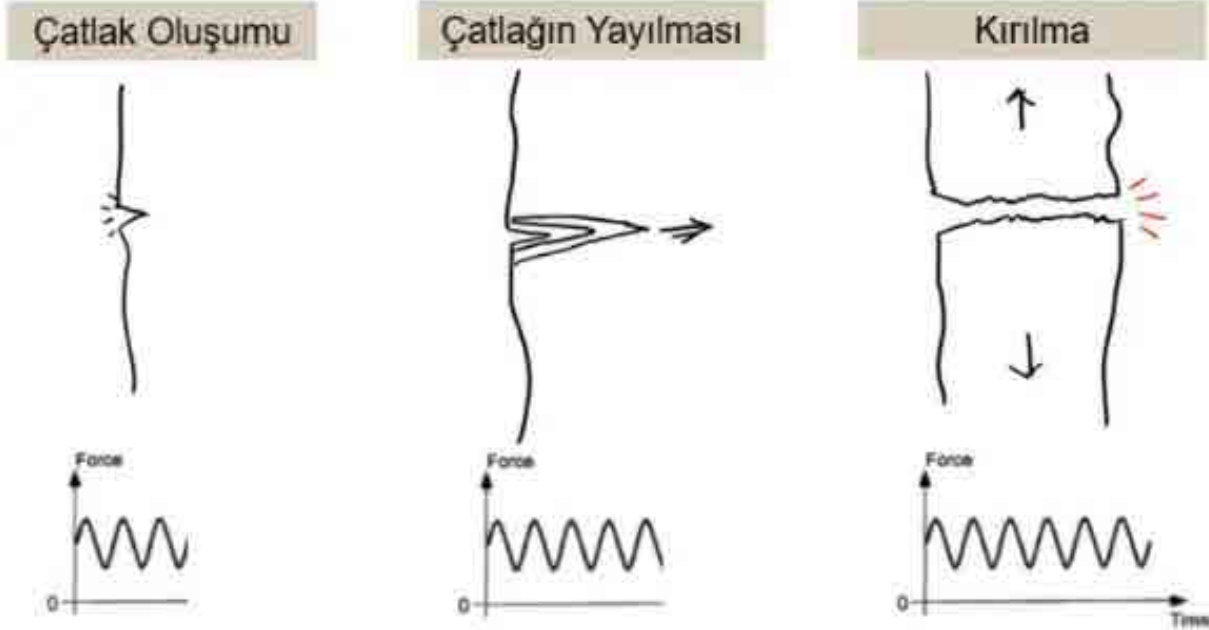


TEKNİK DOKÜMAN



CAEfatigue

Bu dokümanda CAEfatigue ile frekans düzleminde yorulma analizi ve teorik temelleri ele alınmıştır.



CAEfatigue ile Frekans Düzleminde Yorulma Analizi

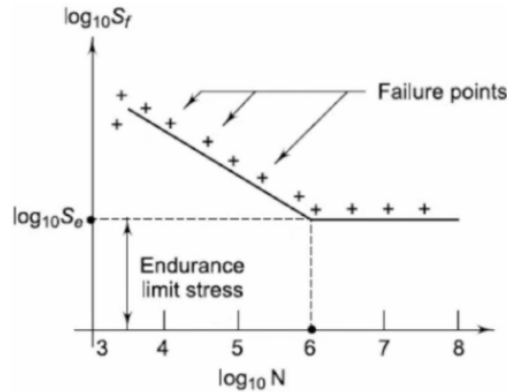
HAZIRLAYAN
Betül ABLAY Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih : 27 / 11 / 2025

Yorulma, tek seferde uygulandığında hasara yol açmayan ancak tekrarlı yükler altında malzemede çatlak veya kırılma oluşmasına neden olan bir olgudur. Dr. Neil Bishop tarafından 2013 yılında geliştirilen CAEfatigue [1], Mart 2020’de MSC Software bünyesine katılmış olup; yorulma, rassal cevap, yük yönetimi ve test tasarımı için kapsamlı çözümler sunmaktadır. Program, CF Time, CF Random, CF Frequency, CF Premium ve PSD veri tabanı modülleriyle özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik yazıda, CAEfatigue ile frekans düzleminde yorulma analizi teorik temelleriyle ele alınacaktır.

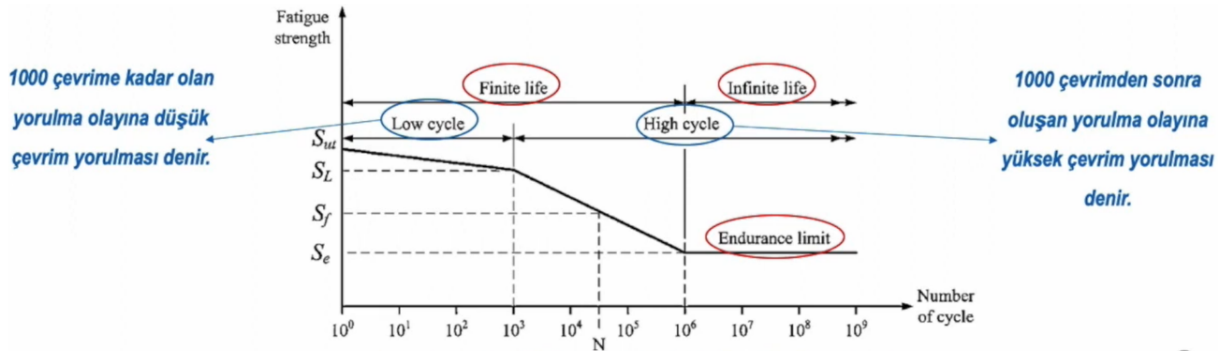
1. Yorulma Nedir?

