

ALÜMİNYUM SEMI-SWATH TİPİ BİR TEKNENİN DALGA SPEKTRUMLARI BAZ ALINARAK GERERÇEKLEŞTİRİLEN YORULMA ANALİZLERİ

Fuat KABAKÇIOĞLU, Ertekin BAYRAKTARKATAL
Istanbul Technical University

ÖZET

Yüksek süratlerde kullanım amacı ile tasarlanan deniz yapılarının maruz kaldığı yüklerin büyük bir kısmı, denizde oluşan dalgalar nedeni ile meydana gelen çevrimsel yükler olduğundan, özellikle yüksek süratli botlar için yorulma analiz hesaplamaları dikkatli ve hassas bir şekilde dikkate alınmalıdır. Bu çalışma dahilinde alüminyum AA5059 alaşımı kullanılarak tasarlanmış olan semi-swath tipi bir teknenin, Ege Denizi, Akdeniz ve Karadeniz dalga ve deniz karakteristikleri dikkate alınarak ve Palmgren-Miner metodu kullanılarak her üç deniz için ayrı ayrı yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde AA5059 alüminyum alaşımının 108 çevrim değeri için yorulma limit değeri olan ve S-N eğrisinden okunan yaklaşık 115 Mpa değeri aşılmadığı durumlarda yorulma çatlakları oluşmadan kaç yıl süre ile kullanılabilceği hesaplanmıştır[7].

Anahtar kelimeler: Palmgren-Miner Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Maestro FEA Programı , Yorulma Analizleri

1. Giriş

Yorulma olayı, tasarlanmış olan deniz yapıların sürekli ve döngüsel olarak maruz kalmış oldukları yüklemeler altında, inşa edilmiş oldukları malzemelerin yapısal özelliklerini ve bütünlüklerini kaybetmesi olarak tarif edilebilir. Gemilerin ya da diğer yapıların yorulma öngörülere nümerik ve ampirik yöntemler kullanılarak dizaynın ilk aşamalarında mutlak suretli olarak değerlendirilmeli ve yapısal tasarım bu şekilde gerçekleştirilmelidir.

Yorulma analizleri, günümüz gemi inşaatı mühendisliği temel hesaplamaları arasında önemi hızla artan analizlerin başında yer almaktadır. Son zamanlarda yorulma analizleri ile ilgili hesaplamaların önem kazanmasının nedeni, bu fenomen nedeni ile meydana gelen can ve mal kayıplarının kayda değer biçimde artıyor olmasıdır. Yorulmadan kaynaklanan hasarların yeni imal edilmiş olan gemilerde de sıklıkla görülüyor olması, özellikle armatörlerden gelen talepler üzerine, gemi inşaatı mühendislerinin konu ile çok daha fazla ilgilenmelerini gerektirmiştir. Bu gerekliliklerin neticesinde yorulma analizleri, artık tüm klas kuruluşları tarafından talep edilen temel mühendislik hesaplamaları arasında yerini almıştır.

Gemi inşaatı mühendisliği hesaplamaları açısından yorulma ve yorulmadan kaynaklanan yapısal bütünlüğün bozulması olayı 20. yüzyıl ortalarında giderek daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Yorulma nedeni ile meydana gelen gemi kayıpları ikinci dünya savaşı esnasında Liberty Freighters ve T2 tankerlerinde kullanılan malzemelerin düşük yorulma dayanımları nedeni ile oldukça üst noktalara ulaşmıştır. Ayrıca, perçin uygulamasından, kaynak

teknolojisine geçiş ile kaynaklarda meydana gelen yorulma ve dolayısıyla oluşan kırılmalar nedeniyle meydana gelen hasar sayısı da bu doğrultuda gittikçe artmıştır. [12].

Yorulma hesaplamaları gerçekleştirilirken, tekne bünyesinde meydana gelen gerilme yoğunluğu bölgelerinin (hot spot) analiz edilebilmesi ve çevrim sayılarının belirlenebilmesi en önemli iki basamağı oluşturmaktadır. Çevrim sayılarının belirlenebilmesi, tamamıyla teknenin kullanılacağı deniz yapısının özelliklerine ve karakteristiklerine bağlı olarak değişmekte ve bu durum teknenin maruz kalacağı dalga karşılama frekanslarını doğrudan etkilemektedir.

Teknenin global olarak analizleri gerçekleştirildiğinde yorulmadan kaynaklanan çatlakların ve gerilme yığılmalarının en fazla olduğu bölgelerin teknenin yapısında bulunan süreksizliklerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Genel olarak gerilme yığılmaları, kaynak geçiş çugullarının (notch) bulunduğu bölgelerde, braketlerin T profillere ya da hollanda profillerine bağlandığı noktalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle gemi inşaa mühendislerinin genellikle dizaynlarının başlangıç aşamalarında dikkate almadıkları detaylar (braketlerin uç noktalarının desteklenmesi, kaynak geçiş çugullarının desteklenmesi vb.) global dizayn safhasında öngörülerek tasarım yapılmalıdır [6].

