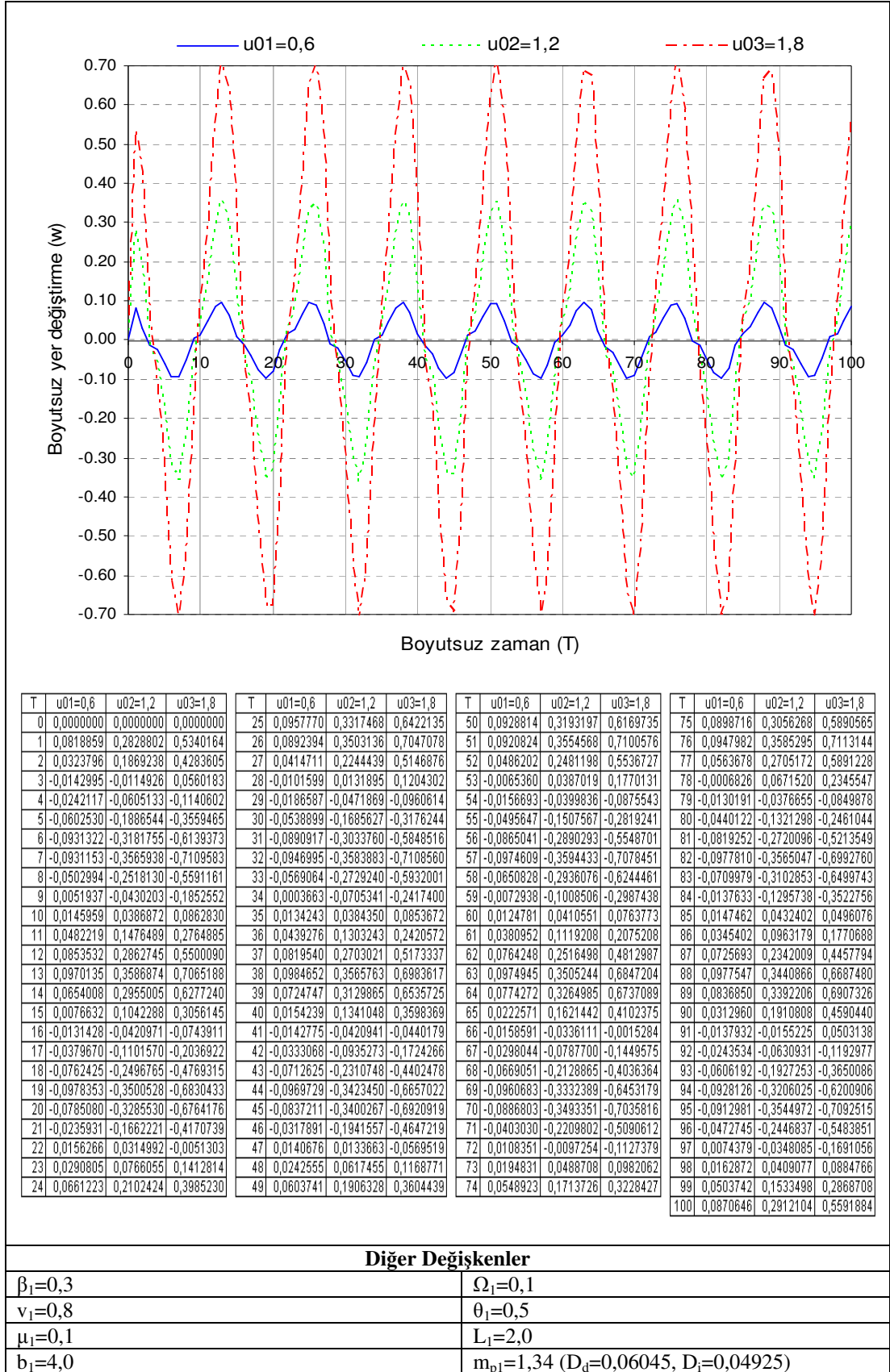
Şekil 3.24 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

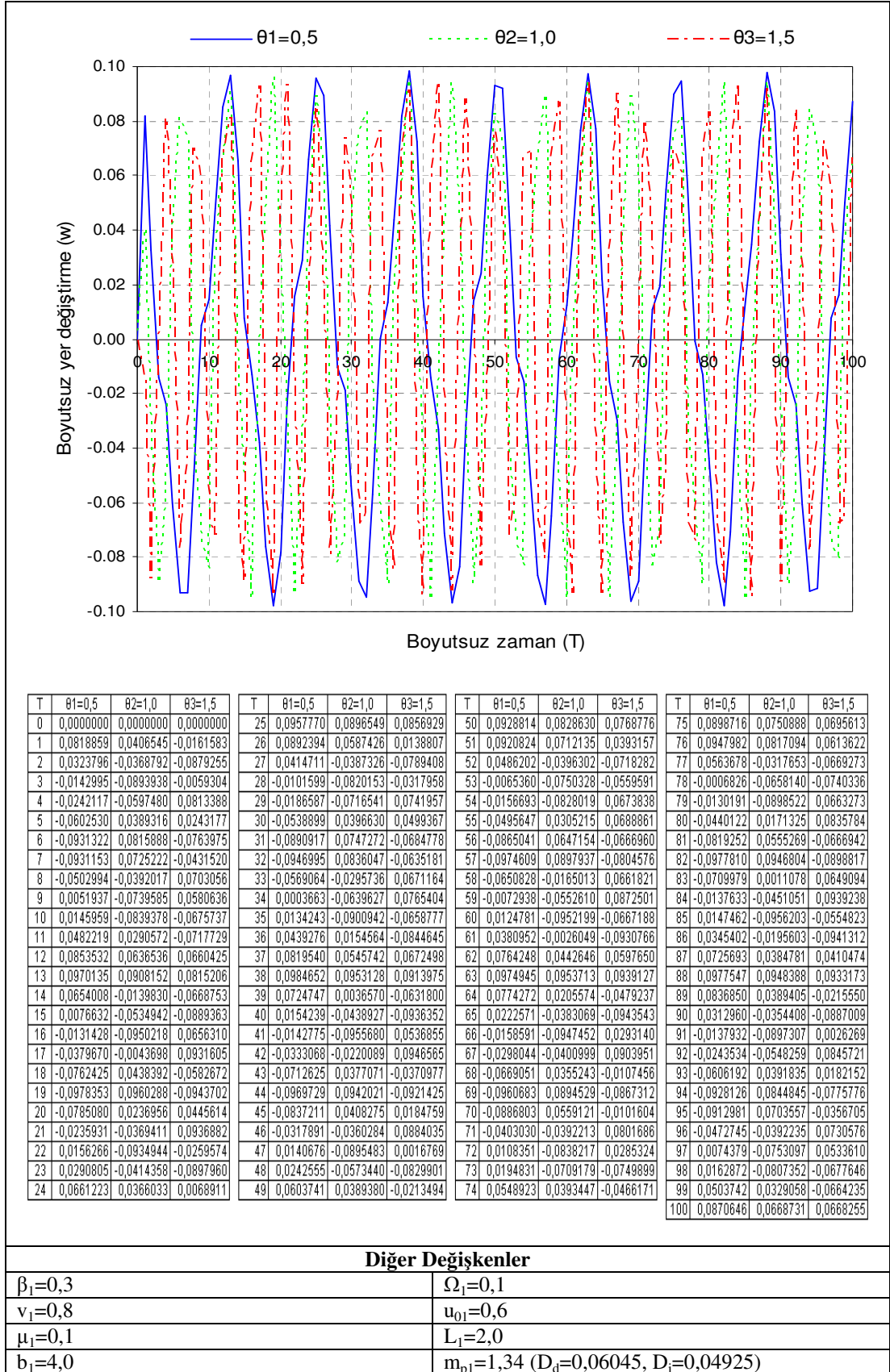
Şekil 3.25 Boyutsuz sönüm katsayısı (μ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

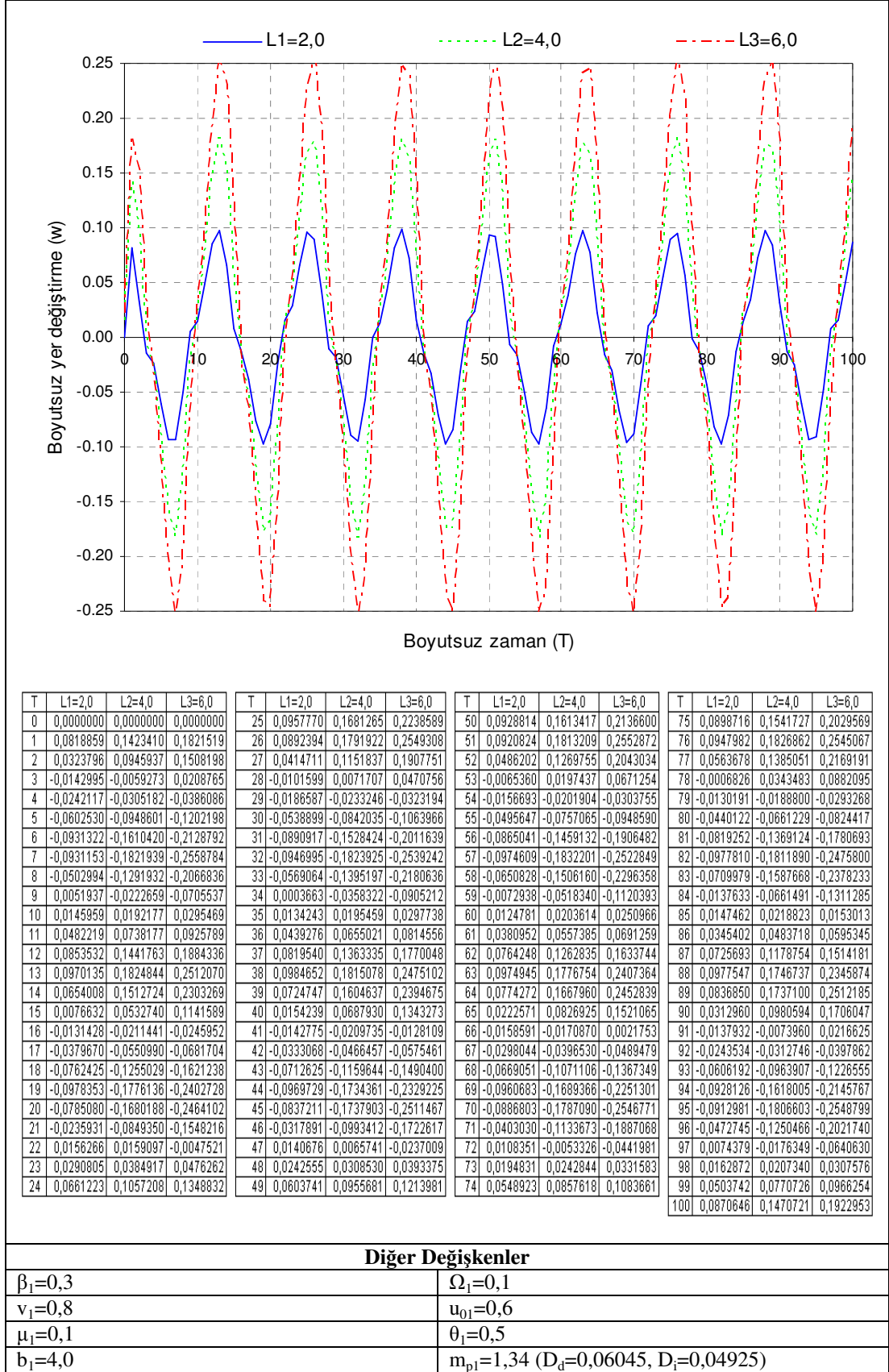


Şekil 3.26 FPSO'nun hareket genliği (b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

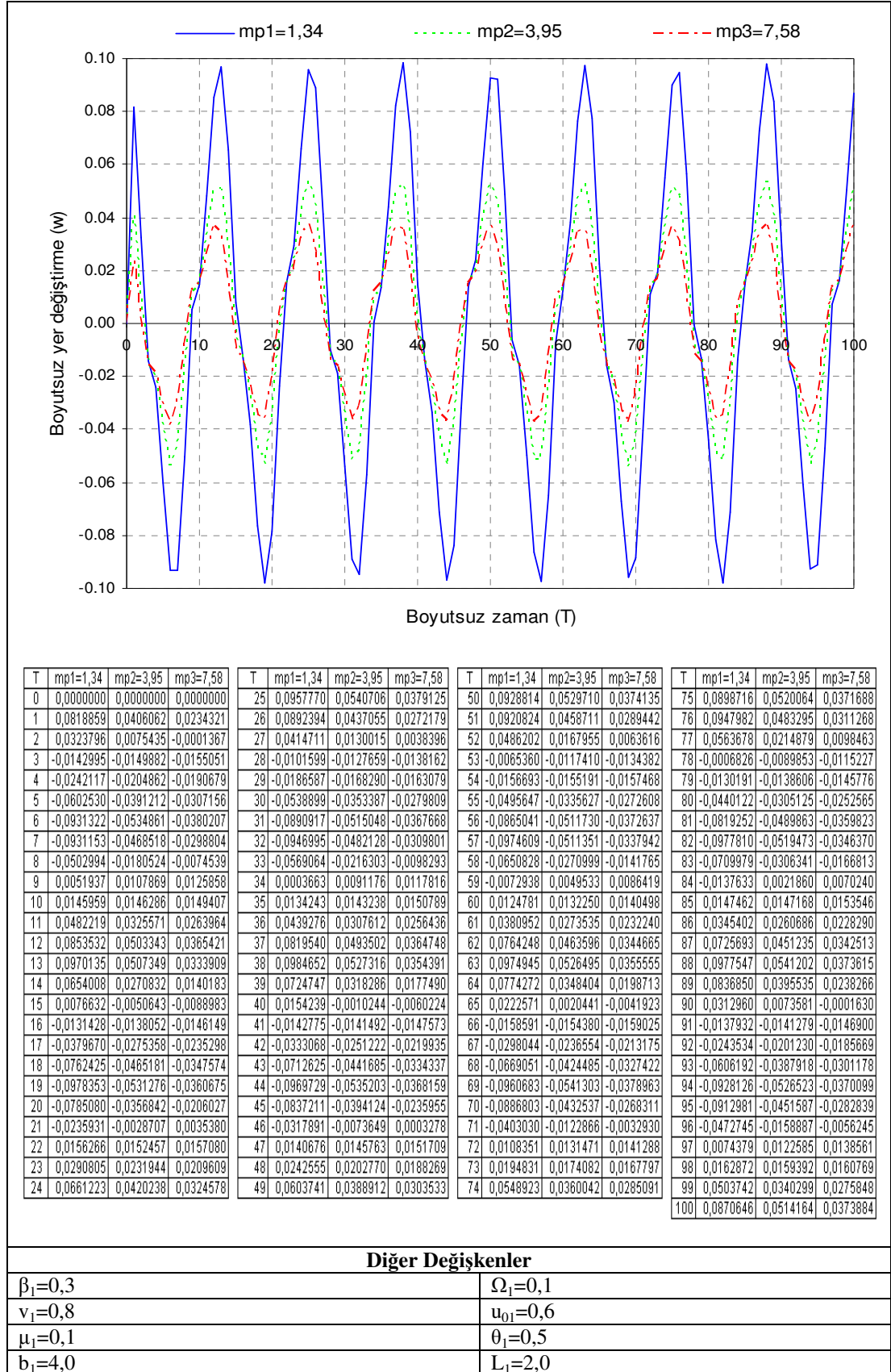
Şekil 3.27 FPSO'nun hareket frekansı (Ω) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.28 Dalga genliği (u_0) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

