YÜKSEK YAPILAR İÇİN MODAL ANALİZ TABANLI HASAR TESPİTİ VE YAPI SAĞLIĞI İZLEME YAKLAŞIMI

Quy Thue NGUYEN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK YAPILAR İÇİN MODAL ANALİZ TABANLI HASAR TESPİTİ VE YAPI SAĞLIĞI İZLEME YAKLAŞIMI

Quy Thue NGUYEN
0000-0003-3436-8551

Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK YAPILAR İÇİN MODAL ANALİZ TABANLI HASAR TESPİTİ VE YAPI SAĞLIĞI İZLEME YAKLAŞIMI

Quy Thue NGUYEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU

Yapı sağlığı izleme (SHM), herhangi bir yüklemeye bağlı olarak hasar gören yüksek katlı yapıların sağlığını kontrol etmek için şu anda az sayıda da olsa uygulanmaktadır. Burada hedeflenen yapıda muhtemel hasar mekanizmasının başlangıç düzeyinde tespit edebilmek ve karar destek sistemlerine bilgi üretebilmektedir. Ancak uygulamada, birçok farklı nedenle bu düzeyde izlemeden ziyade genel maksatlı izlemeler tercih edildiği, çok az sayıda örnekte ise önemli sayıda ve nitelikte sensör ile izlemelerin yapıldığı da aşikardır. Bu maksatla çalışmada, hasarlı katları tespit etmek ve ardından hasarlı elemanların yerini belirleyebilmek için hibrit bir prosedür(ler) önerilmiştir. İlk adım için modal şekildeğiştirme enerjisi (MSE) yaklaşımı, ters çözüm, ve Yapay Sinir Ağı (ANN) yöntemi olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır. Başlangıçta ötelenme serbestlikleri üzerine kurulan yaklaşımlar bir yapının gerçek davranışını daha iyi modelleyebilmek maksadıyla dönme serbestliklerini de içerecek şekilde Guyan statik yoğuşma prosedürü kullanılarak yaklaşık olarak basitleştirilmiş, daha sonra, sadece ilk iki en düşük eğilme modunu kullanarak ters çözüm uygulanarak gerçekleştirilen modeller sayısal ve deneysel olarak doğrulanmıştır. ANN tabanlı teknik, gerek diğer yaklaşılmalarda kat düzeyinde hasarı tahmin etmek için gerekse kat ve eleman düzeyi tespitleri için ayrı ayrı kullanılmıştır. Ağlar, en düşük eğilme modları kullanılarak eğitilmiştir. İkinci adımda, yalnızca belirlenen katlara odaklanarak hasarlı elemanları tahmin edebilmek için ANN yöntemi yardımıyla değişken sayısı etkin bir şekilde azaltılabilmektedir. Çalışmada, farklı yöntemler ve hibrit yaklaşımlar sırasıyla iki boyutlu (2D) problemden başlayarak, yüksek binayı temsilen (3D) 30 katlı bir binanın hasar tespitine kadar farklı senaryolar için adım adım geliştirilerek verilemektedir. Bu veriler ışığında düşük gürültü düzeyleri için tüm seviyelerde hasar tahminlerinin doğru bir şekilde elde edilebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal sağlık izleme, hasar tespiti, yapay sinir ağı, ters çözüm, modal şekildeğiştirme enerjisi, yüksek yapılar
2022, xii + 154 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DAMAGE IDENTIFICATION FOR HIGH-RISE BUILDINGS USING AN EIGEN PROBLEM BASED APPROACH AND AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Quy Thue NGUYEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU

Structural health monitoring (SHM) has been applied, albeit in small numbers, in the regular control of high-rise buildings' health that has deteriorated having been subjected to any loading. The main objective is to detect invisible damage at the initial levels for early warning of collapse and retrofitting works. However, in practice, it is obvious that monitoring is preferred preferred for general purposes instead of these levels for many different reasons, and it is implemented utilizing dense sensor networks and high-qualified sensors in very few examples. To circumvent the complexity of high-rise buildings, hybrid procedures are proposed to detect damage at storey and then element levels. For the first step, three approaches, namely modal strain energy (MSE), eigenvalue problem-based inverse solution, and Artificial Neural Network (ANN) are considered. The inverse solution based technique is constructed based on the behavior of lumped-mass systems simplified from full buildings employing the Guyan static condensation procedure. The technique detects damage accounting for only the first two lowest bending modes and is verified numerically and experimentally. The ANN approach is also implemented for storey-level detection. The networks are trained using only the lowest bending modes. In the second step, the ANN method is deployed to pinpoint damaged elements focusing only on the identified storeys, effectively reducing the number of variables. In this thesis, hybrid approaches are implemented considering the two-dimensional (2D) and then (3D) 30-storey buildings. As a result, storey-level and element-level detection is accurately achieved as long as the generated modal data is low-level noise-contaminated.

Keywords: Structural health monitoring, damage detection, artificial neural network, inverse solution, modal strain energy, high-rise buildings
2022, xii + 154 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans ve doktora yaptığım süre boyunca bana yol gösterdiği için tez danışmanım Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU'na şükranlarımı sunarım. Bana "eğer bir insan hak ediyorsa ona verebileceğiniz her şeyi vermelisin, haketmiyorsa da hiçbir şey vermek için çabalama" demişti. Sanırım hak ettiğimi düşündüğündendir eğitimim ve Türkiye'deki hayatım boyunca Prof.'dan bitmez tükenmez destekler aldım. Onu danışmanım olarak seçtiğim için altıncı hissimin olduğunu söylemişti bana. Birlikte çalışırken aramızda önemli bir uyumun olduğunun farkındaydım. Doktoram sırasında hocam sıkışıp kaldığım problemlerimin üstesinden gelmek için neye ihtiyacım olduğunu çok iyi biliyordu ve asla baskı kurmadı ama her şey yolunda gitti. Çünkü hocamdan kendi kendine nasıl hızlanacağımı öğrendim. Bunun yanı sıra onunla istişare etmek beni motive ediyor ve ufkumu genişletiyordu. Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU ile tanışmak hayatımda bir dönüm noktası oldu. Onun öğretisi kesinlikle beni sonsuza dek takip edecek.

Prof. Dr. Tez jüri üyelerim Fethi KADIĞOĞLU'na, tezimi daha nitelikli hale getirmek için yaptıkları fikir ve yorumlardan dolayı. Üniversitedeki yüksek lisans dersimin ilk gününden itibaren bana destek olduğu için özellikle Dr. Serkan SAĞIROĞLU'na ve tez jürime katılıp desteklerinden ötürü Prof. Dr. Alper İLKLİ ile Prof. Dr. Nurdan MEMİŞOĞLU APAYDINA'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bana sponsor olan T.C. Başbakanlık Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB), yüksek lisans ve doktora pozisyonunda eğitim almak ve Türkiye'de ilginç bir yaşam deneyimi için muazzam bir şans verdiler.

Türkiye'de tanıştığım arkadaşlarıma, özellikle her durumda yanımda olan Numan Nuri Can Çekmece ve Nouroullach Toumpan Mestan kardeşlerime. En iyi arkadaşlarımdan biri olan Beşevler'deki Halil amcama, 152 Evler'deki Ahmet amcam'a ve Emine ablam'a. Söz veriyorum ki bir gün sizi ziyaret için geri geleceğim. Umarım siz de gelip Vietnam'ı ziyaret edersiniz.

Hayatımın her adımında bana destek olan anneanneme. Torunlarını her zaman çok çalışmaya ve iyi insanlar olmaya teşvik eden büyük büyükanne ve büyükbabama. Kuzenim Đỗ Phú Hiệp'e, bir gün büyük ailemizi gururlandırabilirsiniz. Mükemmel halam Nguyễn Thị Suông'a, büyükanne ve büyükbabalarımıza bakıyor.

Aşkım NCK'ya (KT), şimdi ve sonsuza dek benimle birlikte olduğu için. Umarım Nguyễn An Vy gibi sevimli başka bir aşkımız olur. En önemlisi, biz her zaman ebeveynlerimizin evlatlarıyız.

Sevgili aileme, bizim için birçok şeyi feda eden harika ebeveynlerime. Ben evde değilken babama ve anneme bakan erkek ve kız kardeşime. Sevgili yeğenim Nguyễn Bảo Du'ya, hayallerinizin büyük ve harika olacağına ve gerçek olacağına inanıyorum.

Quy Thue NGUYEN
17/05/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1. Kuramsal Temeller 6
2.1.1. MSE tabanlı mevcut DI'ler 6
2.1.2. Guyan matris yoğunlaştırma prosedürü ve hasar tespitinde uygulanışı 9
2.1.3. Yapay sinir ağı 11
2.1.4. Operasyonel modal analiz (OMA) 15
2.1.5. İstatistik hasar endeksi yaklaşımı 19
2.1.6. Veri bozulması 20
2.2. Kaynak Araştırması 22
3. MATERYAL VE YÖNTEM 32
3.1. Hasar İndeksi DI B Tabanlı NL Güncelleme Prosedürü 33
3.1.1. Hasar İndeksi DI NL Yöntemi 34
3.1.2. Hasar İndeksi DI NL için sayısal doğrulama 36
3.2. 2D yapılar için hasar tespiti - NL2D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN) 37
3.2.1. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı güncelleme prosedürü 38
3.2.2. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı kütle tanıma prosedürü 41
3.2.3. Eleman düzeyinde tespiti - ANN Tasarımı 43
3.3. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL3D_INVSOL_ANN) 46
3.3.1. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı ortalama şeması 46
3.3.2. Kat düzeyinde tespiti - ANN tabanlı prosedürü 48
3.3.3. Eleman düzeyinde tespiti - ANN tabanlı prosedürü 49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 51
4.1. MSE tabanlı DI'lerin performansı 51
4.1.1. Mevcut DI'lerin araştırılması 52
4.1.2. DI NL'nin değerlendirilmesi 58
4.2. 2D yapılar için hasar tespiti - NL2D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN) 67
4.2.1. Kat düzeyinde tespiti - Basit hasar senaryoları için hasar tespiti prosedürü 67
4.2.2. Kat düzeyinde tespiti - Kütle tanıma tekniği için deneysel bir doğrulama 76
4.2.3. Kat düzeyinde tespiti - Simetrik hasar senaryoları için hasar tespiti prosedürü 85
4.2.4. Kat düzeyinde tespiti – Asimetrik ve hafif hasar senaryoları için hasar tanıma 93
4.2.5. Eleman (kolon ve kiriş) düzeyinde tespiti - ANN tabanlı hasar tespiti 100
4.3. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-Ters Çözüm-ANN tabanlı prosedürü 110
4.3.1. Asimetrik yapı (ASY-3D) için hasar tespiti 111
4.3.2. Simetrik yapı (SYM-3D) için hasar tespiti 125

4.4. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-ANN-ANN prosedürü (NL3D_ANN_ANN) 126
4.4.1. Kat düzeyinde hasar tespiti 129
4.4.2. Eleman düzeyinde hasar tespiti 135
5. SONUÇ 140
5.1. MSE tabanlı DIs ve NL güncelleme prosedürü (NL_MSE) 141
5.2. 2D Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN) 143
5.3. Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL3D_INVSOL_ANN) 145
5.4. NL3D-ANN-ANN prosedürü (NL3D_ANN_ANN) 146
KAYNAKLAR 148
ÖZGEÇMİŞ 153

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Transfer fonksiyonunun çıktısı
A	Kesit alanı
A_k	k^{th} frekansının reel kısım
b	Bias
b	Genişlik
B_k	k^{th} frekansının sanal kısım
C	Hasarsız durumdaki sistem rijitlik matrisi
C^*	Hasarslı durumdaki sistem rijitlik matrisi
C_j	Hasarsız durumdaki *j*'inci elemanın sistem rijitlik matrisine katkısı
C^*_j	Hasarlı durumdaki *j*'inci elemanın sistem rijitlik matrisine katkısı
C_{jo}	*j*'inci elemanın malzeme rijitlik özellikleri
C_{ko}	*k*'ıncı elemanın malzeme rijitlik özellikleri
E	Young'ın elastik modülü
E_j	Hasarsız durumdaki *j*'inci elemanın elastik modülü
E^*_j	Hasarlı durumdaki *j*'inci elemanın elastik modülü
E^*_k	Hasarlı durumdaki *k*'ıncı elemanın elastik modülü
f	Frakansı
f	Transfer function/ Transfer fonksiyonu
F	Error function/ Hata fonksiyonu
F_{ij}	Hasarsız durumdaki *j*'inci üyesinde *i*'inci modal enerjisinin değişimi
F^*_{ij}	Hasarlı durumdaki *j*'inci üyesinde *i*'inci modal enerjisinin değişimi
F_{max}	Bandwidth or Maximum frequency
FS	Sampling rate/ Örnekleme oranı
G	Kesme katsayısı
h	Yükseklik
H_o	Sıfır hipotezi
H_1	Alternatif hipotez
I	Atalet momenti
I_{eq}	Eşdeğer bir atalet momenti
j	Imaginary unit/Sanal birim
K_i	Hasarsız durumdaki *i*'inci modal rjitlik
K^*_i	Hasarlı durumdaki *i*'inci modal rjitlik
K_{ij}	Hasarsız durumdaki *i*'inci moddaki *j*'inci elemanın modal rijitliğe katkısı
K^*_{ij}	Hasarlı durumdaki *i*'inci moddaki *j*'inci elemanın modal rijitliğe katkısı

