



Monte Carlo Simülasyon Yöntemi ile Dairesel Delikli Ankastr Kirişin Gerilme Yığılması Faktörüne Bağlı Güvenilirlik Analizi

Murat MAYDA

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 70100, Merkez/KARAMAN

Öz

Gerilme yığılması faktörü (SCF), ani geometri değişim bölgesindeki deneysel maksimum gerilmenin teorik nominal veya referans gerilmeye oranı olarak bilinmektedir. Son zamanlarda, SCF'nin belirsizlik altında incelenmesi yoğun ilgi gören bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, rasgele tasarım parametrelerine sahip dairesel delikli bir ankastr kirişin çekme gerilmesi altında SCF'nin istatistiksel analizi, deterministik ve stokastik akma dayanımına göre güvenilirlik analizi ve çıktılarının süreklilik gösteren istatistiksel özelliklerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın literatüre özgün katkıları olarak SCF ve nominal gerilmeye ait istatistiksel özelliklerin modellenmesiyle bilgisayar maliyetinin azaltılabileceği ön görülmüştür. Böylece herhangi bir ara modele ve yüksek sayıda simülasyona ihtiyaç duymadan doğrudan güvenilirlik analizi gerçekleştirilebilir ve analiz süresi kısaltılarak bu işlem daha pratik hale getirilebilir. Ek olarak, ileriki çalışmalarda, burada sunulan stokastik yaklaşım diğer farklı geometri ve yüklere tabi kırımlarda da benzer şekilde uygulandığında belirsizlik altında güvenilir tasarım için elde edilebilecek genel bir SCF kılavuzu ortaya çıkarılabilir.

Reliability Analysis of A Cantilever Beam with Circular Hole Depending on Stress-Concentration Factor By Using Monte Carlo Simulation Method

Abstract

Stress-concentration factor (SCF) is known to be the ratio of the maximum experimental stress around the sudden change of the geometric shape to the theoretical nominal or reference stress. Recently, the investigation of SCF under uncertainty has received intensive attention. In this work, it is aimed to realize reliability analysis of a cantilever beam with a circular hole having random design parameters in consideration of deterministic and stochastic yield strength, and to model the common properties of the statistical characteristics of the outputs. As for the original contributions of this work to the literature, due to the modelled statistical characteristics of SCF and nominal stress, it is considered to reduce the computer cost. Moreover, it can be possible to directly realize reliability analysis without the necessity of an intermediate model and high number of simulations, and thus, to conduct this process in a more practical way by reducing the analysis period. Additionally, in the future works, when this stochastic approach followed in this work is applied to other beams with different geometries and exposed to different loadings, a guideline of SCF for reliable design under uncertainty can be obtained.

Makale Bilgisi

Başyuru: 18/10/2017

Düzeltilme: 18/12/2017

Kabul: 26/12/2017

Anahtar Kelimeler

Gerilme yığılması faktörü

Ankastr kiriş

Güvenilirlik

Monte Carlo Simülasyonu

Keywords

Stress Concentration Factor

Cantilever beam

Reliability

Monte Carlo Simulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir makine parçasındaki herhangi bir ani geometri değişimi (örneğin, mildeki kademeler, plakadaki delikler veya çeşitli çentik türleri) malzemenin bu bölgesinde oluşan gerilme dağılımını değiştirmektedir. Böyle durumlarda beklenen nominal gerilmeden daha yüksek bir gerilme ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan maksimum gerilme ile nominal gerilmenin oranı ise gerilme yığılması faktörü (SCF) olarak bilinmektedir. SCF, genellikle statik yüklemelerde sadece gevrek malzemelerde (kırılma uzaması $\epsilon_f < 0.05$); dinamik yüklemelerde ise hem sünek ($\epsilon_f \geq 0.05$) hem de gevrek malzemelerde dikkate alınmaktadır [1]. Fatura ve çentikler belirgin şekilde mekanik bileşenlerin yorulma ömrünü azaltmaktadır [2]. Bu yüzden SCF genellikle yorulma analizi çalışan araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir.