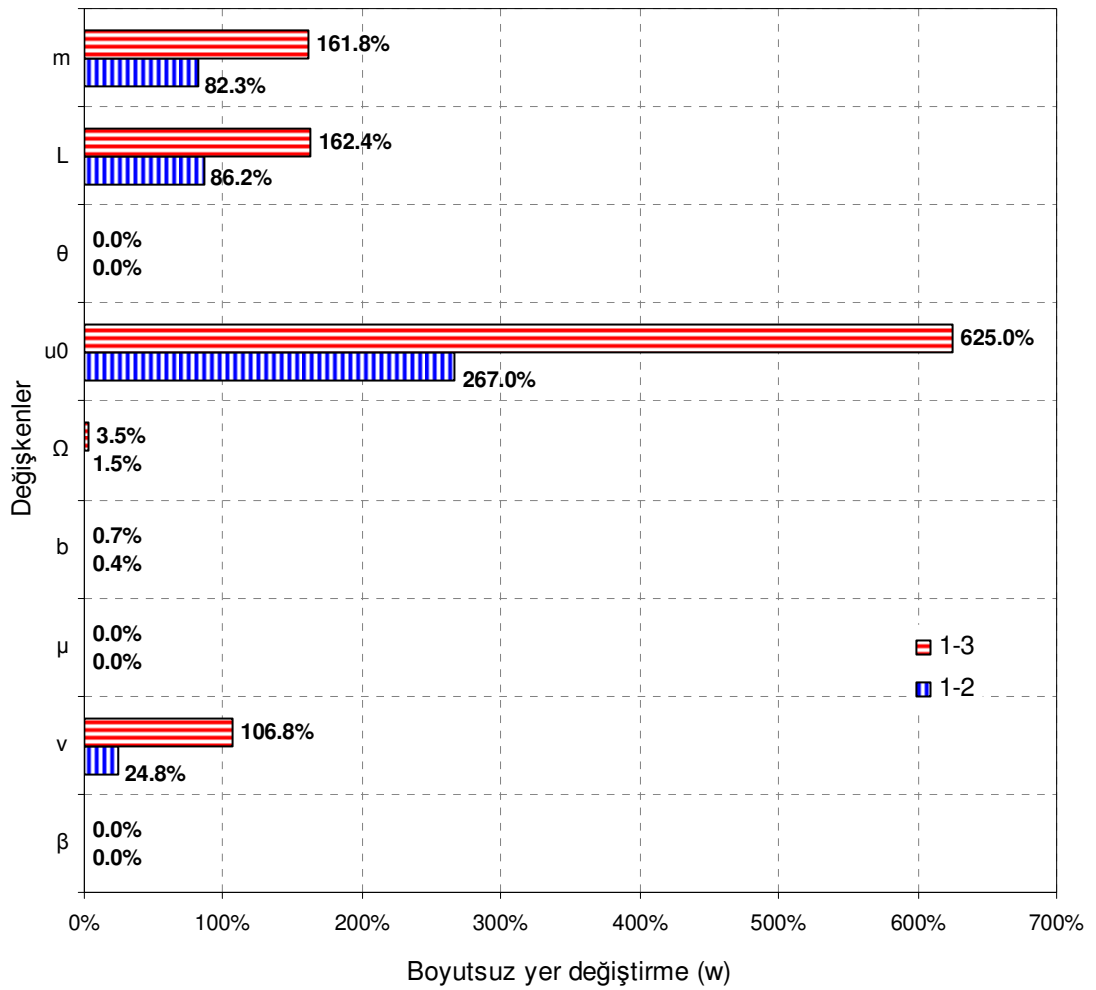
Şekil 3.29 Dalga frekansı (θ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)



Şekil 3.30 Boru boyu (L) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.31 PVC boru için birim boy kütlesi (m_p) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.23 - Şekil 3.31 arası verilen hareket denkleminde ait değişkenlerin aldıkları büyüklüklerle boyutsuz yer değiştirme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için oransal karşılaştırma sonuçları Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Şekil 3.32’de görüldüğü üzere, boyutsuz yer değiştirme değerini en çok boruya etki eden dalga yükü kaynaklı akışkan zerreciklerinin hızı (Şekil 3.28) etkilemektedir. Boru boyu (Şekil 3.30), boru kütlesi (Şekil 3.31) ve boru içerisindeki akışkanın hızı da (Şekil 3.24) yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir.



Şekil 3.32 Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirme (w) değerine etkisi

3.2.4 CTP boru için uygulama çalışması

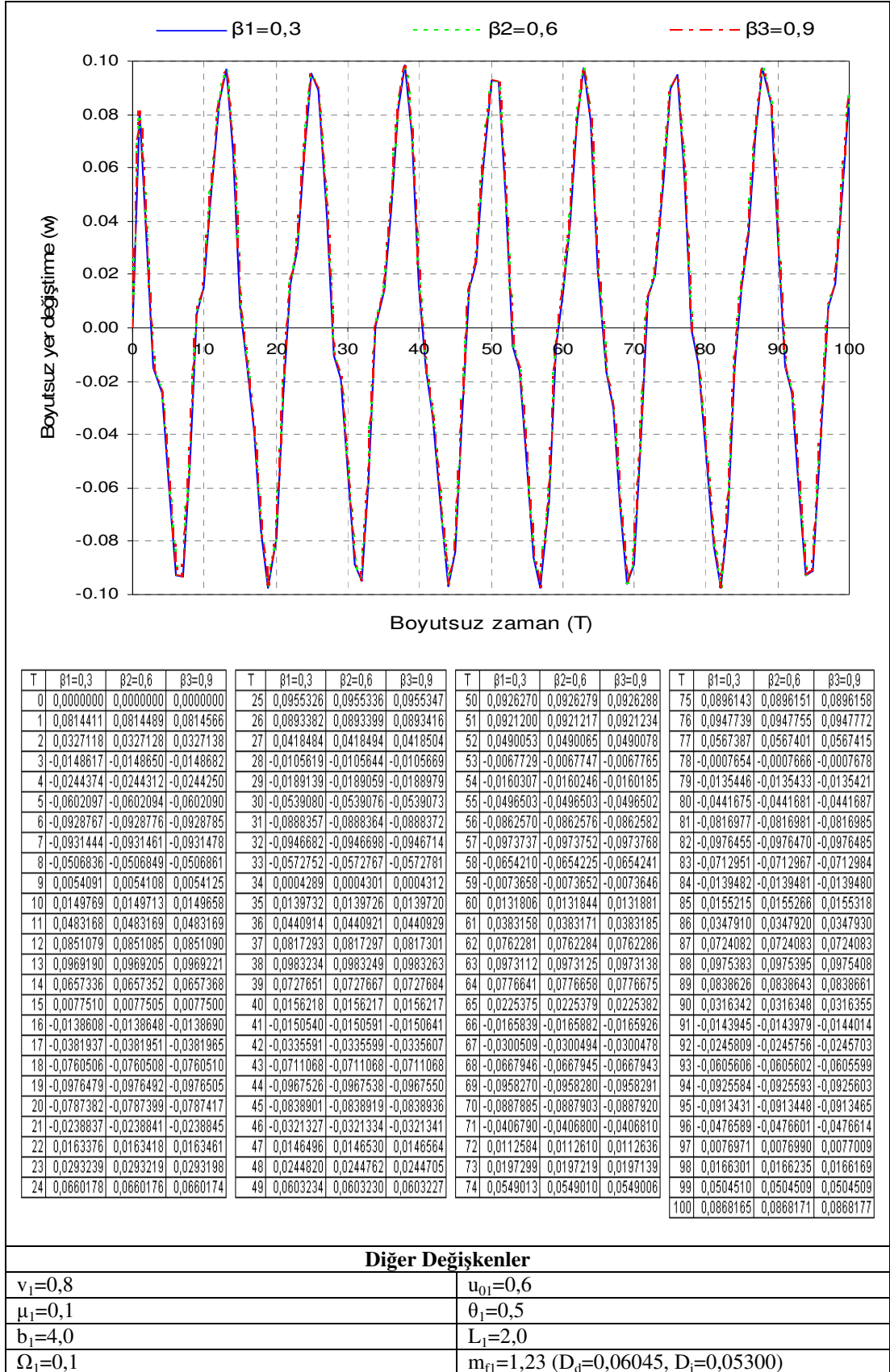
CTP borular, son yıllarda üretim teknolojilerinde geliştirilen sürekli elyaf sarma ve savurma döküm yöntemleriyle imal edilmektedir. Pürüzsüz iç yüzeyleri sayesinde enerji kayıpları diğer borulara göre çok düşük seviyelerdedir. Yüzeylerinde paslanma meydana gelmediği için katodik koruma gerektirmez.

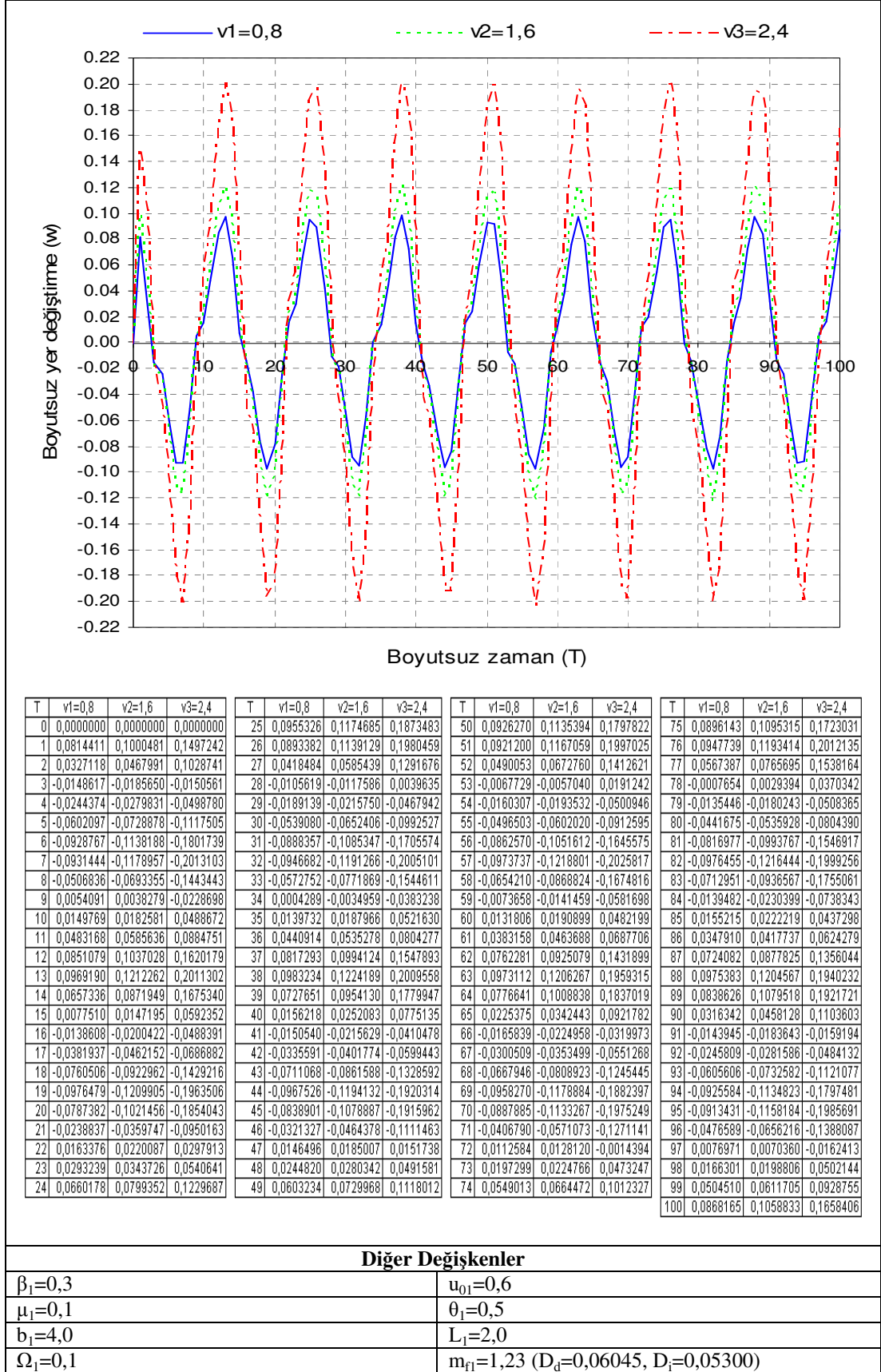
Bu bölümdeki uygulama çalışmalarında, yoğunluğu 1850 kg/m^3 , elastisite modülü $11,7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olan üç farklı kalınlıkta cam elyafı boru kullanılmıştır. Tablo 3.4'de verilen boru karakteristikleri, gemi ve acık deniz yapılarında kullanılan Bondstrand 7000M serisi cam elyafı boru kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.4 CTP boru karakteristikleri

