

STİFNERLİ PANELLERİNİN NİHAİ MUKAVEMET VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

Murat ÖZDEMİR*, Ahmet ERGİN
**İstanbul Teknik Üniversitesi*

ÖZET

Gemi panellerinin nihai mukavemetlerinin doğru bir şekilde hesaplanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada stifnerli paneller için Sonlu Elemanlar Yöntemi(SEY) ile elasto-plastik göçme analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Ayrıca panel nihai mukavemetini yaklaşık olarak tahmin etmek amacıyla bir Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli geliştirilmiştir. Panel nihai mukavemet değerini etkileyen parametreler ve bu parametrelerin kendi içlerindeki belirsizlikler dikkate alınarak YSA temelli Monte Carlo Simülasyonu(MCS) gerçekleştirilmiş ve hesaplanan nihai mukavemet değerlerindeki belirsizlikler tayin edilmiştir. Bu çalışma, stifnerli panellerin güvenilirlik analizleri için bir başlangıç olarak değerlendirilebilir.

Anahtar kelimeler: Nihai Mukavemet, Stifnerli Panel, Yapay Sinir Ağları, Monte Carlo Simülasyonu, Belirsizlik Analizi

1. Giriş

Günümüz yapısal tasarımlarında müsaade edilebilir gerilme kriterinin yanı sıra limit durum dizaynı(limit state design) da önem kazanmıştır. Bunların en başında yapının taşıyabileceği maksimum yük miktarını temsil eden nihai durum dizaynı gelmektedir. Bu sebeple gemi panellerinin nihai mukavemet analizlerinin doğru şekilde yapılması oldukça elzemdir.

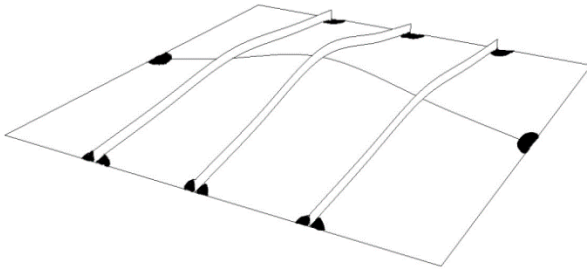
Yapıların göçme davranışları ve nihai mukavemet değerleri yükleme durumu, geometrik ve malzeme özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Stifnerli panellerin göçme davranışı ve nihai mukavemetini etkileyen tüm parametreler kendi içlerinde belirsizlik barındırır, bu sebeple hesaplanan panel yapısal kapasitesinde bir belirsizlik söz konusu olacaktır. Yapısal kapasitedeki bu belirsizliğin hesaplanması yapısal güvenlik bakımından oldukça önemlidir. Güvenilirlik yöntemleri yıllardır gelişim içerisinde[1]. Bu yöntemler ilk olarak matematiksel formda 1926 yılında Mayer[2] tarafından ortaya atılmış, Streletzki [3] ve Wierzbicki[4] tarafından geliştirilmiştir. Yapısal güvenlik açısından, yük taşıma kapasitesi ve yük karakteristiğindeki tüm belirsizlikler olasılıksal modellerle dikkate alınmalıdır [5].

Ivanov ve Rousev [6] levha burkulma problemine olasılıksal bir bakış getiren ilk çalışmalardan birini yapmıştır. Soares[7] ise levha burkulma probleminde çeşitli durumlar için belirsizlik analizleri yapmıştır. Soares [7] in çalışmasında özel olarak problemin matematiksel modelinden kaynaklanan belirsizlikler ve belirsizlik modeli üzerinde durulmuştur. Kimiecik ve Soares [8] nonlineer sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçları kullanarak cevap yüzey metodolojisi ile limit durum fonksiyonu tanımlamışlar ve eksenel yükleme altındaki levhaların yapısal kapasitelerinin kümülatif dağılım fonksiyonları için bir metot geliştirmişlerdir. Stifnerli panellerin güvenilirlik ve belirsizlik analizleri ile ilgili yakın zamanda yapılan çalışmalar [9,10] tarafından gerçekleştirilmiştir.

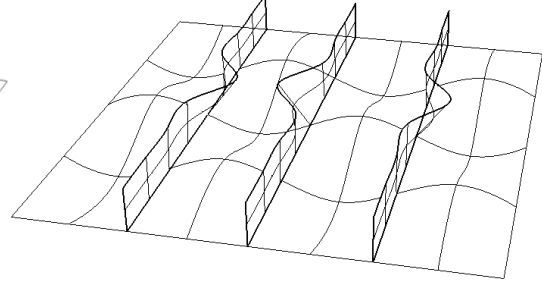
2. Stifnerli Panellerin Nihai Mukavemet Analizi

Stifnerli panellerin elasto-plastik göçme analizleri için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler analitik, nümerik, deneysel, yaklaşık yöntemler ve ampirik formüller olarak gruplandırılabilir. Analitik yöntemler çok basit problemler için kullanılabilecek de gerçekte var olan yapılar oldukça karmaşık geometri ve sınır koşullarına sahiptir. Bu tür karmaşık problemlerin göçme analizlerinin analitik olarak yapılması çoğu zaman imkânsızdır. Deneysel yöntemler ise oldukça maliyetlidir ve kısıtlı sayıda yapılabilmektedir. Yaklaşık yöntemler ise genel olarak belirli aralıklarda ve belirli kısıtlar altında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermektedir. Son olarak bir nümerik yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) araştırmacının bilgi ve deneyimine bağlı olarak yüksek doğrulukta sonuç vermektedir. Bu çalışmada stifnerli panellerin göçme davranışı geometrik ve malzeme kaynaklı nonlinearlikler de dikkate alınarak ticari bir sonlu eleman yazılım olan ANSYS [11] ile incelenmiştir. Stifnerli panellerin göçme modları 6 gruba ayrılabilir[12].

Stifnerlerin eğilme rijitliği büyükse, stifnerler arası levahının lokal burkulması meydana gelir. Stifner eğilme rijitliğinin küçük olduğu durumlarda ise stifnerli panelin genel burkulması (overall buckling) meydana gelir. Ayrıca stifnerlerin çok narin olduğu durumlarda stifnerin lokal burkulması veya burulmalı burkulması(tripping) gözlemlenebilir.

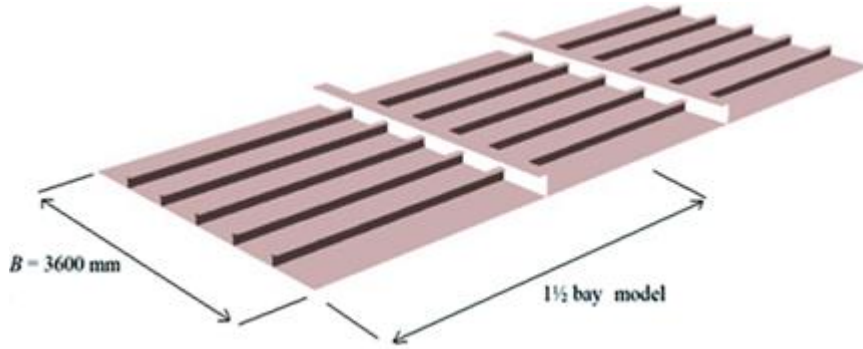


Şekil 1. Stifnerli panelin genel burkulması.