*İletişim yazarı, e-mail: mmayda@mmu.edu.tr

Örneğin, Ogeman ve ark. [3] yorulma değerlendirme kılavuzlarına dayalı olarak SCF'nin nasıl belirleneceğine yönelik farklı doğrudan hesaplama işlemlerini incelemişlerdir. Ayrıca yorulma ömrünü artırma amaçlı SCF'nin nasıl azaltılabileceği tartışılmıştır. Ye ve ark. [4] tipik çelik köprü T-bağlantıları üzerinde yaptığı deneysel çalışmada SCF dağılımının Normal dağılım olduğunu tespit etmişler ve sunulan bu istatistiksel bilginin ileriki yorulma güvenilirlik analizinde kullanılabileceğini ön görmüşlerdir. Benzer şekilde Ahmadi ve ark. [5], çok yönlü boru yapılarında SCF istatistiksel dağılımını sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlar ve en iyi uyan dağılımın ters Gaussian dağılımı olduğunu tespit etmişlerdir. Malzeme alanında ise Makki ve ark. [6] karbon elyaf takviyeli epoksi malzemenin SCF'sini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Ardından bu model esas alınarak SCF'nin güvenilirliği araştırılmıştır. Öte yandan literatürde ankastre kirişlerin çekme ve eğilme gerilmesi altında güvenilirlik analizi amaçlı birkaç çalışmaya da rastlanmıştır. Örneğin, Attajkani ve ark. [1], geometrik parametreleri değişken olan bir kare delikli ankastre kirişin çekme gerilmesi altındaki güvenilirlik analizini yapmışlardır. Analizde kare deliğin geometrik ölçüleri değişken kabul edilmiş ve bunlara çeşitli istatistiksel dağılım türleri atanarak SCF'ye dayalı başarısızlık değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak tasarım girdilerine lognormal dağılım türü atandığında daha güvenilir tasarımlar elde edileceğini iddia etmişlerdir. Kargar ve Bardot [7] dairesel delikli bir ankastre kirişin eğilme gerilmesi altında deneysel ve sayısal (sonlu elemanlar analizi) SCF belirsizliğini karşılaştırmışlardır. Burada belirsizlik analizinde Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemi kullanılarak SCF'nin istatistiksel özellikleri belirlenmiştir.

Literatürdeki taranan çalışmalar çoğunlukla boru bağlantılar, çeşitli profil bağlantıları, kompozit malzemeler ve ankastre kirişlerde belirsizlik durumunda SCF'nin nasıl bir dağılım gösterdiğine yönelik gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, belirsizliğe dayalı elde edilmiş SCF'nin parça, bileşen veya sistem üzerindeki belirli bir dayanım sınırına (akma dayanımı gibi) göre deterministik ve stokastik etkisini gösteren bir güvenilirlik analizi gerçekleştirilmesi bu alana daha detaylı bir katkı sunabilir. Bu yönde literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma, rasgele tasarım parametrelerine sahip dairesel delikli bir ankastre kirişin çekme gerilmesi altında SCF'nin istatistiksel analizi, deterministik ve stokastik akma dayanımına göre güvenilirlik analizi ve süreklilik gösteren istatistiksel özelliklerin modellenmesini amaçlamıştır. Modellenen istatistiksel özelliklerle bilgisayar maliyetinin azaltılabileceği ön görülmüştür. Makalenin geri kalanı şöyle organize edilmiştir: Bölüm 2'de SCF hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Bölüm 3'te belirsizlik altında güvenilirlik analizinin nasıl yapılacağı özetlenmiştir. Bölüm 4'te dairesel delikli bir ankastre kirişin çekme gerilmesi altında güvenilirlik analizi ve istatistiksel sonuçların modellenmesi anlatılmıştır. Bölüm 5'te ise araştırma sonuçları özetlenmiş ve tartışılmıştır.

2. GERİLİM YIĞILMASI FAKTÖRÜ (STRESS-CONCENTRATION FACTOR)

Gerilme yığılması faktörü (SCF); ani geometri değişim bölgesindeki maksimum gerilmenin teorik olarak bulunan nominal gerilmeye oranı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad 2.1$$

Burada σ_{max} , maksimum gerilme ve σ_{nom} ise nominal veya referans gerilmedir.

SCF değerinin, parça malzemesinden bağımsız olup doğrudan parça geometrisiyle ilgili olduğu bilinmektedir [1]. Bu durumda, SCF ve nominal gerilme biliniyorsa yukarıdaki bağıntı ile maksimum gerilme kolaylıkla bulunabilir. Pilkey W. ve Pilkey D. tarafından yayınlanan kitapta farklı geometri ve gerilme türlerine göre doğrudan SCF değeri veren analitik bağıntılar verilmiştir [8]. Bu araştırmacılar ise çalışmalarında Peterson'un gerilme yığılması faktörü [9] adlı çalışmasını esas almışlardır.