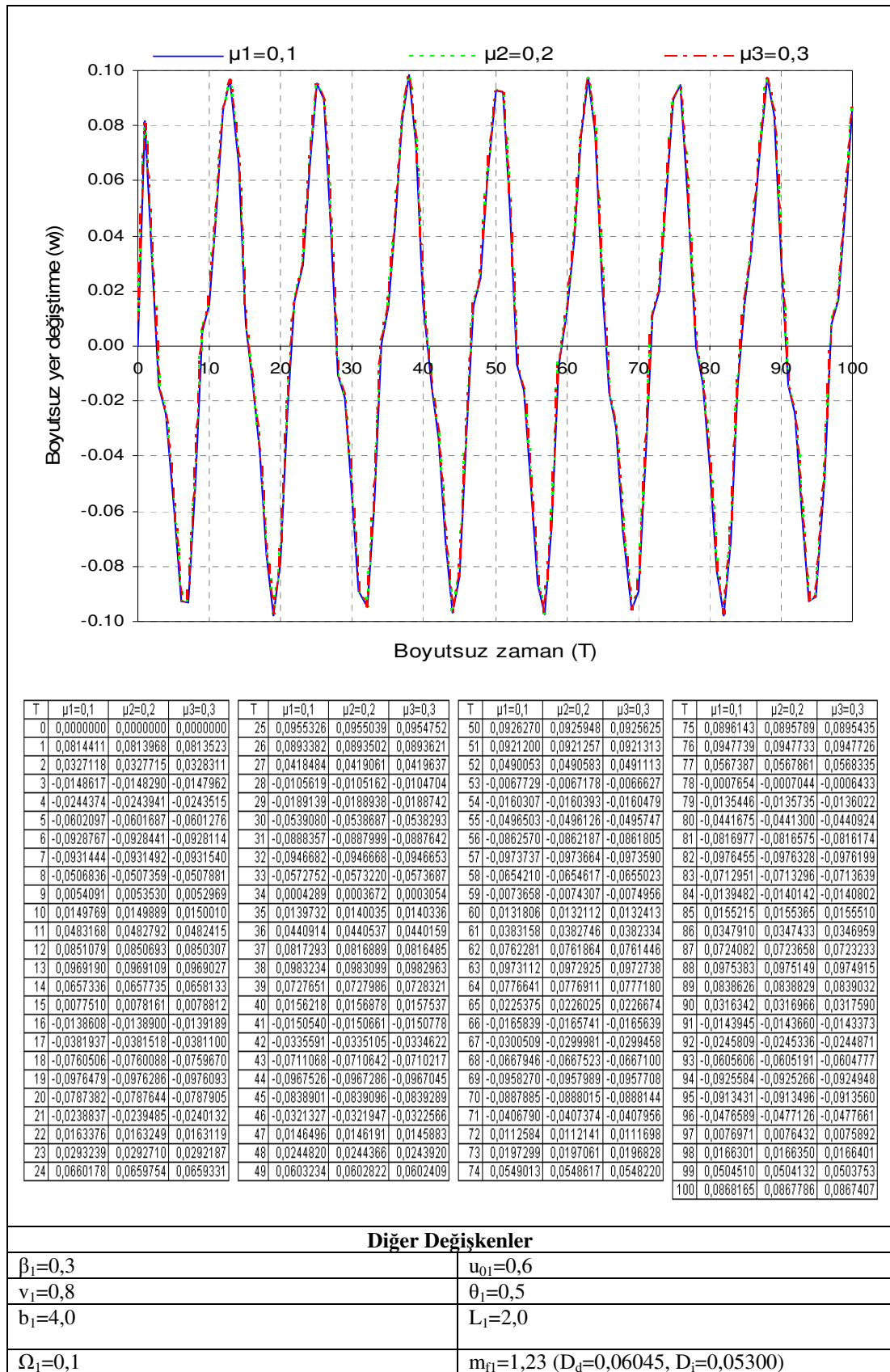
	Birim	1 no'lu boru	2 no'lu boru	3 no'lu boru
Borunun dış çapı (D_d)	m	0,06045	0,11430	0,16840
Borunun iç çapı (D_i)	m	0,05300	0,10500	0,15900
Borunun birim boy kütlesi (m)	kg	1,23	2,96	4,47

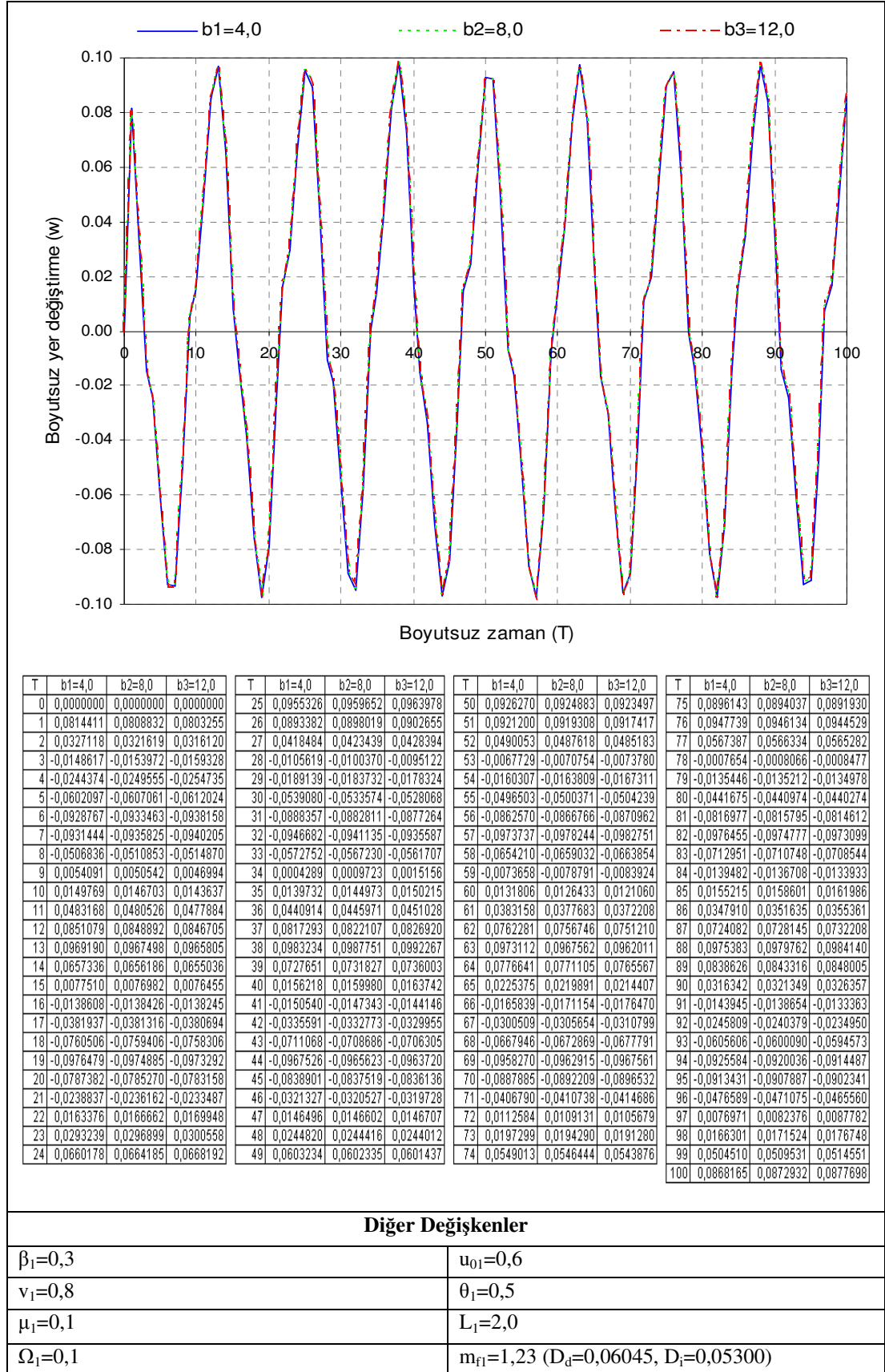
Hareket denklemindeki değişkenlerin her biri için üç farklı değer alınarak yapılan dinamik analiz çalışmalarından elde edilen boyutsuz yer değiştirme değerleri ve karakteristikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 3.33 Boyutsuz doluluk oranı (β) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

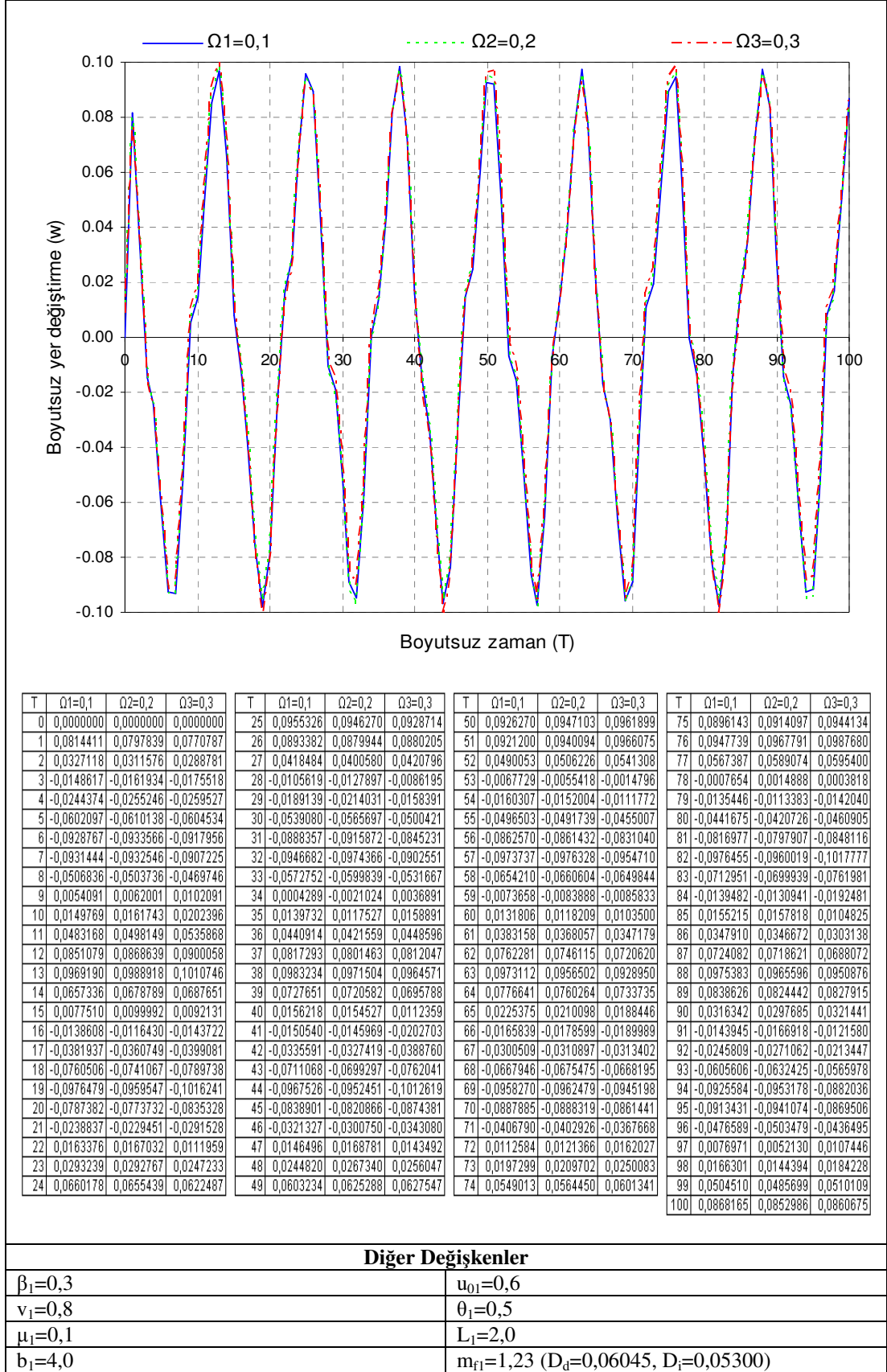


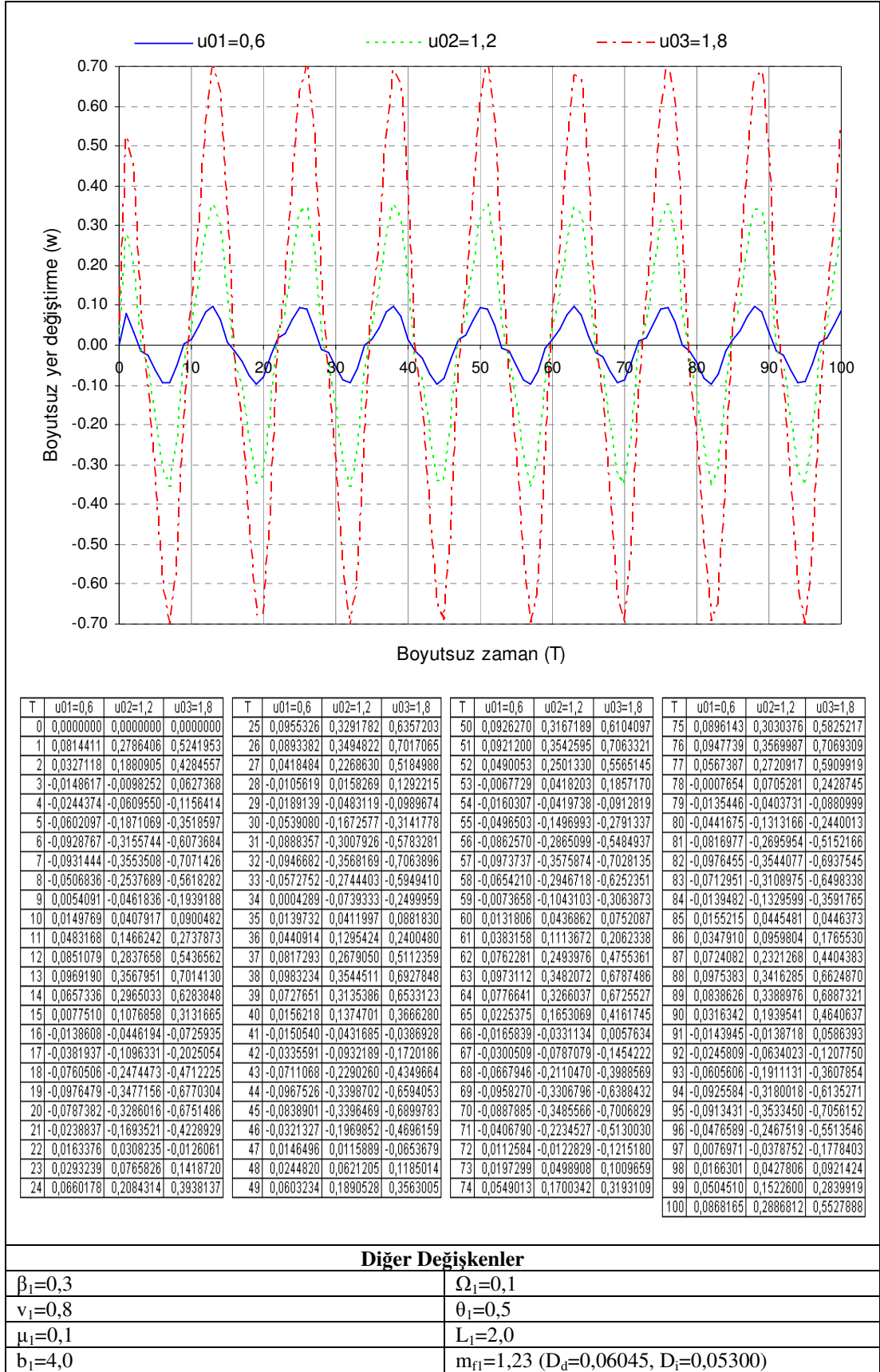
şekil 3.34 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