L	Uzunluk
$M_e^{distributed}$	Dağıtılmış kütle
M_e^{lumped}	Toplanmış kütle
mse	Mean squared error
n	Döngü sayısı
n	Transfer fonksiyonunun girişi
N	Düğüm sayısı
N	Fasıla sayısı
ND	Veri sayısı
NE	Eleman sayısı
NM	Mod sayısı
O_p	Tahmin edilen çıktı
O_t	Hedef çıktı
p	Tek giriş verisi
p	Giriş vektörü
R	Giriş verilerinin uzunluğu
rand	[0, 1] aralığında random bir sayı
S	Nöron sayısı
T	Frame size/ Çerçeve boyutu
X_k	k^{th} frekansının magnitüd
w	Weight/ Ağırlık
W	Weight matrix/ Ağırlık matrisi
Z_j	Normalize edilmiş gösterge
α_j	*j*'inci elemanın hasar şiddeti
α_i	Standart sapması
β_j	*j*'inci elemanın hasar indeksi
β_{ij}	*i'*inci modundaki *j*'inci elemanın hasar indeksi
$\overline{\beta_1}$	Ortalama
γ	Ortalaması sıfır ve varyansı bir olan random bir sayı
θ	Phase
λ_i	*i'*inci modundaki özdeğer
ρ	Yoğunluk
ρ_f	Frakansı için random gürültü seviyesi
ρ_m	Mod şekli için random gürültü seviyesi
σ	Standart sapma
ϕ_i	Hasarsız durumdaki *i*'inci mod vektörü
ϕ^*_i	Hasarlı durumdaki *i*'inci mod vektörü
ϕ_y	Kesme parametresi
Δf	Frequency resolution

Kısaltmalar	**Açıklama**
ANN	Yapay sinir ağı
BLWN	Kısıtlı bant beyaz gürültü

CDPM	Beton hasar plastisite modeli
CFMSS	İlk mod şekli eğimindeki değişiklikler
C.O.V.	Coefficient of variation/Değişim katsayısı
DEN	Payda
DFT	Discrete Fourier Transform
DI	Hasar indeks
DOF	Serbest derecesi
EB	Euler-Bernoulli
EMA	Deneysel modal analizi
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
FFT	Fast Fourier Transform
FRFs	Frekans tepki fonksiyonları
GA	Genetik algoritma
I	Atalet momenti
MSE	Modal şekildeğiştirme enerjisi
MSECR	Modal şekildeğiştirme enerjisi değişim oranı
MSEDIs	Modal şekildeğiştirme enerjisi hasar endeksler
NFV	Frekanslar doğal frekans vektörü
NFVAC	Doğal frekans vektörü güvence kriteri
NMA	Sayısal modal analiz
NUM	Pay
OMA	Operasyonel modal analizi
PDE	Hasar varlığı olasılığı
PGA	Pik yer ivmesi
RC	Betonarme
SB	Kesme- eğilme
SHM	Yapısal sağlık izleme
SSI	Stokastik Altalan Tanımlama
VBDITs	Titreşime dayalı hasar tanımlama teknikleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Nöronlar. A) Tek girişli B) Çoklu giriş C) Çoklu giriş için kısaltılmış form 11
Şekil 2.2. Transfer fonksiyon. A) Doğrusal B) Log- sigmoit. 12
Şekil 2.3. S nöronlu katmanı. A) Tam form B) Kısaltılmış form 12
Şekil 2.4. Üç katmanlı ağ 13
Şekil 2.5. Fourier dönüşümü 16
Şekil 2.6. Zaman alanı ve frekans alanı 17
Şekil 2.7. Zaman tanım alanı gelişigüzel veri. 18
Şekil 2.8. Fourier dönüşümünün ürünleri. A) Karmaşık düzlem B) 3D çizim (Radeş, 2001)..... 18
Şekil 2.9. Standart dalgalanmalara sahip normal bir dağılım 21
Şekil 3.1. 3D model ile 2D arasındaki idealleştirme..... 32
Şekil 3.2. 2D kiriş elemanı 33
Şekil 3.3. NL güncelleme prosedürü metodu için genel akiş diyagramı 37
Şekil 3.4. Hasar tanımlama için güncelleme prosedür A 40
Şekil 3.5. Kütle tanıma için güncelleme prosedürü 42
Şekil 3.6. ANN yöntemi. A) Önerilen ANN mimarisi B) Latin hypercube uygulama örneği..... 45
Şekil 3.7. Purelin transfer fonksiyon 45
Şekil 3.8. Önerilen hasar tespit tekniğinin akış şeması. A) NL3D-Ters Çözüm-ANN prosedürü B) Ortalama şeması C) Değişken belirleme örneği 47
Şekil 3.9. NL3D-ANN-ANN prosedürü 49
Şekil 4.1. Dikkate alınan konsol detayları..... 52
Şekil 4.2. S4a sonuçları. A) Mod şekli karşılaştırması B) Hasar şiddet tahmini C) DI'ler 53
Şekil 4.3. Çoklu ayrı hasar tanımlaması..... 55
Şekil 4.4. Çoklu hasar. A) Ardışık hasarlar B) hasar uzunluğu uzatması 56
Şekil 4.5. Senaryo M2b için güncellenmiş sonuçlar. A) Mevcut prosedür B) NL güncelleme prosedürü 59
Şekil 4.6. DI NL için güncelleme prosedürü..... 60
Şekil 4.7. Tek hasar için NL prosedüründe yakınsama sorunu..... 62
Şekil 4.8. NL prosedüründe yakınsama sorunu 63
Şekil 4.9. Tek katlı portal çerçeve için hasar indeksi güncellemesi 65
Şekil 4.10. Üç katlı portal çerçevesi için hasar indeksi güncellemesi 66
Şekil 4.11. Model 3S1B, birinci ve ikinci modları 69
Şekil 4.12. Model 3S1B için iterasyon tabanlı DI 69
Şekil 4.13. Model 3S1B için güncelleme prosedürü..... 70
Şekil 4.14. Güncelleme prosedürü. A) 20S1B B) 20S2B C) 30S4B. 72
Şekil 4.15. 20S1B için güncelleme prosedürü 73
Şekil 4.16. Güncelleme prosedürü. A) 20S1B B) 20S2B C) 30S4B 74
Şekil 4.17. 30S4B için Hızlı hasar tespiti. 75
Şekil 4.18. Test kurulumu. A) RF B) AF C) Kütle ekleme D) Acc E) Kiriş-kolon birleşimi F) Kolon-taban birleşimi 77
Şekil 4.19. Zaman tanım alanında işlenmemiş ham veriler. A) RF B) AF..... 80
Şekil 4.20. Bode grafikler. A) RF B) AF 81

Şekil 4.21. Mod karşılaştırması. A) Deneysel B) Model güncelleme C) Deneysel ve sayısal 83
Şekil 4.22. Model güncelleme. A) RF B) RF_updated 84
Şekil 4.23. Sayısal örnekler. A) 20S B) 20SX C) 30S D) 30SX 85
Şekil 4.24. Prosedür A tabanlı hasar tespiti. A) 20S B) 20SX C) 30S D) 30SX 86
Şekil 4.25. 30S için Prosedür A tabanlı güncelleme prosedürü 90
Şekil 4.26. 20SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti. A) Güncellenmemiş B) Güncellenmiş 91
Şekil 4.27. 20SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti 92
Şekil 4.28. 30SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti 93
Şekil 4.29. Sayısal model. A) SYM B) ASY 94
Şekil 4.30. Güncelleme prosedürü. A) SYM B) ASY 95
Şekil 4.31. Prosedür A tabanlı hasarlı kat tespiti. A) SYM B) ASY 96
Şekil 4.32. SYM için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. A) Güncellenmemiş B) Güncellenmiş C) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması 97
Şekil 4.33. ASY için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. A) Güncellenmemiş B) Güncellenmiş C) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması 99
Şekil 4.34. Performans yüzeyi. A) Eğitim (Training) B) Doğrulama (Validation) C) Test (Testing) 102
Şekil 4.35. ASY için ANN tabanlı *E* tahmini. A) 4 noktalı B) 6 noktalı C) 11 noktalı bölme 106
Şekil 4.36. ASY için ANN tabanlı DI tahmini. A) 4 noktalı B) 6 noktalı C) 11 noktalı bölme 107
Şekil 4.37. Yalnızca mod 1 ile ASY için sonuçlar 107
Şekil 4.38. Tip 1 kullanılarak ASY için hasar tespiti 109
Şekil 4.39. Tip 1 kullanılarak SYM için hasar tespiti 109
Şekil 4.40. Durum çalışması. A) ASY-3D B) SYM-3D C) Plan görünüş (mm) D) Eleman boyutları (mm) 110
Şekil 4.41. M1 için hasar tahmin sonuçları. A) X yönü B) Y yönü 112
Şekil 4.42. Hasar yerine bağlı DI'lerin tespitindeki hassasiyet 113
Şekil 4.43. Hasar senaryoları. A) M2, B) M3, C) M4, D) M5 115
Şekil 4.44. Hasar tespit tekniğinin performansı. A) M2, B) M3, C) M4 115
Şekil 4.45. M2 için hasar tespiti. A) 0,015-0,003 B) 0,02-0,004 118
Şekil 4.46. M4 için 0,01-0,002 seviyelerinde hasar tespiti 119
Şekil 4.47. ANN performansı 121
Şekil 4.48. Kimlik numaraları (ID). A) S7 B) S22 122
Şekil 4.49. Deterministik ANN tabanlı hasar tahminleri. A) M2 B) M4 123
Şekil 4.50. Deterministik ANN tabanlı hasar tahmini. A) M2 (0,01-0,002) B) M4 (0,005-0,001) 124
Şekil 4.51. İstatistiksel ANN (0,01-0,002) tabanlı M5 (0,01-0,001) için hasar tahminleri 124
Şekil 4.52. 0,01-0,002 gürültü seviyeleri ile SYM-3D'de eleman düzeyinde hasar tespiti sonuçları. A) X-dir B) Y-dir 125
Şekil 4.53. SYM-3D eleman düzeyinde hasar tespiti. A) S7'deki eleman numaraları, B) S22'deki eleman numaraları, C) ANN (0,01-0,002) tabanlı tahminler. 126

Şekil 4.54. Hasarsız ve hasarlı durumda mod şekilleri. A) X yönü B) Y yönü.....128
Şekil 4.55. S7 ve S22'de hasar senaryoları. A) B1 B) B2 129
Şekil 4.56. Gürültülü girdi verileri için nöron sayısı (*NH1=NH2*). A) 0,01-0,002 B) 0,5-0,1 C) 1-0,2 D) 1,5-0,3. 131
Şekil 4.57. 0.01-0.002 ANN tabanlı gürültüsüz veri kullanarak hasar tespiti A) B1 B) B2 132
Şekil 4.58. Mod şekillerinde gürültü etkileri A) B2 ve B2-1,5-0,3 B) B1 ve B1-1-0,2 C) B2 ve B2-0,3-0,06. 133
Şekil 4.59. Farklı gürültü seviyeleri için hasar tespiti A) B1 B) B2 135
Şekil 4.60. Gürültülü giriş verileriyle nöron sayısı (*NH1=NH2*) hesabı. A) 0,01-0,002 B) 0,025-0,05 C) 0,05-0,01 D) 0,3-0,06. 136
Şekil 4.61. Gürültüsüz veriler kullanılarak 0,01-0,002-ANN tabanlı hasar tespiti A) B1 B) B2 137
Şekil 4.62. Farklı gürültü seviyelerinde B1 (Sol) ve B2 (Sağ) senaryoları eleman düzeyinde hasar tespiti sonuçları. A) 0,01-0,002 B) 0,025-0,005 C) 0,05-0,01, D) 0,3-0,06. 139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Tek hasar tanımlaması 54
Çizelge 4.2. Çok hasar tanımlaması 57
Çizelge 4.3. Ardışık hasarlar tanımlaması 58
Çizelge 4.4. Güncelleme prosedürünün sonuçları 61
Çizelge 4.5. Çerçevelerle ilgili genel bilgiler 67
Çizelge 4.6. Modal modları 82
Çizelge 4.7. Çerçevelerle ilgili genel bilgiler 105
Çizelge 4.8. Hasarsız durum için ASY-3D ve SYM-3D kütle katılım oranları 111
Çizelge 4.9. ANN performansı 122
Çizelge 4.10. ASY-3D için bozulmamış aşamanın kalıcı bilgileri 127
Çizelge 4.11. Hasarlı yapıların frekansları 129