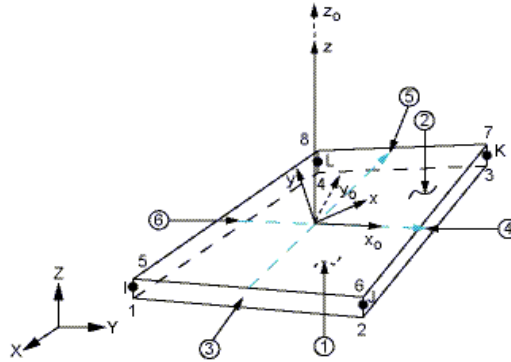
Şekil 2. Stifnerin burulmalı burkulması.

Bu çalışmada stifnerli panellerin genel burkulması ve buna bağlı olarak genel göçmesi ele alınmıştır. Stifnerli panelin nonlinear yapısal davranışı çatalanma burkulması problemi değildir, yapının sürekli tepki problemidir. Bu sebeple yapının elasto-plastik göçme davranışını analiz edebilmek için yapıya bir başlangıç deformasyonu veya tetikleyici kuvvet uygulanması gerekmektedir. Stifnerli panele tetikleyici bir kuvvet uygulamak gerçekçi bir yaklaşım olmayacaktır, panele bir başlangıç deformasyonunun verilmesi daha gerçekçi bir yaklaşımdır. İlk olarak stifnerli panellerin burkulma mod şekillerini ve kritik burkulma değerlerini hesaplamak amacıyla SEY özdeğer analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen genel burkulma mod şekli göçme analizi için başlangıç deformasyonu olarak sonlu elemanlar modeline uygulanmıştır.



Şekil 3. Stifnerli panel modeli.

Stifnerli panel göçme analizi için geliştirilen sonlu elemanlar modeli göçmeye sebep olacak tüm mekanizmaları simüle edebilecek kapasitede olmalıdır. İnelastik göçme analizinde enine derin elemanlar arası panelin bir kısmı yukarı yönde deforme olurken diğer kısmı aşağı yönde deforme olacaktır, bu sebeple, stifnerli panel sonlu eleman modelinin iki enine eleman arasında(1 bay) alınması tüm göçme modları simüle edebilecek kapasitede olmayacaktır. Ayrıca enine derin eleman sınır koşulu basit mesnet ile ankastre mesnet arasındadır, derin eleman bölgesi yüklü kenar olarak doğru şekilde modellenemeyebilir[13]. Bahsedilen tüm bu sebeplerden dolayı stifnerli panel sonlu eleman modeli Şekil 3'te görüldüğü gibi $1 \frac{1}{2}$ aralık alınarak oluşturulmuştur. Stifnerli panel Shell181 kabuk elemanı ile modellenmiştir. Son derece gelişmiş olan kabuk elemanı yapıların lineer ve büyük deformasyon-büyük dönme davranışlarını simüle edebilecek kapasiteye sahiptir. Ayrıca kayma deformasyonları Mindlin-Reissener plak-kabul teorisine göre dikkate alınmıştır [11]. Kabuk elemanı üzerinde her köşede 1 nod yer almaktadır. Her nodun ise 3 öteleme ve 3 dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi vardır. Shell181 kabuk elemanında kalınlık boyunca Gauss nokta sayısı 3 tür, problemin doğasına göre bu sayı değiştirilebilmektedir.



Şekil 4. Shell181 kabuk elemanı[11].

2.1 Sınır koşulları

- Panel boyuna kenarları(uzun kenarlar) basit mesnetli olarak kabul edilmiştir. Düşey yöndeki (z-yönü) deplasmanlar ve y ve z eksenini etrafındaki dönmeler kısıtlanmıştır.

Ayrıca komşu panellerin de etkisini dikkate alacak şekilde bu kenarların y -yönünde uniform deplasman yapması sağlanmıştır.

- Enine derin elemanlar modellenmemiş, bunun yerine düşey yöndeki deplasmanlar kısıtlanmıştır.
- 3 aralıklı modelin (Şekil 3.) ortasındaki kısa kenar simetrik sınır şartına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Simetrik sınır şartı panel boyu doğrultusunda deplasmanlar (x -yönü) ve y eksenine etrafındaki dönmeler kısıtlanarak sağlanmıştır.
- İki kısa kenarın orta noktalarında y -yönündeki deplasmanlar kısıtlanarak panelin rijit kütle hareketi yapması engellenmiştir.

2.2 Başlangıç kusurları

Stifnerli panel göçme analizinde levha ve stifner için özdeğer analizlerinden elde edilen genel burkulma modu şeklinde başlangıç deformasyonu uygulanmıştır. Uygulanan başlangıç deformasyonu Şekil 5'te tam aralık kısmında yukarı yönde (levha etkili), yarım aralık kısmında ise aşağı yönlü (stifner etkili) deformasyona sahiptir. Başlangıç deformasyonunun maksimum değeri $w_0 = 0.0025a$ şeklinde hesaplanmıştır. Burada a iki enine derin eleman arası mesafedir.



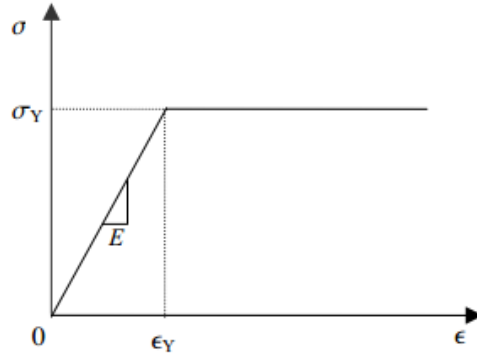
Şekil 5. Stifnerli panel genel burkulma modu.

Bu çalışmada 3 ve 5 stifnerli paneller incelenmiştir. İki boyuna derin eleman arası mesafe tüm paneller için aynı ve $B=3600$ mm dir. Malzeme olarak yüksek mukavemetli çelik kullanılmıştır, özellikleri ise aşağıdaki gibidir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri.

Elastisite Modülü ' E ' (MPa)	205800
Poisson oranı ' ν '	0.3
Akma Gerilmesi ' σ_y ' (MPa)	352.8

Malzemenin akma sonrası pekleşmeye maruz kalmadığı, yani elastik-tam plastik özellik gösterdiği kabul edilmiştir.