Yorulma hesaplamalarının bir diğer önemli parametresi, inşa esnasında kullanılacak olan malzeme seçiminin teknenin kullanım koşullarına ve maruz kalacağı yüklere uygun olarak seçilmesidir. Deneysel çalışmalar neticesinde hazırlanmış olan ve her malzeme ve alaşım için farklı özellikler gösteren wöhler diyagramları (S-N grafikleri) malzeme seçimi aşamasında mutlak suretle dikkate alınmalıdır. Örneğin gemi inşaa çeliğinde belirli bir çevrim sayısından sonra yorulma limit değeri sabit ve doğrusal bir ilerleme gösterirken, alüminyum malzemelere limit değeri doğrusal değil sürekli azalan bir eğilim göstermektedir[8]. İlerleyen bölümlerde bu konu üzerinde grafikler üzerinde daha detaylı bilgi verilecektir. Bir malzemenin yorulma olayına karşın dayanımını ve davranışı yine S-N eğrileri ile karakterize edilmektedir. S-N eğrileri çevrim sayısı ile malzemenin çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değerlerini ortaya koyan ve malzemeden malzemeye değişiklik gösteren deneysel analizler neticesinde hazırlanmaktadır[9].

Yorulma hesaplamaları gerçekleştirilirken hemen hemen tüm klaslama kuruluşları tarafından (Alman-Norveç Loydu DNV-GL, Amerikan Loydu ABS vb...) kabul gören analiz yöntemi olan Palmgren-Miner yöntemi seçilmiştir [10] [11]. Her ne kadar bu yöntemin eksik yönleri bulunsada elde edilen sonuçların gerçek değerlere yakınsaması ve uygulanabilirliğinin kolay olması bu yöntemi klas kuruluşları tarafından tercih edilen bir yöntem olmasını sağlamıştır. Palmgren-Miner yönteminin en önemli özelliği, geminin maruz kaldığı sabit genlikli gerilmelerde olduğu gibi, sürekli değişen genlikli gerilmelerde başarılı sonuçlar vermesidir. Gerçekleştirilen hesaplamalar ve analizler neticesinde gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler tespit edilerek bu bölgelerde gerilme yığılmalarını önleyici önlemlerin alınması gerekmektedir.(braket takviyelendirmesi, sac kalınlığı artırılması, stifner aralığının küçültülmesi gibi).

Palmgren-Miner yöntemi ile geminin ömrü boyunca farklı deniz durumları ve yükleme koşullarında oluşan çevrim sayıları ve bu çevrim sayıları esnasında oluşan gereilme değerleri hesaplanmakta ve toplanan bu oranlar 1 değerine ulaştığında yorulma kırıkları ve çatlakları beklenmektedir [11]. Aşağıda gerçekleştirilecek olan hesaplamalarda burada bahsedilen durum açıkça takip edilebilmektedir.

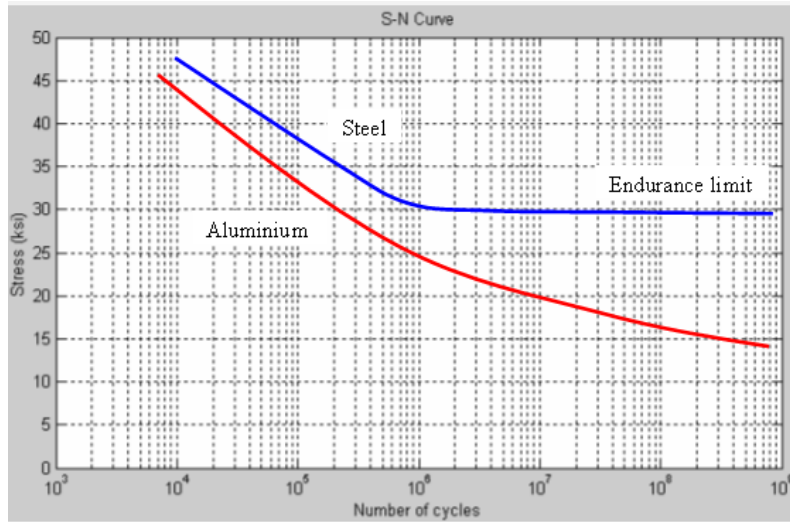
2. Çelik, AA5059 ve AA5083 Alaşımlarının Wöhler Diagramlarının ve Yorulma Limit Değerlerinin Karşılaştırılması

2.1 Çelik ve Alüminyum Malzemelerin Yorulma Dayanımlarının Karşılaştırılması

Aşağıda yer alan Şekil-1[8] den anlaşılacağı gibi, çelik ve alüminyum malzemelerin yorulma dayanımları arasında açıkça görülen ve yorulma hesaplama sonuçlarını ve analizlerini tamamen değiştirebilecek farklılıklar yer almaktadır.

Çelik ve alüminyum malzeme örnekleri kullanılarak hazırlanmış deney düzenekleri neticesinde elde edilmiş olan S-N grafiklerinde (Şekil-1) görüldüğü üzere, çelik malzeme 106 çevrimden sonra tamamen yatay doğrultuda bir ilerleme gösterirken alüminyum malzeme de olduğu gibi herhangi bir yorulma dayanım limit noktası yer almamaktadır. 30ksi (207 MPa) değeri ve altında olan gerilme değerlerinde çelik malzeme tamamen doğrusal davranış göstererek, çevrim sayısında bağımsız bir şekilde yorulma dayanımı sağlamaktadır. Gerçekleştirilecek olan genel ve detay Sonlu Elemanlar Analizleri (SEA) esnasında 207 MPa olan yorulma dayanım değeri aşılmadığı takdirde tasarımın yorulma çatlaklarına karşı emniyetli olabileceği söylenebilecektir.