1. GİRİŞ

Şiddetli rüzgar ve deprem yüklerine maruz yüksek binalar önemli ölçüde hasar görme potansiyeline sahiptir. Genel olarak iyi derecede mühendislik hizmeti alan bu yapılar kısmen hasar gördüklerinden ve dahi söz konusu hasarların gözle tespiti kaplama, tesisat katları vb. nedenlerle çoğu durumda doğrudan mümkün olmayacağından izlenmeleri riskin ortadan kaldırılması açısından oldukça önem arz eder. SHM terimi, hasar oluşumunu tespit etmek, hasarlı elemanları yerelleştirmek, hasar ciddiyetini tahmin etmek ve yapıların kalan hizmet ömrü boyunca bunları tahmin etmek için yeni ve uygulanabilir yaklaşımların geliştirilmesi bu çalışmaya konu edilmektedir. Ancak bilindiği üzere betonarme, çelik veya kompozit bir yüksek yapıda çok farklı hasar mekanizması ya da türü tanımlamak mümkündür. Söz konusu hasarlar düşük önem derecesinden çok yüksek önem derecesine kadar da sınıflandırılabilir. Yüksek seviyede hasarın yapı-sağlığı izleme yöntemleri ile kısa sürede varlığını kanıtlamak frekans düzeyinde rahatlıkla gerçekleştirilebilecek bir durum iken düşük seviyelerde hasarların tahmini yukarıda da ifade edilen gerekçeler ile mümkün olmayabilir. Bu nedenle bu çalışmada genel hatlarıyla pratik olarak sınırlı hasar ya da kullanılabilirlik sınır düzeyi durumundaki nispeten daha düşük hasar düzeyleri tahmini hedeflenmektedir. Bu manada mertebe itibari ile bir kesitin rijitliğini % 30'nun kaybı genel olarak çalışmada sınır teşkil etmektedir. Literatürde konuyla ilgili oldukça fazla sayıda çalışma olmasına karşın burada konu edilen yüksek yapılar için oldukça kısıtlı sayıda örnek mevcuttur. Söz konusu örnekler ise genellikle yapı yapılırken yerleştirilmiş şekildeğiştirme ölçer deplasman ölçer ve ivme ölçer gibi birçok enstrümanın birlikte ve çok sayıda kullanılmasıyla sağlık izlenmesi gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle enstrümantasyon çok pahalı bir hal almakta ve öngörülen bölgeler dışında meydana gelebilecek hasarların bu yolla tespiti mümkün olamamaktadır. Bu bağlamda hasarın konumunu ve şiddetinin tahmini araştırmacıların ulaşmaya çalıştığı en önemli odak noktası haline gelmiştir. Bu tezde, sağlıklı (hasarsız) durum ve hasar sonrası aşamalarda toplanan modal veriler ile birlikte binaya özel tanımlanan özel modellere dayanarak var olan birçok yaklaşıma göre çok daha az enstrümantasyon maliyeti ile çok daha yüksek duyarlılıkta yerelleştirme kabiliyetine sahip yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu bakış açsına göre binaların hasarlı katı ilk aşamada yerelleştirilerek daha sonra hasar oranı tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Bu aşamada oldukça az sayıda ivme ölçer

enstrümante edilmesi hedeflenmekte bu yolla yöntemin hemen her sistemde ekonomik olarak da uygulanabilir ve tercih edilebilir olması hedeflenmektedir. Bu aşamadan sonra ise tahmini toplam hasar şiddeti ile tespit edilen hasarlı katlarda, bilinmeyen hasarlı elemanlar (kolonlar, kirişler ve perde duvarlar) tespit edilmesi ve sonra hasar şiddeti belirlenmesi hedeflenmektedir. Söz konusu amaçlara ulaşmak için tez iki ana adıma değerlendirilmektedir.

Bu tezde ilk olarak MSE tabanlı bir yöntemin artıları ve eksileri araştırılmaktadır. Bunun yanı sıra, hasar tespiti için daha fazla doğruluk elde etmek için orijinal yaklaşım geliştirilmektedir ve sonuçları açısından daha doğru sağlık tahminine olanak sağlayacak düzeltmeler ile benzer bir bakış açısıyla yeni bir yöntem üretilmektedir. Bundan sonra, kat seviyelerinde hasar tespiti için tamamen yeni bir teknik geliştirilerek ardışık olarak her iki yöntemin birlikte kullanılması ile tam bir yapı sağlığı izleme yaklaşımı üretilmektedir. Önerilen yaklaşımın ana fikri, özdeğer probleminin ters çözümüne dayanmaktadır. Daha sonra tespit edilen katlardaki hasarlı bileşenleri tespit etmek için ANN yöntemi uygulanmaktadır. Bu şekilde elde edilmiş bütünleşik yaklaşım için bu çalışmada Ters Çözüm-ANN prosedürü ifadesi kullanılmaktadır. Buna alternatif olarak, bir ANN hibrit prosedürü, yani ANN-ANN, kat seviyesi ve eleman sağlık izlemesi ile alakalı olarak yine bu çalışmada ikinci bir yöntem olarak sunulmaktadır.

Birinci olarak, MSE tabanlı yaklaşım, mod şekillerini elde etmek için büyük binalardaki çok sayıda düğümde titreşim bilgisi gerektirdiğinden, eşdeğer model gerçek bir modelden ziyade daha uygulanabilir bir yaklaşımdır. Diğer bir ifadeyle gerçekte çok sayıda düğüm noktasından veri alabilmek ve eş zamanlı bu verileri işleyebilmek ekonomik sorunlar nedeniyle pratikte imkansız bir hal alabilmektedir. Sonuç olarak, çalışmada hedeflenen yaklaşım ile mod şekillerini elde etmek için yapı sisteminin yüksekliğine bağlı olarak basit bir sensör sistemi kullanılabilmektedir. Bu sistem mevcutta yüksek yapılar için kullanılan izleme yöntemlerine nazaran oldukça az sayıda enstrüman ile daha yüksek hassasiyette sonuç üretme kapasitesine sahip olabilecektir. Bundan sonra, eşdeğer modeldeki tespit edilen eleman, gerçek binalardaki hasarlı durumu hakkında bilgi elde etmek için yeterli olmaktadır. Bu bakış açısıyla kiriş benzeri bir örnek üzerinde mevcut hasar endekslerin geçerliliği üzerine sayısal bir araştırma yapılarak, yüksek mod şekillerinin yaklaşımın doğruluğu üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Daha da

önemlisi, literatürde MSE tabanlı yöntemlerden DI B'ye dayanarak, hasar şiddeti tanımlanabilirliğini yükseltmek için bir güncelleme prosedürü, bu çalışmada anılan ismi ile NL (Nguyen ve Livaoğlu) prosedürü uygulanmaktadır. Sonuç olarak, NL prosedürü genellikle sadece temel mod şekillerini kullanarak gerçeklerden % 20'den daha az hata içeren hasar tahmini vermektedir. Buna ek olarak mevcut yöntemlerin çoklu hasar durumunda tahmin kabiliyetlerinin oldukça azalması gibi bir hususun burada önerilen NL prosedüründe meydana gelmeyeceği yine yapılan çalışmaların sonucundan görülmektedir.

İkinci olarak, bu çalışma kapsamında kat seviyelerinde hasar tespiti için tamamen yeni bir yaklaşım getirilmiştir. Bu yöntemin, yüksek yapılarda uygulama için MSE tabanlı yöntemden kaynaklanan kısıtlamaların üstesinden gelmesi beklenmektedir. Yöntem, özdeğer problemine dayalı ters çözümden istifade edilerek oluşturulmaktadır. Rijitlik ve kütle matrisleri gibi hasarsız durumun mekanik özellikleri ve hasarlı durumda mod şekilleri, yöntemin girdileri olarak seçilmiştir. Pratikte, ekonomik sorunlar nedeniyle yalnızca kısıtlı sayıda serbestlik derecesi için ölçüm alınabilmektedir. Bu manada ölçülen özvektörlerin boyutu gerçek durumda olduğundan oldukça az sayıda ya da diğer bir ifadeyle çok daha sınırlı sayıda veri ile çok sayıda serbestlik derecesinin davranışının tahmin edilmesi beklenmektedir. Bu nedenle, hasarsız durumdaki matrisler, ölçülen mod şekilleri ile uymlu olacak şekilde küçültülmesi gerekmektedir. Bu amaçla Guyan statik yoğuşma prosedürü uygulanarak söz konusu idealleştirme gerçekleştirilmektedir. Yöntemi uygulamak için, titreşim sırasında yanal yer değiştirmeyi tanımlayabilmek için kat başına yalnızca bir tek eksenli ivmeölçer gerekir. Sensör ağına göre, rijitlik ve kütle matrisleri yoğunlaştırılır. Sonuç olarak, mod şekillerindeki değişiklikler, mevcut durumda rijitlik matrisinde değişikliklere yol açar. hasarsız durumda elde edilen emsal ile karşılaştırıldığında, her katın sağlığı yaklaşık olarak belirlenir. Yoğunlaştırma prosedürünün karmaşık olduğu ve bu nedenle bir miktar tahminin gerekli olduğu söylenebilir. Hasar lokalizasyonu ve ciddiyetine ilişkin ilk tahmin, yoğunlaştırma tekniğinin doğasında bulunan yaklaşıklık nedeniyle doğru olmayabilir. Ancak, kabul edilen yaklaşıma dayalı olarak, ilk sonucu iyileştirmek için ise bir güncelleme prosedürü tasarlanmıştır. Her yinelemeden sonra, hasar tanımlaması önceki sonuçlardan geliştirilir. Ters çözüme dayalı olarak, bu tezde özellikle Prosedür A ve Prosedür B olmak üzere iki prosedür sunulmaktadır. Önerilen prosedürler 2D 20 katlı ve 30 katlı çerçeveler üzerinde

doğrulanmıştır. Önce simetrik ve ağır hasar senaryoları değerlendirilmiş, daha sonra ise hafif ve asimetrik hasar konfigürasyonları dikkate alınarak yöntem değerlendirmesi genişletilmiştir. Bu adımın sonunda, hasarlı perde, kolon ve kirişlerin tespiti için ANN yöntemi kullanılarak bir sonraki adım için girdi verilerinin oluşturulması için potansiyel hasarlı katları içeren bir liste dikkate alınmaktadır.

Üçüncü aşamada, temel seviyelerdeki hasar şiddetini tespit etmek ve tahmin etmek için yapay bir sinir ağı eğitim prosedürü söz konusu yönteme entegre edilerek yöntemin farklı bir bakış açısıyla gerek kontrolü gerekse güvenilirliği de eşzamanlı denetlenmektedir. Belirtilen hasarlı yapısal bileşenlere (düşey ve yatay taşıyıcı elemanlar) iki gizli katmana sahip bir ağ kullanılarak tanımlanmaktadır. Söz konusu ağın çıktıları, istenen öğelerin sağlıklı durumunu gösterirken, hasarı tanımlayabilmek için örüntü tanıma istatistiksel yaklaşımı bu vektör kullanılarak uygulama gerçekleştirilir. Önerilen yöntem 20 katlı çerçeve üzerinde sayısal olarak doğrulanmıştır. Güvenilir algılama elde etmek için bazı giriş verileri türleri tanıtılırken bunlardan yalnızca yanal yer değiştirme modu şekillerini içeren girdi verileri ilk olarak dikkate alınır. Daha sonra her katın rotasyon bilgisi de girdilere eklenmektedir.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında 3D 30 katlı bir yapı sistemi, dördüncü aşama olarak, ters çözüm-ANN yöntemi kullanılarak diğer uygulamalardan farklı bir şekilde üç boyutlu olarak değerlendirilmektedir. Genel bakış açısına benzer şekilde burada da kat düzeyinde algılama hedeflenmektedir. 2D çerçeveler üzerinde uygulanan orijinal inversiyon çözümüne dayalı prosedürle karşılaştırıldığında, 3D problemin karmaşıklığını çözmek için bazı idealleştirmelerin yapılması gerekliliği açıktır. Özellikle, ters çözüme dayalı bir ortalama alma şeması burada önerilen yöntemde ön görülmektedir. Eleman düzeyinde hasar tespiti için ise ANN yöntemi uygulanmaktadır. Burada hasarlı perde duvarlar ve kolonların tespiti hedeflenmektedir. Pratik koşullar nedeniyle, sensör ağı düşünüldüğünde, kat başına sadece bir çift eksenli ivmeölçerin bu yöntem için yeterli olacağı ifade edilebilir.