3. BELİRSİZLİK ALTINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ (RELIABILITY ANALYSIS UNDER UNCERTAINTY)

Belirsizlik altında güvenilirlik analizi genel olarak iki adımdan oluşmaktadır. Bunlar: değişkenlerin istatistiksel olarak tasvir edilmesi ve bir güvenilirlik analiz yöntemiyle sistemdeki belirsizlik durumunun incelenmesidir. Bu analiz sonucunda, belirsiz değişkenler içeren bir sistemin veya ürünün belirli koşullara

bağlı olarak başarısızlık veya güvenilirlik ihtimali hesaplanmaktadır. Bu değer genellikle 0 ile 1 aralığında veya yüzde 0 ile 100 aralığında ifade edilmektedir.

3.1 Değişkenlerin istatistiksel tasviri

Başlıca standart istatistiksel özellikler; ortalama (μ), standart sapma (σ_{std}), değişim (varyasyon) katsayısı (δ veya COV olarak gösterilir), basıklık ve çarpıklık olarak verilebilir. Bu çalışmada, rasgele değişkenlerin istatistiksel tasvirinde üç temel özellik olan ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayısı kullanılacaktır. Bu üç özellikten en az ikisi bilindiğinde üçüncü özellik basit şekilde aşağıdaki 3.1 nolu formülden bulunabilir.

$$\delta = \frac{\sigma_{std}}{\mu} \quad 3.1$$

Ek olarak, birden fazla belirsiz faktörün (örneğin ölçüm aletlerindeki sistematik hata (σ_{sis}) gibi) olduğu durumlarda genel standart hata veya sapma değeri aşağıdaki 3.2 nolu formülle hesaplanmaktadır. Benzer şekilde sistemdeki varsa diğer sistematik veya bilinen farklı hatalar da genel standart hata formülünde karekök içine karesi alınarak ilave edilebilir.

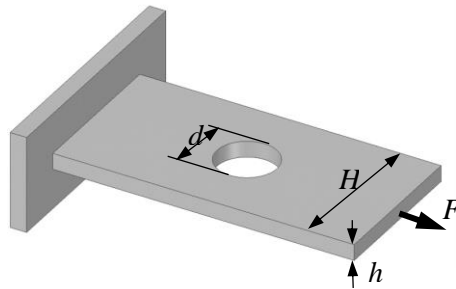
$$\sigma_{genel} = \sqrt{\sigma_{std}^2 + \sigma_{sis}^2 + L} \quad 3.2$$

3.2 Güvenilirlik analiz yöntemleri

Hâlihazırda kullanılan güvenilirlik analiz yöntemlerinden başlıcaları; Birinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (FORM), İkinci Dereceden Güvenilirlik Yöntemi (SORM), Monte Carlo Simülasyon (MCS) Yöntemi olarak verilebilir. Bu çalışma kapsamında MCS yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem, genel olarak belirsiz değişkenler için stokastik olarak rasgele değerler üretmek olasılıksal modeller oluşturmaya ve bu modellerden istatistiksel anlamlar çıkarmaya dayanmaktadır. Genel olarak işlem üç adımda gerçekleştirilir [10]. İlk olarak, fonksiyon veya sistemdeki belirsiz değişkenlerin dağılım türü belirlenir ya da bilinmiyorsa varsayılır (Gaussian, Gama, Weibull, Lognormal dağılım vb gibi). İkinci olarak, belirlenen bu dağılım türüne göre rasgele değerler içeren bir örneklem kümesi oluşturulur. Üçüncü olarak ise bu örneklem kümesi kullanılarak artan sayıda simülasyonlar gerçekleştirilir ve çıktı olarak elde edilen olasılıksal modelin istatistiksel yorumlanması veya amaca bağlı değerlendirme yapılmasıyla işlem tamamlanır.

4. DAİRESEL DELİKLİ ANKASTRE GİRİŞİN ÇEKME GERİLMESİ ALTINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ (RELIABILITY ANALYSIS OF A CANTILEVER BEAM WITH CIRCULAR HOLE EXPOSED TO TENSION STRESS)

Bu bölümde, rasgele tasarım parametreleri veya değişkenlerine sahip dairesel delikli bir ankastre girişin çekme gerilmesi altındaki SCF değişkenliği ve bu değişkenliğin maksimum gerilmeyi güvenilirlik açısından nasıl etkileyeceği incelenmiştir. Girişte kullanılacak rasgele değişken özelliği gösteren boyutsal (H, h, d) ve yük (F) tasarım parametreleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sonlu genişlikli ve dairesel delikli ankastre giriş parametreleri

Pilkey W. ve Pilkey D. [8]'e göre çekme gerilmesi altındaki sonlu genişlikli ve dairesel delikli bir ankastre kirişteki SCF değeri aşağıdaki bağıntı ile bulunabilmektedir.