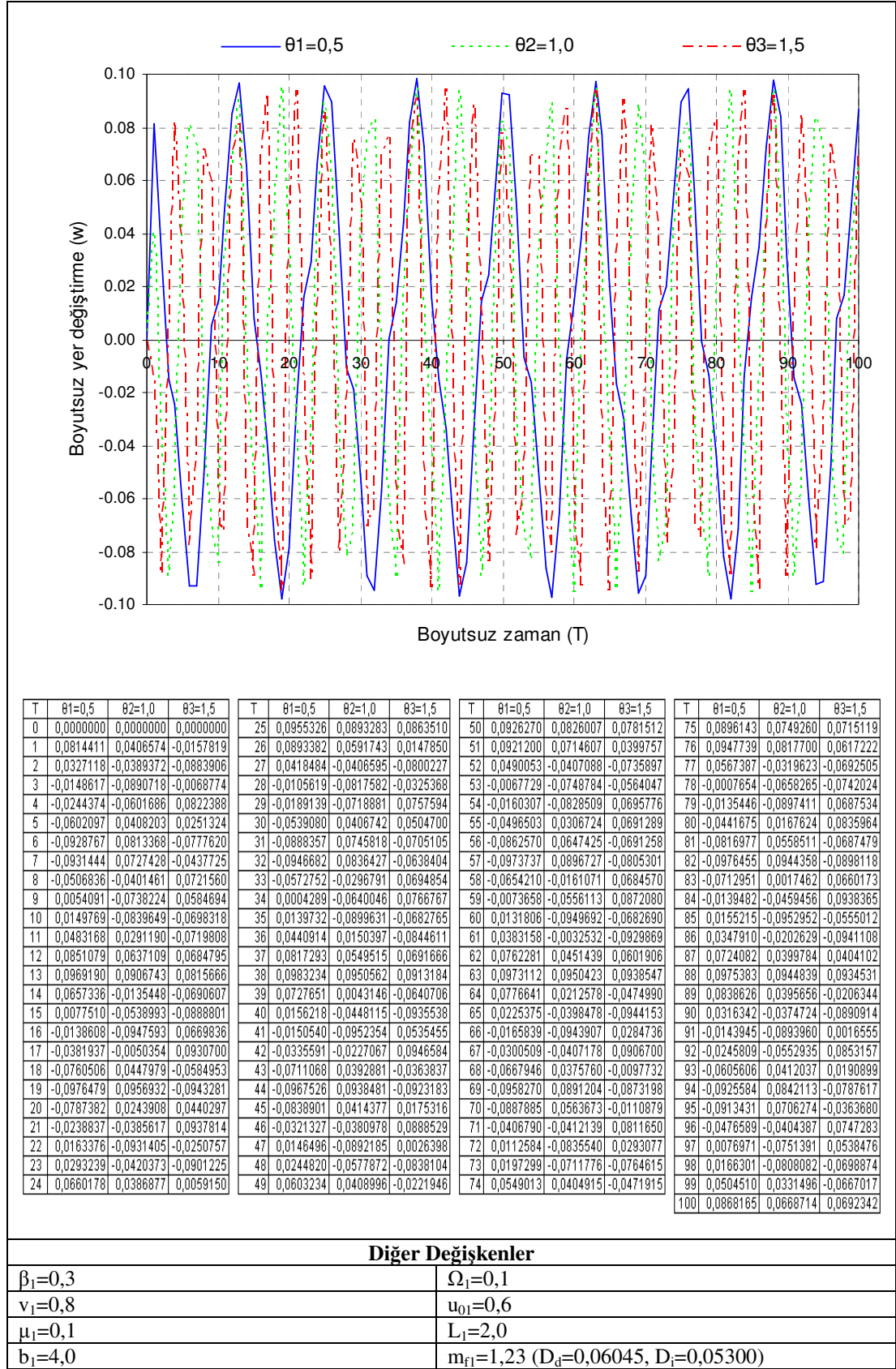
Şekil 3.35 Boyutsuz sönüm katsayısı (μ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

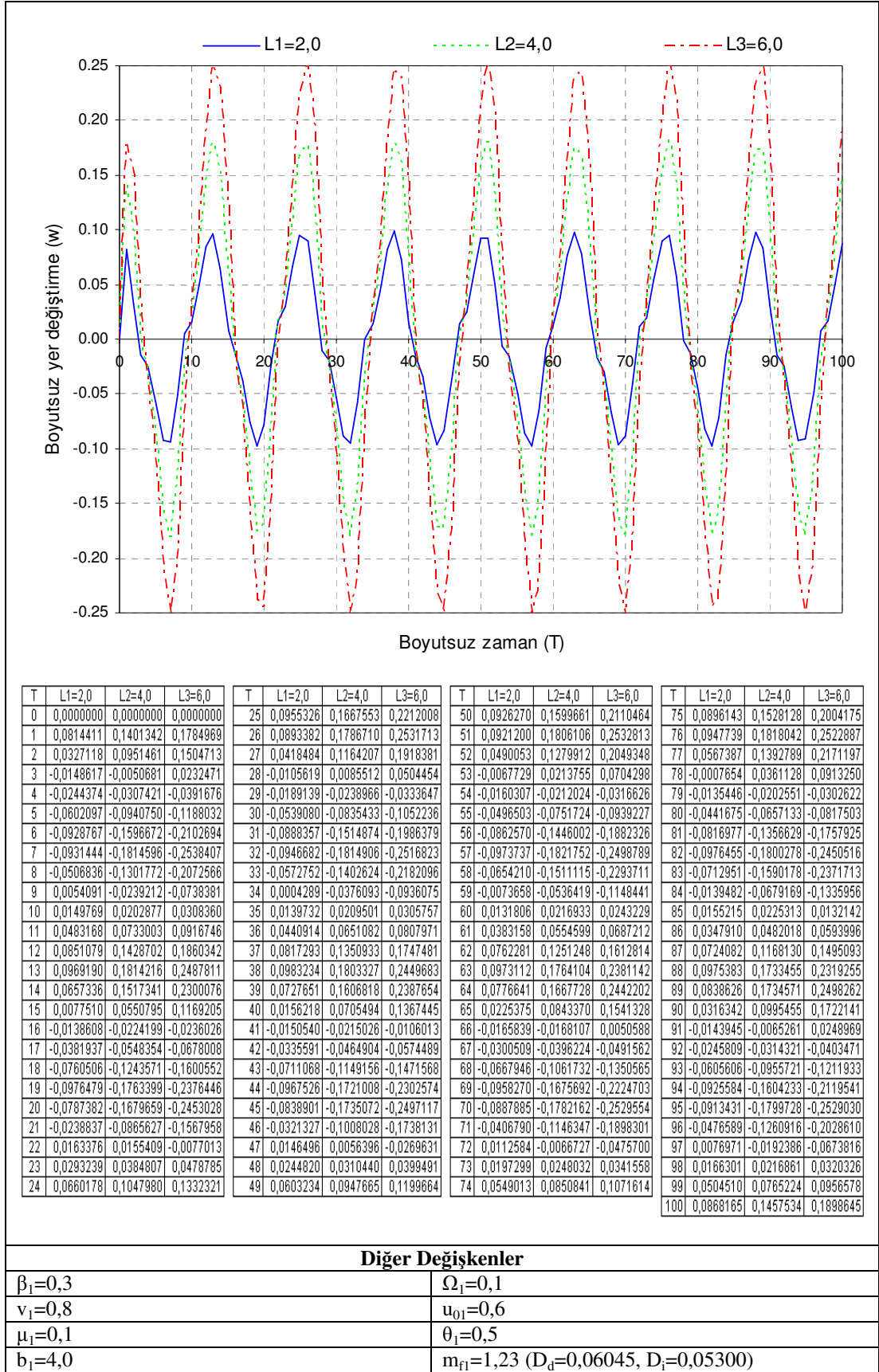


şekil 3.36 FPSO'nun hareket genliği (b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

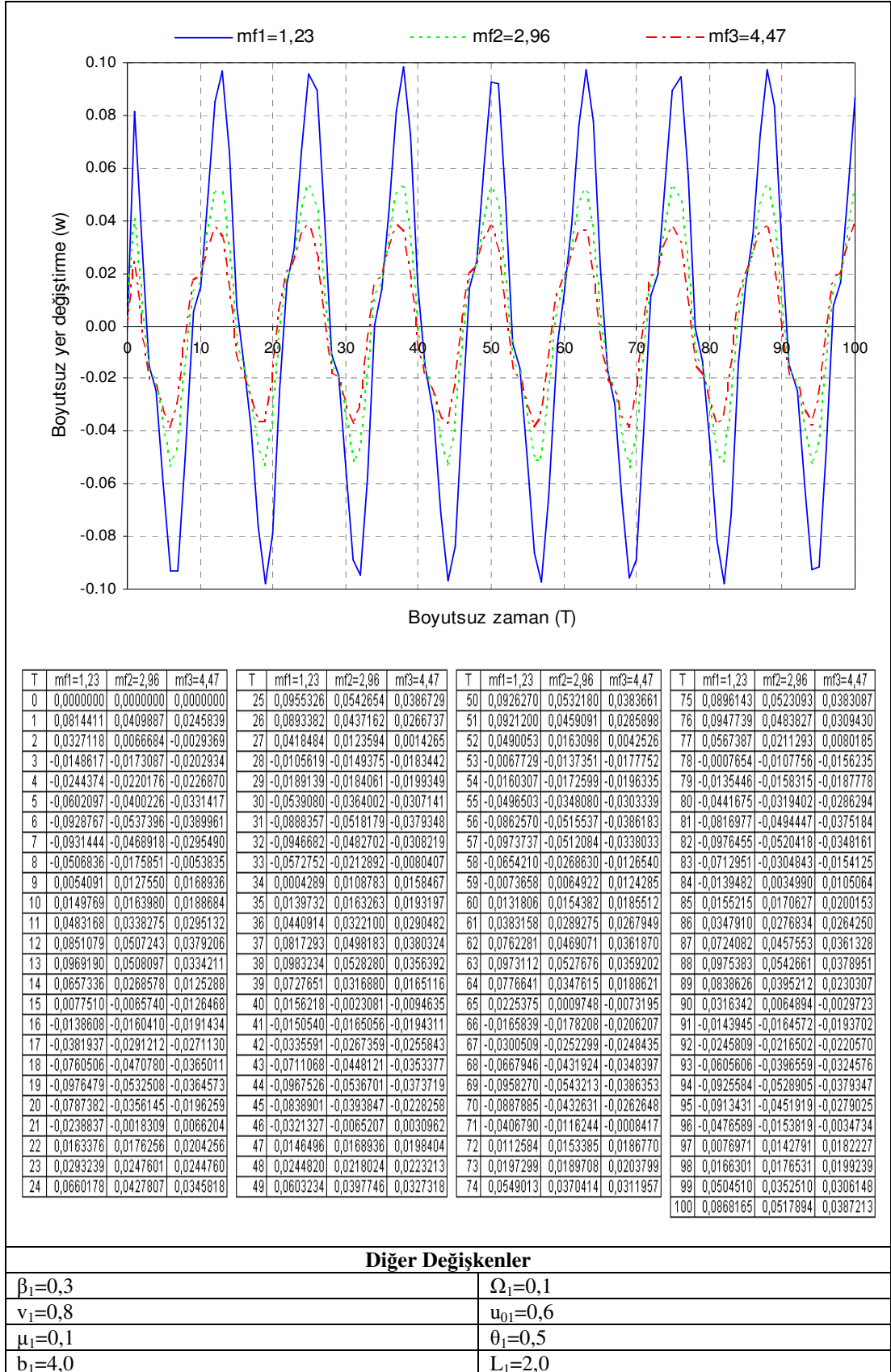
Şekil 3.37 FPSO'nun hareket frekansı (Ω) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.38 Dalga genliği (u_0) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

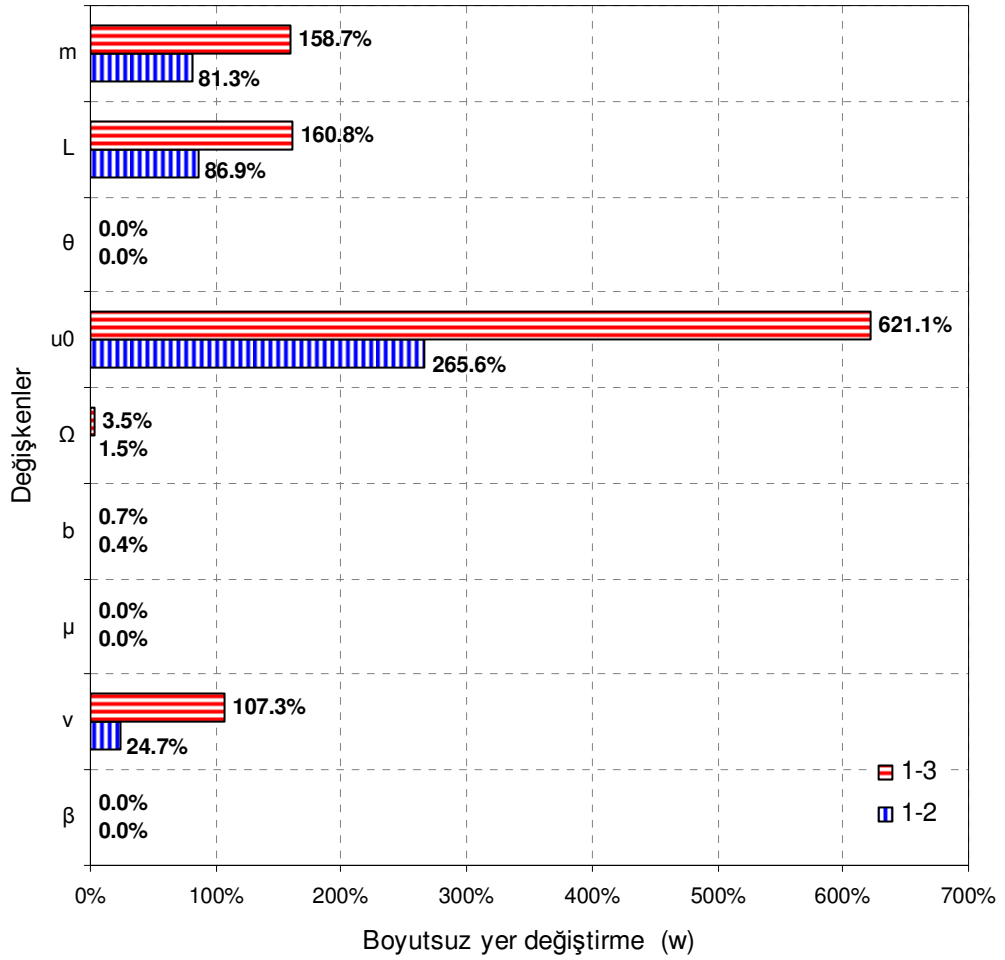
Şekil 3.39 Dalga frekansı (θ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)



şekil 3.40 Boru boyu (L) değerlerine bağlı boyutsuz yer değişirme (w)

Şekil 3.41 CTP boru için birim boy kütlesi (m_f) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.33 - Şekil 3.41 arası verilen hareket denkleminde ait değişkenlerin aldıkları büyüklüklerle boyutsuz yer değiştirme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için oransal karşılaştırma sonuçları Şekil 3.42’de gösterilmiştir. Şekil 3.42’de görüldüğü üzere, boyutsuz yer değiştirme değerini en çok boruya etki eden dalga yükü kaynaklı akışkan zerreciklerinin hızı (Şekil 3.38) etkilemektedir. Boru boyu (Şekil 3.40), boru kütlesi (Şekil 3.41) ve boru içerisindeki akışkanın hızı da (Şekil 3.34) yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir.