Son olarak, 3D binanın hem kat seviyesinde hem de eleman bazında hasar tespiti için ANN tabanlı bir prosedür bu çalışma kapsamında önerilmektedir. yukarıda bahsedilen basit sensör ağı tarafından üretilen veriler girdi olarak yine bu yöntemde de

değerlendirilmektedir. Mod verilerine ve izlenen binanın karmaşıklığına bağlı olarak hasarın kat seviyesindeki tahmini ilk aşamada mümkün olabilmektedir, ardından kusurlu elemanlar (perde duvarlar ve kolonlar) ikinci olarak bu yöntemde tahmin edilebilmektedir. Diğer önerilen yaklaşımlardan farklı olarak bu çalışmada 1.aşama diğer bir ifade ile hasarın kat düzeyinde tespitinde ANN tabanlı bir prosedür de geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda yüksek katlı bir binanın, ilk üç modu yada daha azı kullanılarak , kiriş benzeri bir sistemle yaklaşık olarak aynı şekilde davrandığı varsayılmaktadır (Tributsch ve Adam, 2018). Söz konusu idealleştirmenin Chang ve diğerleri (2018) tarafından da hasarlı katları tespit etmek için toplanmış kütle yaklaşımı ile kullanıldığı bilinmektedir. Bu çalışmada da girdileri oluşturmak için benzer bir idealleştirmeden yararlandığı ve dolayısıyla benzer yaklaşımların literatürde var olduğu ifade edilebilir. Bu tezde, ters çözüm kullanılarak, yapının bütün matrisleri, sırasıyla 2D ve 3D problemlerini göz önünde bulundurarak bir toplu kütle sistemine dönüştürülerek, özdeğer problemine dayalı ters çözüm, yalnızca en düşük iki modunu yardımıyla yüksek yapıların hasarlı katlarını tespit etmek için doğrudan kiriş benzeri yapılara uygulanması mantığına dayanmaktadır. Yüksek binalardaki ve kiriş benzeri sistemlerdeki hasarın muhtemelen en düşük modlara göre yada yüksek modların da katkısıyla yine bu modların etkinliği ile ortaya çıktığı açıktır. Böylece bir kat hasar gördüğünde, üzerinde bulunan perde, kolon, kiriş, döşeme gibi tüm elemanların rijitlik parametresinin aynı oranda azaldığı kabul edilebilir. Bu nedenle, gerçek hasar senaryosundan bağımsız olarak, katın yanal yer değiştirmeye direnen rijitliği bir indirgeme faktörü olarak değerlendirilebilir. Söz konusu katsayı burada kata ait sağlığının temsil eden bir parametredir. Bu basitlikten dolayı, bir ANN modeli, ilk üç en düşük eğilme modunun frekansları ve mod şekilleri açısından farklılıklara dayalı olarak her katın azaltma faktörünü yakalamak için tasarlanmıştır. Hasarlı katlar tespit edildikten sonra, yukarıda Adım 2'de oluşturulan ANN tabanlı strateji kullanılarak duvar ve kolonların tespiti hedeflenmektedir. Moda ait veriler gürültüsüz ve gürültüden arındırılmış olduğunda önerilen yaklaşımın fizibilitesi ve etkinliği ilerleyen başlıklarda araştırılmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1. MSE tabanlı mevcut DI'ler

Literatürden yaygın olarak kullanılan hasar indeksleri yöntemleri DI A ve DI B ilk olarak Kim ve Stubbs (1995a, 1995b, 1996, 2002) tarafından önerilmiştir. Kuramsal olarak hasar indeksleri (DI), hasarsız ve hasarlı durum arasındaki modal şekildeğiştirme enerjisindeki değişimlere bağlı olarak oluşturulmaktadır. *NE* sayıda elemana ve *N* sayıda düğüm noktasına sahip olan lineer, hasarsız, taşıyıcı sistem için, rastgele bir yapının *i*'inci modal rijitlik denklemi (2.1) olarak yazılabilir. Bu mantıkla *j*'inci elemanının modal rijitliğe K_{ij} katkısı ise (2.2) eşitliğ yardımıyla elde edilebilir. Denklemlerde, Φ_i, mod vektörü ve C, sistem rijitlik matrisidir, C_j, *j*'inci elemanın sistem rijitlik matrisine katkısını temsil etmektedir. $C_{j''}$'nin, denklem (2.3)'te gösterildiği gibi, malzeme rijitlik özellikleri, elastisite modülü, E_j ve sadece geometrik özellikleri (Poisson oranını da içeren) içeren terimlerden ibarettir. Bundan sonra, *j*'inci üyesinde *i*'inci modal enerjisinin değişimi F_{ij}, denklem (2.4) ile elde edilebilir.

$$K_i = \phi_i^T C \phi_i \tag{2.1}$$

$$K_{ij} = \phi_i^T C_j \phi_i \tag{2.2}$$

$$C_j = E_j C_{jo} \tag{2.3}$$

$$F_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_i} \tag{2.4}$$

Benzer şekilde hasar gören bir aşama ile ilişkili olarak yukarıda belirtilenlere karşılık gelen parametreler (2.1-2.4 denklemleri) yıldız işaretleri ile tanımlanmaktadır. Söz konusu denklemlere benzer şekilde hasar görmüş durum için denklemler bu bağlamda aşağıdaki eşitlikler vasıtasıyla elde edilebilir.

$$K_i^* = \phi_i^{*T} C^* \phi_i^* \tag{2.5}$$

$$K_{ij}^* = \phi_i^{*T} C_j^* \phi_i^* \tag{2.6}$$

$$C_j^* = E_j^* C_{jo} \tag{2.7}$$

$$F_{ij}^* = \frac{K_{ij}^*}{K_i^*} \tag{2.8}$$

Bu yaklaşımdan hareketle *j*'inci düğüm noktası için *i*'inci modun modal duyarlılıklarının hasar meydana geldikten sonra da değişmediği yaklaşık olarak kabul edilebilir ($F^*_{ij} \approx F_{ij}$). Söz konusu kabul ile, E_j'nin azaltılması, *j*'inci eleman için hasarın bir göstergesidir. Salawu'ya (1997) göre bir elemanın hasarı mesnet hasarı, çatlak ilerlemesi, kesme hasarı ve aşırı yüklenmeden kaynaklanabilir. Basitleştirme maksadıyla *E,* bir hasar parametresi olarak kabul edilebilir. Bu nedenle DI'ler, Elastisite modülünün iki aşamada elde edilen farklılıklar için tahmin edilebilir niteliktedir. Literatürde önerilen formu ile yöntem başlangıçta denklem (2.9)'da DI A üretmek için β_{ij} oranını sadece yaklaşık olarak *i'*inci moddaki bilinmeyen hasarlı rijitlik, ($K_i^* \approx \Phi_i^{*T} C \Phi_i^*$) olduğu varsayılarak belirlenir. Bu yaklaşım 1. Yaklaşım olarak yada DI A olarak ifade edilmektedir.

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{\phi_i^{*T} C_{jo} \phi_i^*}{\phi_i^T C_{jo} \phi_i} \frac{K_i}{K_i^*} = \frac{NUM}{DEN} \tag{2.9}$$

j'inci eleman için koordinatlar ile *i*'inci moda ait modal koordinatlar çakışır yada birbirlerine çok yakın değerler alması durumunda, (2.9) denkleminin paydası sıfır veya yaklaşık olarak sıfır değeri alacaktır. Bu durumda, denklem (2.9) matematiksel olarak bir hataya neden olurken, DI A pozitif bir yanlış tahmin sonucu üretecektir. Sorunu çözmek için, $F^*_{ij} \approx F_{ij}$ varsayımı yaklaşık olarak, $F_{ij} << 1$ olduğundan, (2.10) denklemi olarak yeniden yazılabilir. Bundan sonra, denklem (2.8) ve denklem (2.4) yerine F^*_{ij} and F_{ij} kabulü ile denklem (2.11) elde edilmiş olacaktır. Bu denklemden, (2.17) denklemi ile elde edilecek DI B'yi tahmin edebilmek için, yaklaşık bir prosedürden yararlanır. Bu prosedürde ilk olarak, K_i^* için Varsayım 1 tekrarlanır. İkincisi, hasarlı aşamada, her bir eleman, örneğin *k*'ıncı elemanın E_k^* Elastisite modülü değerine sahip olduğu kabul edilir. DI, β_{ij}, denkleminden (2.16) elde edebilmek için $E_k^* = E_j^*$ 'nin bir başka yaklaşımı uygulanır. Başka bir deyişle, hasardan sonra her bir bileşenin gerçek elastisite modülünü görmezden gelerek, her bir bileşen *j*'inci elemandan biriyle aynı değer aldığı kabulüyle tekrar uyarlanır. Bu aşamaya Varsayım 2 denir. Ek olarak, C_{ko} parametresi *k*'ıncı elemanının global rijitlik matrisine katkısı ile ilgilidir ve *j* ila *k* değiştirilerek denklem (2.3) ile tamamen aynı şekilde karakterize edilebilir.

$$1 = \frac{F_{ij}^* + 1}{F_{ij} + 1} \tag{2.10}$$

$$1=\frac{K_{ij}^{*}+K_{i}^{*}}{K_{ij}+K_{i}}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.11}$$

$$1=\frac{\left(\phi_{i}^{*T}C_{j}^{*}\phi_{i}^{*}+\phi_{i}^{*T}C^{*}\phi_{i}^{*}\right)}{\left(\phi_{i}^{T}C_{j}\phi_{i}+\phi_{i}^{T}C\ \phi_{i}\right)}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.12}$$

$$1=\frac{\left[\phi_{i}^{*T}C_{j}^{*}\phi_{i}^{*}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{*T}C_{k}^{*}\phi_{i}^{*}\right)\right]}{\left[\phi_{i}^{T}C_{j}\phi_{i}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}C_{k}\phi_{i}\right)\right]}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.13}$$

$$1=\frac{\left[\phi_{i}^{*T}E_{j}^{*}C_{jo}\phi_{i}^{*}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{*T}E_{k}^{*}C_{ko}\phi_{i}^{*}\right)\right]}{\left[\phi_{i}^{T}E_{j}C_{jo}\phi_{i}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}E_{k}C_{ko}\phi_{i}\right)\right]}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.14}$$

$$1=\frac{E_{j}^{*}\left[\phi_{i}^{*T}C_{jo}\phi_{i}^{*}+\frac{1}{E_{j}^{*}}\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{*T}E_{k}^{*}C_{ko}\phi_{i}^{*}\right)\right]}{E_{j}\left[\phi_{i}^{T}C_{jo}\phi_{i}+\frac{1}{E_{j}}\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}E_{k}C_{ko}\phi_{i}\right)\right]}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.15}$$

$$\beta_{ij}=\frac{E_{j}}{E_{j}^{*}}=\frac{\left[\phi_{i}^{*T}C_{jo}\phi_{i}^{*}+\frac{1}{E_{j}^{*}}\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{*T}E_{k}^{*}C_{ko}\phi_{i}^{*}\right)\right]}{\left[\phi_{i}^{T}C_{jo}\phi_{i}+\frac{1}{E_{j}}\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}E_{k}C_{ko}\phi_{i}\right)\right]}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}} \tag{2.16}$$

$$\beta_{ij}=\frac{E_{j}}{E_{j}^{*}}=\frac{\left[\phi_{i}^{*T}C_{jo}\phi_{i}^{*}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{*T}C_{ko}\phi_{i}^{*}\right)\right]}{\left[\phi_{i}^{T}C_{jo}\phi_{i}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}C_{ko}\phi_{i}\right)\right]}\frac{K_{i}}{K_{i}^{*}}=\frac{NUM}{DEN} \tag{2.17}$$

Kim ve Stubbs (2002) çalışmalarında daha doğru sonuçlar elde etmek için yukarıda ifade edilen iki endeksten farklı olarak MSE yaklaşımı kullanılarak üçüncü endeks olan DI C'yi literatüre sunmuşlardır. Bu yaklaşımda hasarlı eleman sayısının (*ND*) bilinen durumunda olması durumunda, DI C denklem (2.18)'de önerildiği şekliyle hasar indekslerinin elde edilmesi fikrine dayanmaktadır. Denklem (2.18)'de, iki aşama arasındaki özdeğer, $\Delta\lambda_i$'deki değişiklik DI C'yi karakterize etmektedir.

$$\beta_{ij}=\frac{E_{j}}{E_{j}^{*}}=\frac{\phi_{i}^{*T}C_{jo}\phi_{i}^{*}}{\left[\phi_{i}^{T}C_{jo}\phi_{i}+\sum_{k=1}^{NE}\left(\phi_{i}^{T}C_{ko}\phi_{i}\right)\frac{\Delta\lambda_{i}}{\lambda_{i}}\frac{1}{ND}\right]}\frac{K_{j}}{K_{j}^{*}}=\frac{NUM}{DEN} \tag{2.18}$$

Gösterilen üç DI β_{ij} (denklem 2.9, 2.17, 2.18) yalnızca tek bir modun, örneğin *i'inci* modunun *j'inci* elemanın DI'si üzerindeki etkisi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çoklu

modların etkilerini birleştirmek için, denklem (2.19)'te görüldüğü gibi bir kombinasyon şeması kurulur. Her DI durumu için, tek bir modun dikkate alınmasının bir numeratör (*NUM*) ve bir payda (*DEN*) ile sonuçlandığını açıklamaya değer. Birden fazla modu dikkate almak için, denklem (2.19)'daki kümülatif DI'nin payı ve paydası, 1'inci moddan *NM*'inci moduna kadar bir mod kullanılarak ayrı ayrı hesaplanan numeratör ve paydaların doğrudan eklenmesiyle hesaplanır.

Mod şekillerinin bir kombinasyonunun dikkate alınması durumunda, üç DI'nin tümüne uygulanabilecek ek bir yol bu çalışmada ilerleyen başlıklarda önerilmektedir. *j*'inci eleman için DI, β_j, i = 1:*NM* mod şekilleri aynı anda *NUM*/*DEN* değişimleri sadece tek bir mod uygulandığı denklem (2.19)'te gösterildiği gibi kabul edilebilir.