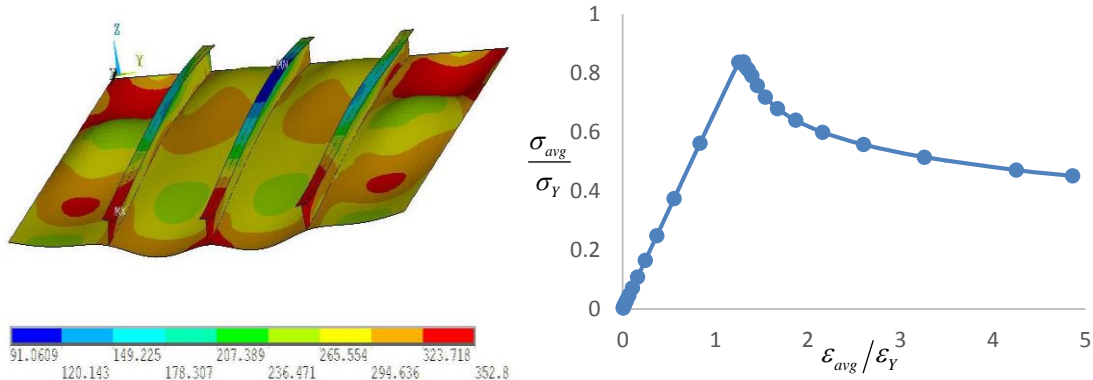


Şekil 6. Malzeme gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

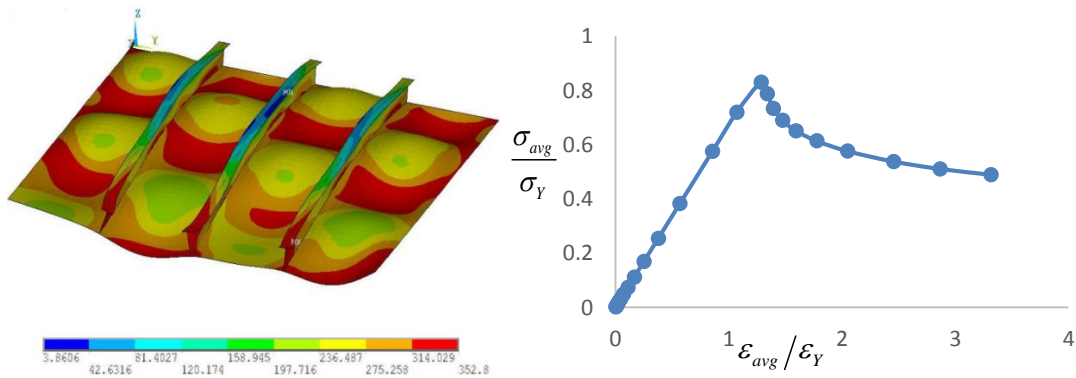
İncelenen toplam panel sayısı 107 dir. Panellerin geometrik özellikleri Ek A’da verilmiştir.

2.3 Sonuçlar

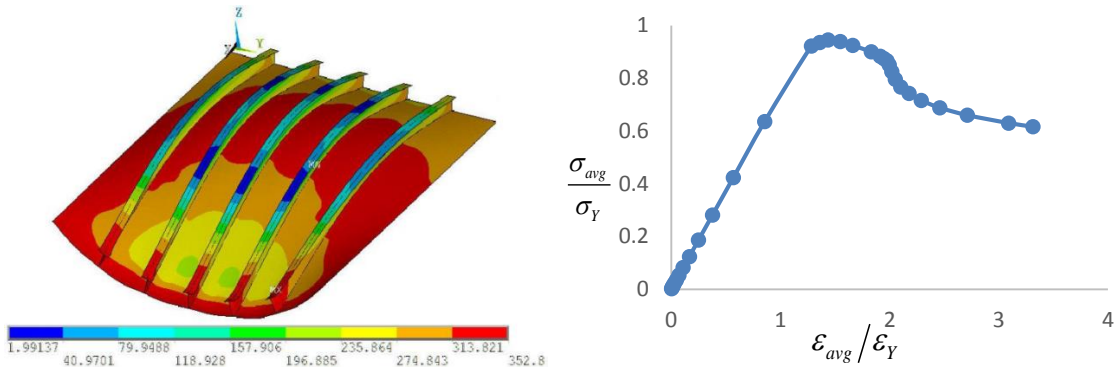
Gerçekleştirilen elasto-plastik göçme analizleri sonucunda tüm paneller için nihai mukavemet değerleri hesaplanmış, göçme modları ve ortalama gerilme-şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Tüm paneller yerine aşağıda bazı panellerin göçme modları ve ortalama gerilme-şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir.



Şekil 7. P16 için göçme modu ve ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

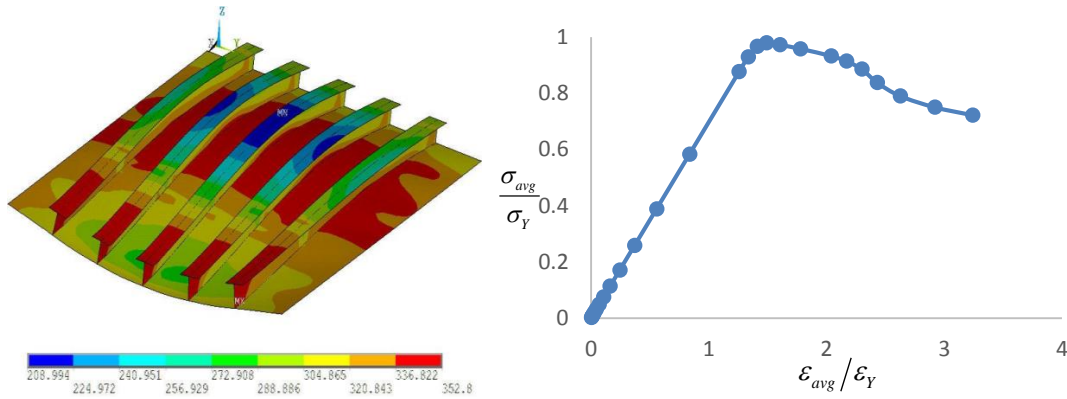


Şekil 8. P17 için göçme modu ve ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.



Şekil 9. P93 için göçme modu ve ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

Yapılan analizler sonucunda göçme modlarının stifner eğilme rijitliğine ve levha narinlik oranına bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. P16 ve P17 de stifner eğilme rijitliğinin görece büyük olması ve stifnerler arası levhanın narin olması sebebiyle ilk olarak levhanın lokal burkulması gerçekleşmiş, yük arttıkça genel burkulma deformasyonları da artmıştır. P93 ve P98 gibi 5 stifnerli panellerde ise stifner eğilme rijitliğinin yanı sıra levha narinliği düşük olduğundan (panel genişliği sabit stifner sayısı arttı.) genel olarak panelin genel burkulmaya ve genel göçmeye maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Genel göçmeye maruz kalan panellerde eğilme gerilmeleri daha baskın olduğundan panel üzerindeki akma ilk olarak stifner alın lamasında başlayıp stifner gövdesine ve levhaya doğru yayılmıştır. Yüksek gövdeli stifnerlere sahip panellerin genel göçmesi sonrasında yükün daha da artması ile stifnerlerin burulmalı burkulması gözlemlenmiştir. Lokal burkulma sonrası göçmelerde ise eğilme gerilmelerinin yanı sıra düzlem içi gerilmeler de önem kazanmaktadır, bu sebeple stifner alın lamasının yanı sıra levhalarda da akma başlangıcı gözlemlenmiştir.