Şekil-1 den de takip edilebileceği üzere 105 çevrim değerine kadar alüminyum malzeme ve çelik malzeme arasındaki dayanım limit değerlerinin değişimi birbirine oldukça paralel biçimde ilerlemektedir. Buna karşın 106 çevrim değerinden sonra alüminyum malzemenin yorulma direnç değeri kayda değer biçimde azalmaya devam etmektedir. Çevrim sayısı arttıkça yapının göstereceği dayanım limiti ciddi değerlerde azaldığından, özellikle alüminyum alaşımlar kullanılarak tasarlanan ve imal edilen teknelerin yorulma hesaplamaları dizaynın ilk aşamalarında itibaren çok daha dikkatli ve hassas bir biçimde ele alınmalıdır.



Şekil 1. Çelik-Alüminyum S-N Eğrisi Karşılaştırılması [8]

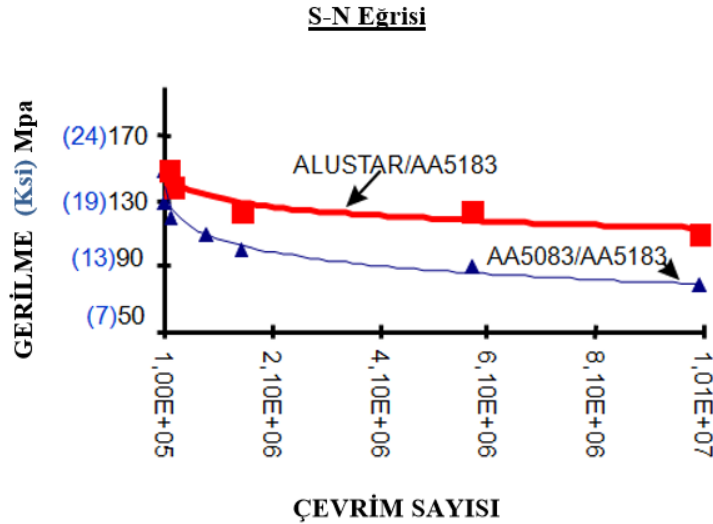
Yorulma dayanımları aynı malzemeler içerisinde de alaşımı bir araya getiren kimyasalların özelliklerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bölüm 2.2 den de takip edilebileceği üzere iki farklı alüminyum inşa malzemesinin de yorulma dayanımları arasında oldukça büyük miktarlarda farklılıklar yer almaktadır.

Yukarıda bahsedilen teorik hesaplamalar ve hesaplama yöntemleri, geminin üretimi esnasında kaynak, taşlama, gerilme giderme gibi işlemlerin prosedürlere uygun olarak gerçekleştirildiği durumlar için geçerlidir. İşçilik uygulamaları ve uygun olmayan aşırı sıcaklık değişimleri gibi durumlar yukarıda sözü geçen ve ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilen olan hesaplamaları negatif yönde etkileyecektir. Bu nedenden dolayı hesaplamalarda ve tasarımda gösterilen hassasiyet teknenin üretimi esnasında da mutlak suretle gösterilmelidir.

2.2 Alüminyum Alaşım AA5059'un Yorulma Dayanım Karakteristiği

Yukarı da değinildiği gibi S-N grafikleri arasındaki farklılıklar aynı malzemenin farklı alaşımları içerisinde büyük miktarda farklılıklar gösterebilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil-2'de [6] AA5083 ve AA5059 alüminyum alaşımlarının yorulma dirençleri arasındaki fark oldukça belirgindir. 105 çevrimde AA5059 (ALUSTAR) yorulma dayanım değeri yaklaşık 150MPa okunurken, AA5083 alüminyum alaşımının değeri 130 MPa olarak okunmaktadır. Çevrim sayısı arttıkça iki alaşım arasında oluşan yorulma dayanım değeri de dikkate değer biçimde farklılık göstermektedir. 108 çevrimde AA5059 (ALUSTAR) 110-120 MPa yorulma dayanım limit gösterirken AA5083 75-80 MPa değerlerinde kalmaktadır. Bu iki farklı alüminyum alaşımı arasındaki bu farklılık AA5059 alaşımı kullanılarak imal edilecek olan botların daha düşük yapısal ağırlık oluşturarak teknenin verimli yükünün artmasına ya da bir diğer söylemle teknenin daha düşük makine gücünde aynı süratle ulaşmasını sağlayabilecektir.

Şekil-2' de AA5059 (ALUSTAR) ve AA5083 alüminyum alaşımları, yine bir diğer alüminyum alaşım olan AA5183 elektrot kullanılarak kendi içlerinde kaynatılmış (AA5059-AA5059 ve AA5083-AA5083) ve karşılaştırmalı S-N eğrisi bu doğrultuda oluşturulmuştur. Çalışma dahilinde AA5059 ve AA5083 alaşımları karşılaştırıldığından, ayrıca AA5183 alaşımına değinilmemiştir.