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} NUM}{\sum_{i=1}^{NM} DEN} \tag{2.19}$$

Son olarak, üç yaklaşımın (DI A, DI B, ve DI C) her biri için *j*'inci elemanda, denklem 2.19'un ürünü, hasarsız durumdaki *E* değerleri ile hasarlı durumdaki E_j ve E_2 arasındaki orandır. *j*'inci elemanın sağlığı, bu tahmin edilen fraksiyona dayalı olarak değerlendirilebilir. Özellikle $\beta_j > 1$, $E^*_{j''}$'nin E_j'den daha düşük olduğu anlamına gelir, bu bir hasar göstergesidir.. Ayrıca *j*'inci elemanın hasar şiddeti, α_j, denklem 2.20 kullanılarak hızla hesaplanabilir. *j*'inci eleman için $\beta_j > 1$ olması durumu hasara işaret eder. Ardından, karşılık gelen hasar şiddeti α_j, elastik modülünün E_j'den E^*_j'ye düşmesi ile temsil edilir. Denklem (2.20) yardımıyla bu değişim hızlı bir şekilde hesaplanabilir.

$$\alpha_j = \frac{1}{\beta_j} - 1 \tag{2.20}$$

2.1.2. Guyan matris yoğunlaştırma prosedürü ve hasar tespitinde uygulanışı

Yapı sistemlerinin bazılarında rijit cisim hareketinin gözlemlendiği veya diğer salınım modlarına nazaran oldukça küçük düzeyde elastik şekildeğiştirmelerin doğmasına neden olacak salınım modlarından bahsetmek mümkündür. Bu durumda elde edile özdeğerler ya sıfır ya da sıfıra çok yakın değerler almakta ve hesap açısından gereksiz işlem yoğunluğuna neden olmaktadırlar. Bu nedenle sistem üzerinde söz konusu etkilerin elemine edilmesi ve daha sade bir çözümle sonuca ulaşabilmek mümkündür. Guyan

yoğunlaştırma tekniği (Guyan, 1965) bu şekilde birçok mekanik sistemdeki söz konusu etkiyi ortadan kaldırarak daha çabuk sonuç üretmek konusunda etkili bir yaklaşımdır.

Bu yaklaşımda, rijitlik matrisi, $\boldsymbol{K}$ ve kütle matrisi, $\boldsymbol{M}$ olan bir yapısal problem genel öz değer problem çözümünde, $\boldsymbol{\lambda}$ öz değerleri ve $\boldsymbol{\Phi}$ özvektörlerine karşılık gelen mod şeklinin elde edildiği denklem (2.21) olarak verilmiştir. Mesnet koşullarına bağlı olarak rijit cisim hareketinden farklı şekilde hareketi kontrol eden ana DOF'lar ve yoğunlaştırılan bağımlı DOF'lar belirlendikten sonra, matrisler yeniden düzenlenebilir. Sonuç olarak denklem (2.21), denklem (2.22) olarak ayrıştırılmış ve yoğunlaştırılmış bir biçimde yeniden yazılabilir. Burada *m* ve *s* alt simgelerinin, ana (master) ve bağımlı (slave) birimlere karşılık gelen parametreleri göstermektedirler.

$$(\boldsymbol{K}-\boldsymbol{\lambda M})\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{0} \tag{2.21}$$

$$\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{mm} & \boldsymbol{K}_{ms}\\ \boldsymbol{K}_{sm} & \boldsymbol{K}_{ss}\end{bmatrix}-\boldsymbol{\lambda}\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{mm} & \boldsymbol{M}_{ms}\\ \boldsymbol{M}_{sm} & \boldsymbol{M}_{ss}\end{bmatrix}\right)\begin{Bmatrix}\boldsymbol{\Phi}_m\\ \boldsymbol{\Phi}_s\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0}\end{Bmatrix} \tag{2.22}$$

Aşağıda verilen $\boldsymbol{K_G}$ ve $\boldsymbol{M_G}$ indirgenmiş rijitlik ve kütle matrisleridir. Herhangi bir yapısal problem için öz değer problemi (2.23)-(2.25) denklemleri ile söz konusu yoğunlaştırma tekniği kullanılarak tanımlanabilmektedir. İndirgenmiş matrisler $\boldsymbol{K}_G$ ve $\boldsymbol{M}_G$ iki kısma bölündüğünde, ilk kısımlar $\boldsymbol{K}_{mm}$'ye eşit $\boldsymbol{K}_f$'yi ve $\boldsymbol{M}_{mm}$'ye eşit $\boldsymbol{M}_f$'yi içerirken kalan terimler ikinci kısımlar $\boldsymbol{K}_l$ ve $\boldsymbol{M}_l$ olarak kabul edilir.

$$(\boldsymbol{K}_G-\boldsymbol{\lambda M}_G)\boldsymbol{\varphi}_m=\boldsymbol{0} \tag{2.23}$$

$$\boldsymbol{K}_G=\boldsymbol{K}_{mm}-\boldsymbol{K}_{ms}\boldsymbol{K}_{ss}^{-1}\boldsymbol{K}_{sm}=\boldsymbol{K}_f+\boldsymbol{K}_l \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_G&=\boldsymbol{M}_{mm}+\boldsymbol{K}_{ms}\boldsymbol{K}_{ss}^{-1}\boldsymbol{M}_{ss}\boldsymbol{K}_{ss}^{-1}\boldsymbol{K}_{sm}-\boldsymbol{K}_{ms}\boldsymbol{K}_{ss}^{-1}\boldsymbol{M}_{sm}-\boldsymbol{M}_{ms}\boldsymbol{K}_{ss}^{-1}\boldsymbol{M}_{sm}\\&=\boldsymbol{M}_f+\boldsymbol{M}_l\end{aligned} \tag{2.25}$$

Daha sonra hasar gören bir aşama ile ilişkili olarak yukarıda belirtilenlere karşılık gelen parametreler (denklemler 2.23-2.25) yıldız işaretleri ile verilmektedir. Söz konusu denklemlere benzer şekilde hasar görmüş durum için denklemler aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla elde edilebilir (denklemler 2.26-2.28).

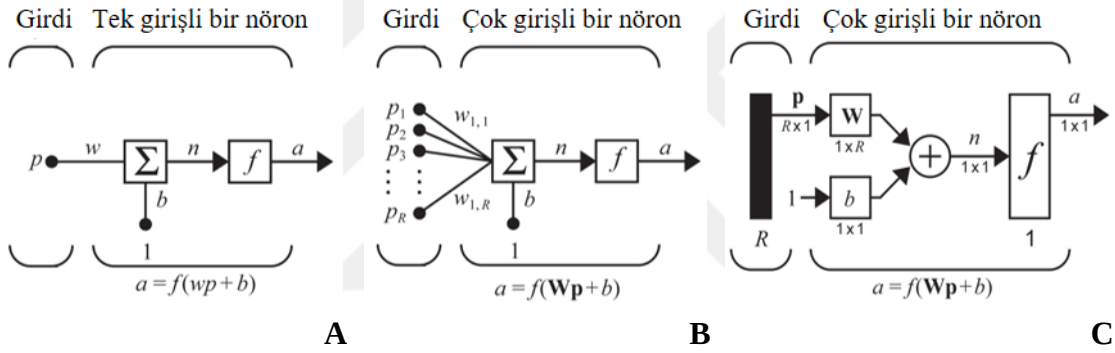
$$(\boldsymbol{K}_G^*-\boldsymbol{\lambda}^*\boldsymbol{M}_G^*)\boldsymbol{\varphi}_m^*=\boldsymbol{0} \tag{2.26}$$

$$\boldsymbol{K}_G^*=\boldsymbol{K}_f^*+\boldsymbol{K}_l^* \tag{2.27}$$

$$\boldsymbol{M}_G^* = \boldsymbol{M}_f^* + \boldsymbol{M}_l^* \tag{2.28}$$

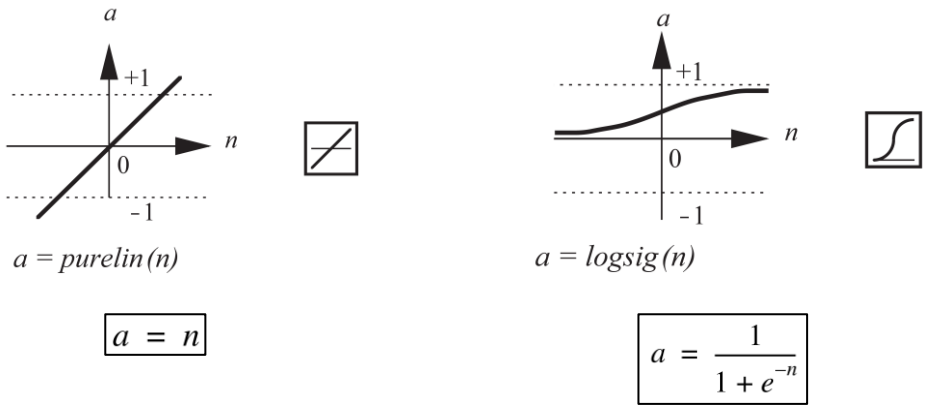
2.1.3. Yapay sinir ağı

Yapay sinir ağları, insan beyni biyolojik sinir sisteminin bilgiyi işleme biçimine benzer şekilde nöronlar arasındaki işlem öğelerini ve birbirine bağlı ağırlıkları etkileri üzerinden sonuç üretme yaklaşımı olarak basitçe ifade edilebilir. Şekil 2.1'de genel sinir ağı türleri gösterilmektedir (Hagan ve diğerleri, 1995). Genel şema anlaşılmak istenirse Şekil 2.1 a'da gösterilen tek girişli bir nöron şeması üzerinde, girdi *p*, ağırlık *w* ile çarpılarak sonuç. ürüne bir bayas *b* ve değeri 1 olan başka bir girdinin ürünü eklenerek son ürün elde edilmektedir. Sonuç olarak, genellikle net girdi olarak adlandırılan toplam çıktısı *n*, bir "*a*" çıktısı üretmek için bir transfer fonksiyonuna (*f*) uygulanır.



Şekil 2.1. Nöronlar. **A**) Tek girişli **B**) Çoklu giriş **C**) Çoklu giriş için kısaltılmış form

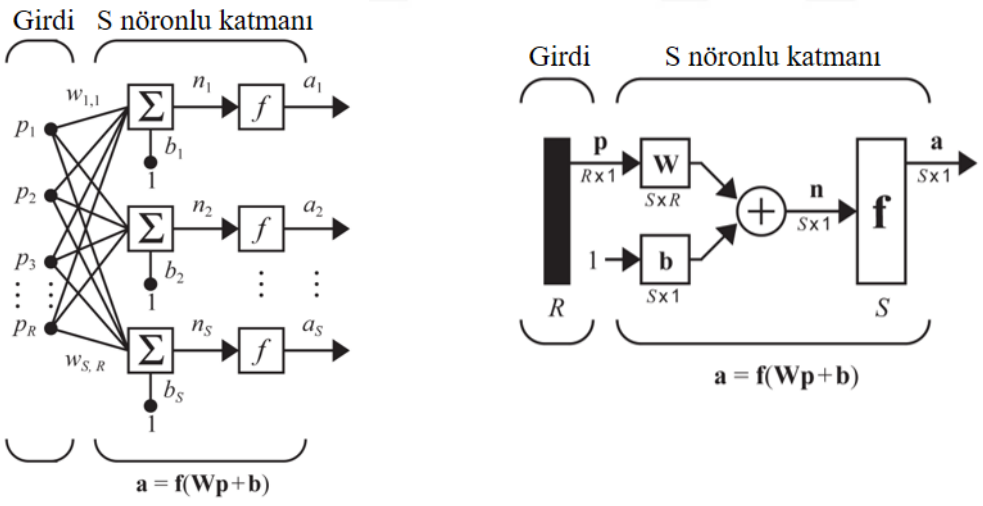
w ve *b* değerleri, bir ağdaki ayarlanabilen parametrelerdir. Nöron giriş / çıkış ilişkisinin belirli bir hedefe ulaşması için bazı öğrenme kurallarına göre ayarlanırlar. Özellikle, tahmin edilen çıktı değeri *a* istenen çıktı ile karşılaştırılır, böylece sapmaları için tanımlanmış bir kriter elde edilmelidir. Kriterlerin karşılanmaması durumunda *w* ve *b*'nin değeri, çıkış değeri *a* kriteri karşılayana kadar tekrarlanarak iyileştirilir. Transfer fonksiyonu, belirli sorunlara bağlı olarak doğrusal bir fonksiyon veya doğrusal olmayan bir fonksiyon olarak seçilebilir. Yaygın olarak uygulanan birçok fonksiyon vardır. Şekil 2.2, doğrusal ve log-sigmoit bir transfer fonksiyon için örnekler verilmektedir. Fonksiyonlar, giriş değerine yeni bir çıkış değerine aktarılır. Her transfer fonksiyonunun denklemi gösterilmiş ve her fonksiyonun işareti de sağ taraftaki dikdörtgen şekillerde tanımlanmıştır.



A **B**

Şekil 2.2. Transfer fonksiyon. **A**) Doğrusal **B**) Log- sigmoit.

Şekil 2.1 b'de çok girişli bir nöron verilmektedir. ***R*** adet giriş verisi ($p_1, p_2, \ldots, p_R$), ağırlık matrisinin ***W*** ağırlık matrisinin karşılık gelen öğeleri ($w_{1,1}, w_{1,2}, \ldots, w_{1,R}$) tarafından ağırlıklandırılır. Daha sonra bir girdi *n* üretmek için ürüne bir bayas b eklenir. Nöron çıkışı, transfer fonksiyonuna *a* uygulanarak elde edilir. Basitleştirme amacıyla, Şekil 2.1 b'de çoklu nöronun tam gösterimini açıklamak için kısaltılmış bir gösterim (Şekil 2.1 c) verilmektedir.