Şekil 10. P98 için göçme modu ve ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

3. Stifnerli Panellerin Belirsizlik Analizi

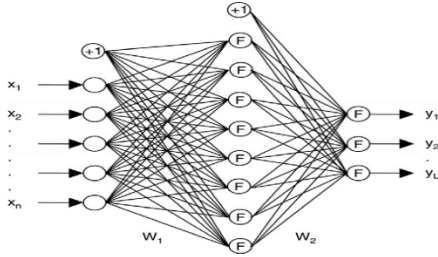
Stifnerli panellerin nihai mukavemetini etkileyen çeşitli faktörler vardır, bu faktörler geleneksel yöntemlerle yapılan analizlerde deterministik olarak ele alınır. Fakat bu parametrelerin kendi içlerinde barındırdıkları belirsizlikler sebebiyle hesaplanan nihai mukavemet değeri değişiklik

gösterecektir. Stifnerli panellerin göçme davranışını etkileyen parametreler pratik olarak üç grupta toplanabilir, bunlar; fiziksel faktörler, kullanıma bağlı faktörler ve modelleme kaynaklı belirsizliklerdir[14].

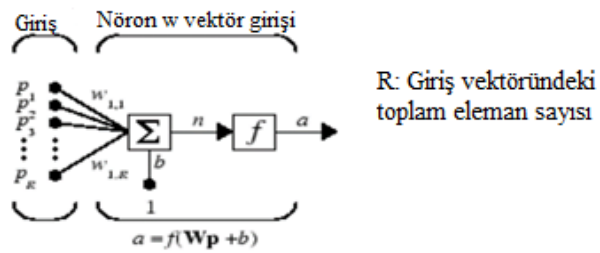
3.1 Yapay sinir ağları(YSA)

Yapay sinir ağları (YSA) birçok alanda uygulanabilen, gruplama, eğri uydurma gibi işlemleri başarıyla gerçekleştiren bir yöntemdir. Bu çalışmada ise stifnerli panellerin nihai mukavemet değerlerinin sayısal olarak tahmini amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların fiziksel bir anlamı olmayacaktır, ancak stifnerli panellerin yapısal kapasitelerini açık formda fonksiyonlarla elde etmek oldukça zor olduğundan bu tür bir nümerik yaklaşım tercih edilmiştir.

YSA'nın genel yapısı Şekil 11'de verilmiştir. Burada, ilk katman veri giriş katmanıdır ve ham veriler eğitim için hazırlanır. İkinci katman gizli katman olarak adlandırılır ve nöronların büyük bir kısmı bu katmanda yer almaktadır, son katman ise çıkış katmanıdır ve YSA tarafından tahmin edilen sonuçların verildiği kısımdır. Tek bir nöronun yapısı ise Şekil 12'de verilmiştir. 3 stifnerli ve 5 stifnerli paneller için ayrı iki model oluşturulmuştur. Her bir modelin eğitimi için ayrı 270 adet göçme analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. YSA genel yapısı.



Şekil 12. Nöron yapısı.

3.1.1 Matematiksel altyapı

Matematiksel açıdan, deneysel ve nümerik sonuçlardan yola çıkarak yaklaşık fonksiyon bulmak için problem, giriş ve çıkış verileri arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden ampirik formülün bulunmasıdır[15].

Bir YSA'nın girdi ve çıktı vektörleri sırasıyla aşağıdaki gibi verilsin:

$$\mathbf{X}^T = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}^T = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_L) \quad (2)$$

Gizli katmanda yer alan i -inci nöronun çıktısı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\varphi_i(\mathbf{X}) = f \left(\sum_{k=1}^n w_{i,k} x_k + b_i \right) \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

Verilen (3) ifadesinde $w_{i,k}$ ifadesi giriş katmanındaki k -ıncı değişkenin gizli katmandaki i -inci nörona giderken ki ağırlık çarpanıdır, b_i ise sabittir.

Çıkış katmanında yer alan j -inci değişken ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$y_j = f \left(\sum_{k=1}^n w_{kj} \phi_k(\mathbf{X}) + c_j \right) \quad (j=1,2,\dots,L) \quad (4)$$

(3) ve (4) ifadeleri matris formunda yazılmak istenirse:

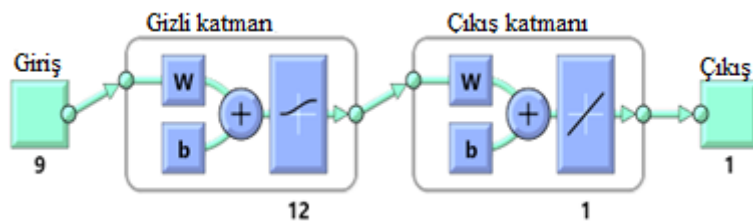
$$\mathbf{Y} = f \left\{ \mathbf{W}_2^T \times \left[f \left(\mathbf{W}_1 \times \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{X} \end{bmatrix} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

(5) ifadesinde \mathbf{I} , 1x1 boyutunda birim matristir, \mathbf{W}_1 ve \mathbf{W}_2 ise ağırlık matrisleridir.

Geliştirilen bir YSA modelinde katmanlardaki nöron sayıları genellikle deneme yanılma yöntemleri ile belirlenmektedir, aynı şekilde transfer fonksiyonlarının seçimi de deneme yanılma yöntemiyle belirlenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise nöron sayısı gerekenden az olursa model iyi eğitilmemiş olacak ve geliştirilen yaklaşım doğru sonuçlar vermeyecektir. Çok fazla nöron seçilmesi durumunda ise hem hesaplama maliyetinde artış olacak hem de fazla-eğitilmiş model, kullanılan veri kümesinde iyi sonuç verse de farklı verilerle simülasyon yapıldığında doğru sonuç vermeyecektir. Transfer fonksiyonunun seçilmesinde ise çıkış katmanında lineer fonksiyonun seçilmesi çoğunlukla iyi sonuç vermektedir. Gizli katmanda ise genel olarak tanjant hiperbolik veya sigmoid fonksiyon seçilebilir.

Bu çalışma da geliştirilen her iki ağ için de gizli katmanda sigmoid fonksiyonu, çıkış katmanında ise lineer fonksiyon seçilmiştir. Sigmoid fonksiyon (6) ifadesinde verilmiştir, ve sadece 0-1 aralığında değer alır.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

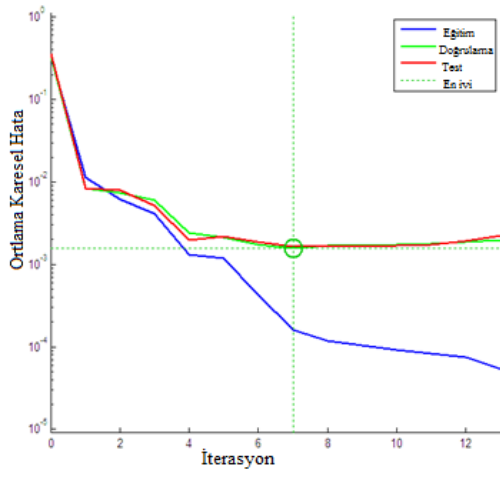


Şekil 13. YSA akış diyagramı.