Şekil 3.42 Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirme (w) değerine etkisi

3.2.5 HDPE boru için uygulama çalışması

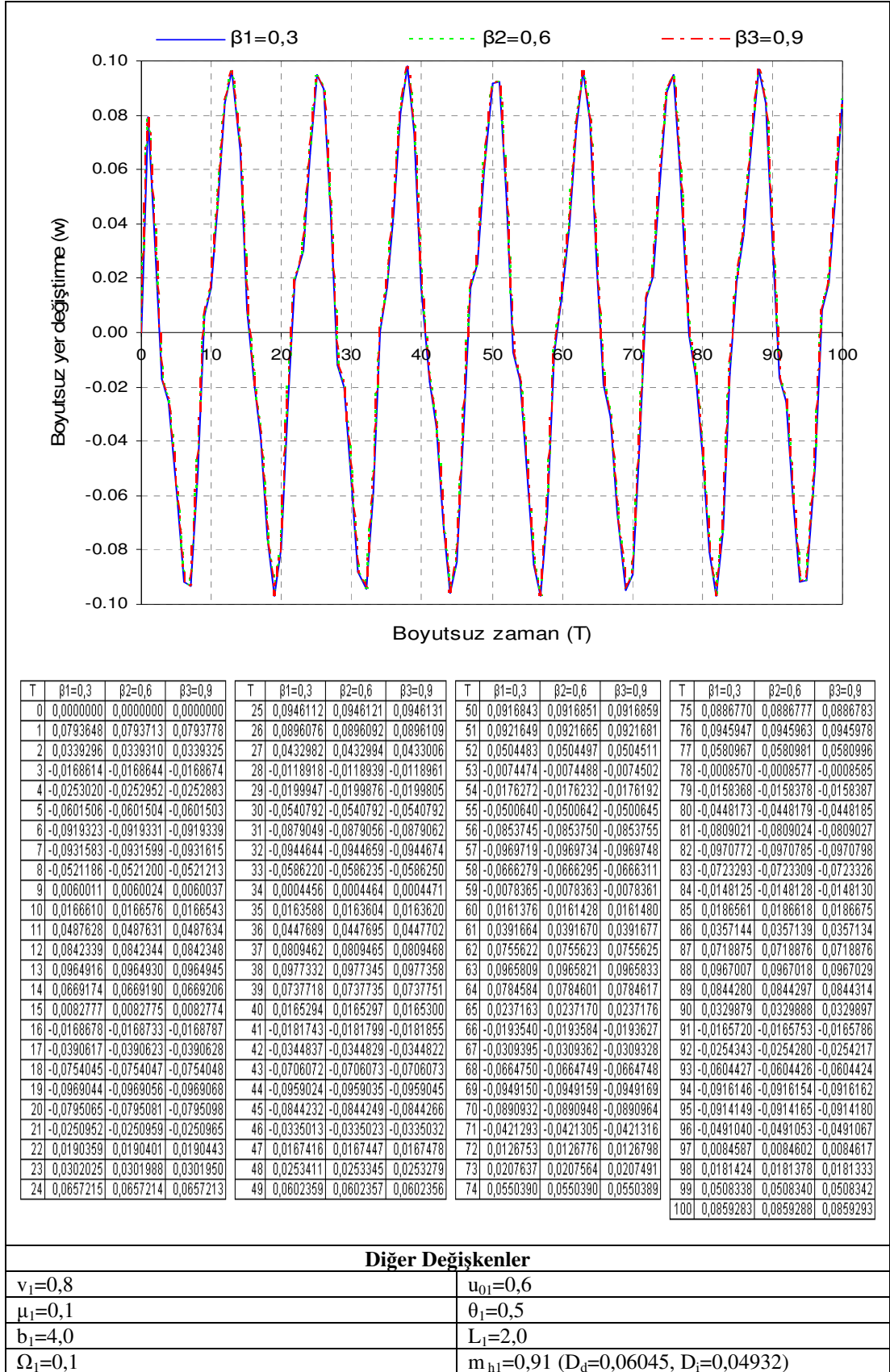
1950'li yıllarda geliştirilen PE 63 tipi HDPE boruları, yüksek basınç gerektirmeyen sistemlerde kullanılmaya başlamış ve daha sonra plastik teknolojisindeki geçirmelere paralel olarak çeşitleri ve kullanım alanları artmıştır. Çatlama ve darbelere karşı dayanıklı, paslanmaz, esnek, hafif ve montajları kolaydır. Bunun yanında yapılarında bulunan UV katalizörü sayesinde güneş ışınlarından etkilenmezler.

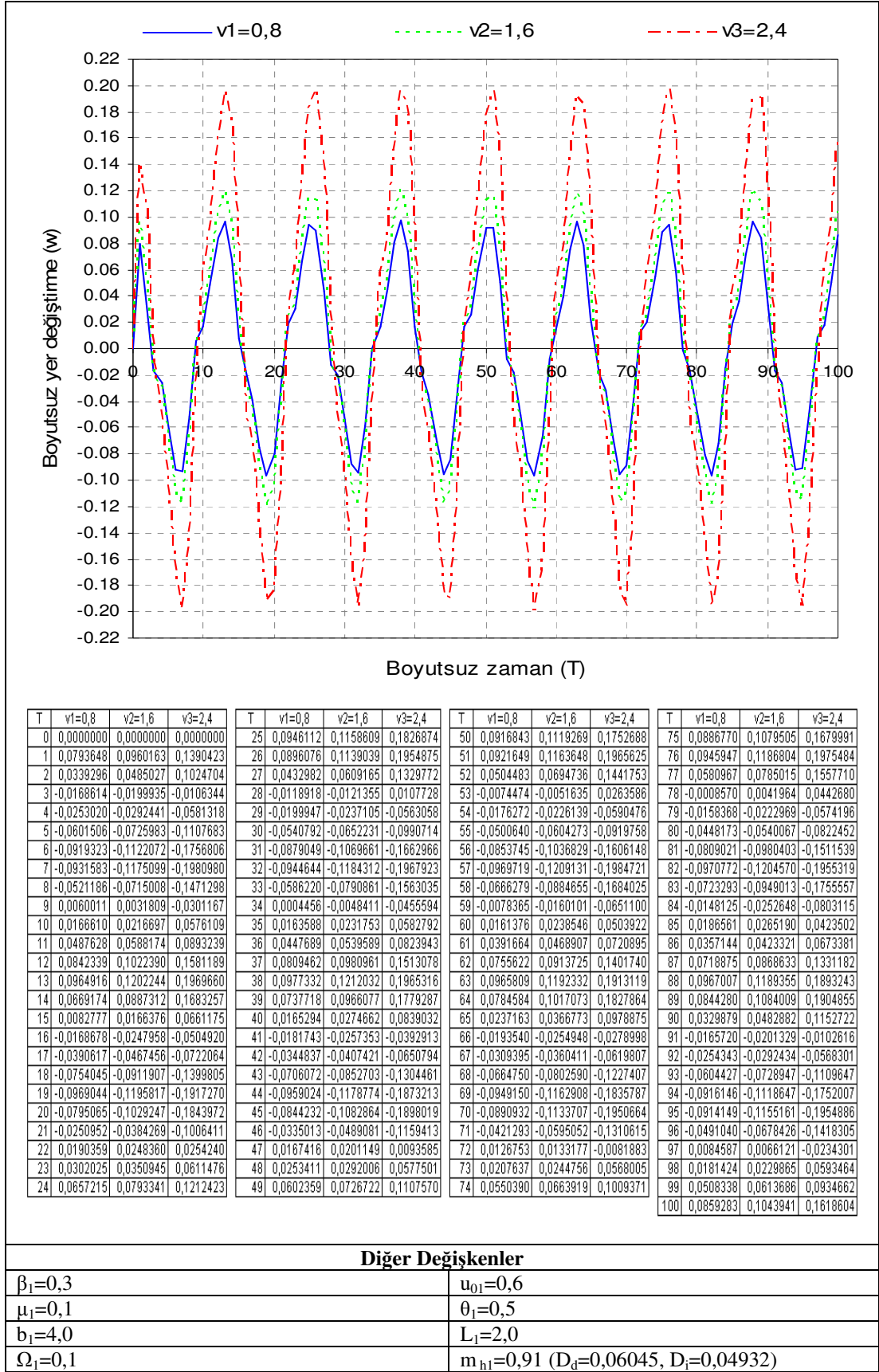
Bu bölümdeki uygulama çalışmalarında, yoğunluğu 950 kg/m^3 , elastisite modülü $1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olan üç farklı kalınlıkta HDPE boru kullanılmıştır. Tablo 3.4'de verilen boru karakteristikleri, 10 bar iç basınca dayanıklı PN 10 tipi HDPE boru kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.3 HDPE boru karakteristikleri

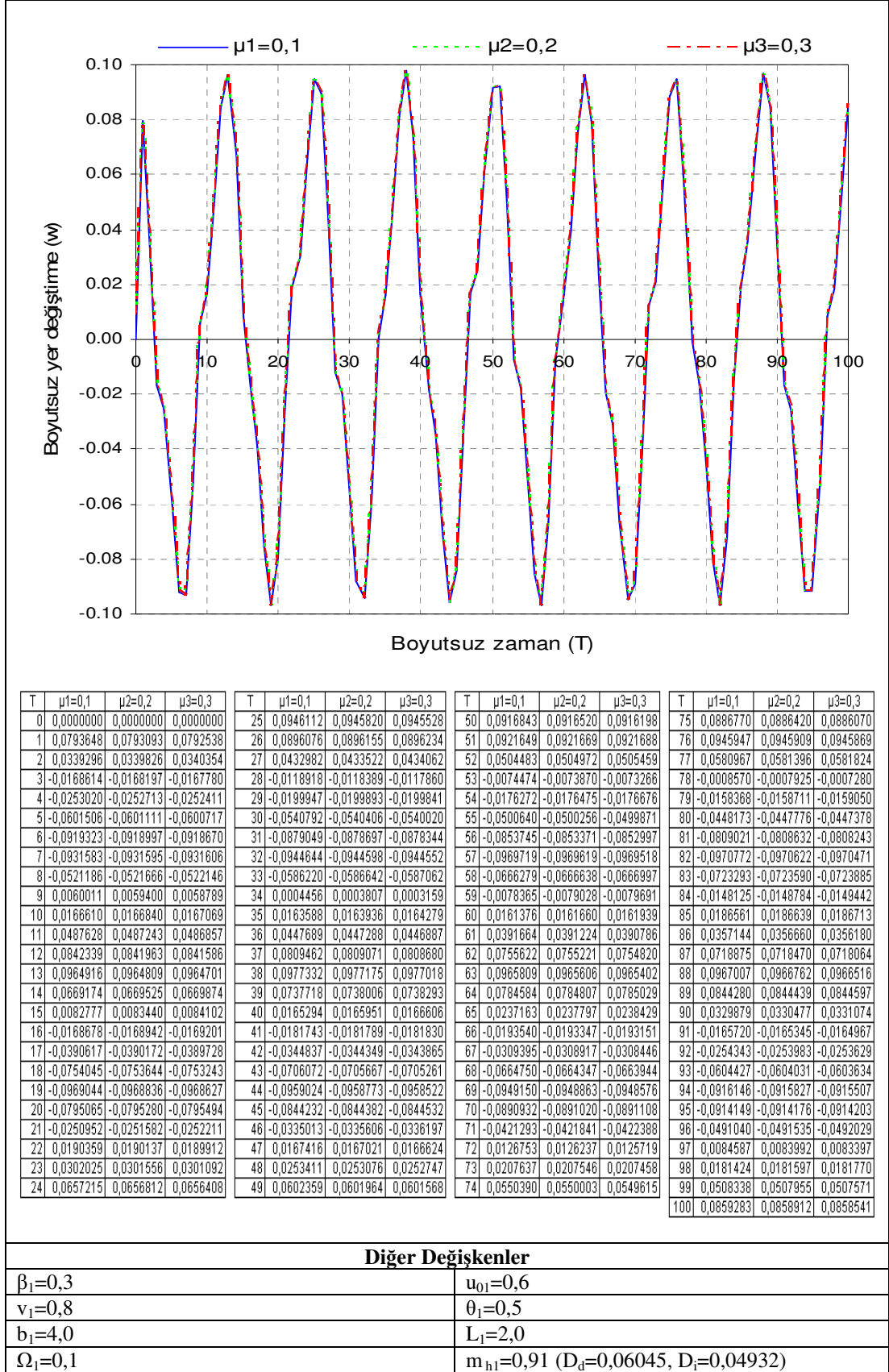
	Birim	1 no'lu boru	2 no'lu boru	3 no'lu boru
Borunun dış çapı (D_d)	m	0,06045	0,11430	0,16840
Borunun iç çapı (D_i)	m	0,04932	0,09350	0,13769
Borunun birim boy kütlesi (m)	kg	0,91	3,22	7,01

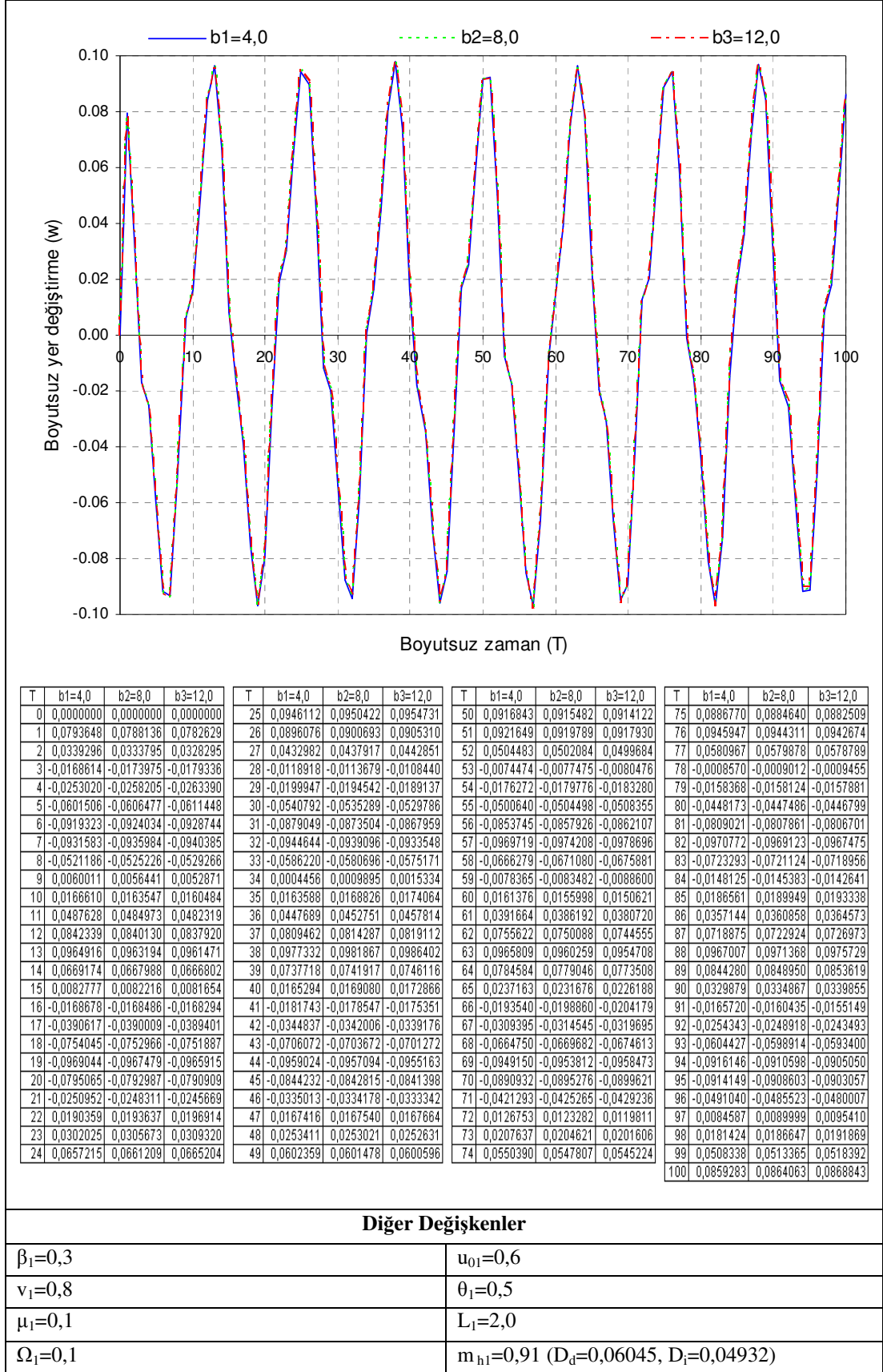
Hareket denklemindeki değişkenlerin her biri için üç farklı değer alınarak yapılan dinamik analiz çalışmalarından elde edilen boyutsuz yer değiştirme değerleri ve karakteristikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 3.43 Boyutsuz doluluk oranı (β) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