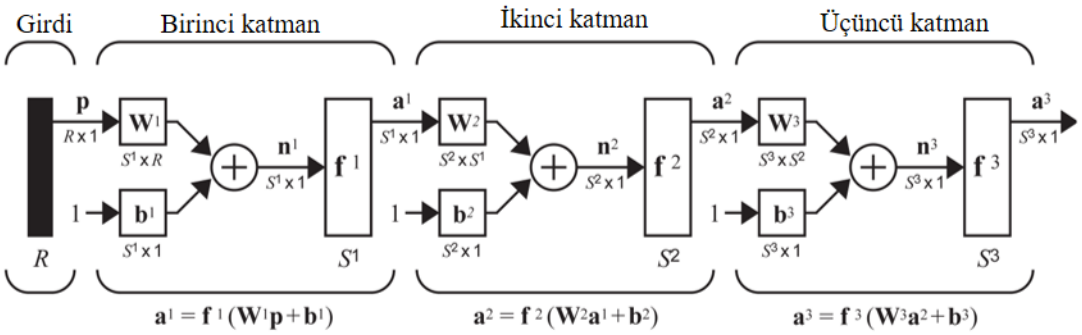


A **B**

Şekil 2.3. S nöronlu katmanı. **A**) Tam form **B**) Kısaltılmış form

Yukarıda belirtilen ifadeler, bir katmandaki yalnızca tek nöron içindir. *S* nöronları içeren bir katman Şekil 2.3'te açıkça gösterilmektedir. Ayrıca pratik uygulama için bir ağ birden fazla katman içerebilir. Şekil 2.4'te üç katmanlı bir ağ örnek olarak verilmektedir. Çok

katmanlı ağlar, tekli ağlardan daha güçlüdür. Çoğu pratik sinir ağları iki veya üç katman içerirken, daha fazla sayıda katman nadiren uygulanır (Hagan ve diğerleri, 1995).



Şekil 2.4. Üç katmanlı ağ

Bir ANN mimarisi seçildikten ağa bir dizi girdi tanıtılarak, ağın tahmin edilen çıktı verileri daha sonra karşılık gelen bir dizi istenen çıktı verisi ile karşılaştırılarak sonra, bir eğitim işlemi gerçekleştirilir. Ağırlık ve bayas matrislerinin gelişigüzel seçilmiş olmasından dolayı her zaman sapma veya hata görülür. Sapmayı olabildiğince küçültmek için matrisler ayarlanmalıdır. Bu, tahmin edilen çıktıların ve istenen çıktıların kabul edilebilir şekilde birbirine yakın olması gerektiği anlamına gelmektedir. Fark veya hata belirlendikçe, Shih'e (1994) göre bunun bir kısmı ağ üzerinden geri yayılır. Ağdaki her bir nöronda, matrisler farka göre güncellenir. Güncellemeden sonra, ağ başka bir giriş vektörü tarafından beslendiğinden, daha düşük bir hata elde edilir. Bunu yapmak için, hatanın işlenmesi gerekir. Sapmayı değerlendirmek için denklem (2.29) olarak ortalama karekök hatası (*mse*) uygulanır. O_t ve O_p sırasıyla hedef (istenen) ve tahmin edilen çıktılardır. Tüm noktaların hatası esas olarak hesaplanır ve ardından ortalaması alınır. Denklemde *ND* veri sayısıdır. Levenberg-Marquardt algoritması uygulanarak (Newton yönteminin varyasyonu) *mse* değeri belirli bir referans hatasına yaklaştırılmaya çalışılır.

$$mse = \frac{1}{ND}\sum_{i=1}^{ND}\left(O_t - O_p\right)^2 = \frac{1}{ND}\sum_{i=1}^{ND}\left(v_i\right)^2 = \frac{1}{ND}F(\mathrm{x}) \qquad (2.29)$$

Ağ çıktılarını hedeflere yaklaştırmak için geri yayılım algoritması olarak adlandırılan bir öğrenme algoritması kullanılmaktadır. Algoritma, çok katmanlı ağları eğitmekte kullanılan yaklaşık olarak en dik iniş algoritmasıdır. Bu yaklaşımda *mse* değeri bir performans endeksi olarak kabul edilir. Hata ağ üzerinden sağdan sola geri gönderilir.

Ağırlık ve bayas matrisleri daha sonra *mse* değerine ne kadar katkıda bulunduklarına göre güncellenir. Hata kabul edilebilir bir değeri karşılayana kadar ayarlama tekrarlanır. Matrislerin ne kadar güncellendiğine karar vermek için, bir öğrenme oranı dikkate alınır. Geri yayılım algoritması için geleneksel algoritma ve modern ikinci dereceden algoritma gibi iki farklı yaklaşım sıklıkla kullanılmaktadır. İkincisi, Conjugate gradyan ve Levenberg-Marquardt algoritmalarını içerir. Birçok karmaşık sorun için güçlü oldukları düşünülmekle birlikte, Hagan ve Menhaj'a (1994) göre, yakınsama performansı söz konusu olduğunda Leverberg Maquardt Conjugate gradyan algoritmasına kıyasla oldukça üstün bir algoritmadır.

Levenberg-Marquardt algoritması, Newton yönteminin bir varyasyonudur. Diğer doğrusal olmayan $\boldsymbol{F}(\mathrm{x})$ fonksiyonlarının karelerinin toplamı olan minimize edilmesi için oluşturulmuştur (Hagan ve diğerleri, 1995) (denklem 2.29). Standart geri yayılım, denklem (2.30) gibi terimleri hesaplar.

$$\frac{\partial F(\mathrm{x})}{\partial \mathrm{x}} \; or \; \left(\frac{\partial F(\mathrm{x})}{\partial w} \; and \; \frac{\partial F(\mathrm{x})}{\partial b} \right) \tag{2.30}$$

Yukarıda ifade edilen süreç sonunda *mse* değerinin kabul edilebilir düzeyde ve belirlenen düzeyde küçük olması beklenir. Bu maksatla belirlenen referans hata oranı ile bu durum sağlanmaya çalışılmaktadır. Bunun nedeni, pratik uygulamalar için eğitim hatasının hiçbir zaman tamamen sıfıra yakınlaşmamasıdır. Eğitim ağlarını durdurmak için erken durdurma yöntemi uygulanır. Erken durdurma yönteminin dört adımı vardır. İlk olarak, giriş verileri seti bir eğitim, bir doğrulama ve bir test alt kümesine bölünür. Birincisi, gradyanları veya Jacobi matrislerini hesaplamak ve her yinelemede ağırlık güncellemesini belirlemektir. İkincisi, eğitim noktaları arasındaki ağ fonksiyonuna ne olduğunun bir göstergesidir ve hatası eğitim işleminde izlenir. Eğitim verileri için, tek bir veri satırı için geri yayınlama gerçekleştirilir ve ağırlık ve sapma matrisleri güncellenir. Bundan sonra, başka bir satır dikkate alınarak güncellenen matrisler yinelenir. Eğitim setindeki tüm satırlar matrisleri güncellemek için kullanıldığından, bir çağ (eğitim döngüsü) hesaba katılır. Tanımlanmış sayıda dönemden sonra, doğrulama seti güncellenmiş ağa uygulanır ve bir *mse* değeri elde edilir. Doğrulama kümesindeki hata birkaç etkileşim için artar. Sonuç olarak, eğitim işlemi durdurulur ve son olarak güncellenen matrisler, doğrulama setinde minimum hatayı üretir.

Üçüncü alt küme, eğitimli ağın etkinliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Test seti asla eğitim için kullanılmaz ve yalnızca eğitim seti kullanılarak ağın tamamen eğitilmesinden sonra uygulanır. Üç alt kümede ve tüm veri kümesinde ayrı ayrı bir regresyon analizi yapılmalıdır. Aralarındaki sapma, aşırı uyumu veya ekstrapolasyonu gösterir. Aşırı uyum, eğitim seti için hassas bir uyum sağlarken, yanlış tahminler doğrulama ve test alt kümeleri içindir. Bu problemin üstesinden gelmek için ağın boyutunu küçültmek Hagan ve diğerleri (1995). Hem eğitim hem de doğrulama iyi performans gösterdiğinden ekstrapolasyona tanık olunur, ancak test sonuçlar zayıftır. Eğitim ve doğrulama alt kümeleri için daha fazla veri sağlanarak çözülür. Üç alt grubun tümü kötü performans gösterdiğinde, gizli katmanlardaki nöron sayısının artırılması önerilir. Çözüm etkili bir şekilde çalışmazsa, katman sayısı artırılmalıdır.

Eğitimin tamamlanmasının ardından, eğitilen ANN'nin mantıklı olup olmadığına Beale'e (2018) göre bazı kriterler nedeniyle karar verilmesi gerekmektedir. Birincisi, performans çizgilerine göre, son *mse* küçük olmalıdır. Daha sonra, doğrulama ve test verisi alt kümeleri için *mse* değeri benzer bir özelliğe sahip olmalı, son olarak da optimum doğrulamanın gerçekleştiği aşamaya kadar önemli bir aşırı uyum sorunu olmamalıdır. Aşırı uyum, eğitim alt kümesini kullanarak eğitimden sonra iyi performansın elde edildiği ve doğrulama ve test kümeleri için zayıf tahminlerin yakalandığı durum için tanımlanır. Buna ek olarak, ağı minimum dağılım ve devir sayısındaki artışla daha iyi yakınsamaya dayalı olarak seçmişlerdir (Sahin & Shenoi, 2003). Bu çalışmada, ilk olarak eğitim, doğrulama ve testin *mse* değeri ve performansı ele alınmıştır. Bundan sonra, istenen hedefler ile tahmin edilen çıktılar arasındaki korelasyon, *R*-değeri de dikkate alınır.

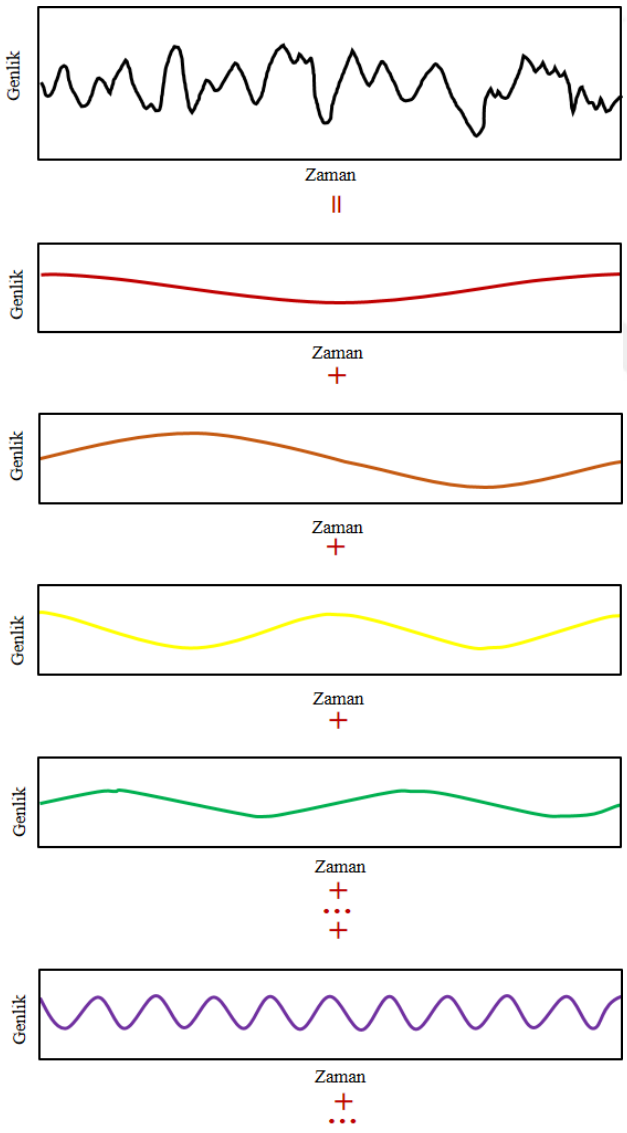
2.1.4. Operasyonel modal analiz (OMA)

Bu tezde mod şekilleri izlenen bir yapının hem hasarsız hem de hasarlı bir durumda ölçülebilir olması beklenmektedir. Hasarsız aşamada, mod bilgisi yapının mekanik özelliklerini tanımlarken, diğer yandan, hasarlı durumdaki mod verileri ise, hasara neden olan değişiklikleri tanımlamak için kullanılabilmektedir. Bu bağlamda gerek hasar öncesi gerek sonrası modal veriler anlık olarak izlenen yapılar için elde edilmelidir. Her ölçüm noktası için Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bir ivme-zaman değişimi izlemede elde edilmektedir. Jean-Baptiste Joseph Fourier'e (1768-1830) göre, uzunluğu T olan herhangi bir sinyal, her birinin bir frekansı (f_k) olan sinüs ve kosinüs dalgalarının sonsuz

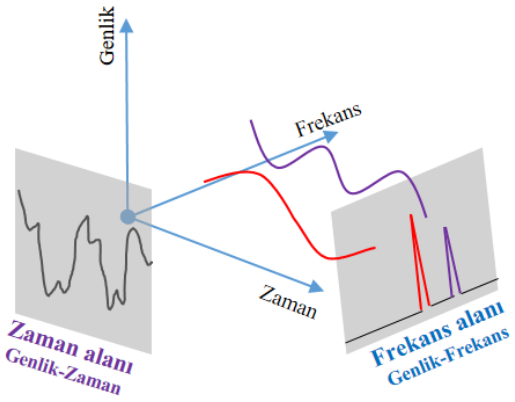
toplamından oluşmaktadır (Şekil 2.5). Söz konusu frekanslar, 1/*T*'nin bir tam sayı katıdırlar. Her dalganın kendi genliği ve fazı vardır. Bu yaklaşımı şematik olarak gösterebilmek için, Şekil 2.5'te ayrı ayrı listelenen dalga serileri ve bunların toplamını temsil eden ivme-zaman şekli verilmektedir. Temel denklem (2.31) de verildiği gibi yazılabilir. Burada a_o, a_k, ve b_k Fourier serisinin katsayılarını göstermektedir.

$$x(t) = a_o + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos(2\pi f_k t) + b_k \sin(2\pi f_k t) \right] \tag{2.31}$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{2.32}$$



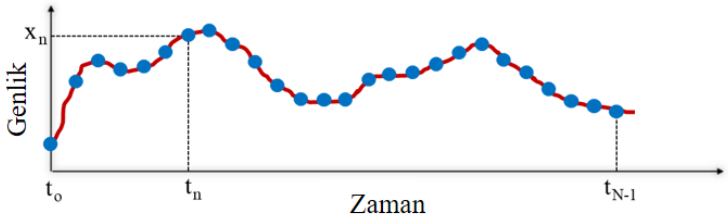
Şekil 2.5. Fourier dönüşümü



Şekil 2.6. Zaman alanı ve frekans alanı

Ölçülen sinyal sürekli bir fonksiyon ise, bir zaman alanında görüntülenebilir (Genlik-zaman). Alternatif olarak, zaman alanı, denklem (2.32) kullanılarak Fourier dönüşümüne dayalı bir frekans alanına dönüştürülebilir. Denklemde j, j^2=-1 denklemini sağlayan sanal birimi temsil eder. Zaman ve frekans alanı arasındaki genel ilişki Şekil 2.6'da gösterilebilir.