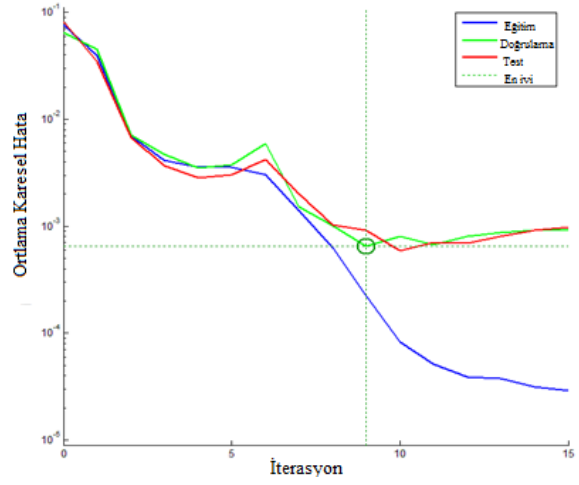
Burada her iki model için aynı akış diyagramı görülmektedir, ancak her iki model için ağırlık çarpan matrisleri ve sabit metrisleri farklıdır. Matrisler yer kısıtlaması sebebiyle burada verilmeyecektir.

Geliştirilen YSA modelinde giriş verileri panel boyutları ve malzeme özellikleridir. Poisson oranı sabit kabul edilmiş, belirsizlik analizine dahil edilmemiştir. Başlangıç deformasyonu büyüklüğü doğrudan panel boyuna bağlı olarak tanımlandığından ayrıca giriş parametresi olarak tanımlanmamıştır.

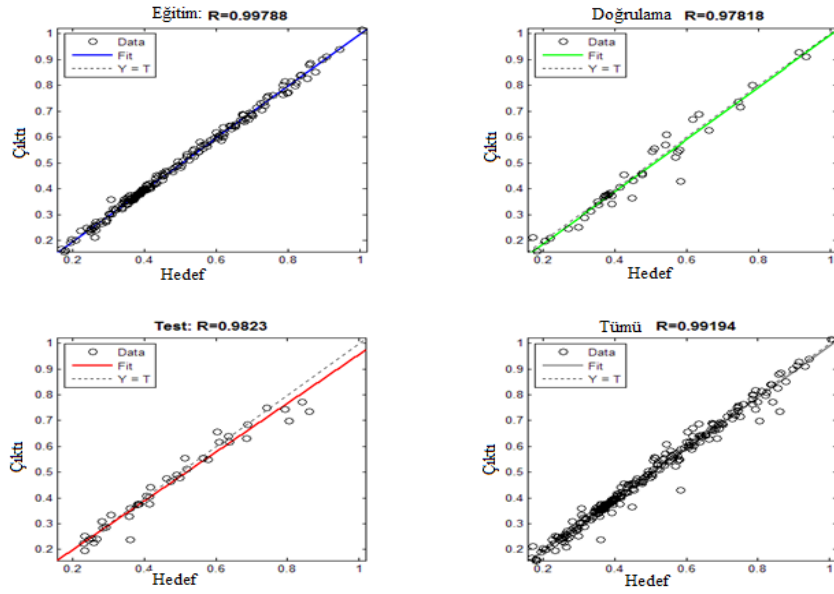
Çıkış verisi ise panel nihai yük taşıma kapasitesinin akma gerilmesi ile normalize edilmiş halidir.



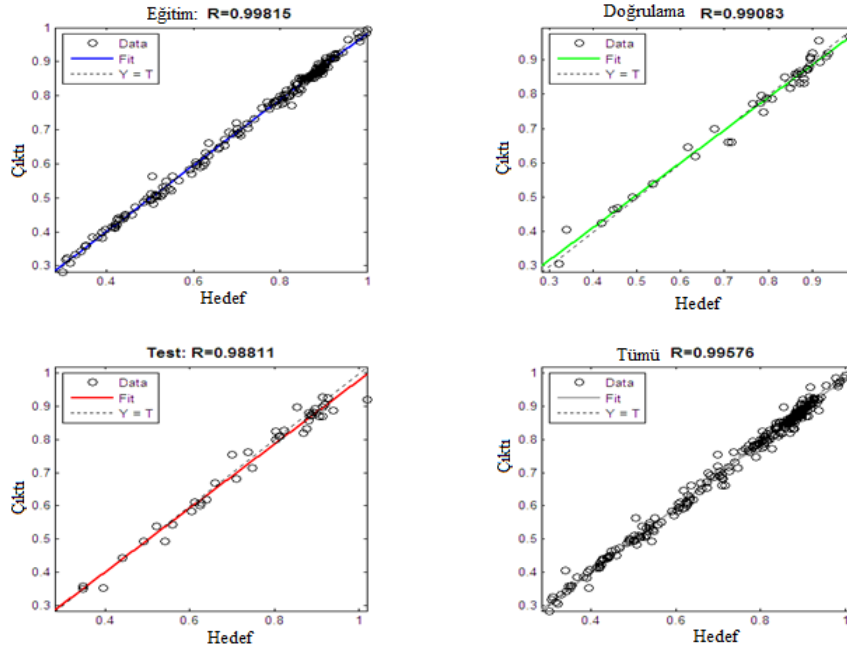
Şekil 14. 3 stifnerli panel doğrulama performansı.



Şekil 15. 5 stifnerli panel doğrulama performansı.



Şekil 16. 3 stifnerli panel için regresyon performansı.



Şekil 17. 5 stifnerli panel için regresyon performansı.

Şekil 16 ve 17 den görüldüğü üzere YSA ile geliştirilen yaklaşık model stifnerli panellerin nihai mukavemetinin tahmini için oldukça iyi sonuç vermiştir.

3.2 Monte carlo simülasyonu (MCS)

Yapısal güvenilirlik veya belirsizlik analizinde, MCS genellikle analitik çözümün mümkün olmadığı ve göçme bölgesinin analitik olarak ifade edilemediği durumlarda kullanılır.

Yapısal güvenilirlik analizlerinde ilk olarak limit durum fonksiyonu olan $G(x)$ belirlenmelidir. Limit durum fonksiyonu yapısal kapasiteyi ve yük karakteristiklerini tanımlayan rastgele değişken vektörünü içerir.

Geleneksel güvenilirlik analizinde, yapının göçme olasılığı aşağıdaki gibi belirlenir:

$$p_f = \int_{G(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad (7)$$

(7) ifadesinde $f_x(x)$, rastgele değişkenlerin bağımlı olasılık dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir. (7) ifadesinin analitik olarak çözümü oldukça uzun ve zahmetli olacağından, yapının göçme olasılığı MCS ile aşağıdaki gibi belirlenebilir.