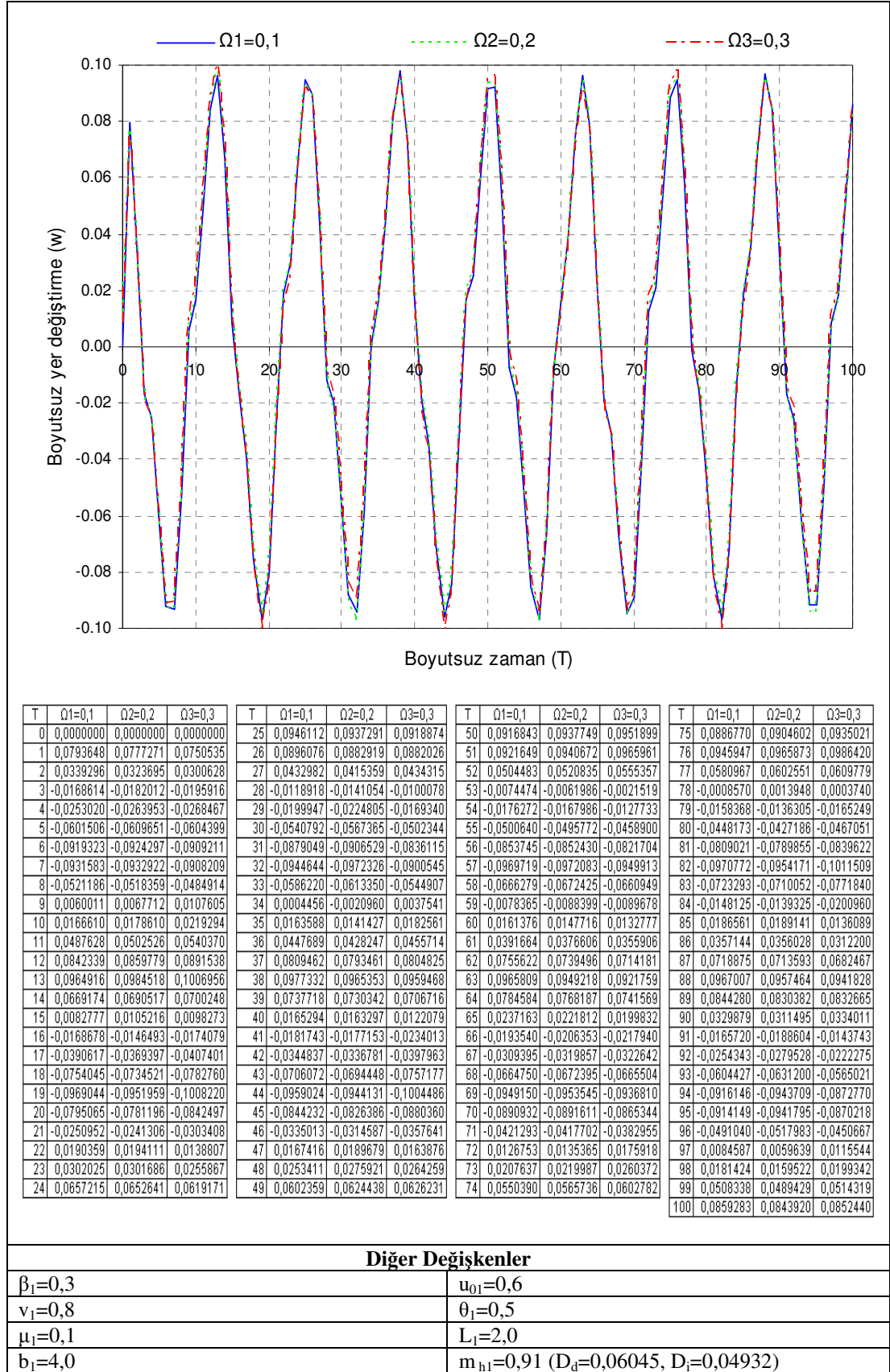


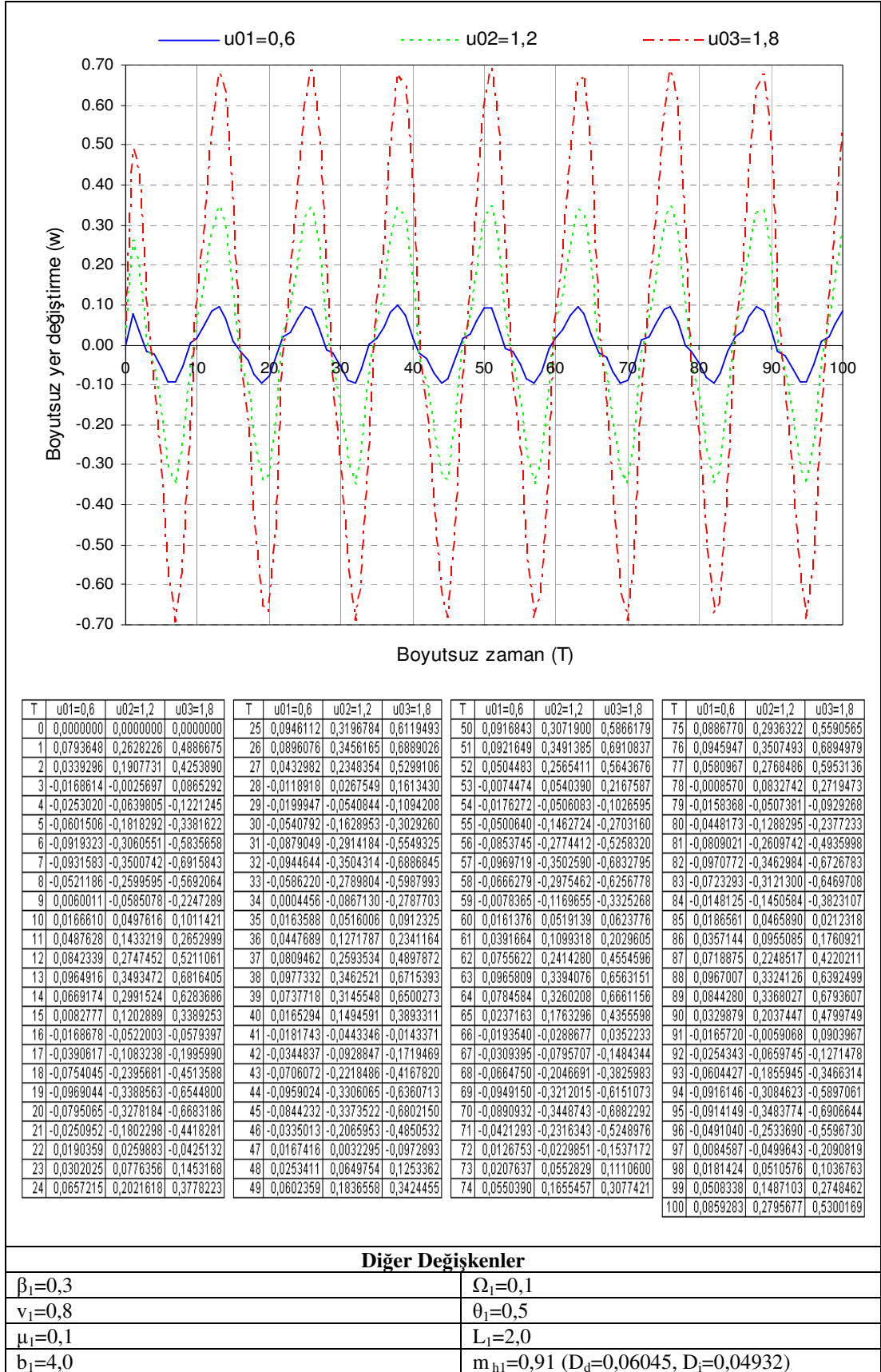
Şekil 3.44 Boyutsuz hız (v) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

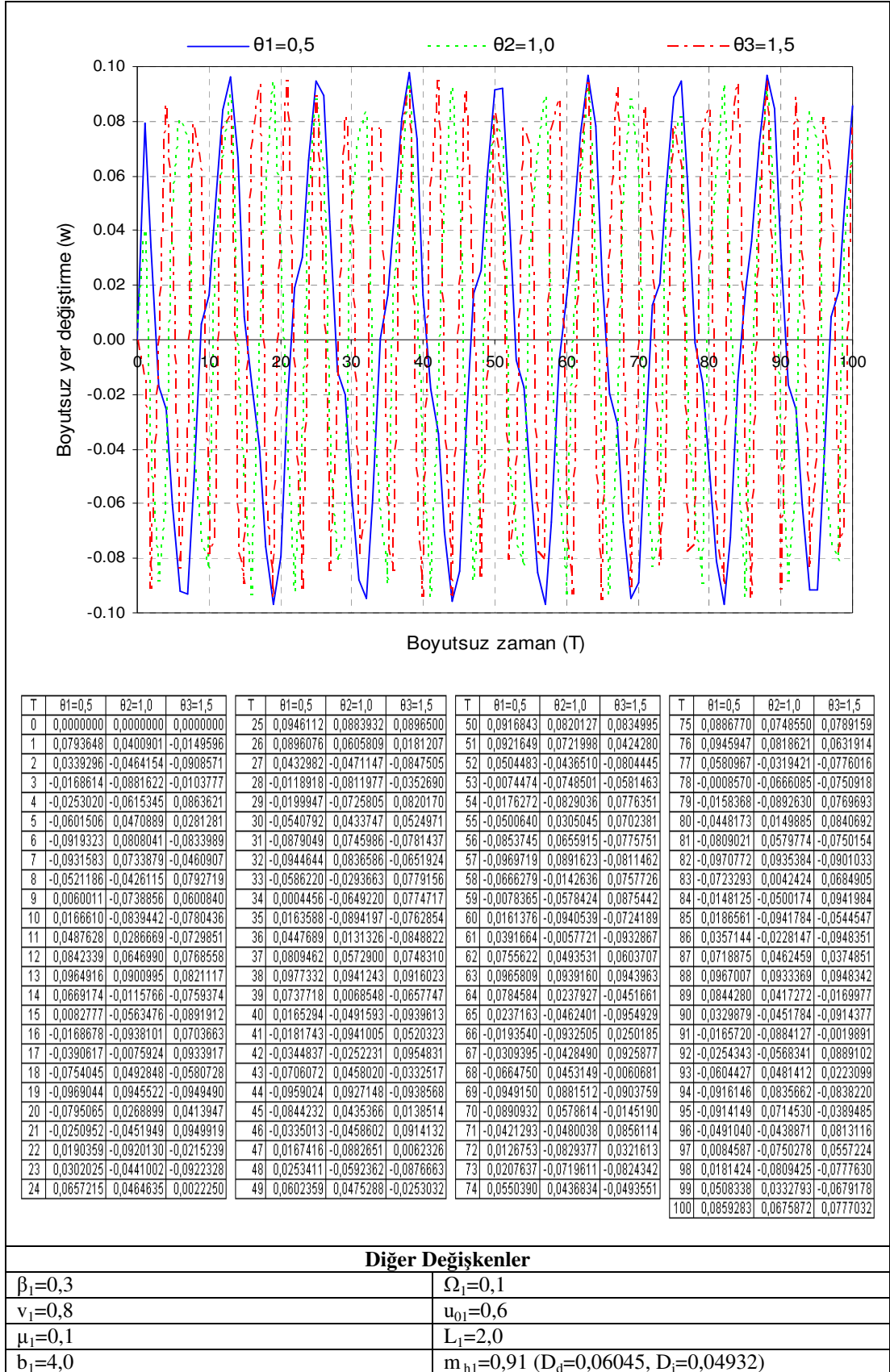
Şekil 3.45 Boyutsuz sönüm katsayısı (μ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

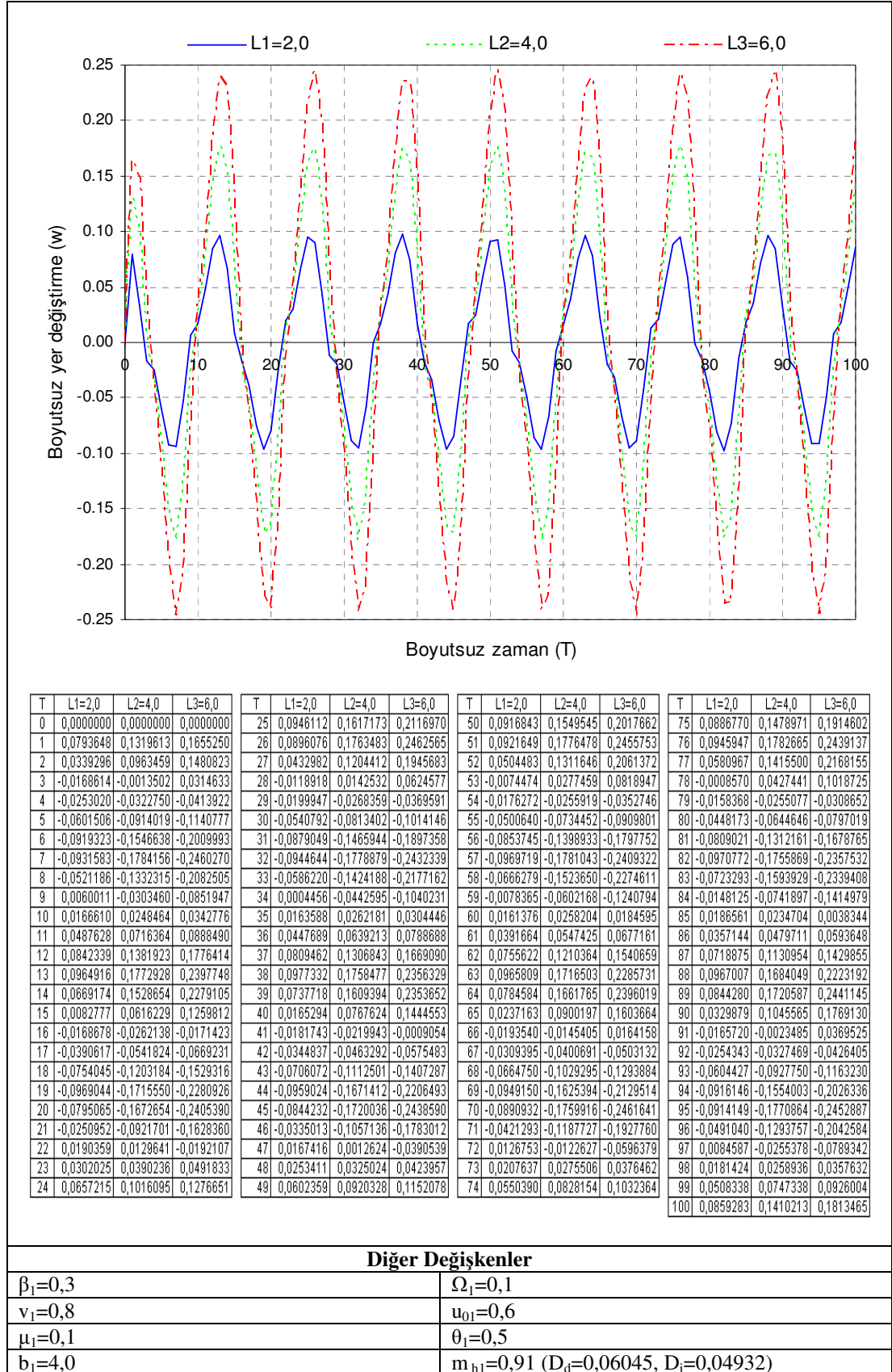


Şekil 3.46 FPSO'nun hareket genliği (b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