Tekrarlı yükler altında çalışan makine ve yapı elemanlarında oluşan gerilmelerin (tekrarlı gerilmeler), parçanın statik dayanımından düşük olmalarına rağmen belirli bir tekrarlı sayı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlak ve bunu takip eden kırılma olayına yorulma denir. Çatlağın ucundaki çentik lokal gerilme yığılmasına neden olur. Böylece çatlağın ucu tekrarlı plastik deformasyona uğrar. Ömrün büyük kısmı ilk çatlağın oluşmasına kadar geçen sürede harcanır. Bu grafiklere S-N eğrisi / diyagramı (stress vs. number of cycles) veya bulan kişiye atfen Wöhler eğrisi / diyagramı denir. X eksenini çevrim sayısını gösterirken, Y eksenini gerilme genliğini göstermektedir.



Şekil 1. Gerilme - Çevrim Sayısı Grafikleri

“Endurance” limit değeri veya altındaki gerilme değerlerinde malzeme hasara uğramaz. Dolayısıyla bu gerilme değerleri için malzemenin sonsuz ömre (sürekli mukavemet) sahip olacağı ve başka bir deyişle bu limit değerin üstündeki gerilmelerde malzemenin sonlu ömre (zamana bağlı mukavemet) sahip olacağı kabul edilmektedir.



Şekil 2. Yorulma Dayanımı – Çevrim Sayısı Grafikleri

Yorulmanın Aşamaları

Değişken genlikli yüklemeye maruz kalan bir elemanda, yorulma olayı üç aşamada meydana gelmektedir:

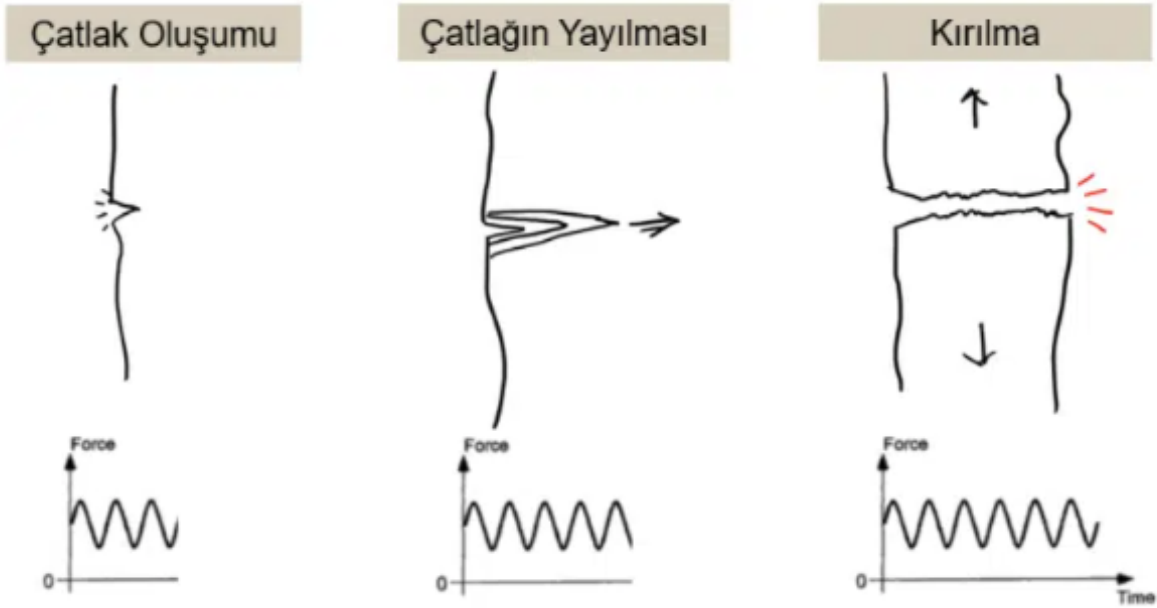
- I. Çatlak oluşumu
- II. Çatlak ilerlemesi
- III. Kırılma

Belirgin bir değere sahip olmayan malzemelerde yorulma dayanımı belirli çevrim sayılarına denk gelen gerilme değerleri referans alınarak belirlenir. Bu durum literatürde; şekil değiştirme sertleşmesi, atomsal titreşimler, dislokasyon hareketi vs. gibi farklı teorilerle açıklanmaktadır.

Tekrarlı yüklemeye maruz kalan bir elemanda, mikroskobik boyutta bir çatlak oluşumu, bunu takiben makroskobik boyutta bir çatlak ilerlemesi ve yorulma ömrünün sonunda kırılma ile meydana gelen bu süreç, malzemenin toplam yorulma ömrünü oluşturmaktadır.

Malzemelerde yorulma, kayma bantlarında mikro çatlakların oluşmasıyla başlar ve çatlak oluşumu toplam ömrün büyük kısmını kapsar. İki aşamada da birbirinden farklı tahmine dayalı metotlar kullanılmaktadır. Bu yüzden yorulmada çatlak oluşumu ve yorulma çatlak ilerlemesi aşamalarının ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Ayrıca bir diğer önemli nokta yorulmanın tersinmez bir olay olmasıdır. Malzemede yorulma olayı gerçekleşirken, yeni açılan yüzeylerde oksitlenme meydana gelmektedir.

Bunun yanında uygulanan yük sonucu oluşan hareket ile deformasyon sertleşmesi meydana gelmektedir. Yani, bir tam çevrim yüklemekten sonra malzemenin tamamen eski haline dönmesi söz konusu değildir. Bir malzemede mikro çatlak oluşuktan sonra, çatlak yük eksenine ile 45° oluşturacak şekilde ilerler ve sonrasında çatlak 90° ilerlemektedir. Bu esnada çatlak ucunda gerilme yığılması oluşur ve sonucunda birden fazla kayma sistemi devreye girmektedir. Yorulma olayının sonunda da yorulmaya maruz kalan malzemenin kesiti artık yük taşıyamadığından kırılma olayı gerçekleşmektedir.