$$SCF = 2 + 0.284 \cdot \left(1 - \frac{d}{H}\right) - 0.600 \cdot \left(1 - \frac{d}{H}\right)^2 + 1.32 \cdot \left(1 - \frac{d}{H}\right)^3 \quad 4.1$$

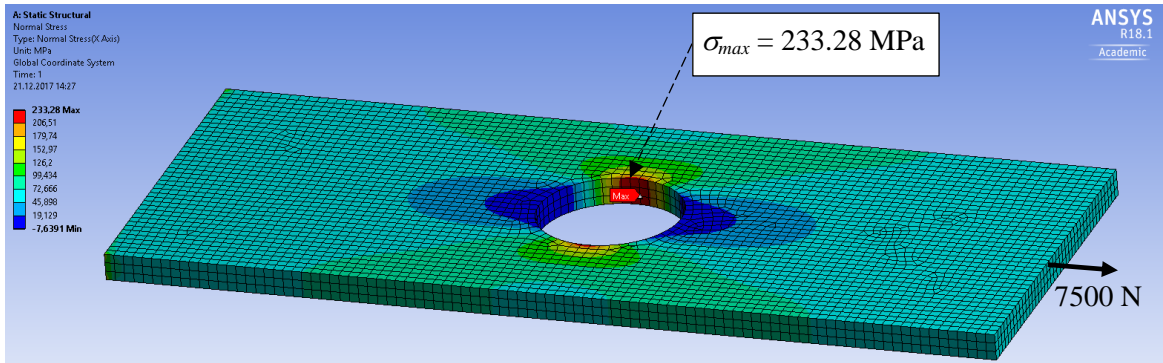
Bağıntıdan anlaşılacağı gibi, SCF değeri sadece genişlik (H) ve delik çapına (d) bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Çalışmada güvenilirlik analizinde 4.1 nolu bağıntı kullanılmıştır. Ancak daha hassas ve güvenilir sonuçlar için öncelikle bu teorik bağıntının doğrulaması yapılmıştır. Bu amaçla parça üzerindeki nominal çekme gerilmesi, bilinen teorik çekme gerilmesi formülü ile hesaplanmış ve ANSYS'te sonlu elemanlar yöntemiyle delik etrafındaki deneysel maksimum normal gerilme bulunmuştur. Sonuç olarak ise deneysel maksimum normal gerilmenin teorik nominal gerilmeye oranı ile bir SCF değeri hesaplanmıştır. Örnek olarak, kiriş için varsayılan başlangıç parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kiriş tasarım parametreleri ve başlangıç değerleri

Tasarım parametresi	Başlangıç değeri
Genişlik (H), mm	40
Kalınlık (h), mm	3
Delik çapı (d), mm	16
Kuvvet (F), N	7500

Teorik maksimum nominal çekme gerilmesi, $\sigma_{nom} = \frac{F}{A} = \frac{F}{(H-d) \cdot h} = \frac{7500}{(40-16) \cdot 3} = 104.17$ MPa

bulunmuştur. Deneysel maksimum çekme gerilmesini bulmak için ankastre kiriş verilen ölçülerde ANSYS yazılımıyla modellenmiş ve kirişin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



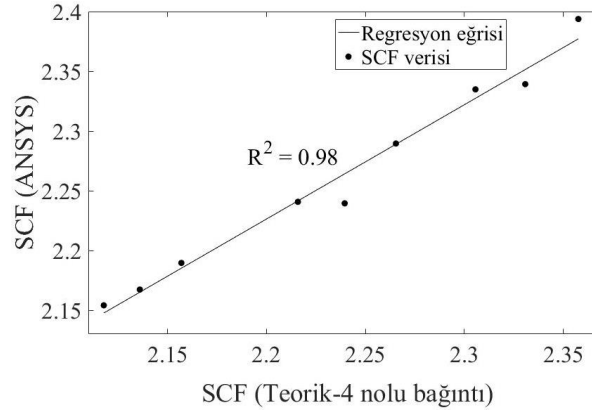
Şekil 2. Sonlu elemanlar analiziyle elde edilen maksimum normal gerilme

Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen maksimum normal gerilme 233.28 MPa bulunmuştur. Bu durumda, SCF, deneysel maksimum gerilmenin teorik maksimum gerilmeye oranı ($233.28 \text{ MPa} / 104.17 \text{ MPa} = 2.2394$) ile basit şekilde hesaplanabilir. Aynı ölçülerde 4.1 nolu teorik bağıntıya göre hesaplanan SCF değeri, 2.2395 bulunmuştur. Sonlu elemanlar ve 4.1 nolu bağıntı ile bulunan SCF değerleri, yaklaşık % 0.004 gibi bir hata payı ile çok yüksek uyumluluk göstermiştir. Bununla birlikte daha hassas bir doğrulama için tam faktöriyel yöntemi kullanılarak 3 seviyeli H ve d tasarım parametrelerinden toplam 9 tasarım kombinasyonu oluşturulmuş ve karşılık gelen SCF değerleri teorik bağıntı ve sonlu elemanlar yöntemi ile ayrı ayrı bulunmuştur. Bu tasarım parametrelerine ait değer aralıkları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. 4.1 nolu bağıntıyı doğrulamada kullanılan tam faktöriyel yöntem için aralık değerleri

Faktörler	Sınır değerleri		Seviye
	Min	Max	
H	30	50	3 (30, 40, 50)
d	15	17	3 (15, 16, 17)

4.1 nolu bağıntı ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen SCF değerlerinin regresyon analizi sonucunda 0.98'lik bir R^2 değeri ile örtüştüğü ortaya çıkmaktadır (Şekil 3). Bu sonuçtan yola çıkarak 4.1 nolu bağıntının yeterli doğrulukta SCF değerleri ürettiği söylenebilir.



Şekil 3. 4.1 nolu bağıntı ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen SCF değerlerinin regresyon analizi

Teorik SCF bağıntısının doğrulanmasının ardından güvenilirlik analizi için ilk adım, değişkenlerin istatistiksel özelliklerini belirlemektir. Bu amaçla, Kargar ve Bardot [2010]'un deneysel olarak elde ettiği ölçümlerdeki hatalar dikkate alınarak eğri uydurma yöntemlerinden üstel yöntemeye dayalı yeni bir bağıntı bulunmuştur (Bağıntı 5).

$$\delta_m = a \cdot e^{b \cdot m}$$

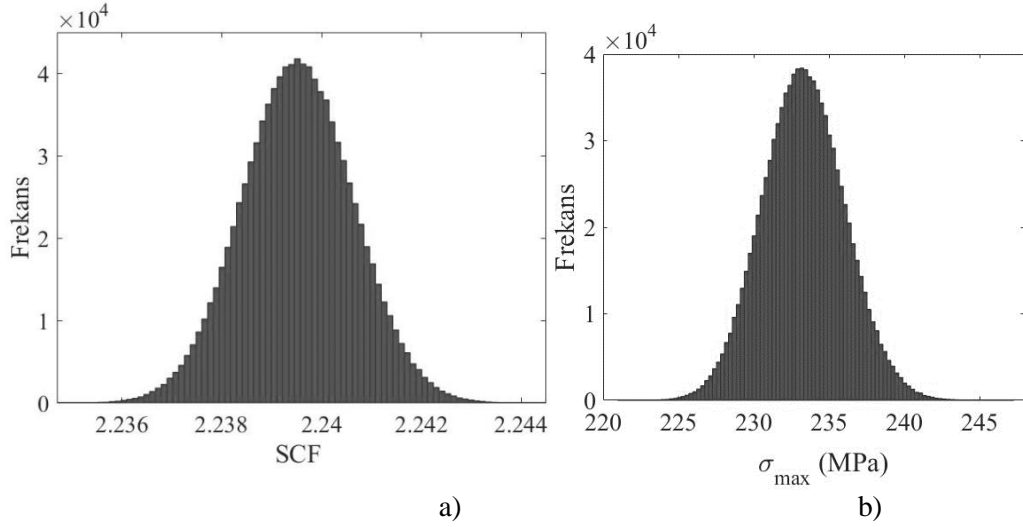
4.2

Formüldeki a ve b değerleri sırasıyla 0.01607 ve -0.1096'dır. Bu bağıntı ile herhangi bir m ölçümünün değişim katsayısı (δ_m) bulunabilmektedir. Böylece ortalama değeri bilinen bir ölçüm değişkeninin standart sapması kolayca bulunabilir. Bağıntı 5 dikkate alınarak başlangıçta verilen ortalama tasarım parametrelerine karşılık gelen değişim katsayısı ve standart sapmalar Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda ayrıca Kargar ve Bardot [7]'a göre her tasarım parametresi için verilen sistematik hatalar ve sonuç olarak hesaplanan genel standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Tasarım parametrelerine ait istatistiksel özellikler