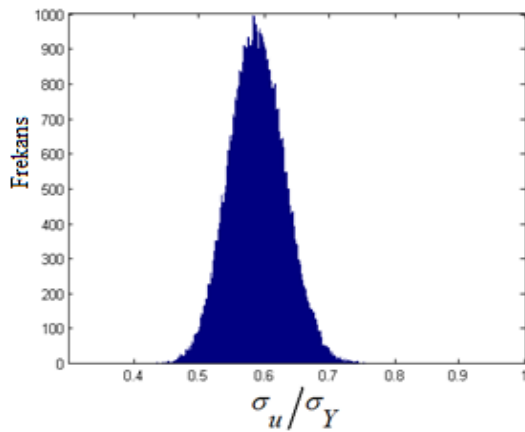
$$p_f = \frac{1}{N_\infty} \sum_{j=1}^{N_\infty} I(x_j) \quad (8)$$

Belirsizlik analizi sırasından tüm değişkenlerin normal dağılım gösterdiği ve standart sapmasının dizayn değerinin %3 ü olduğu kabul edilmiştir. Simülasyon sırasında basit rastgele örnekleme yöntemi kullanılmıştır.

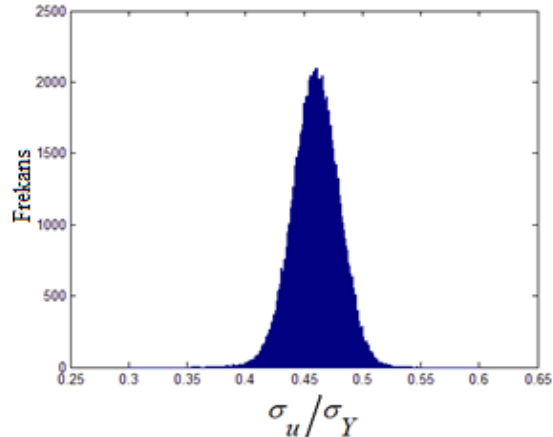
3.3 Sonuç

Stifnerli panellerin nihai mukavemetlerinin tayini amacıyla bir seri elasto-plastik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak panel nihai mukavemetinin tayini amacıyla YSA modelleri geliştirilmiş, YSA modelleri ile elde edilen sonuçların sonlu elemanlar sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilen YSA modeli temel alınarak MCS ile panel nihai mukavemet değerlerindeki dağılım gözlemlenmiştir.

Tüm sonuçlar Ek B ve Ek C’de tablo halinde verilmiştir. Bu alt başlıkta ise sadece iki panel için nihai mukavemet değerinin dağılımı verilmiştir.



Şekil 18. P6 için nihai mukavemet dağılımı.



Şekil 19. P28 için nihai mukavemet dağılımı.

4. Değerlendirme

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- YSA, yapıların nihai mukavemetinin tayini ve belirsizlik analizleri için güçlü bir araçtır ve kullanımı uygun sonuçlar verebilmektedir.
- Dizayn parametrelerinin belirsizliği (C.O.V: %3), bazı panellerde panel nihai mukavemeti ortalama değerinin % 11 ine kadar belirsizliğe sebep olmuştur.
- Yapısal güvenlik açısından yapının kapasitesindeki ve yük karakteristiğindeki belirsizliklerin tayini oldukça önemlidir.

Kaynaklar:

[1] Sobey A.J, Blake J.I.R, Sheno R.A., Monto Carlo Reliability Analysis of Tophat Stiffened Composite Plate Structures Under Out of Plane Loading. Reliability Engineering and System Safety, 2013; 110: 41-49.

[2] Mayer M., *Die Sicherheit Der Bauwerke und Ihre Berechnung Nach Grenzkraften Statt Nach Zulassigen Spannung*, Springer-Verlag, 1926.

- [3] Streletzki N.S., Statistical Basis for the Evaluation of the Structural Safety Factor. State Publishing House for Buildings, Moscow, Stroizdat, 1947.
- [4] Wierzbicki W., Safety of Structures as a Probabilistic Problem, Technical Report. Warsaw, Poland: Przegląd Techniczny.
- [5] Gaspar B, Guedes Soares C., Hull Girder Reliability Using a Monte Carlo based Simulation Method, Probabilistic Engineering Mechanics, 2013; 31: 65-75.
- [6] Ivanov L.D, Rousev S.G., Statistical Estimation of Reduction Coefficient of Ship's Hull Plates with Initial Deflections, Naval Architecture, 1979; 4: 158-160.
- [7] Guedes Soares C., Uncertainty Modeling in Plate Buckling, Structural Safety, 1988; 5:17-34.
- [8] Kmiecik M, Guedes Soares C., Response Surface Approach to The Probability Distribution of The Strength of Compressed Plates, Marine Structures, 2002; 15: 139-156.
- [9] Garbatov Y, Tekgoz M, Guedes Soares C., Uncertainty Assessment of the Ultimate Strength of a Stiffened Panel. Proceedings of the 4th International conference on Marine Structures, Espoo, Finland, 2013.
- [10] Gaspar B, Naess A, Leira B. J, Guedes Soares C., System Reliability Analysis of Stiffened Panel Under Combined Uniaxial compression and Lateral Pressure Loads. Structural Safety, 2012; 39: 30-43.
- [11] ANSYS 14.5 user's manual.
- [12] Paik J. K, Thayamballi A. K., Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, Wiley, 2003.
- [13] Chen Y. Ultimate Strength Analysis of Stiffened Panels Using A Beam-Column Method. Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University 2003; Virginia, USA.
- [14] Proceedings of the 18th International Ship and Offshore Structures Congress, Committee III.1 Ultimate Strength, Rostock, Germany, 2012.
- [15] Pu Y, Mesbahi E., Application of Artificial Neural Networks to evaluation of Ultimate Strength of Steel Panels, Engineering Structures, 2006; 28: 1190-1196.

Ekler:

Ek A: Stifnerli panel boyutları.