Şekil 3. Parçanın Kırılma Süreci

Yorulma Ömrü Hesaplaması

Gerçek yapılara uygulanan çevrimsel yükün değişkenliği ve karmaşıklığı nedeniyle yapıların yorulma ömrünü tahmin etmek genellikle zordur. Yorulma ömrü hesaplanmasında en çok kullanılan üç yöntem şunlardır;

- **S-N (Stress-Life, Wöhler Curve):** Genel kesit veya lokal elastik gerilmeyi toplam ömürle ilişkilendirmektedir. Genellikle, yüksek sayıda tekrar (10^6) ile stres akma dayanımının altında olduğu durumlarda kullanılmaktadır. S-N metodu lineer gerilim üzerinden hesaplanmasına rağmen, yorulma çatlak ucundaki plastik kesme geriniminden kaynaklanır. Malzeme kırılana kadar testi yapılarak elde edilmektedir.
- **$\epsilon - N$ (strain – life):** Lokal gerinim değerini çatlak başlangıcı ile ilişkilendirir. Çatlak başlangıcına kadar malzeme testi yapılmaktadır. Genelde her bölgede kullanılmaktadır.
- **LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics, Crack Propagation):** Doğrusal elastik kırılma mekaniği, elastik cisimlerdeki keskin çatlaklarla ilgilenen oldukça basitleştirilmiş ancak sofistike bir teoridir. Çatlağın ilerlemesini gerilme yoğunluğu ile değerlendirmektedir.

2. Frekans Düzleminde Yorulma Analizi Temelleri

Frekans tabanlı yorulma analizi, zaman düzlemi yerine frekans spektrumları üzerinden çalışarak malzemenin yorulma ömrünü tahmin etmeye odaklanır. Bu yaklaşımda, Power Spectral Density (PSD) verileri kullanılarak titreşim yükleri frekans düzleminde modellenir ve gerilme yanıtları doğrudan spektral yöntemlerle hesaplanır.

Zaman tabanlı analizlerde yük geçmişi doğrudan kullanılırken, frekans tabanlı yaklaşımda sistemin rastgele titreşim davranışı istatistiksel yöntemlerle ifade edilir. Bu sayede, yüksek çevrimli yorulma senaryolarında daha hızlı ve hesaplama açısından verimli sonuçlar elde edilir.

PSD Nedir?

Power Spectral Density (PSD), rastgele titreşim yüklerinin frekans düzleminde enerji dağılımını tanımlayan matematiksel bir fonksiyondur. Frekans tabanlı yorulma analizlerinde PSD, zaman düzlemindeki titreşim verilerinin frekans düzlemine dönüştürülmesiyle elde edilir ve birim frekans başına titreşim enerjisini ifade eder.

PSD'nin Temel Mantığı

- Zaman düzleminde ölçülen ivme, hız veya kuvvet sinyalleri doğrudan yorulma hesabı için yeterli değildir.
- Bu sinyaller Fourier dönüşümü ile frekans düzlemine çevrilir.
- PSD, bu dönüşüm sonucu elde edilen verilerden türetilerek, belirli bir frekansta titreşim enerjisinin yoğunluğunu gösterir.

PSD ve Frekans Tabanlı Yorulma Analizi

CAEfatigue yazılımında, PSD verilerini kullanarak titreşim altında yorulma ömrünü hesaplar:

1. **Girdi PSD** → Dış yüklemelerin rastgele titreşim spektrumları tanımlanır.
2. **Modal Analiz Sonuçları** → MSC Nastran veya Apex üzerinden doğal frekanslar ve mod şekilleri alınır.

3. **Stres PSD Hesaplama** → Modal sonuçlarla giriş PSD birleştirilir, gerilme yanıt spektrumları elde edilir.
4. **Yorulma Ömrü Hesaplama** → Stres PSD sonuçları, S-N eğrileri ve hasar modeli ile birleştirilerek parça ömrü hesaplanır.

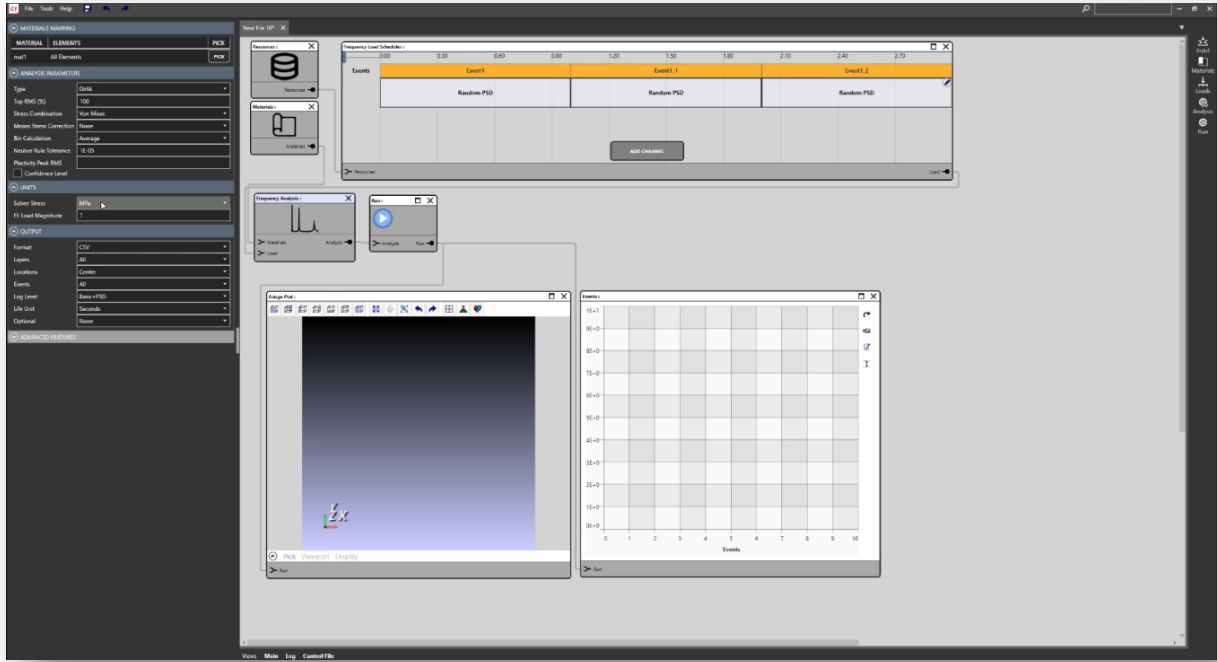
PSD'nin Frekans Tabanlı Analizde Sağladığı Avantajlar