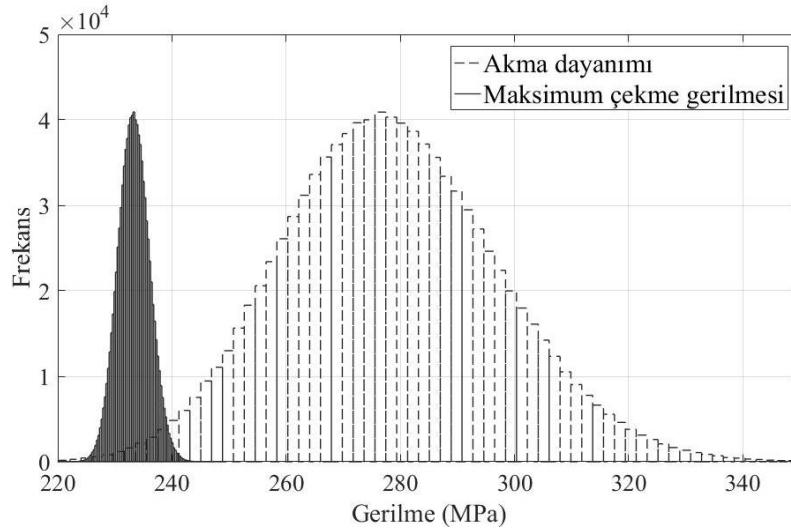
Tasarım parametresi	Ortalama, μ	COV, δ	Standart sapma, σ_{std}	Sistematik sapma, σ_{sis}	Genel standart sapma, σ_{genel}
H	40	0.0002	0.008	0.003	0.008544
h	3	0.0116	0.0348	0.003	0.034929
d	16	0.0028	0.0448	0.003	0.0449
F	7500	0.00056	4.2	0.01	4.200012

İstatistiksel özellikleri belirlenmiş olan tasarım parametreleri için, MCS yöntemi ile güvenilirlik analizinde Normal veya Gaussian olarak bilinen dağılım türü seçilmiştir. Her dört parametre için MCS ile 1,000,000 simülasyon yapıldığında karşılık gelen SCF ve maksimum çekme gerilmesi dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Dağılımlar incelendiğinde her iki çıktının da simetrik özellik gösteren Normal dağılım türüne uygun olduğu ortaya çıkmıştır.



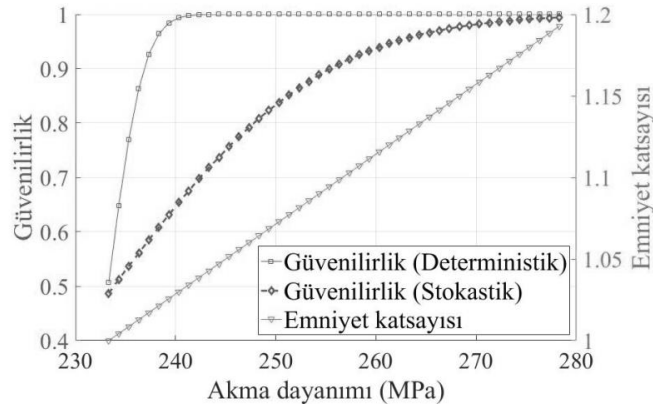
Şekil 4. Belirsizlik altında bulunan SCF ve maksimum çekme gerilmesi dağılımı

Gerilme yığılması faktörünün maksimum gerilmeye ve dolayısıyla güvenilirliğe etkisini görmek amacıyla maksimum gerilme, deterministik ve stokastik akma dayanımı sınır değerlerinde incelenmiştir. Bu amaçla, akma dayanımına önce deterministik yani tek değerler atayarak MCS ile deterministik güvenilirlik değerleri bulunmuştur. Arkasından akma dayanıma değişim katsayısı atayarak stokastik akma dayanımı karşısındaki stokastik güvenilirlik değerleri bulunmuştur. Bu örnekte kiriş malzemesi yapı çeliği olarak seçilmiştir. Stokastik hesaplamalarda akma dayanımı için Hess ve ark. [11]'nin deneysel çalışmalarında yapı çeliği için elde ettiği 0.068 değişim katsayısı değeri ve lognormal dağılım türü kullanılmıştır. Buna göre simülasyon yöntemi ile ulaşılan stokastik akma dayanımı ve maksimum çekme gerilmesi dağılımları Şekil 5'te verilmiştir. Şekle göre, akma dayanımı dağılımı ile maksimum çekme gerilmesinin çakıştığı alan başarısızlık veya güvenilir olmayan bölge olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 5. Akma ve maksimum çekme gerilmesi dağılımları