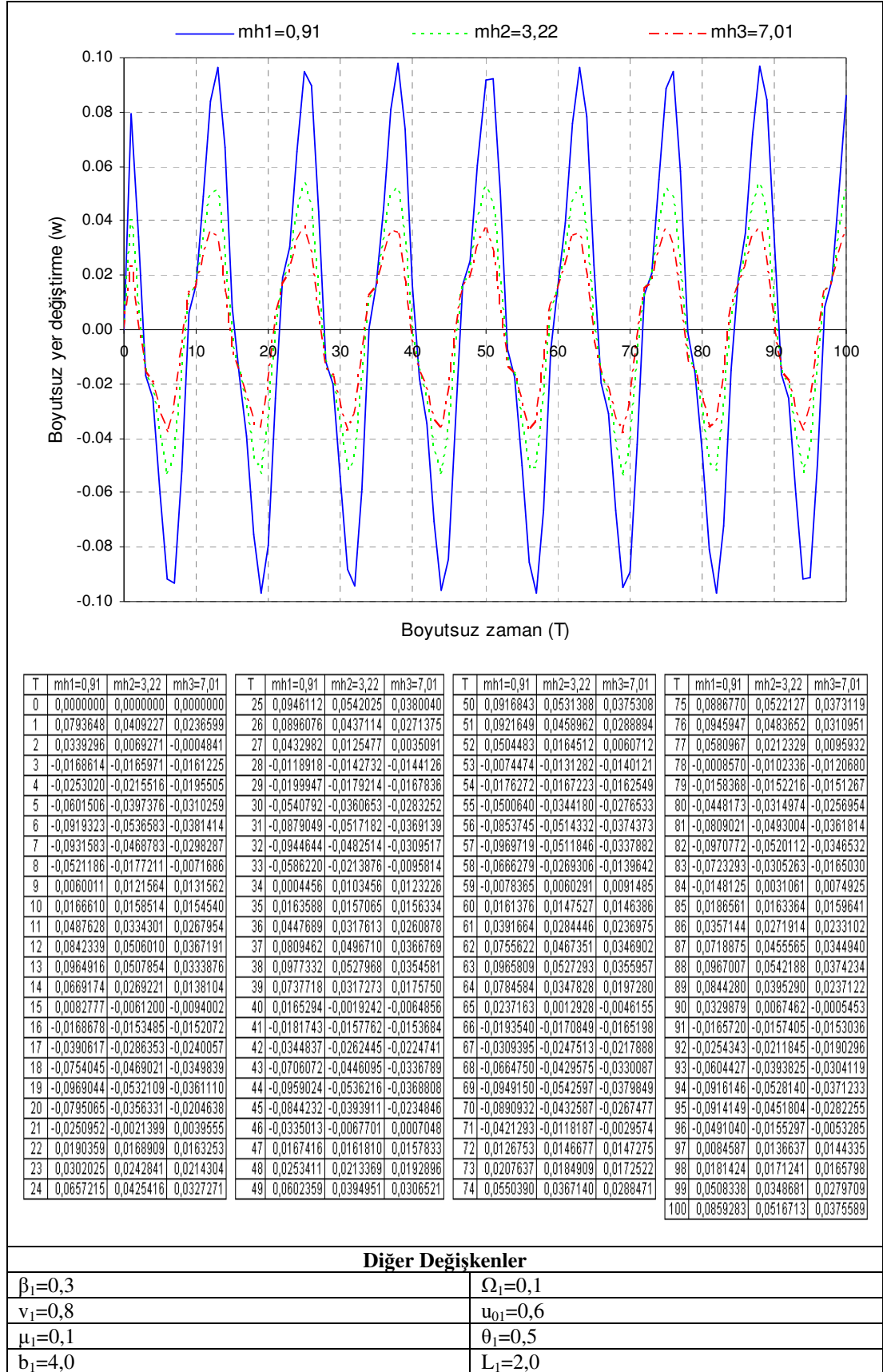
Şekil 3.47 FPSO'nun hareket frekansı (Ω) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.48 Dalga genliği (u_0) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

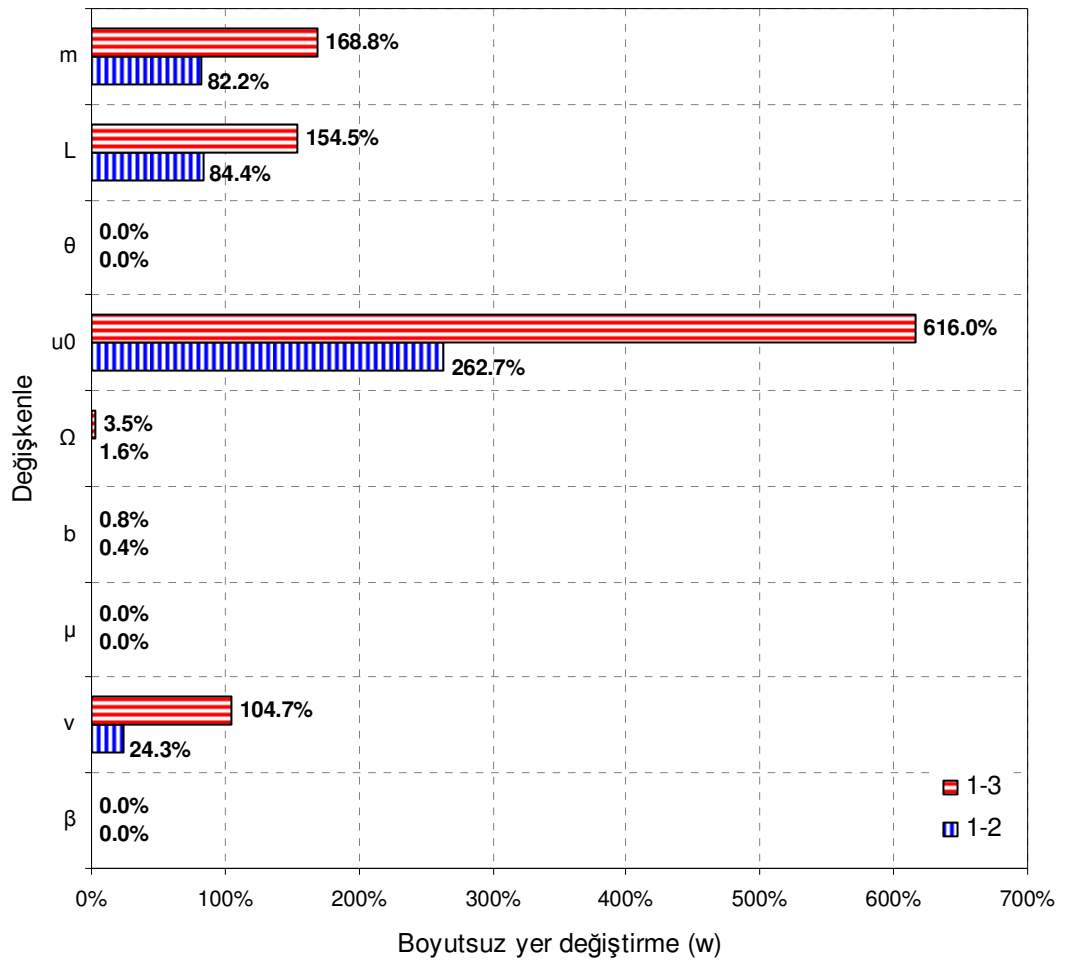
Şekil 3.49 Dalga frekansı (θ) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)



Şekil 3.50 Boru boyu (L) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.51 HDPE boru için birim boy kütlesi (m_b) değerlerine bağlı boyutsuz yer değiştirme (w)

Şekil 3.43 - Şekil 3.51 arası verilen hareket denkleminde ait değişkenlerin aldıkları büyüklüklerle boyutsuz yer değiştirme değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için oransal karşılaştırma sonuçları Şekil 3.52’de gösterilmiştir. Şekil 3.52’de görüldüğü üzere, boyutsuz yer değiştirme değerini en çok boruya etki eden dalga yükü kaynaklı akışkan zerreciklerinin hızı (Şekil 3.48) etkilemektedir. Boru boyu (Şekil 3.50), boru kütlesi (Şekil 3.51) ve boru içerisindeki akışkanın hızı da (Şekil 3.44) yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir.



Şekil 3.52 Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirme (w) değerine etkisi

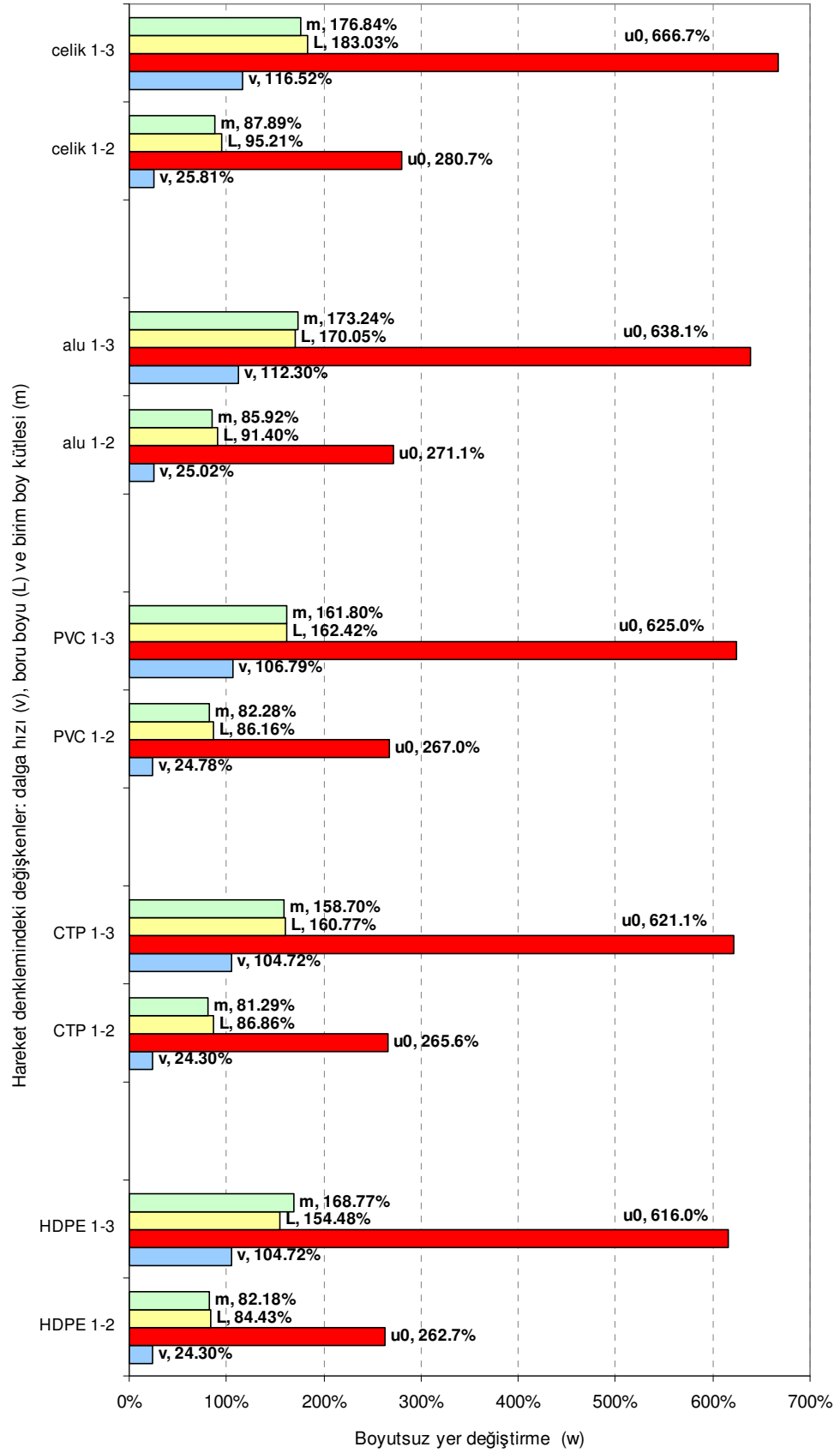
BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR

FPSO yapılarının güverte üzerinde bulunan boru hatlarına etkiyen dinamik çevre yükleri, yapısal yorulma ve hasarlara neden olmaktadır. Boru hattında meydana gelen bu zorlamaları analiz etmek ve yapının davranışlarını inceleyebilmek amacıyla Bölüm 2’de sistemin matematik modeli oluşturulmuş ve Bölüm 3.2’de bilgisayar destekli uygulama çalışmaları yapılmıştır.

Çevre yüklerine bağlı en uygun boru cinsini seçmek FPSO yapılarının güverte üzerindeki boru donanımlarından mümkün olan en iyi verimi almak yanında can ve mal güvenliği açısından da önemlidir. Bu nedenle, beş farklı malzemeden (çelik, alüminyum, PVC, CTP ve HDPE) imal edilmiş boru cinsi için hareket denklemindeki değişkenlerle yer değiştirme değeri arasındaki bağ analiz edilmiştir. Borudaki boyutsuz yer değiştirme değerinin boruya etkiyen dalga yüklerinin yanında boru malzemesi ve ana boyutlarıyla (boru çapı ve uzunluğu) yakından ilişkili olduğu Bölüm 3.2’deki uygulama çalışmalarında görülmektedir. Boru dış çapları ve uzunlukları aynı alınarak sistemin dinamik yükler altındaki boyutsuz yer değiştirme değerleri grafiklerde gösterilmiştir.