Panel	$a(mm)$	$b(mm)$	$t_p(mm)$	ns	$h_w(mm)$	$t_w(mm)$	$b_f(mm)$	$t_f(mm)$	β
P1	1800	900	21	3	42	12	100	15	1.7745
P2	2640	900	21	3	48	12	100	15	1.7745
P3	3600	900	21	3	80	12	100	15	1.7745
P4	1800	900	21	3	80	12	100	15	1.7745
P5	2640	900	21	3	90	12	100	15	1.7745
P6	3600	900	21	3	150	12	100	15	1.7745
P7	1800	900	21	3	150	12	100	15	1.7745
P8	2640	900	21	3	150	12	100	15	1.7745
P9	3600	900	21	3	200	12	100	15	1.7745
P10	1800	900	16	3	40	9	100	14	2.3290
P11	2640	900	16	3	45	9	100	14	2.3290
P12	3600	900	16	3	72	9	100	14	2.3290
P13	1800	900	16	3	60	9	100	14	2.3290
P14	2640	900	16	3	80	9	100	14	2.3290
P15	3600	900	16	3	100	9	100	14	2.3290
P16	1800	900	16	3	120	9	100	14	2.3290
P17	2640	900	16	3	160	9	100	14	2.3290
P18	3600	900	16	3	180	9	100	14	2.3290
P19	1800	900	10	3	40	6	80	10	3.7264
P20	2640	900	10	3	60	6	80	10	3.7264
P21	3600	900	10	3	60	6	80	10	3.7264
P22	1800	900	10	3	90	6	80	10	3.7264
P23	2640	900	10	3	120	6	80	10	3.7264
P24	3600	900	10	3	150	6	80	10	3.7264
P25	2640	900	21	3	24	12	100	15	1.7745
P50	1800	900	21	3	50	20	200	30	1.7745
P51	1800	900	21	3	84	12	100	15	1.7745
P52	1800	900	21	3	50	10	200	30	1.7745
P53	1800	900	16	3	36	20	200	30	2.3290
P54	1800	900	16	3	56	12	100	15	2.3290
P55	1800	900	16	3	81	5	60	10	2.3290
P56	1800	900	16	3	31	10	200	30	2.3290
P57	2640	900	21	3	60	12	100	15	1.7745
P58	1800	900	10	3	28	12	100	15	3.7264
P59	1800	900	10	3	41	5	60	10	3.7264
P60	2640	900	21	3	80	20	200	30	1.7745
P61	2640	900	21	3	123	12	100	15	1.7745
P62	2640	900	21	3	75	10	200	30	1.7745
P63	2640	900	16	3	58	20	200	30	2.3290
P64	2640	900	16	3	84	12	100	15	2.3290
P65	2640	900	16	3	53	10	200	30	2.3290
P66	2640	900	21	3	95	12	100	15	1.7745
P67	2640	900	10	3	45	12	100	15	3.7264
P68	2640	900	10	3	62	5	60	10	3.7264
P69	3600	900	21	3	112	20	200	30	1.7745
P70	3600	900	21	3	166	12	100	15	1.7745
P71	3600	900	21	3	106	10	200	30	1.7745
P72	3600	900	16	3	83	20	200	30	2.3290
P73	3600	900	16	3	120	12	100	15	2.3290
P74	3600	900	16	3	76	10	200	30	2.3290
P75	2640	900	21	3	150	12	100	15	1.7745
P76	3600	900	10	3	65	12	100	15	3.7264
P77	3600	900	10	3	86	5	60	10	3.7264

<i>Panel</i>	<i>a(mm)</i>	<i>b(mm)</i>	<i>t_p(mm)</i>	<i>ns</i>	<i>h_w(mm)</i>	<i>t_w(mm)</i>	<i>b_f(mm)</i>	<i>t_f(mm)</i>	<i>β</i>
P26	1800	600	21	5	42	12	100	15	1.1830
P27	2640	600	21	5	48	12	100	15	1.1830
P28	3600	600	21	5	80	12	100	15	1.1830
P29	1800	600	21	5	80	12	100	15	1.1830
P30	2640	600	21	5	90	12	100	15	1.1830
P31	3600	600	21	5	150	12	100	15	1.1830
P32	1800	600	21	5	150	12	100	15	1.1830
P33	2640	600	21	5	150	12	100	15	1.1830
P34	3600	600	21	5	200	12	100	15	1.1830
P35	1800	600	16	5	40	9	100	14	1.5527
P36	2640	600	16	5	45	9	100	14	1.5527
P37	3600	600	16	5	72	9	100	14	1.5527
P38	1800	600	16	5	60	9	100	14	1.5527
P39	2640	600	16	5	80	9	100	14	1.5527
P40	3600	600	16	5	100	9	100	14	1.5527
P41	1800	600	16	5	120	9	100	14	1.5527
P42	2640	600	16	5	160	9	100	14	1.5527
P43	3600	600	16	5	180	9	100	14	1.5527
P44	1800	600	10	5	40	6	80	10	2.4842
P45	2640	600	10	5	60	6	80	10	2.4842
P46	3600	600	10	5	80	6	80	10	2.4842
P47	1800	600	10	5	90	6	80	10	2.4842
P48	2640	600	10	5	120	6	80	10	2.4842
P49	3600	600	10	5	150	6	80	10	2.4842
P78	1800	600	21	5	84	20	200	30	1.1830
P79	1800	600	21	5	116	12	100	15	1.1830
P80	1800	600	21	5	93	10	160	20	1.1830
P81	1800	600	21	5	77	10	200	30	1.1830
P82	1800	600	16	5	60	20	200	30	1.5527
P83	1800	600	16	5	82	12	100	15	1.5527
P84	1800	600	16	5	54	10	200	30	1.5527
P85	1800	600	10	5	31	20	200	30	2.4842
P86	1800	600	10	5	45	12	100	15	2.4842
P87	1800	600	10	5	56	5	60	10	2.4842
P88	2640	600	21	5	126	20	200	30	1.1830
P89	2640	600	21	5	168	12	100	15	1.1830
P90	2640	600	21	5	136	10	160	20	1.1830
P91	2640	600	21	5	116	10	200	30	1.1830
P92	2640	600	16	5	93	20	200	30	1.5527
P93	2640	600	16	5	120	12	100	15	1.5527
P94	2640	600	16	5	82	10	200	30	1.5527
P95	2640	600	10	5	52	20	200	30	2.4842
P96	2640	600	10	5	68	12	100	15	2.4842
P97	2640	600	10	5	84	5	60	10	2.4842
P98	3600	600	21	5	174	20	200	30	1.1830
P99	3600	600	21	5	223	12	100	15	1.1830
P100	3600	600	21	5	185	10	160	20	1.1830
P101	3600	600	21	5	159	10	200	30	1.1830
P102	3600	600	16	5	131	20	200	30	1.5527
P103	3600	600	16	5	164	12	100	15	1.5527
P104	3600	600	16	5	133	10	160	20	1.5527
P105	3600	600	16	5	115	10	200	30	1.5527
P106	3600	600	10	5	76	20	200	30	2.4842
P107	3600	600	10	5	95	12	100	15	2.4842

Ek B: Sonuçlar (3 stifnerli paneller)