Deterministik ve stokastik güvenilirlik değerlerini daha açık bir şekilde göstermek amacıyla Şekil 6'da deterministik ve stokastik güvenilirlik ile geleneksel emniyet katsayısının karşılaştırılması grafikte gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, kiriş yaklaşık 242 MPa akma dayanımında, 1.03 emniyet katsayısında, deterministik olarak % 99 güvenilir görünürken stokastik şartlarda yani gerçek koşullarda ise aynı akma dayanımlı malzemenin % 69 güvenilir olduğu ortaya çıkmıştır. Malzemenin stokastik koşullarda % 99 güvenilir olduğu akma dayanımı ise yaklaşık 278 MPa ve emniyet katsayısı 1.19 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Deterministik ve stokastik güvenilirlik ile geleneksel emniyet katsayısının karşılaştırılması

Stokastik hesaplamalar bilgisayar maliyeti açısından oldukça yüksek maliyet içermektedir. Bu çabaları aza indirmek amacıyla tasarım parametrelerindeki değişkenliğin SCF ve nominal çekme gerilmesine etkisi incelenmiş ve sonuç olarak bu çıktıların süreklilik gösteren istatistiksel özellikleri ortaya çıkarılmış ve kuadratik polinoma dayalı bağıntılarla modellenmiştir. Böylece istenildiğinde doğrudan SCF ve nominal çekmeye ait standart sapma gibi istatistiksel değerler simülasyona gerek kalmaksızın kolayca hesaplanabilecek ve bilgisayar işlem maliyeti düşürülmüş olacaktır. Bunun için ise tam faktöriyel yöntemi kullanılarak tasarım parametrelerinden oluşan çeşitli kombinasyonlar türetilmiştir. Burada her bir parametreye minimum ve maksimum değerler atanmış ve 3. seviyeden kombinasyonlar oluşturulmuştur (Tablo 4). Örneğin genişlik değeri (H), 30, 40 ve 50 mm aralığında değiştiği varsayılmıştır. Bu şekilde oluşturulan 81 kombinasyona (3^4) karşılık gelen SCF ve σ_{nom} değerleri Monte-Carlo yöntemi ile istatistiksel olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. İstatistiksel analizde kullanılan tam faktöriyel yöntem için aralık değerleri

Faktörler	Sınır değerleri		Seviye
	Min	Max	
H	30	50	3 (30, 40, 50)
h	2	4	3 (2, 3, 4)
d	15	17	3 (15, 16, 17)
F	7000	8000	3 (7000, 7500, 8000)

81 kombinasyona göre SCF ve σ_{nom} için istatistiksel özellikler (çarpıklık, basıklık ve COV) Tablo 5'te verilmiştir. Hem SCF hem de σ_{nom} için bulunan çarpıklık ve basıklık değerlerine bakıldığında; çarpıklık değerleri 0'a yakın, basıklık değerleri ise 3'e yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu çarpıklık ve basıklık değerleri Gaussian veya normal dağılım olarak bilinen türüne uymakta ve SCF ve σ_{nom} dağılımlarının simetrik olduğunu göstermektedir. Bu sebeple, SCF ve σ_{nom} değişkenlerinin, tasarım parametrelerine bağlı kalmaksızın her şartta Gaussian dağılımı göstereceği söylenebilir. Her iki değişkenin belirsizliğini temsil etmek ve gerektiğinde güvenilirlik analizi uygulamak için bu değişkenlerin COV değerleri de aynı Tabloda verilmiştir.

Tablo 5. 81 kombinasyonun istatistiksel özellikleri

	Ortalama değerler			Standard sapma
	Çarpıklık	Basıklık	COV	
SCF	0.0134	2.9996	0.0005	4.3719e-05
σ_{nom}	0.0690	3.0103	0.0119	1.7458e-04

Yukarıdaki tabloda genellenen COV değerleri ortalama bir değer olduğu için güvenilirlik hesaplamasında çok küçük (yaklaşık % 1 gibi) hata verebilmektedir. Daha hassas analiz yapılmak istendiğinde ise SCF ve σ_{nom} için COV değerlerini veren kuadratik polinoma dayalı 4.3 ve 4.4 nolu yeni bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{COV}_{\text{SCF}} = & 9.5749\text{e-}06 * H - 7.3163\text{e-}07 * h - 3.3176\text{e-}05 * d - 9.3397\text{e-}10 * F - 2.6534\text{e-}09 * H * h + \\ & 1.6764\text{e-}06 * H * d + 6.1668\text{e-}12 * H * F - 1.5911\text{e-}08 * h * d + 1.0045\text{e-}10 * h * F + 5.0768\text{e-}11 * d * F - \\ & 3.9955\text{e-}07 * H^2 + 4.4643\text{e-}08 * h^2 - 1.4067\text{e-}06 * d^2 - 2.8318\text{e-}14 * F^2 + 5.7267\text{e-}04 \end{aligned} \quad 4.3$$