- **Hız:** Zaman düzlemine göre çok daha kısa çözüm süreleri sağlar.
- **Doğruluk:** Rastgele titreşim yükleri altında yorulma ömrünü hassas biçimde tahmin eder.
- **Veri Verimliliği:** Büyük zaman serileri yerine özet PSD eğrileriyle çalışılır.
- **CAEfatigue Entegrasyonu:** MSC Nastran, Apex ve Adams ile birlikte otomatik analiz akışını destekler.

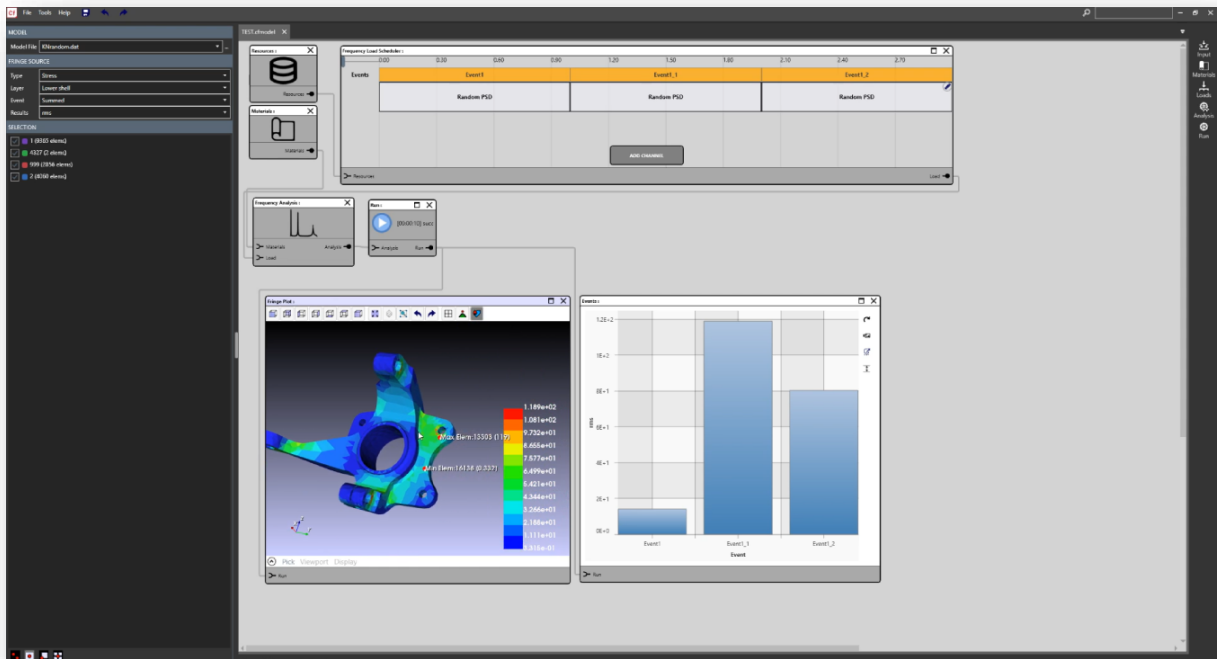
3. CAEfatigue Arayüzü

CAEfatigue, zaman ve frekans düzleminde, gerilme (stress) ve birim şekil değiştirme (strain) sonuçlarını kullanarak yorulma hesabı yapabilen bir çözücüdür. Büyük modellerin yorulma analizleri, kolaylıkla ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Yapılacak analiz statik, dinamik, modal süperpozisyon veya frekans alanında olabilmektedir. Ek olarak, kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir.

Gerçekleştirilmek istenen analize göre CAEfatigue içerisinde birçok iş akışı ve şablonu bulunmaktadır. Örnek olması adına, "Base Shake Input PSD" şablonuna ait analizde, tek bir sarsıcıdan gelen sinyalin, girdiye (input) bağlı bir iş akış örneğine ait görseller Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Kullanıcı, bu tarz şablonları, analiz türüne bağlı sekmelerden ("Base Shake Input PSD Template" → File- New – Processes Flow – Frequence Domain) açarak, sonlu elemanlar kısmından gelen sonuç dosyalarını girdi olarak besledikten sonra CAEfatigue içerisinde bulunan S-N ya da E-N malzeme veri tabanını girdi olarak vermesi gerekmektedir. Sonraki aşamada, yapıya uygulanacak yük spektrumları da girdi olarak verilip, analiz sonuçları hızlı şekilde elde edilebilmektedir.