Şekil 2. AA5083 ile AA5059 (ALUSTAR) Alüminyum Alaşımlarının S-N Eğrilerinin Karşılaştırılması [6]

3. Türk Kara Suları Dahilinde (Akdeniz, Ege ve Karadeniz) Yorulma Hesaplamalarının Gerçekleştirilmesi

Türk kara sularında yorulma analizlerinin gerçekleştirilmesinin en önemli sebebi, teknenin kullanım ömrü boyunca kaç yıl boyunca yorulma çatlakları oluşmadan kullanılabilmesinin öngörüsünü gerçekleştirmektir. Aşağıda verilen Tablo-1’de yer alan deniz ortamlarında teknenin maruz kalacağı çevrim sayıları ve maruz kaldığı yükler farklı olacağından, bu duruma bağlı olarak gerilme değerleri ve dolayısı ile yorulma süreleri de farklı olacaktır. Aşağıda aktarılan yorulma hesaplamalarında teknenin Ege Denizi’nde, Akdeniz’de ve Karadeniz’de denizde kalma süresinin belirli kısımlarını farklı deniz ortamlarında geçireceği varsayılarak toplamda her üç deniz ortamı için yorulma analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir[7]. Tablo-1’de Akdeniz, Karadeniz ve Ege Denizi’ne ait farklı deniz durumlarını temsil eden karakteristik dalga yükseklikleri ve modal dalga periyotları yer almaktadır. Hesaplamaların her aşamasında Tablo-1 sıklıkla kullanılacaktır.

Tüm hesaplamalarda teknenin tam yüklü draft değeri 3,2 metre ve deplasmanı 900 ton olarak ve botun trimsiz ve meyilsiz olduğu varsayılarak hesaplamalar gerçekleştirilecektir. Dalga boyu hesaplamaları için yukarıda aktarılan parametreler ve değerler kullanılmıştır.

Yorulma hesaplamaları gerçekleştirilen oluşan ivmelerin ve ek su basınçlarının hesaplanabilmesi için teknenin intikal hız değeri 20 knot (10,28 m/sn) olarak dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilecek olan hesaplamalarda kullanılacak olan tüm deniz durumları için teknenin denizde kalacağı süreler, %30’unu 2 deniz durumunda, %20’sini 3 deniz durumunda, %20’sini 4 deniz durumunda, %15’ini 5 deniz durumunda ve kalan %15 ini de 6 deniz durumunda geçirdiği düşünülerek hesaplamalar gerçekleştirilecektir[7]. Palmgren-Miner yöntemi yukarıda yer alan yükleme ve ortam koşullarının dikkate alınıp analiz edilebilmesi için en uygun yöntem olarak değerlendirilmekte ve hesaplamalar giriş bölümünde de değinildiği üzere bu doğrultuda gerçekleştirilmektedir.

Hesaplamalar esnasında, ABS (American Bureau Of Shipping) Spectral-Based Fatigue Analysis For Floating Offshore Structures Mart 2005[10] “Dalga Rozet yaklaşımı kullanılmış olup (uzun vadeli dalga yönelimi olarak da bilinir)”, bu doğrultuda analizi yapılacak olan deniz yapısının farklı açılardan gelen dalgalara göre analizi gerçekleştirilerek, gemi üzerine etkiyen en tahrip edici senaryoda yer alan deniz koşulları hesaplamalar dahilinde kullanılmaktadır. Analizi gerçekleştirilecek olan deniz yapısına 15’er derecelik açılar ile dalgalar gönderilerek en fazla gerilmenin gözlemlendiği durum hesaplamalara dahil edilmiştir. Yorulma analizinde gerçekçi bir dalga rozetinin kullanılması tavsiye edilir. Dalga rozetinin mevcut olmaması durumunda, yukarıda da belirtildiği üzere en yüksek gerilmelerin hesaplanmış olduğu yükleme durumu dikkate alınmalıdır. [10]

Tüm yorulma hesaplamalarında olduğu gibi gemi ile ilgili gerçekleştirilen yorulma hesaplamalarında da en önemli noktalardan bir tanesi çevrim sayısının belirlenebilmesidir. Teknenin bir yıl boyunca toplam 2000 saatlik operasyon süresi olacağı öngörülerek yorulma hesaplamaları gerçekleştirilecektir. 2000 saati kullanım süresini deniz koşullarında geçireceği süreler göre gruplandırılırsa;

- 2 Deniz durumunda geçireceği süre, $2000 \cdot 0.3 = 600$ saat
- 3 Deniz durumunda geçireceği süre, $2000 \cdot 0.2 = 400$ saat
- 4 Deniz durumunda geçireceği süre, $2000 \cdot 0.2 = 400$ saat

- 5 Deniz durumunda geçireceği süre, $2000 \cdot 0.15 = 300$ saat
- 6 Deniz durumunda geçireceği süre, $2000 \cdot 0.15 = 300$ saat olarak hesaplanır.

Geminin maruz kalacağı çevrim sayısı, bir dalga tepesinden diğer dalga tepesine geçiş olarak değerlendirilecek ve gemi ve dalga hızına göre periyot ve periyot değerlerine göre geçiş süreleri hesaplanacaktır. Tablo-1’ de yer alan değerlerinden yola çıkılarak dalga boyu hesaplamaları gerçekleştirilecektir.

Tablo-1. Yorulma hesaplamalarında kullanılacak olan Akdeniz, Karadeniz ve Ege Denizi İçin Modal Dalga Periyotları[1]

Deniz Durumu	Karakteristik Dalga Yükseklikleri	Karadeniz Modal Dalga Periyodu (s)	Akdeniz Modal Dalga Periyodu (s)	Ege Denizi Modal Dalga Periyodu (s)
0-1	0,05	3,53	4,42	3,63
2	0,3	4,14	5	4,01
3	0,88	5,41	6,25	4,86
4	1,88	7,28	8,15	6,25
5	3,25	9,1	10,16	7,96
6	5	10,19	11,74	9,81

3.1 Ege Denizi İçin Yorulma Hesaplamalarının Gerçekleştirilmesi

Ege denizi için gerçekleştirilecek olan hesaplamalar deniz durumu iki dikkate alınarak aşağıda izlenen yol ile hesaplandıktan sonra, deniz durumu 3,4,5 ve 6 için de benzer yöntem izlenerek tablo halinde sunulacaktır.