Pratikte sinyal, $x(t)$'nin bir fonksiyonu olarak değil, ayrık olarak ölçülür (Şekil 2.7). Bu nedenle ayrık veriler nedeniyle Fourier dönüşümü, denklem (2.32) kullanılarak doğrudan uygulanamaz. Bu gibi durumlarda Discrete Fourier Transform (DFT) kullanılır. Uzunluğu T olan sinyal verileri t_o'dan t_{N-1}'ye N aralıktan (örnek) oluşur. Frekans alanındaki *k'inci* frekansının genliği (f_k, k=1, 2, …, N) denklem (2.33) kullanılarak hesaplanır. (2.33) denkleminin ürünü, denklem (2.34) olarak yazılan karmaşık bir sayıdır. Şekil 2.8 a'de karmaşık bir düzlemde gösterilebilir. Vektör X_k, bir reel kısım (A_k) ve bir sanal kısımdan (B_k) dan oluşmaktadır. Büyüklük ve faz sırasıyla denklem (2.35) ve denklem (2.36) olarak hesaplanabilir. Her frekansın büyüklüğü belirlenirken, Şekil 2.6'daki gibi bir frekans alanı (genlik-frekans) çözümü elde edilebilir. Alternatif olarak, her frekansın reel kısmı ve sanal kısmı bir 3D çizimde gösterilebilir Şekil 2.8 b'deki gibi gösterilebilir. Her rezonansta sanal kısım zirveye ulaşırken reel kısım sıfırdır. Olumlu veya olumsuz olabilirler. Bu değerler her modda ölçülen noktanın gerçek genliğini elde etmekte kullanılırlar. Her rezonanstaki sanal kısım bu nedenle mod şekillerini belirlemek için gereklidir.



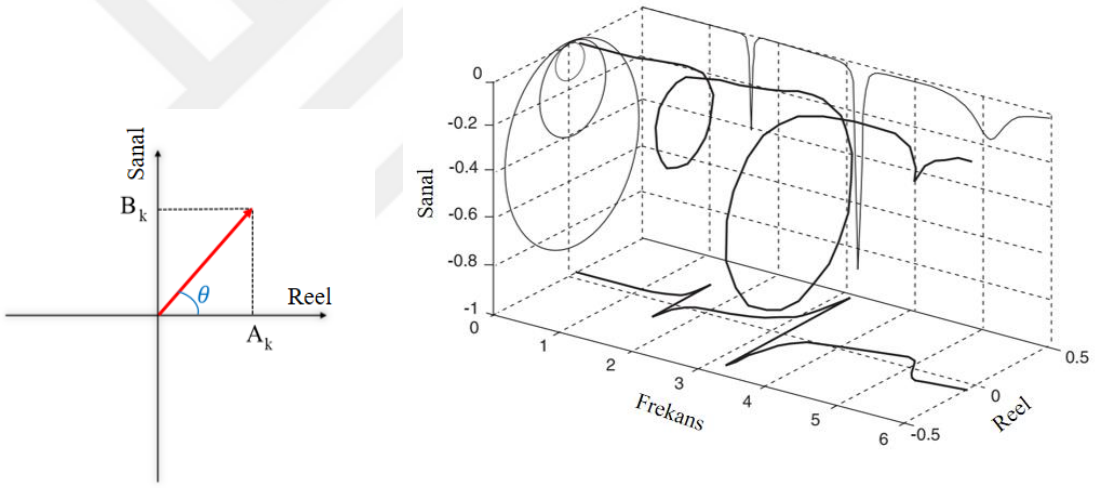
Şekil 2.7. Zaman tanım alanı gelişigüzel veri.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \tag{2.33}$$

$$X_k = A_k + jB_k \tag{2.34}$$

$$X_k^{mag} = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \tag{2.35}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_k}{A_k}\right) \tag{2.36}$$



A **B**

Şekil 2.8. Fourier dönüşümünün ürünleri. **A**) Karmaşık düzlem **B**) 3D çizim (Radeş, 2001)

DFT, mod bilgilerini belirlemek için kullanışlıdır. Ancak, denklem (2.33)'e göre, zaman alanında elde edilen veriler *N* örneğe bölünürse, toplam N^2 adet hesaplama yapılması çok zaman alır. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT), zaman alıcı sorunu çözmek için Cooley ve Tukey (1965) tarafından geliştirilmiştir. FFT, veri işlemeyi hızlandırmak amacıyla DFT'den geliştirilmiş bir algoritmadır. İki teknik arasındaki fark, bir sinyalden örnek sayısını seçmektir. DFT, rastgele sayıda veri noktası içeren bir zaman tanımlı sinyale uygulanabilir. Diğer tarafta, FFT, zaman bloğundaki nokta/örnek sayısını kullanarak bir

Fourier dönüşümü gerçekleştirir. Sayı 16, …, 1 024 veya 2 048 vb. olmalıdır. Örneğin, denklem 2.33'teki X_k vektörü, denklem (2.37)'deki gibi bir çift indeks ve bir tek indekse bölünmüştür. Simetri özdeşliğinden dolayı her indeksteki kırmızı üs $k=N/2$'den sonra tekrar eder (denklem 2.38). Bu nedenle, hesaplama sayısı yarıya indirilebilir. Bu şekilde, bir üs için her bölmeden sonra, hesaplama sayısı, tam işleme göre % 50 oranında azaltılır. Hesaplama sayısının azaltılması FFT'nin DFT'den daha kısa sürede sonuca ulaşmayı sağlamaktadır.

$$X_k = \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m} e^{\frac{-j2\pi k(m)}{N/2}} + \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m+1} e^{\frac{-j2\pi k(m+1/2)}{N/2}} \tag{2.37}$$

$$= \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m} e^{\frac{-j2\pi km}{N/2}} + \left(e^{\frac{-j2\pi k}{N}} \right) \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m+1} e^{\frac{-j2\pi km}{N/2}}$$

$$e^{\frac{-j2\pi km}{N/2}} = e^{\frac{-j2\pi(N/2+k)m}{N/2}} \tag{2.38}$$

2.1.5. İstatistik hasar endeksi yaklaşımı

İzlenen bir sistemde kullanılan her bir hasar tespit tekniği, örneğin Bölüm 2.1.1'de açıklanan MSE tabanlı yöntem, değişikliği sistemin her bir elemanının rijitlik parametreleri açısından değerlendirir. Örnek olarak denklem (2.20)'de gösterilen hasar şiddetini alalım. İdeal olarak, hasar görmemiş elemanların tahmini parametreleri 1'e eşit olmalıdır, hasarlı elemanların ise 1'den küçük olması beklenir. Bu, hasarlı elemanların kolayca ayırt edilmesini sağlar. Ancak parametreler bazı varsayımlara dayalı olarak oluşturulan teknik kullanılarak elde edildiğinden genellikle ideal bir çözüme ulaşılamaz. Bunun yerine, 1 civarında sapma gösteren tahmin edilen parametreleri içeren yaklaşık bir vektör tamamen dikkate alınmalıdır. Her bir hasar tespit tekniğinin doğasında bulunan hatalar nedeniyle, ayrı parametrelerin dikkate alınması muhtemelen yanlış tahminlere neden olur. Öte yandan, tahmin edilen parametrelerin tüm vektörünü hesaba katmak daha doğru sonuçlara yol açar. Etkili bir hasar tespiti, hasarlı elemanların parametrelerinin sağlam olanlardan önemli ölçüde farklı olduğu tahmini bir vektörle sonuçlanabilir. Bazı istatistiksel teknikler kullanılarak etkili bir şekilde gösterilebilirler.

Açıklama için, örnek olarak MSE tabanlı yaklaşımı ele alalım. Hasarlı unsurları, yukarıda verilen ölçümler sonucunda belirli kriterler kullanılarak tanımlanabilir ya da belirli oranda tarif edilmeye çalışılabilir. Ancak istatistiksel kriterler kullanılarak daha duyarlı

bir yöntem önermek daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için gereklidir. Belirli bir mod seti için, hasar yerleri Fukunaga (1990) ve Gibson ve Melsa'ya (1975) göre istatistiksel anlamda hipotezlerin reddedilmesi temelinde dayanır.

Başlangıçta, her üye ile ilişkili β_i (i = 1, 2, 3, …, NE) değeri, β vektörünün rastgele bir değişkeni olarak kabul edilir. NE, dikkate alınan vektördeki eleman sayısıdır. Başka bir deyişle, hasar endekslerinin toplanması, β, bir örnek popülasyonu temsil eder (değişkenlerin normal dağıldığı varsayılarak). Normalize edilmiş gösterge Z_j, denklem (2.38) ile elde edilebilir. Burada $\overline{\beta\iota}$ ve α_i'nin sırasıyla tüm β_i değerlerine ait toplulukların ortalama ve standart sapması olduğunu belirtmek gerekir. Daha sonra üye, hipotez testini kullanan bir istatistiksel model tanıma tekniği aracılığıyla özel sınıfa atanır. Sıfır hipotezi (yani, H_o) yapının i'inci elemanda hasar görmediği, alternatif hipotez ise (yani, H_1) yapının i'inci elemanda hasar gördüğüdür. İstatistiksel örüntü tanımaya göre, Z_i 0'a eşit olduğu için % 50 güven düzeyi ile bir hasar doğrulanır. β_i değeri sırasıyla 1 ve 2'ye ulaştığında güven düzeyi % 84,1 ve % 97,7'ye sıçrar. Hasar kriteri seçilirse karar kuralı şu şekildedir:

(1) H_o'yu (yani, Z_i kriterden daha az ise i'inci üyede hasar yoktur) veya
(2) Z_i kriterden büyük veya eşitse alternatif H_1'i.

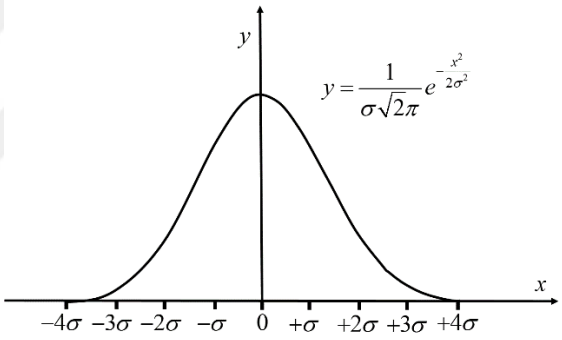
$$Z_i = \frac{\beta_i - \overline{\beta_i}}{\sigma_i} \tag{2.39}$$

2.1.6. Veri bozulması

Uygulamada, yüksek binalar için ölçülen veriler, hasar tespiti ile ilgili mevcut çalışmalarda üzerinde durulan ortam titreşimi yöntemi kullanılarak elde edilmektedir (Noh & Nair, 2011). Shin (1994), Hjelmstad ve Shin (1997), Clinton ve diğerleri (2006), operasyonel ve çevresel koşullardan kaynaklanan ölçüm gürültüsünün kaçınılmaz olduğunu belirtmiştir. Behmanesh ve Moaveni (2016) tarafından belirtildiği gibi, tanımlanan modal parametreler için tamamlayıcı bilgilerdir, bu nedenle binaların yapısal özellikleri belirlenirken etkileri dikkate alınmalıdır. Ayrıca, hasar sonrası durumlardaki doğrusal olmayan davranışlar, doğrusal davranışa dayalı olarak elde edilen modal veriler dikkate alındığında hasar tespit teknikleri için potansiyel hatalara neden olabilir (Quqa ve

diğerleri, 2021). Yukarıda belirtilen nedenler muhtemelen önerilen hasar tespit yöntemini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada sadece ölçüm gürültüsü araştırılmıştır.