PANEL	SEY	YSA	ORT.	STD	MIN	MAKS.	PANEL	SEY	YSA	ORT.	STD	MIN	MAKS.
P1	0.39	0.38	0.39	0.02	0.28	0.50	P52	0.72	0.73	0.72	0.03	0.59	0.82
P2	0.33	0.31	0.31	0.02	0.22	0.39	P53	0.62	0.64	0.64	0.03	0.53	0.74
P3	0.31	0.36	0.36	0.02	0.25	0.46	P54	0.48	0.46	0.46	0.03	0.35	0.61
P4	0.66	0.64	0.64	0.04	0.48	0.79	P55	0.40	0.40	0.40	0.03	0.30	0.54
P5	0.50	0.48	0.48	0.03	0.35	0.63	P56	0.56	0.58	0.58	0.03	0.46	0.69
P6	0.61	0.59	0.59	0.04	0.41	0.79	P57	0.36	0.35	0.35	0.02	0.26	0.45
P7	0.93	0.91	0.90	0.03	0.76	1.01	P58	0.26	0.26	0.26	0.02	0.19	0.38
P8	0.78	0.80	0.80	0.04	0.64	0.94	P59	0.22	0.21	0.21	0.01	0.16	0.29
P9	0.76	0.76	0.76	0.04	0.61	0.90	P60	0.74	0.75	0.75	0.03	0.63	0.88
P10	0.34	0.33	0.33	0.02	0.26	0.44	P61	0.67	0.69	0.68	0.04	0.51	0.85
P11	0.28	0.28	0.28	0.02	0.21	0.36	P62	0.70	0.69	0.69	0.03	0.55	0.84
P12	0.35	0.34	0.34	0.02	0.22	0.43	P63	0.62	0.61	0.61	0.02	0.52	0.73
P13	0.48	0.45	0.46	0.03	0.33	0.63	P64	0.48	0.46	0.47	0.03	0.35	0.60
P14	0.43	0.42	0.42	0.03	0.29	0.54	P65	0.58	0.55	0.55	0.02	0.45	0.66
P15	0.39	0.39	0.39	0.03	0.27	0.52	P66	0.52	0.51	0.51	0.03	0.39	0.66
P16	0.80	0.77	0.77	0.04	0.61	0.92	P67	0.28	0.26	0.27	0.01	0.20	0.33
P17	0.79	0.74	0.74	0.03	0.62	0.87	P68	0.23	0.22	0.22	0.02	0.15	0.30
P18	0.70	0.69	0.68	0.03	0.55	0.83	P69	0.73	0.73	0.73	0.03	0.62	0.89
P19	0.25	0.24	0.24	0.01	0.18	0.31	P70	0.67	0.66	0.66	0.04	0.49	0.85
P20	0.26	0.25	0.25	0.02	0.18	0.33	P71	0.69	0.68	0.68	0.04	0.55	0.86
P21	0.22	0.24	0.23	0.02	0.15	0.32	P72	0.62	0.60	0.60	0.02	0.51	0.71
P22	0.46	0.48	0.48	0.02	0.38	0.59	P73	0.50	0.48	0.48	0.03	0.35	0.63
P23	0.47	0.46	0.46	0.02	0.36	0.58	P74	0.58	0.54	0.54	0.03	0.44	0.65
P24	0.45	0.45	0.45	0.03	0.33	0.61	P75	0.79	0.80	0.80	0.04	0.65	0.95
P25	0.27	0.25	0.25	0.02	0.18	0.31	P76	0.30	0.30	0.30	0.02	0.22	0.40
P50	0.74	0.76	0.76	0.02	0.65	0.85	P77	0.25	0.24	0.24	0.03	0.14	0.36
P51	0.68	0.67	0.67	0.04	0.49	0.81							

Ek C: Sonuçlar (5 stifnerli paneller)

PANEL	SEY	YSA	ORT.	STD	MIN	MAKS.	PANEL	SEY	YSA	ORT.	STD	MIN	MAKS.
P26	0.49	0.49	0.50	0.02	0.40	0.61	P81	0.90	0.90	0.90	0.03	0.78	1.02
P27	0.39	0.40	0.40	0.02	0.30	0.50	P82	0.86	0.85	0.85	0.04	0.73	1.00
P28	0.45	0.46	0.46	0.02	0.33	0.57	P83	0.80	0.77	0.77	0.03	0.63	0.93
P29	0.79	0.75	0.74	0.03	0.63	0.87	P84	0.84	0.83	0.83	0.03	0.75	0.97
P30	0.61	0.61	0.61	0.03	0.48	0.72	P85	0.62	0.60	0.61	0.02	0.52	0.74
P31	0.70	0.69	0.69	0.03	0.56	0.84	P86	0.56	0.54	0.54	0.02	0.45	0.64
P32	0.96	0.96	0.97	0.03	0.88	1.11	P87	0.42	0.44	0.44	0.03	0.33	0.57
P33	0.87	0.86	0.86	0.02	0.76	0.98	P88	0.91	0.88	0.89	0.02	0.79	1.02
P34	0.86	0.83	0.84	0.03	0.70	0.95	P89	0.91	0.89	0.90	0.02	0.80	1.01
P35	0.44	0.44	0.45	0.02	0.36	0.54	P90	0.90	0.88	0.88	0.03	0.77	1.01
P36	0.35	0.35	0.35	0.02	0.25	0.43	P91	0.89	0.89	0.89	0.02	0.79	1.01
P37	0.40	0.41	0.40	0.02	0.29	0.48	P92	0.85	0.82	0.82	0.03	0.72	0.96
P38	0.61	0.60	0.60	0.03	0.47	0.73	P93	0.78	0.77	0.77	0.03	0.66	0.89
P39	0.54	0.53	0.53	0.03	0.40	0.65	P94	0.82	0.80	0.80	0.02	0.72	0.94
P40	0.49	0.49	0.49	0.02	0.36	0.59	P95	0.63	0.61	0.61	0.03	0.51	0.74
P41	0.93	0.92	0.92	0.02	0.81	1.05	P96	0.55	0.52	0.52	0.03	0.41	0.62
P42	0.89	0.88	0.88	0.02	0.78	0.99	P97	0.43	0.44	0.43	0.03	0.26	0.55
P43	0.81	0.79	0.78	0.03	0.64	0.92	P98	0.90	0.89	0.89	0.01	0.80	1.01
P44	0.35	0.36	0.36	0.02	0.28	0.47	P99	0.89	0.87	0.87	0.03	0.74	0.96
P45	0.35	0.36	0.35	0.02	0.23	0.43	P100	0.89	0.88	0.88	0.03	0.75	0.98
P46	0.35	0.36	0.35	0.02	0.19	0.42	P101	0.89	0.88	0.88	0.03	0.76	0.99
P47	0.72	0.72	0.71	0.03	0.56	0.84	P102	0.84	0.81	0.81	0.03	0.72	0.95
P48	0.64	0.66	0.66	0.03	0.51	0.77	P103	0.77	0.77	0.76	0.02	0.64	0.88
P49	0.63	0.62	0.62	0.04	0.43	0.75	P104	0.78	0.78	0.77	0.02	0.64	0.89
P78	0.92	0.91	0.91	0.04	0.75	1.03	P105	0.81	0.79	0.79	0.02	0.71	0.91
P79	0.92	0.91	0.91	0.02	0.81	1.03	P106	0.63	0.61	0.62	0.03	0.51	0.75
P80	0.91	0.90	0.90	0.03	0.79	1.03	P107	0.55	0.53	0.52	0.03	0.39	0.63