Teknenin deniz durumu iki de 600 saat geçireceği öngörüldüğünde ve intikal süratinin 20 knot (10.28 m/sn) olduğu dikkate alındığında aşağıda aktarılan hesaplamalar bu doğrultuda gerçekleştirilecektir. Dalga boyu hesaplanırken formül (3.2)’de yer alan bağıntı dikkate alınacaktır. Burada λ dalga boyunu simgelerken, T dalga periyodunu ve g yer çekimi ivmesini göstermektedir. Dalga boyunun hesaplanmasının ardından dalga hızı hesaplanmalıdır ve dalga hızı formül (3.1)’e göre hesaplanacaktır.

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.2)$$

Geminin baş tarafından gelen dalgalar dikkate alındığında karşılaşma frekanslarının hesaplanabilmesi için bağıl hız, aşağıda yer alan formüle göre hesaplanmalıdır

$$V_{bağıl} = V_{gemi} + V_{dalga} \quad (3.3)$$

Aşağıda yer alan Tablo-2’de yukarıda aktarılan parametreler ve formüller dikkate alınarak gerçekleştirilmiş olan hesaplamalar deniz durumları 2,3,4,5 ve 6 için hesaplanarak verilmiştir.

Tablo-2. Ege Denizi için Hesaplanmış Olan Karakteristik Değerler [7]

Deniz Durumu	λ (metre)	V_{dalga} (m/sn)	$V_{bağıl}$ (m/sn)	$\lambda/V_{bağıl}$	Karşılaşma Sayısı
2	25,106	6,261	16,541	1,518	1,423,112
3	36,877	7,588	17,686	2,085	697,675
4	61	9,78	20	3,05	473,116
5	98,93	12,43	22,7	4,358	247,934
6	150,3	15,3	25,6	5,871	183,986

Örnek olarak teknenin 2 deniz durumunda toplamda kaç adet çevrime (dalga ile karşılaşma sayısı) maruz kaldığını bulabilmek için;

$$\frac{2160000}{1.5178} = 1423112.4$$

adet çevrim elde edilmektedir.

Burada 2160000 değeri aşağıda yer aldığı gibi hesaplanmıştır.

$$600\text{saat} = 36000\text{ dakika} = 2160000\text{ sn dir}$$

3.2 Ege Denizi İçin Palmgren-Miner Metodunun Uygulanması

Palmgren-Miner kuralına göre bu çevrimler kümülatif olarak değerlendirilirse[2];

$$\sum \frac{n}{N} \leq 0.99 \quad (3.4)$$

Ya da yukarıda aktarılan formülü daha açık bir biçimde yazılırsa[2];

$$\frac{n_1}{N} + \frac{n_2}{N} + \frac{n_3}{N} + \dots \leq 0.99 \quad (3.5)$$

Tablo-2 de yer alan çevrim sayıları toplam ömür hesabını sağlaması gereken çevrim sayısına bölünerek toplanırsa (10^8) Ege denizinde baştan gelen dalgalar için kümülatif çevrim değeri 0.030256 olarak hesaplanır.

Burada ömür süresinin hesaplanabilmesi için Palmgren -Miner kuralında yer aldığı gibi ve eşitlik (3.5) te yer aldığı gibi bir yöntem izlenecek olursa,

$$\text{ömür süresi} * 0.030256 = 0.99 \quad (3.6)$$

$$\text{ömür süresi} = 32,72\text{ olarak hesaplanır}$$

Burada 32,72 yıl olarak hesaplanan değer, AA5059 Alaşımının Wöhler diyagramından okunan ve 10^8 çevrim değerine karşılık gelen yaklaşık 115 MPa gerilme değerinin aşılmaması gerektiği durumlar için hesaplanmış olan değerdir. Gerçekleştirilen SEA analizleri neticesinde 115 MPa değerini aşan yapısal bölgeler gereken önlemler alınarak (yapısal bütünlüğün sağlanması, sac kalınlığını artırılması, eleman takviyelerinin eklenmesi vb...) 115 MPa değerinin altına çekilmelidir.

3.3 Ege Denizi İçin Sonlu Elemanlar Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilirken SEA programı olarak MAESTRO programı tercih edilmiştir. MAESTRO programı sadece gemi inşaatı ve gemi yapısal analiz hesaplamalarına yönelik olarak tasarlanmış bir program olduğundan, kullanıcılarına oldukça büyük kolaylıklar getirmektedir. Geminin modellenmesinin ardından gemide yer alan tüm tanklar ve ekipman ağırlıkları gemi üzerine yerleştirilerek modelin dengeye getirilmesi sağlanmış ve yüksek süratlerden dolayı oluşacak olan ivmelenme değerleri ayrıca klas kurallarına göre hesaplanarak gemiye tatbik edilmiştir. Bu hesaplamalar dahilinde gemiye gelen dalgalar 0 dereceden başlamak üzere 45 er derece aralıklar ile taranarak dalga spektrumları gemiye uygulanmış ve bu doğrultuda en yüksek gerilmelerin olduğu koşullar çalışmada dahilinde dikkate alınmıştır.