Uygulama çalışmalarında kullanılan beş farklı boru için değişkenlere aynı değerler verilmiş ve daha sonra da iki ve üç katı artırıma gidilmiştir. Böylece farklı malzemeden imal edilmiş borularda hareket denklemine ait değişkenler ve büyüklükleriyle boyutsuz yer değiştirme arasındaki ilişki incelenmiştir. Değişkenlerin boyutsuz yer değiştirmeye etkileri karşılaştırıldığında boru üzerine etkiyen dalga kaynaklı dış akışkanın hızı en çok etkiye sahip olduğu görülmektedir. Boru boyu, boru kütlesi ve boru içerisindeki akışkanın hızı da yer değiştirmeye neden olan diğer önemli etkenlerdir. Şekil 4.1’de beş farklı borunun analizinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Çelik borunun deniz yükleri etkisi altında en büyük boyutsuz yer değiştirme değerlerini verdiği görülmektedir. Benzer yükler altında çelik boruya kıyasla sırasıyla alüminyum, PVC, CTP ve HDPE borularda daha az yer değiştirme meydana gelmektedir.



Şekil 4.1 Boyutsuz yer değiştirme (w) değerini etkileyen önemli değişkenler

Şekil 4.1'deki verilere dayanarak çelik boru ile diğer borular karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Çelik boru ile alüminyum boru karşılaştırıldığında, dalga zerrecikleri hızındaki iki kat artış % 9,6, üç kat artış ise % 28,6 fazla boyutsuz yer değiştirmeye neden olmaktadır. Boru boyu için bu artış eğilimi % 3,8 ile % 13,0 değerini, boru içindeki akışkan hızı için ise % 0,8 ile % 4,2 değerini bulmaktadır. Birim boy kütle için ise % 2,0 ile % 3,6 değerinde bir azalma eğilimi vardır.

Çelik boru ile PVC boru karşılaştırıldığında, dalga zerrecikleri hızındaki iki kat artış % 13,07, üç kat artış ise % 41,7 fazla boyutsuz yer değiştirmeye neden olmaktadır. Boru boyu için bu artış eğilimi % 9,1 ile % 20,6 değerini, boru içindeki akışkan hızı için ise % 1,0 ile % 9,7 değerini bulmaktadır. Birim boy kütle için ise % 5,6 ile % 15,0 değerinde bir azalma eğilimi vardır.

Çelik boru ile CTP boru karşılaştırıldığında, dalga zerrecikleri hızındaki iki kat artış % 15,1, üç kat artış ise % 45,7 fazla boyutsuz yer değiştirmeye neden olmaktadır. Boru boyu için bu artış eğilimi % 8,3 ile % 22,3 değerini, boru içindeki akışkan hızı için ise % 1,1 ile % 9,2 değerini bulmaktadır. Birim boy kütle için ise % 6,6 ile % 18,1 değerinde bir azalma eğilimi vardır.

Çelik boru ile HDPE boru karşılaştırıldığında, dalga zerrecikleri hızındaki iki kat artış % 18,0, üç kat artış ise % 50,8 fazla boyutsuz yer değiştirmeye neden olmaktadır. Boru boyu için bu artış eğilimi % 10,8 ile % 28,6 değerini, boru içindeki akışkan hızı için ise % 1,5 ile % 11,8 değerini bulmaktadır. Birim boy kütle için ise % 5,7 ile % 8,1 değerinde bir azalma eğilimi vardır.

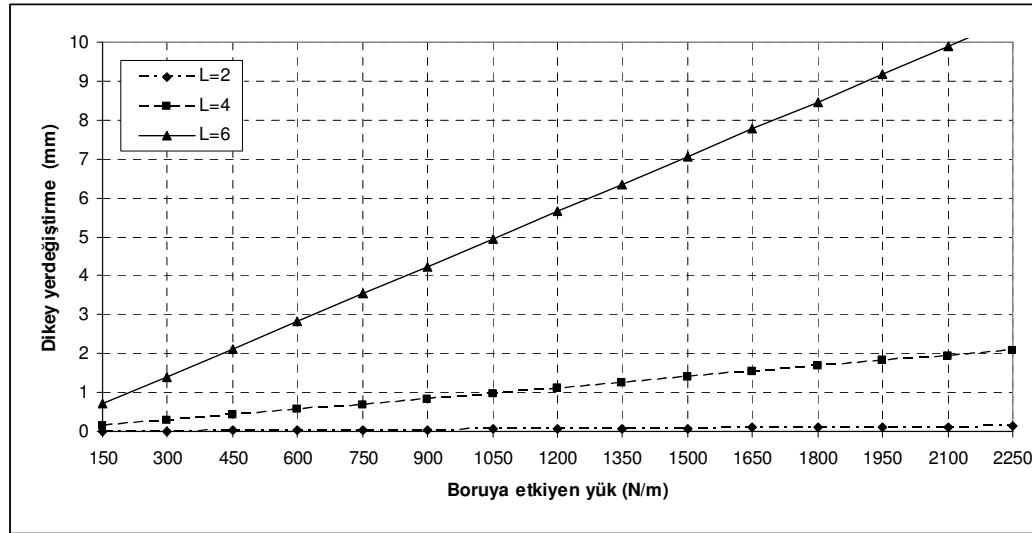
Bölüm 2'de verilen matematik modele dayalı elde edilen sayısal sonuçların konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılması amacıyla aşağıdaki inleme yapılmıştır. Vakharia ve Faroop (2009) tarafından maksimum eğilme gerilmesi teorisine dayanan çalışmada, yatay konumdaki boruya etkileyen yükler

altında meydana gelen maksimum dikey yer değiştirme aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir:

$$y_p = \frac{5w_p L^4}{384EI} \quad (37)$$

Yukarıdaki denklemlerde, “ w_p ” boruya etkiyen yük, “ L ” boru boyu, “ E ” boruya ait elastisite modülü, “ I ” boruya ait atalet momentidir.

Bölüm 3.2.1’de incelenen 3 no’lu çelik borunun, 6 m boyunda olması ve 1500 N/m yüke maruz kalması durumunda oluşan maksimum dikey yerdeğiştirme (37) nolu denklemden 7,06 mm olarak hesaplanır ve bu değer $L/600$ olarak ifade edilen 10 mm güvenlik sınırı değerinin altındadır. Borunun 2m, 4m ve 6m boylarında Şekil 4.2’de verilen yük değerlerine bağlı hesaplanan dikey yer değiştirmesi ve değişimi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Çelik boruda boya ve dış yüke bağlı dikey yer değiştirme

Konuyla ilgili geliştirilen matematik modele dayalı sayısal sonuçlar incelendiğinde, Bölüm 3.2.1’de incelenen 6 m boyundaki 3 no’lu çelik boru için yatay yerdeğiştirme değeri 5,44 mm olarak hesaplanır. Bu değer ile (37) nolu denklemlerle hesaplanan değer arasındaki farkın boru boyuna oranı, % 0,027 gibi çok küçük bir sayıdır. Bunun yanında, $L/600$ olarak ifade edilen 10 mm güvenlik sınırı değerinin altındadır.

Güverte üstünde bulunan boru hatlarını etkileyen deniz yüklerinin incelendiği bu çalışmada, dinamik yükler altında kalan boruların yerdeğiştirme değerleri incelenmiştir. Boru hatları ve diğer donanımların tasarım ve işletim ömürlerinin belirlenmesi süreçlerinde bu çalışmadan çıkan sonuçların göz önüne alınması, üretim ve işletim aşamalarında yarar sağlayacaktır. Türkiye ekonomisi ve yatırımları için yakın gelecekte daha da önem kazanacak olan açık deniz yapıları konularında yapılacak akademik ve endüstriyel çalışmaların yararlı olacağı düşünülmektedir. Yerli ve yabancı akademisyen, uzman kişi ve kurumlarla ortaklaşa yürütülen araştırma konusunun ve ilgili matematik modelin geliştirilerek çalışmanın ilerletilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Offshore Technology Report (2001). Analysis of green water susceptibility of FPSO/FSU's on the UKCS, Prepared by BOMEL Limited for the Health and Safety Executive. *Offshore Technology Report 2001/005*
- Abramson, H.N. & Kana, D.D. (1966). Some recent research on the vibration of elastic shells containing liquids, *Proc. of Symp. on Theory of Shells*, University of Houston, TX, 253-310
- Amabili, M. Sarkar, A. & Paidoussis, M.P. (2006). Chaotic vibrations of circular cylindrical shells: Galerkin versus reduced-order models via the proper orthogonal decomposition method, *Journal of Sound and Vibration*, 290, 736-762
- Aryawan, I.D. ve İncecik, A. (1999). Yüzer petrol üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapısı üzerine gelen dinamik yükler, *GMO Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi Bildiri Kitabı*, 114-122
- Bağcı,S. (2002). Büyüteç, ASOMEDYA, Mayıs 2002
- Belenky, V., Liut, D., Weems, K. & Shin, Y (2002). Nonlinear ship roll simulation with water-on-deck, *American Bureau of Shipping Technical Papers*, 115-127
- Belenky, V. & Breuer, A. (2007). Intact and damage stability of ships and offshore structures-bridging the gap, *American Bureau of Shipping Technical Papers*, 211-218
- Bilim ve Teknoloji Haberleri (2003) Deniz Dibinde Servet, *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 424, 18-19
- Buchner, B., Voogt, A. J., Duggal, A. S. & Heyl, C. N. (2002). Green water evaluation for FPSOs in the Gulf of Mexico, *Offshore Technology Conference*, 14192, 1-13

- Buchner, B. (2002). *Green Water on Ship-Type Offshore Structures*, Technische Universiteit Delft, P.Hd. Thesis
- Bulut, O. (2007). Sınır Eleman Yönteminin Boru Problemlerine Uygulanması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi
- Chiba, M., Tani, J., Hashimoto, H. & Sudo S. (1986). Dynamic stability of liquid-filled cylindrical shells under horizontal excitation, Part I: Experiment, *Journal of Sound and Vibration*, 104, 301-319
- Donnell, L.H. (1934). A new theory for the buckling of the thin cylinders under axial compression and bending, *Trans. Amer. Soc. Mech. Eng.*, 56, 795-815
- Durak, B. (2008). Akışkan Taşıyan Elastik Boruların Titreşim Analizi, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi
- Faltinsen, O. M., Greco, M. & Landrini, M. (2002). Green water loading on a FPSO, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 124/97, 97-103
- Goda Y.(2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific Publishing Company
- Gorman, D.G., Reese, J.M. & Zang, Y.L. (2000). Vibration of a flexible pipe conveying viscous pulsating fluid flow, *Journal of Sound and Vibration*, 230(2), 379-392
- Gülgeze, K.E. (1976). Açık Denizlerde Petrol Sondajı ve Platformlar, *Gemi Mühendisliği Dergisi*, 79, 3-11
- Han S. H. & Benaroya H.(2002). *Nonlinear and Stochastic Dynamics of Compliant Offshore Structures*, Springer
- Helvacıoğlu, İ.H. ve Yılmaz O. (1989). Yüzer açık deniz yapılarının hidrodinamik dizaynı, *Gemi Mühendisleri Odası, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi Bildiri Kitabı*, 232-248

- Holmes, P.J. (1977). Bifurcations to divergence and flutter in flow-induced oscillations: A finite dimensional analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 53/4, 471-503
- Inoue, Y. & Seif M. S.(1997). Nonlinear responses of multiple floating systems, *Proceedings of the Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, 1, 259-267
- Jensen, J.S. (1997). Fluid transport due to nonlinear fluid-structure interaction, *Journal of Fluids and Structures*, 11, 327-344
- Jin, J.D. & Song, Z.Y. (2005). Parametric resonances of supported pipes conveying pulsating fluid, *Journal of Fluids and Structures*, 20/6, 763-783
- Kana, D.D. & Craig, Jr.R.R. (1968). Parametric oscillations of a longitudinally excited cylindrical shell containing liquid, *Journal Spacecr. Rockets*, 5, 13-21
- Kawano K. & Venkataramana K.(1999). Dynamic response and reliability analysis of large offshore structures, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 168/1-4, 255-272
- Lloyd, A. R. J. M., Salsich, J. O. & Zselezky, J. J., (1985). The effect of bow shape on deck wetness in head seas, *Royal Institution of Naval Architects, Trans. RINA*, 9-25
- O'Dea, J. F. & Walden, D. A., (1984). The effect of bow shape and nonlinearities on the prediction of large amplitude motion and deck wetness, *Proc. 15th Symp. on Naval Hydrod.*, Hamburg, National Academy Press, 163-176
- Oksay, O. (2000). Petrol Platformları Dalgaları Aşıyor, *Cumhuriyet Gazetesi Bilim Teknik Dergisi*, 702, 2
- Gören, Ö. (1985). Su Yüzeyinde Salınan Düşey Eksenli Dairesel Silindirlere Ait Lineer Olmayan Hidrodinamik Kuvvetler, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi

- Özhan, B.B. (2004). İçinde Akış Olan Deniz Deşarj Borularının Dinamik Analizi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi
- Paidoussis, M.P. & Issid, N.T. (1974). Dynamic Stability of Pipes Conveying Fluid, *Journal of Sound and Vibration*, 33(3), 267-294
- Paidoussis, M.P. & Li, G.X. (1993). Pipes conveying fluid: A model dynamical problem, *Journal of Fluid and Structures*, 7, 137-204
- Sabuncu, T. (1983). *Gemi Hareketleri*, İTÜ Yayınları, Sayı: 1248
- Sarpkaya, T. (1981). *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Co.
- Semercigil, S.E., Turan, O. F. & Lu, S. (1997). Employing fluid flow in a cantilever pipe for vibration control, *Journal of Sound and Vibration*, 205, 103-111
- Shkenev, S. (1964). The dynamics of an elastic and elastoplastic shell filled with and ideal liquid, *Proc. of IV All-Union Conf. On Theory of Shells and Plates*, Nauka, Moscow, 997-1007
- Sinir, B.G. (2004). The Mathematical Modeling of Vibrations in Marine Pipeline, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi
- Sing-Kwan, L. & Kuan, S.A. (2007). Simulation technology for offshore and marine hydrodynamics status review and emerging capabilities, *American Bureau of Shipping Technical Papers*, 177-182
- Spanos, P. D., Sofi, A., Wang, J. & Peng, B. (2006). A method for fatigue analysis of piping systems on topsides of FPSO structures, *American Society of Mechanical Engineers*, 128, 162-168
- Sükan L. M.(1985). *Açık Deniz Yapılarının Hidrodinamiği*, İTÜ Gemi İnş. ve Deniz Bil. Fak. Sayı: 5

- Vakharia, D. P. & Farooq, M. A. (2009). Determination of maximum span between pipe supports using maximum bending stress theory, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 1, No. 6, , 46-49
- Yılmaz, O. ve İncecik, A. (1995). Yarıbatıkların Fırtınalı Havalarda Hareket Simulasyonu, *Gemi Mühendisleri Odası, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi Bildiri Kitabı*, 152-163
- Zou, G.P., Cheraghi, N. & Taheri, F. (2005). Fluid-induced vibration of composite natural gas pipelines, *International Journal of Solids and Structures*, 42, 125-126
- Wang, X. & Bloom, F. (1999). Dynamics of a submerged and inclined concentric pipe system with internal and external flows, *Journal of Fluid and Structures*, 13, 443-460
- Zhu F. (1995). Vibration and stability control of torodial shells conveying fluid, *Journal of Sound and Vibration*, 183(2), 197-208
- Zülal, A. (2000). Denizlerin Yalnız Devleri, Petrol Platformları, *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 386, 46-50