Şekil 4. CAEfatigue Arayüzünde “Base Shake Input PSD” Şablonu



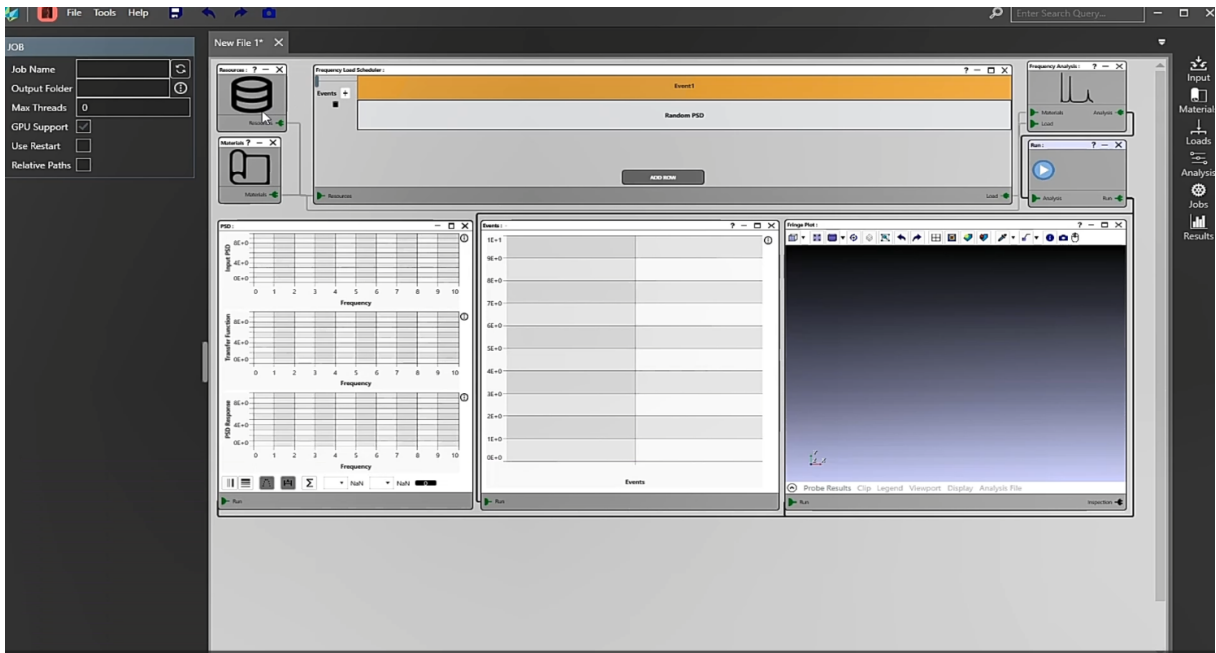
Şekil 5. CAEfatigue Arayüzünde “Base Shake Input PSD” Şablonu Örneğine Ait Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

4. Örnek Analiz Çalışması

Bu bölümde, CAEfatigue yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen örnek bir yorulma analizi gösterilmiştir. Çalışmada, frekans tabanlı (PSD) yorulma analizi adım adım uygulanarak, titreşim kaynaklı yorulmaların hızlı ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Örnek analizde, CAEfatigue'in "Vibration/Frequency Domain Fatigue" modülü kullanılmıştır ve bu yaklaşım sayesinde zaman tabanlı çözümlere kıyasla çok daha kısa sürede güvenilir ömür tahminleri elde edilmiştir.

Sonraki aşamada, CAEfatigue yazılımına model ve analiz sonuç dosyalarının yüklenmesi gösterilmektedir. "Resources" sekmesi üzerinden .bdf, .h5, .op2 gibi model ve sonuç dosyaları yazılıma kolayca içeri aktarılabilmektedir.

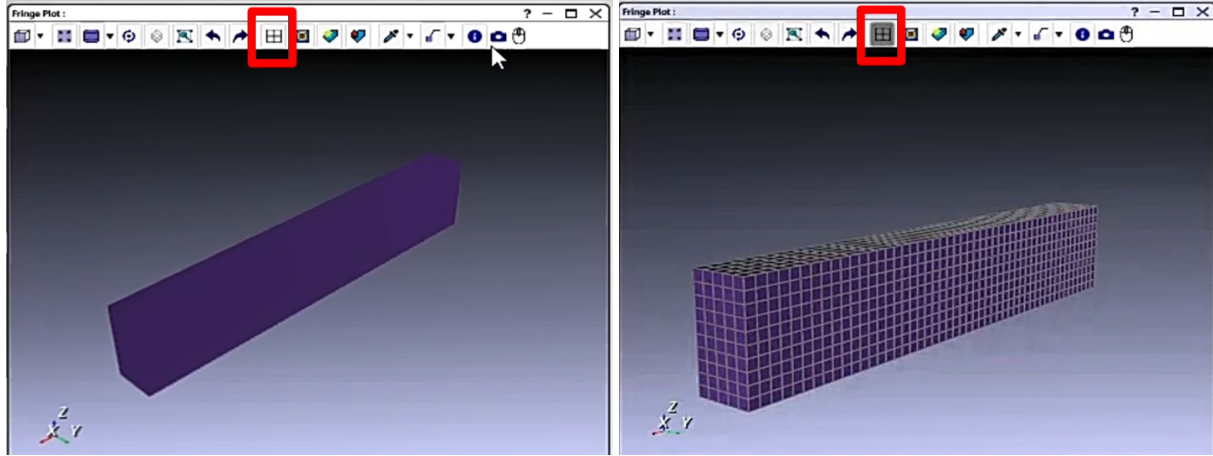


Şekil 6. CAEfatigue Arayüzünde "Vibration/Frequency Domain Fatigue" Modülünün Şablonları

Öncesinde yapının frekans cevap analizi MSC Nastran üzerinden gerçekleştirilmiş ve bu analiz sonucunda transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Elde edilen bu transfer fonksiyonu, CAEfatigue'in hazır şablonları aracılığıyla kullanılarak frekans tabanlı yorulma analizi yapılabilmektedir.