MAESTRO programı kullandığı mesh yapısını tamamen kendi içerisinde geliştirerek ve bu yapıyı büyük paneller şeklinde oluşturarak, yıllar içerisinde gerçekleştirilen detaylı çalışmalar ile gemi inşaatı uygulamaları için özel olarak modifiye edilmiş bir SEA analiz programıdır. MAESTRO tamamen gemi yapısı için uygun olarak geliştirilen ve gemi yapısının analiz edilmesini sağlayan bir sonlu elemanlar analiz programı olduğundan, çok daha hızlı SEA modeli oluşturmasını sağlayan büyük panel yapıları kullanmaktadır[13]. MAESTRO SEA programı mesh yapılarını oluştururken aynı zamanda süper element metoduna da başvurmuştur. Bu metod dahilinde, MAESTRO, detaylı ağ yapısını (fine mesh) global modelde yer alan ana düğüm noktalarına taşıyarak ve yapısal dayanımı, bölgesel detaylı mesh model ile birleştirerek çözüm gerçekleştirmektedir [14].

Ek düşey ivmelenme değerleri, aşağıda yer alan Türk Loydu ve Alman Loydu kurallarına [3][4]göre her deniz durumu için ayrı ayrı hesaplanarak SEA modeline uygulanmıştır. Aşağıda yer alan Tablo-3'te geminin görev tanımına bağlı olan servis tipi faktörleri bulunmaktadır ve bu değerler ivmelenme hesaplamalarında oldukça büyük farklılıklar meydana getirmektedir. Hesaplamalarda bu değer en kötü durum analiz edilebilmesi amacıyla 1,666 olarak dikkate alınmıştır.

Tablo-3. Geminin görev tanımına bağlı olarak değerlendirilen servis tipi faktörleri [3][4]

Servis Tipi	Yolcu,Feribot	Destek	Pilot,Güvenlik	Kurtarma
f_{oc}	0,666	1	1,333	1,666

Servis alanı	Açık deniz	Sınırlı açık deniz	İlimli ortam (2)	Durgun deniz (3)
S_{oc}	$C_F (1)$	0,30	0,23	0,14
(1)	<i>Yolcu, yük tekneleri ve feribotlar için, bu durumdaki denize elverişlilik araştırılacaktır. Genelde, S_{oc} bu tabloda verilen değerlerden daha düşük olmalıdır. Burada;</i>			
	$C_F = 0,2 + \frac{0,6}{\sqrt{L}} \geq 0,32 \text{ 'dir.}$			
(2)	<i>Servis tipi "kurtarma" olan teknelere uygulanmaz.</i>			
(3)	<i>Servis tipi "pilot, güvenlik" veya "kurtarma" olan teknelere uygulanmaz.</i>			

Şekil 3. Geminin görev tanımına bağlı olarak değerlendirilen deniz koşullarına bağlı olarak değişen katsayılar. (Türk Loydu, Hızlı Tekneler, Bölüm 3, Sayfa 18)

Yukarıda aktarılan parametreler dahilinde modele her deniz durumu için ayrı ayrı uygulanacak olan düşey ivmelenme değerleri aşağıda yer alan formüle göre hesaplanacaktır.

$$a_{CG} = f_{oc} * s_{oc} * \frac{v}{\sqrt{L}} \quad (3.7)$$

Yukarıda yer alan formüle göre hesaplanan ivmelenme değerleri her bir deniz durumu için ayrı ayrı hesaplanarak aşağıda yer alan Tablo-4 te verilmiştir.

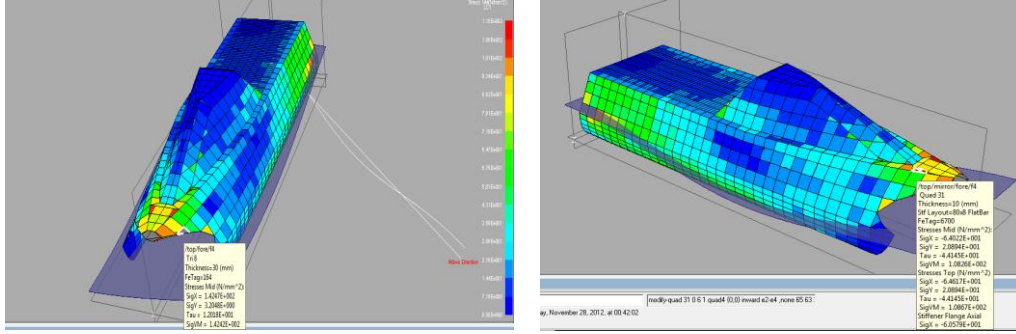
Tablo-4. Farklı deniz durumları için hesaplanan dizayn düşey ivme değerleri[7]