$$\begin{aligned} \text{COV}_{\sigma_{\text{nom}}} = & 1.1237\text{e-}06 * H^2 + 1.5826\text{e-}07 * H * h - 5.08511\text{e-}06 * H * d - 7.0609\text{e-}12 * H * F - 2.7538\text{e-}05 * H + \\ & 1.5598\text{e-}05 * h^2 - 8.8590\text{e-}07 * h * d - 1.5459\text{e-}09 * h * F - 1.1019\text{e-}04 * h + 2.9619\text{e-}06 * d^2 - 9.8728\text{e-}10 * d * F + \\ & 0.0002 * d + 3.1537\text{e-}12 * F^2 - 2.5705\text{e-}08 * F + 0.0112 \end{aligned} \quad 4.4$$

Bu bağıntılar ile doğrudan ortalama tasarım parametre değerleri kullanılarak SCF ve σ_{nom} 'a ait değişim katsayıları ve dolayısıyla standart sapmalar bulunabilir. Diğer bir ifade herhangi bir ara bağıntıya ve yüksek sayıda simülasyona ihtiyaç duymadan doğrudan güvenilirlik analizi gerçekleştirilebilir. Böylece analiz süresi kısaltılabilecektir ve analiz işlemi daha pratik hale gelebilecektir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, rasgele tasarım parametrelerine sahip dairesel delikli bir ankastre kirişin çekme gerilmesi altında gerilme yığılması faktörünün istatistiksel analizi ve buna bağlı olarak deterministik ve stokastik akma dayanımına göre güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda stokastik şartlarda (gerçeğe yakın koşullarda) güvenilirlik daha da düştüğü ve bu nedenle de malzemenin akma dayanımının daha yüksek tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ek olarak, stokastik hesaplamaların artırdığı bilgisayar maliyetini düşürmek amacıyla doğrudan SCF ve σ_{nom} 'nin istatistiksel özelliklerini veren kuadratik polinoma dayalı yeni bağıntılar bulunmuştur. Bu sayede herhangi bir ara bağıntıya ve yüksek sayıda simülasyona ihtiyaç duymadan doğrudan güvenilirlik analizi gerçekleştirilebilir ve analiz süresi kısaltılarak bu işlem daha pratik hale getirilebilir. İleriki çalışmalarda ise, bu çalışmada ortaya atılan dairesel delikli ankastre kirişin SCF güvenilirlik analizi yaklaşımı diğer farklı geometri ve yüklere tabi kirişlerde de benzer şekilde uygulandığında birçok geometri ve yük şartlarında ve belirsizlik altında elde edilmiş genel bir SCF kılavuzu ortaya çıkarılabilir. Böylece gelecekte tasarımda deterministik yaklaşımlar yerine geçecek stokastik çalışmalara önemli bir zemin hazırlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, E. J. Shigley, Shigley's Mechanical Engineering Design, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2] S. Attajkani, A. Khamlichi, A. Jabbouri, Reliability assessment of stress concentration performance state for a perforated composite plate under traction, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2012.
- [3] V. Ogeman, W. Mao, J. W. Ringsberg, Uncertainty in Stress Concentration Factor Computation for Ship Fatigue Design, 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. San Francisco, California, USA, ASME. 4A: Structures, Safety and Reliability: V04AT02A008, 2014.
- [4] X. W. Ye, Y. Q. Ni, J.M. Ko, Experimental evaluation of stress concentration factor of welded steel bridge T-joints. Journal of Constructional Steel Research, 70 (Supplement C): (2012) 78-85.
- [5] H. Ahmadi, M. A. Lotfollahi-Yaghin, A probability distribution model for stress concentration factors in multi-planar tubular DKT-joints of steel offshore structures, Applied Ocean Research 34(Supplement C): (2012) 21-32.
- [6] M. M. Makki, B. Ahmed, B. Chokri, Reliability prediction of the stress concentration factor using response surface method, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2017)1-10.

- [7] S. Kargar, D. M. Bardot, Uncertainty Analysis, Verification and Validation of a Stress Concentration in a Cantilever Beam, The Proceedings of the COMSOL Conference, Boston, USA, 2010.
- [8] W. D. Pilkey, D. F. Pilkey, Holes. Peterson's Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [9] R.E. Peterson, Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [10] S.-K. Choi, , R.V. Grandhi, R. A. Canfield, Reliability-based Structural Design, Springer-Verlag London, 2007.
- [11] P. E. Hess, D. Bruchman, I. A. Assakkaf, B.M. Ayyub, Uncertainties in Material and Geometric Strength and Load Variables, Naval Engineers Journal, (2002) 114(2): 139-166.