Bu yöntemle, titreşim kaynaklı yorulmaların hızlı, doğru ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi sağlanılmaktadır.

“Fringe Plot” penceresinde modelinizin sonlu elemanlar ağı (mesh) görünümünü aktif edilebilmektedir. Şekil 7’de gösterilmektedir.



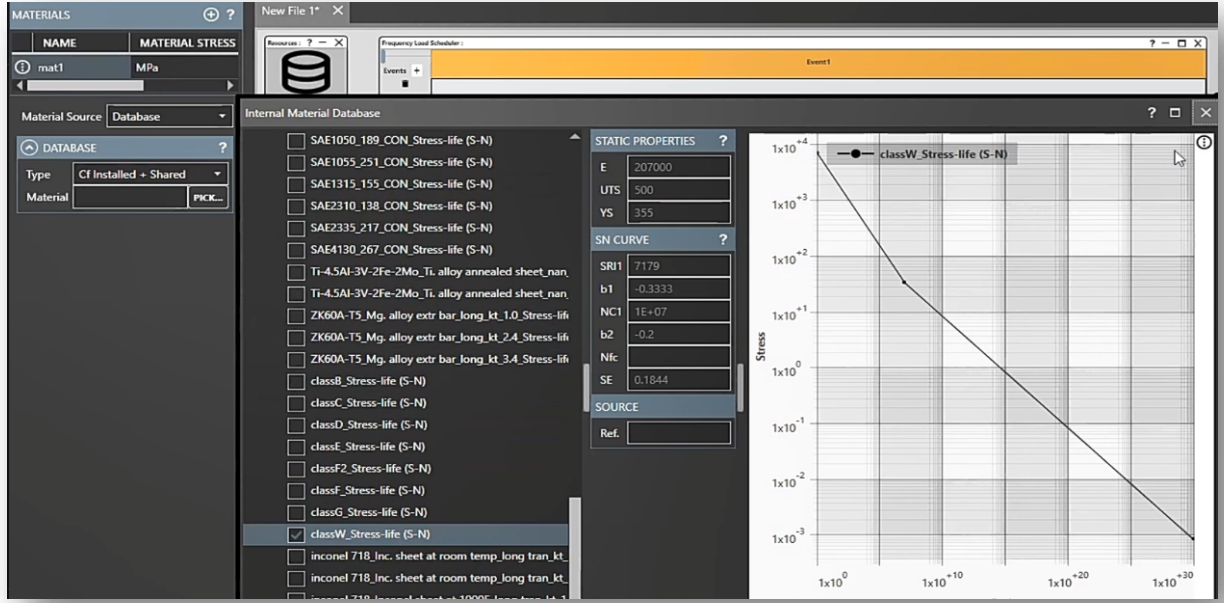
Şekil 7. CAEfatigue Arayüzünde “Fringe Plot” Penceresi

Frekans tabanlı yorulma analizlerinde doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için malzeme özelliklerinin eksiksiz ve doğru bir şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır. CAEfatigue yazılımında malzeme tanımlama işlemi, arayüzde bulunan “**Materials**” sekmesi üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Bu aşamada kullanıcılar iki farklı yöntem izleyebilir:

- **Manuel Tanımlama:** Kullanıcı, analizde kullanılacak malzemeye ait **S-N (Gerilme – Ömür)** veya **E-N (Şekil Değiştirme – Ömür)** eğrilerini kendi deneysel verileri doğrultusunda oluşturabilir.
- **Hazır Kütüphane Kullanımı:** CAEfatigue içerisinde yer alan “**Database**” bölümü üzerinden, standart malzeme özellikleri barındıran hazır veri tabanına erişilerek, analizde kullanılacak malzeme doğrudan seçilebilir.

Malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması, CAEfatigue tarafından gerçekleştirilen yorulma ömrü tahminlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma gibi yüksek güvenilirlik gerektiren sektörlerde, hazır malzeme kütüphanesi analizi hızlandıran ve kullanıcı hatasını en aza indiren önemli bir avantaj sağlamaktadır.



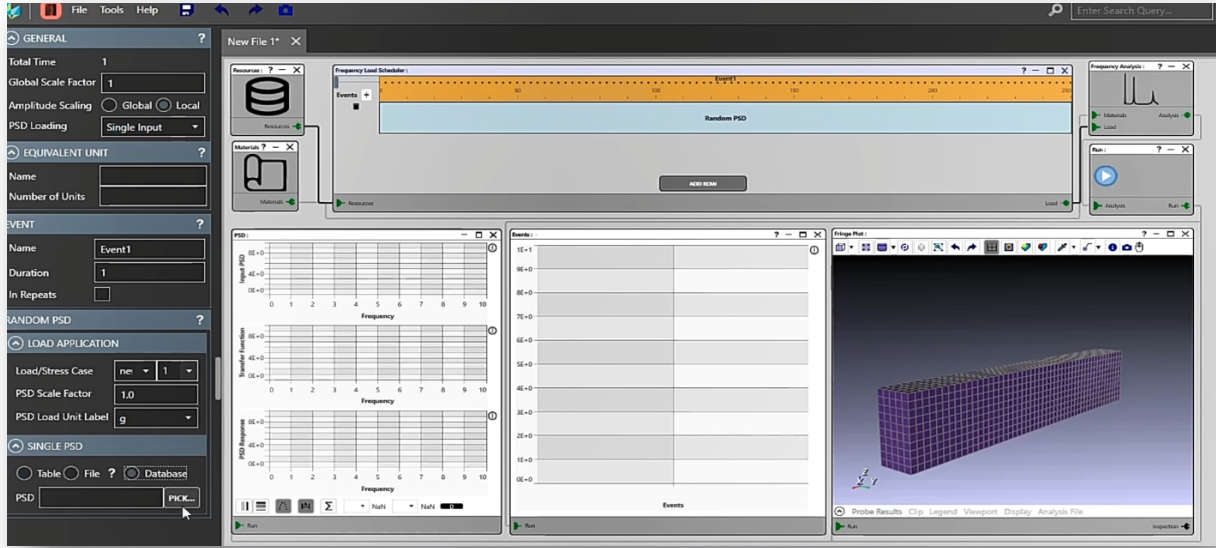
Şekil 8. CAEfatigue Arayüzünde “Internal Material Database” Penceresi