Deniz Durumu	Düşey İvmelenme Değerleri (g)
2	0,66
3	1,08
4	1,25
5	1,4
6	1,55

Tablo-4 te hesaplana değerler, geminin görev tanımı değişmemesinden dolayı aynı zamanda Akdeniz ve Karadeniz için de kullanılacaktır. Foc ve Soc katsayıları teknenin görev tanımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Ege Deniz ortamında gerçekleştirilen hesaplamalar için MAESTRO programında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçları aşağıda yer alan Şekil-4'te görüldüğü gibidir. Dalga spektrumu analizleri neticesinde teknenin baş tarafından 45 derecelik açılarda almış olduğu dalgaların en fazla gerilmeyi oluşturduğu anlaşılmaktadır. Hesaplanan Von-Misses gerilme analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme değeri 142 MPa olarak bulunmuş ve bu gerilme değeri 108 çevrim için maximum izin verilen 110-120 MPa değerinin üzerinde olduğu için mutlak suretle gerekli yapısal önlemler alınarak (braket takviyesi, sac kalınlığı artırılması, yapısal bütünlüğün sağlanması vb.) gerilme değeri 115 MPa'nın altına getirilmelidir. Yine Şekil 4'ten da takip edilebileceği üzere sıfır dereceden gelen dalgalarda maksimum gerilme değeri

108 MPa olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar AA5059 alaşımının akma gerilmesi 155 MPa olarak hesaplanmış olsa da botun yorulma analizleri dikkate alındığında bu değer 108 çevrim için 115 Mpa ile sınırlandırılmalıdır.



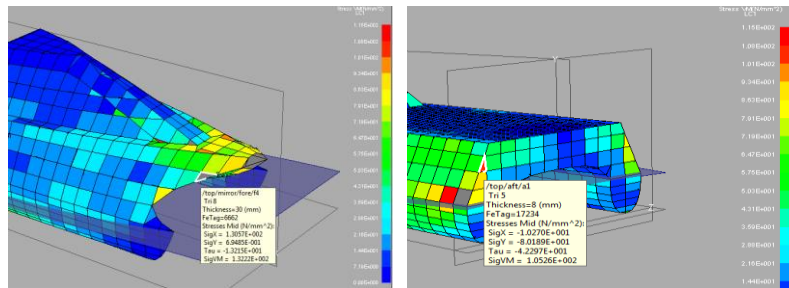
Şekil 4. Ege Denizi'nde 45 ve 0 dereceden gelen dalgaların oluşturduğu gerilme değerleri[7]

3.4 Akdeniz İçin Sonlu Elemanlar Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Tablo-5. Akdeniz İçin Hesaplanmış Olan Karakteristik Değerler [7]

Deniz Durumu	λ (metre)	V_{dalga} (m/sn)	$V_{bağlı}$ (m/sn)	$\lambda/V_{bağlı}$	Karşılaşma Sayısı
2	39,03	7,8	18,1	2,156	1.001.623
3	61	9,76	20,04	3,044	473.062
4	103,76	12,725	23	4,511	319.291
5	161,17	15,863	26,143	6,165	175.182
6	215,2	18,33	25,6	8,406	143.579

Akdeniz koşullarında gerçekleştirilen hesaplamalar, yukarıda Ege Deniz durumunda aktarılmış olan yöntemler izlenerek gerçekleştirilmiş olup, Tablo-5 bu doğrultuda elde edilmiştir. Eşitlik (3.4)'e göre gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde 108 toplam çevrim sayısı dikkate alınarak çevrim katsayısı 0,02111 olarak elde edilmiş ve bu doğrultuda teknenin Akdeniz'de kullanılması durumunda hasar oluşmadan geçireceği yıl sayısı 46,897 olarak hesaplanmıştır. Burada hesaplanan 46,8978 yıl, izin verilen yorulma limiti değeri aşılmadığı takdirde elde edilecek olan hasarsız geçirilecek olan süredir.



Şekil 5. Akdeniz'de 45 ve 0 dereceden gelen dalgaların oluşturduğu gerilme değerleri[9]

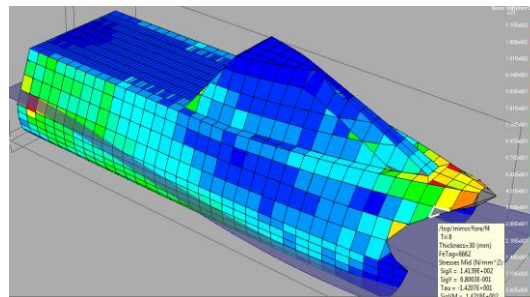
Gerçekleştirilen sonlu elemanlar hesaplamaları doğrultusunda 45 derece 0 dereceden gelen dalgaların oluşturmuş olduğu gerilme değerleri sırası ile 132 ve 105 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda 45 dereceden gelen dalgalar yorulma limit değeri olan 115 MPa değerinin üzerinde olduğundan gerekli yapısal önlemler alınarak bu değer 115 MPa'nın altına çekilmelidir.

3.5 Karadeniz İçin Sonlu Elemanlar Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Tablo-6. Karadeniz İçin Hesaplanmış Olan Karakteristik Değerler [7]

Deniz Durumu	λ (metre)	V_{dalga} (m/sn)	$V_{bağlı}$ (m/sn)	$\lambda/V_{bağlı}$	Karşılaşma Sayısı
2	39,03	7,8	18,1	2,156	1.001.623
3	61	9,76	20,04	3,044	473.062
4	103,76	12,725	23	4,511	319,291
5	161,17	15,863	26,143	6,165	175,182
6	215,2	18,33	25,6	8,406	143,579

Karadeniz koşullarında gerçekleştirilen hesaplamalar yukarıda Ege Deniz durumunda aktarılmış olan yöntemler izlenerek hesaplanmış olup Tablo-6 bu doğrultuda elde edilmiştir. Eşitlik (3.4)'e göre gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde 10^8 toplam çevrim sayısı dikkate alınarak çevrim katsayısı 0,02698 olarak elde edilmiş ve 115 Mpa limit değeri aşılmadığı sürece, teknenin Karadeniz'de kullanılması durumunda hasar oluşmadan geçireceği yıl 36,69 olarak hesaplanmıştır. Burada hesaplanan 36,69 yıl, izin verilen yorulma limiti değeri aşılmadığı takdirde elde edilcek olan hasarsız geçirilecek olan süredir.