Frekans tabanlı yorulma analizlerinde, titreşim yüklerinin tanımlanabilmesi için PSD verilerinin sisteme doğru bir şekilde girilmesi gerekmektedir. CAEfatigue yazılımında bu işlem, arayüzde yer alan “**Frequency Load Scheduler**” penceresi üzerinden gerçekleştirilmektedir.

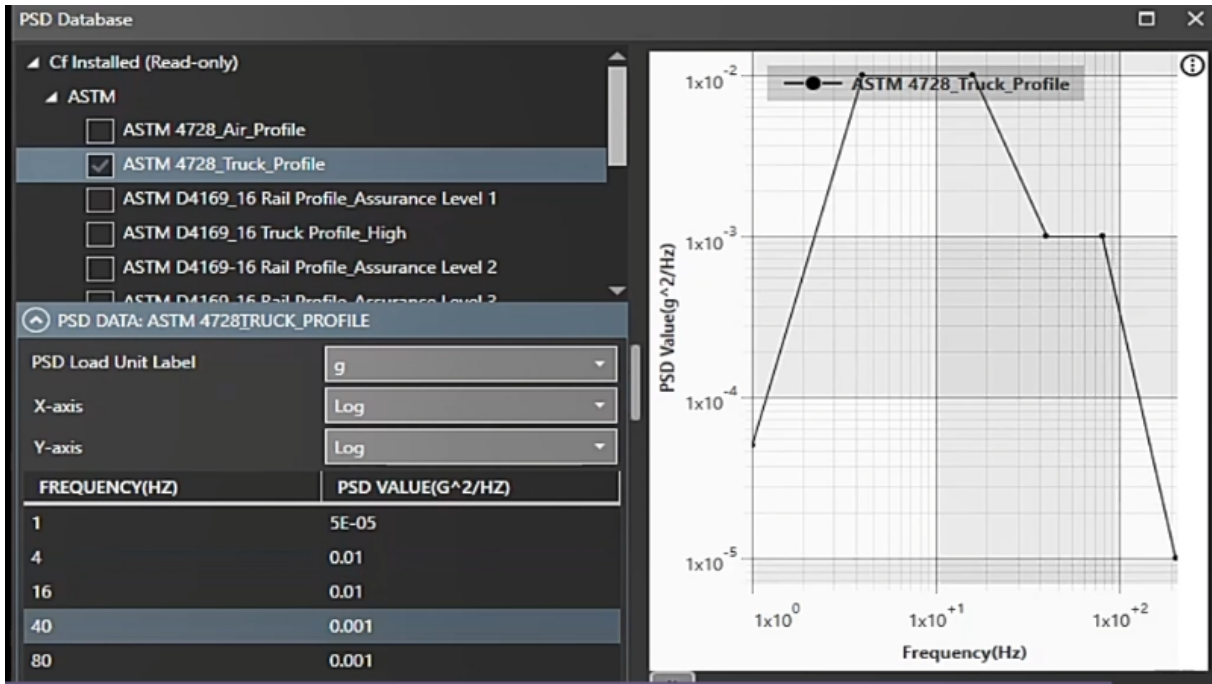
Kullanıcı, PSD verilerini üç farklı yöntemle tanımlayabilir:

- **Manuel Giriş:** “Table” seçeneği kullanılarak frekans ve genlik değerleri doğrudan yazılım arayüzüne girilebilir.
- **Dış Veri Aktarımı:** “File” seçeneği aracılığıyla, Excel veya benzeri formatlardaki hazır PSD verileri yazılıma aktarılabilir.
- **Hazır Veri Tabanı Kullanımı:** Yazılım içerisindeki “**Database**” bölümünde yer alan, standartlara uygun PSD profilleri doğrudan seçilebilir.

Bu yöntemler sayesinde, titreşim yükleri frekans ekseninde doğru şekilde tanımlanarak CAEfatigue’in gerilme, hasar hesaplaması ve yorulma ömrü tahmini için gerekli temel veri seti oluşturulur. PSD’nin doğru tanımlanması, analiz doğruluğunu doğrudan etkileyen kritik bir adımdır.



Şekil 9. CAEfatigue Arayüzünde “Frequency Load Scheduler” Penceresi



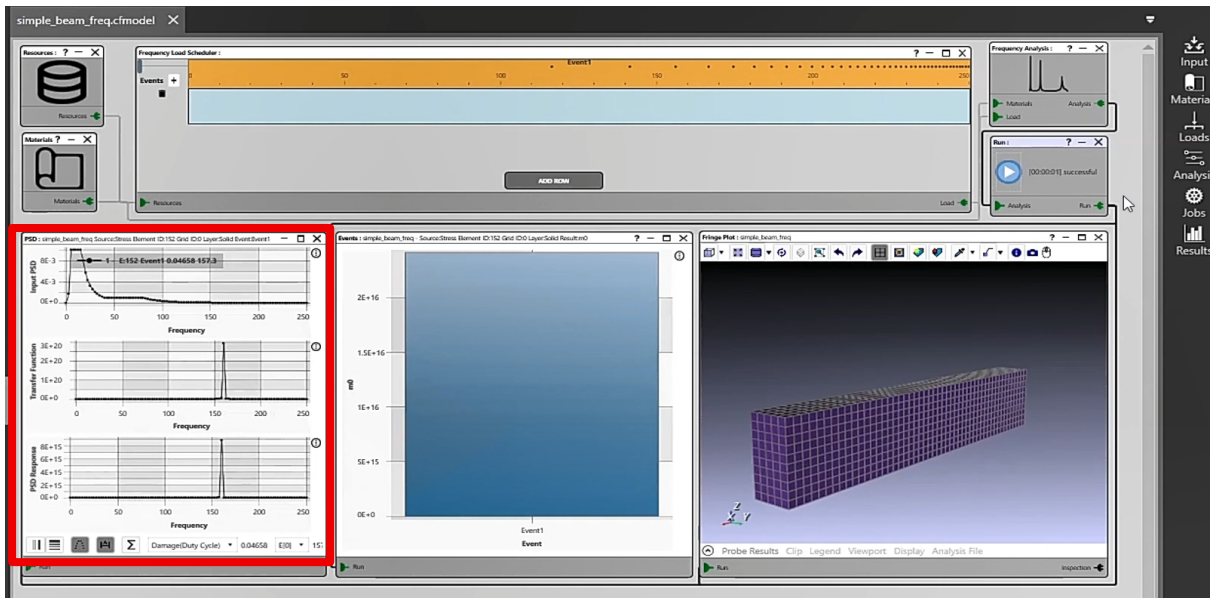
Şekil 10. CAEfatigue Arayüzünde “PSD Database” Penceresi

PSD tanımlaması yapıldıktan sonra “Frequency Analysis” penceresi üzerinden analiz parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamada, “Analysis Parameters” sekmesinden analiz tipi, gerilme kombinasyonu ve kullanılacak hesaplama yöntemleri seçilmektedir.

Analiz tipi seçiminde, Dirlik, Narrow Band, Sines, Steinberg gibi yöntemler tercih edilebilir. Dirlik yöntemi, rastgele titreşim altında yorulma analizi için en yaygın kullanılan formülasyondur ve yüksek doğruluk sağlamaktadır. Gerilme kombinasyonu bölümünde ise Signed Von Mises, Absolute veya diğer gerilme değerlendirme kriterleri belirlenebilir. Ayrıca, aynı sekmede bulunan “Units in FE Results File” bölümü üzerinden, Nastran veya diğer çözücülerden gelen sonuç dosyalarındaki birimlerin (ör. MPa, N, mm vb.) CAEfatigue ile uyumlu olacak şekilde tanımlanması gerekir. Bu adım, analiz sırasında hesaplama tutarlılığını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu parametrelerin doğru yapılandırılması, CAEfatigue’in stresi doğru hesaplamasına, PSD verilerini doğru şekilde işlemesine ve yorulma ömrü tahminlerini güvenilir biçimde elde etmesine olanak tanımaktadır.

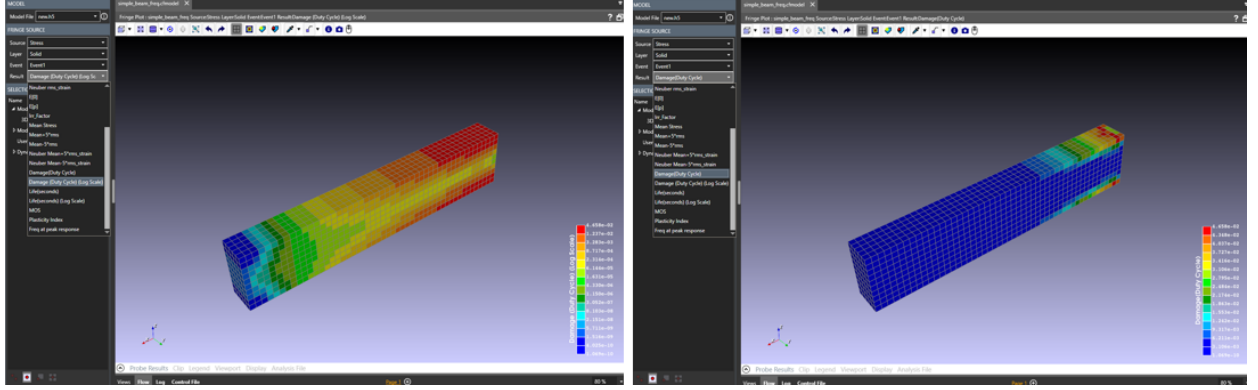
Analiz için bütün tanımlamaları yapıldıktan sonra “Run” penceresine tıklanır ve modelinizi kaydetmek istediğiniz lokasyonu belirtilerek, analiz koşturulmaktadır.

Analiz sonucunda elde edilen PSD grafiklerini incelenebilir. Bu grafikler üzerinden PSD giriş verilerini, transfer fonksiyonlarını ve “PSD Response” görüntülenebilmektedir.



Şekil 11. CAEfatigue Arayüzünde Analiz Sonucunda Elde Edilen “PSD Grafikleri”

“Results” sekmesinde görüntülenmek istenen tüm sonuçlar, “Fringe Plot” penceresi üzerinden incelenmektedir. Yapının PSD yükü altındaki toplam ömrü, “Life” sekmesi aracılığıyla görüntülenebilir. Yapıdaki hasar durumunu analiz edebilmek için, “Damage (Duty Cycle)” seçeneği işaretlenerek ilgili bölgelerde oluşan hasar detaylı şekilde incelenmektedir. Ayrıca, “Mean Stress” ve benzeri diğer sonuçlar da aynı “Fringe Plot” penceresi üzerinden değerlendirilmektedir.



Şekil 12. CAEfatigue Arayüzünde “Fringe Plot” Penceresi

REFERANSLAR:

1. CAEfatigue 2024.1 User Guide