Şekil 6. Karadeniz'de 45 dereceden gelen dalgaların oluşturduğu gerilme değerleri[7]

Gerçekleştirilen sonlu elemanlar hesaplamaları doğrultusunda 0 dereceden gelen dalgaların oluşturmuş olduğu gerilme değerleri sırası ile 143 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda 45 dereceden gelen dalgalar yorulma limit değeri olan 115 MPa değerinin üzerinde olduğundan, gerekli yapısal önlemler alınarak bu değer 115 MPa'nın altına çekilmelidir.

4. Sonuç

Bu çalışma dahilinde, alüminyum alaşım AA5059 (ALUSTAR) H321 temper malzemesi kullanılarak üretilmiş olan semi swath tipinde bir teknenin Türkiye'nin üç farklı denizindeki dalga spektrumları dikkate alınarak ve 0 dan 45 derecelik açılar ile 360 dereceye kadar teknenin karşılaştığı dalgalardan kaynaklanan gerilme değerleri hesaplanarak yorulma davranışı incelenmiş ve her farklı deniz durumunda teknenin geçirebileceği ömür hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalar sonucunda, AA5059 alüminyum alaşımı için 108 çevrimde yorulma dayanım limiti olan 115 MPa aşılmadığı durumda Ege Denizi'nde 32,72 yıl, Akdeniz'de 46,897 yıl ve Karadeniz'de 36,69 yıl yorulma çatlakları oluşmadan hayatta kalacağı hesaplanmıştır. Alüminyum alaşımlarda çevrim sayısı arttıkça limit dayanım limit değeri de azaldığından sonraki yıllarda teknenin kullanımı için bu durum dikkate alınmalıdır. Hesaplamalardan da anlaşılabilir üzere, yorulma çatlakları oluşmadan en uzun süre hayatta kalabileceği deniz ortamı Akdeniz'de oluşmaktadır.

Çalışmada detaylı bir şekilde vurgulandığı üzere, yorulma analizleri gerçekleştirilirken hesaplamalar dahilinde kullanılan, deniz ortamları ve durumu, spesifik dalga karakterleri, dalga karşılaşma açıları ve teknenin kullanım süreleri gibi parametreler teknenin hasarsız bir şekilde kullanım süresini belirlemektedir. Teknenin dizaynın başlangıç aşamasında, yukarıda bahsedilmiş olan parametrelilerin net bir şekilde tanımlanması yorulma hesaplamalarının sağlıklı bir biçimde tanımlanmış olması oldukça önemlidir.

Kaynaklar:

- [1] Özhan E., Middle East Technical University, NATO TU-Waves Project Technical Document (1994-2002).
- [2] Bishop N.W.M., Sherratt F., (2000), Finite Element Based Fatigue Calculations, Chapter 4, P.33, Farnham, UK, July 2000.
- [3] Germanischer Lloyd, Rules for Classification and Construction, Ship Technology, Special Craft, High Speed Craft, Structures, Section 3, Chapter 1, Part 3, P. 51, July 2002.
- [4] Türk Loydu Kuralları, Yüksek Hızlı Tekneler, Cilt C, Kısım7, 2016
- [5] Zukunft, P.F., Diğerleri, High Speed Aluminum Vessels Design Guide, SSC-464 2012.
- [6] McCarthy, R., Diğerleri, Fatigue Of Aluminum Structural Weldments, SSC-410 2000.
- [7] Kabakçioğlu, F., Palmgren-miner Yöntemi İle Semi-swath Tipi Alüminyum Bir Teknenin Yorulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, FBE, 2012.
- [8] Wiki Books Advanced Structural Analysis/ Part I- Theory/ Failure Modes/ Fatigue Crack Initiation/ The Wöhler Curve.
https://en.wikibooks.org/wiki/Advanced_Structural_Analysis/Part_I_-_Theory/Failure_Modes/Fatigue/Crack_Initiation/The_W%C3%B6hler_Curve
- [9] Wægter, J., Fatigue Design Based on S-N Data, Note 2.1, April 2009
<http://homes.civil.aau.dk/lda/Advanced%20Structural%20Engineering/Fatigue%20design%20based%20on%20S-N%20data.pdf>
- [10] ABS, Guide For Spectral-Based Fatigue Analysis For Floating Production, Storage And Offloading (FPSO) Installations, May 2010.
- [11] DNV-GL Class Guideline, DNVGL-CG-1029, Fatigue Assesment Of Ship Structures, October 2015.

- [12] Wolfgang Fricke, Fatigue and Fracture of Ship Structures, Hamburg University of Technology (TUHH), 2017.
- [13] Simpson, M.W., McCord R.S., teaching Ship Structure With Maestro, 122.ASSE Annual Conference And Exposition, June 2015.
- [14] Hughes,. Diğerleri Unified First-Principles Ship Structural Design Based On The MAESTRO Methodology.