Sayısal bir çalışma için, gerçek ölçümler mevcut olmadığında, Gauss beyaz gürültüsü hız veya ivme ile ilgili olarak ölçülen bilgileri, örneğin Şekil 2.7'de gösterilen zaman tanım alanı verilerini kirletmek için kullanılabilir. Gürültülü mod verileri daha sonra doğrudan gürültüyle kirlenmiş zaman geçmişi verilerinden türetilir. Alternatif olarak, Samami ve Oyadiji (2016), iki parametreli (ortalama ve standart sapma) bir fonksiyon olan normal dağılımdan random dizileri doğru yer değiştirme modu şekil verileri üzerinde uygulayarak gürültülü yer değiştirme modu şekilleri oluşturmuştur. Özellikle, sıfır ortalamalı ve standart sapma σ ile normal olarak dağıtılan random gürültü Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Ayrı bir ölçüm için, ölçülen veriler -4σ ile 4σ aralığında rastgele düşen bir hata miktarı içerebilir.



Şekil 2.9. Standart dalgalanmalara sahip normal bir dağılım

Shi ve diğerleri (1998) ayrıca denklem 2.40'ı kullanarak mod şekline rastgele gürültü uygulamıştır. Öte yandan, Xiang ve diğerleri (2014)'ye göre denklem 2.41'de görüldüğü gibi frekanslara rastgele gürültü eklenir.

$$\bar{\phi}_{ij} = \phi_{ij}\left(1+\gamma_i \rho_m \left|\phi_{\max,j}\right|\right) \tag{2.40}$$

$$\bar{f}_j = f_j\left(1+\rho_f\left(2rand-1\right)\right) \tag{2.41}$$

Denklem 2.40'ta, $\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{ij}$ ve $\boldsymbol{\Phi}_{ij}$, j'inci modun i'inci DOF'de sırasıyla gürültüsü olan ve olmayan mod şekilleridir. γ_i , ortalaması sıfıra ve varyansı bire eşit olan random bir sayıdır. ρ_m, mod şekli için random bir gürültü seviyesidir. Denklem 2.41'de $\bar{\boldsymbol{f}}_j$

gürültüyle kirlenmiş frekanstır, $\boldsymbol{f}_j$ ise gürültüsüz karşılığıdır. ρ_f frekans için gürültü seviyesi. *rand,* [0, 1] aralığında random bir sayıdır.

2.2. Kaynak Araştırması

SHM yaklaşımları aşama olarak dört seviyeye ayrılır. Bunlar: hasar mevcut olup olmadığının tahmini, hasar yerelleştirilmesi, hasar şiddetlerinin tahmini ve yapının kalan servis ömrünün tahmin edilmesi olarak sıralanabilir (Rytter, 1993). İlk üç seviye daha geniş hasar değerlendirmesi kategorisindedir (Kim ve Stubbs, 2002). Bu alan için hasarsız ve hasarlı aşamalar arasındaki titreşim özellikleri gereklidir. Diğer taraftan kullanılan yaklaşımları, modelden bağımsız ve model tabanlı yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta da incelemek mümkündür. Birincisi, hasar endekslerini (DI) kullanan doğrudan yöntemlerden oluşur. DI tabanlı yöntemler, bozulmamış durum ile hasar durumu arasındaki tepkideki değişikliklerden kaynaklanan zararları tanımlar. Diğer yandan, model tabanlı yöntemler model güncelleme yöntemlerini, ANN yöntemleri, korelasyon temelli yöntemleri ve genetik algoritma (GA) yöntemlerini içerir. Model tabanlı olmayan yöntemlerin pratikte daha uygun olduğu düşünülmektedir, bunun temel nedeni olarak model tabanlı yöntemlerin belirsizlikler nedeniyle daha büyük yapılar için uygulanmasının zorluğu gösterilebilir.

Titreşime dayalı hasar tanımlama teknikleri (VBDIT'ler) yapıların tepkisindeki değişiklikleri yakalamak için uygulanmıştır. İstenen bilgiler iki gruba ayrılabilir. İlk grup birincil titreşim özelliklerindeki değişikliklerdir. Frekans, mod şekli, sönüm faktörü, Ritz vektörü, frekans tepki fonksiyonları (FRF'ler) değişikliklerini içerir. İkinci grup ise, mod şekli türevlerindeki, esneklik değerlerindeki ve modal şekildeğiştirme enerjisi değerlerindeki değişiklikleri içerir.

Casas ve Aparicio (1994), eşdeğer bir atalet momenti (I_{eq}) kullanarak hasarı ölçmek için ölçülen frekansları ve mod şekillerini kullanmıştır. Skaler performans hatasını minimize etmek için dinamik bir parametre tanımlama tekniği uygulanmıştır. Sadece birinci frekansın kullanılması hatalı sonuçlara neden olabileceği, en az iki frekansın kullanılmasının gerektiği ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra, tepkideki değişikliklerin nedenlerini belirlemek için sadece frekansların kullanılması yeterli olmadığı da bu çalışmada ifade edilmektedir. Mesnet koşulları, deformasyon modülü, çatlama vb. Diğer

nedenlerin de hasardan önce değerlendirilmesi gereken önemli değişkenler olabileceği bu çalışmada belirtilmektedir.

Salawu (1997) doğal frekansların yapısal bütünlüğün hassas göstergeleri olduğunu ve bunların, çeşitli yöntemlerle ucuz yapısal değerlendirme teknikleri kullanılarak ölçülebileceğini ifade etmektedir. Frekans azalması, yapısal bütünlükteki değişikliği göstereceğini ifade ederek, çatlağın mod şeklindeki yüksek eğrilikli bölgelerde olduğu için sapmanın daha belirgin şekilde tespit edilebileceği ifade edilmektedir. Doğal frekans değişiklikleri, rijitlik değişikliğinin kare kökü ile orantılıdır. Önemli bir frekans değişikliğini yakalamak için nispeten büyük bir rijitlik değişikliği gerektirir. Yazar, hasarın güvenle tespit edilebilmesi için doğal frekansın yaklaşık % 5'lik bir miktardan değiştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Hasarların düşük stresli bölgelerde bulunduğu oluşması durumunda daha farklı sorunların çıkabileceğini belirten yazar, bunun, hasarın önemli ölçüde yük taşıyan bir elemanda olmadığının göstergesi olacağını ifade etmektedir. Yazar, titreşim testini izleme için yeterli sonuç üretmede tek başına yeterli olmayacağını, en önemli sorunun ise, saha ölçümünden kaynaklanan hatalarla ilgili olduğunu ifade etmektedir. Örneğin, beton ve çelik köprüler için, ortam koşullarındaki değişiklikler nedeniyle frekans kaymaları % 5'e kadar olabilir. Yazar hasarın varlığını sonuçlandırmak için sadece frekans değişikliklerinin kullanılmasının yeterli olmadığını göstermiştir. Ayrıca, tanımlamayı geliştirmek için daha yüksek mod kullanılmasının gerektiğini ifade etmektedir.

Cerri ve Vestroni (2000, 2003), frekans ölçümü nedeniyle bir kirişin yayılı hasarlarını tespit etmektedirler. Bu çalışmada analitik ve deneysel frekans değerleri arasındaki karşılaştırmaya dayalı bir prosedür oluşturulmuştur. Euler-Bernoulli (EB) kiriş teorisi temelinde frekans değişimi ve hasar (konum, yükseklik ve genişleme) arasında bir ilişki oluşturulmuştur. Burulma yayı yaklaşık olarak hasarın genişlemesine ve şiddetine dayanmaktadır. Model denkleminde hasar için toplam üç değişken kullanmaktadırlar. Çözüm için üç deneysel mod gereklidir. Deneysel ve analitik frekanslar arasındaki fark sıfıra ulaştığında bir çözüm elde edilmektedir. Bununla birlikte, modelleme ve deneysel ölçümde hata varlığı nedeniyle sorun doğru bir şekilde çözülemez. Daha da önemlisi, bu yaklaşım çoklu hasar senaryosu ve daha kompleks yapılar düşünüldüğünde çözüme ulaşmadaki zorluklar çalışmada ifade edilmektedir.

Yang ve Wang (2010) doğal frekansları hasar özelliği olarak kullanmaktadırlar. Bu çalışmaya göre bir hasar senaryosu yalnızca bir yanıtla sonuçlanabilir. Bu yanıt, özdeğer boyutlarına göre ayırt edilebilir. Bir moddaki frekans değişikliklerine farklı hasar durumları neden olabilir. Ancak, vektördeki değişiklikler hasar senaryosunu verebilir. Hasarsız durumun sayısal olarak modellenmesi kullanılarak rafine edilmiş bir dizi hasarlı senaryo oluşturulabilir. Her senaryo için frekanslar doğal frekans vektörü (NFV) ve doğal frekans vektörü güvence kriteri (NFVAC) altında saklanır. Kaydedilmiş veriler, çağrı hasarı özelliği veritabanı olarak çalışmada isimlendirilmektedir. Hasarlı bir duruma karşılık gelen öz-vektörleri veritabanı ile karşılaştırılarak hasar senaryosu bu şekilde tahmin edilebilir. Çalışmada önerilen yaklaşımın 8 katlı tek açıklıklı bir çerçeve üzerinde doğrulanmaktadır. İlk olarak, doğrulamada ölçüm gürültüsünün ihmal edildiği anlaşılmaktadır. Örnek çerçevede hasarın birinci katta meydana geldiği görülmektedir. Veritabanı % 10'luk bir aralık ile rijitliği % 1 0'dan % 50'ye düşürerek oluşturulmuştur. Deneysel örnekte, hasar şiddeti % 2 ila % 45 arasında değişmektedir. Gerçek hasar ciddiyetlerinin veri setindekilerden farklı seçildiği belirtilmelidir. Sonuç olarak, hasar yeri tam olarak tespit edildiği çalışmada görülmektedir. Hasar boyutları gerçek olanlara çok yakın elde edilmekle birlikte, % 2 ve % 6 gibi daha az şiddette durumlarında hasar tespitin başarısız olduğu çalışmada ifade edilmektedir. Dolayısıyla önerilen bu yaklaşımın göreli olarak daha büyük hasarlar için daha iyi sonuçlar üretebildiği ifade edilmektedir. Ayrıca, hasar tespit sonuçları bu yöntemin eksik NFV kullanılarak iyi çalışabileceğini göstermektedir. Bu yöntem genellikle test edilen tek yapılar üzerinde güçlüdür. Bununla birlikte, yapının karmaşıklığı yüksek olduğundan büyük bir veritabanı gerektirir. Bunun yanı sıra, simüle edilen hasar şiddetleri, kabul edilebilir sonuçlar elde etmek için yeterince iyileştirilmelidir.

Wahalthantri'ye (2012) göre frekanslar ve sönüm değerleri bir yapının global özellikleridir. Hasar tespit aşaması ile sınırlıdır. Genel olarak, literatürden, frekans değişikliklerine dayalı yaklaşımların basit yapılar ve basit hasar senaryoları için uygun olduğu söylenebilir. Daha büyük yapılar için, bunların uygulanması ise imkansız olabilir. Açık deniz platformların gibi daha büyük yapılar için, daha düşük frekans değişimlerinin yararlı bir hasar göstergesi olmak için yetersiz olduğu gösterilmiştir (Sheldon ve Coppolino, 1983). Ayrıca, yapı sisteminde sıcaklığa, zemin kaynaklı oturmalar ve etkileşime, rüzgâr şiddetine, büzülme ve rötre gibi ikincil etkilere ve bunlar gibi birçok

etmene bağlı olarak frekans değişimleri görmek mümkün olabilir. Diğer taraftan daha önemli ve ayırt edici olan ise birincil doğal karakteristik olan mod şekli, hasarı tanımlamak için geniş ölçüde kullanılır.

Rizos (1990), mod şekillerindeki değişiklikleri kullanarak çatlak yerini bulabilecek ve derinliği tatmin edici bir doğrulukla tahmin edebilecek bir yöntem geliştirmiştir. Ancak, daha karmaşık yapılarda doğruluk giderek düşmektedir. Bunun yanı sıra, yer değiştirme mod şekillerindeki değişiklikler hasar yerini tam olarak belirlemeyeceği literatürde gösterilmektedir (Yao ve diğerleri, 1992; Chen ve diğerleri, 1995; Abdo ve Hori, 2002). Ndambi (2002), bir betonarme (RC) kirişdeki hasar yerlerini esneklik yöntemi kullanarak tespit etmek istediği çalışmasında hasarın belirli bir bölgede yayılmış olması nedeniyle başarısız olduğunu ifade etmektedir. Wahalthantri (2012) ayrıca betonarme kirişe uygulanacak esneklik esaslı hasar endeksleri oluşturmuş, ilk eğilme modunun hasarın yerini belirlemek için daha doğru sonuçlar vereceğini göstermiştir. Daha yüksek modların ise hasar tanımlanmasına katkısının olmayacağını ifade etmektedir. Muhtemelen olumlu yanlış tahminlere neden olacaklarını ifade ederek, hesaplamada daha fazla mod şekli birleştirildiği için başarısızlık türüne de tanık olduklarını ifade etmektedirler.

Daha hassas tahminlerin ortaya koyulabilmesi adına mod şekli türevleri de literatürdeki çalışmalara konu edilmiştir. Abdo ve Hori (2002), birinci türevdeki (rotasyon veya eğim) değişikliklerin, yer değiştirme modu şekillerindeki değişikliklerden daha fazla hasara duyarlı olduğunu göstermiştir. Yaklaşım hala farklı hasar boyutları ile geçerlidir ve daha yüksek modlara ihtiyaç duymaz. Wahalthantri (2012) ve Wahalthantri ve diğerleri (2012), daha yüksek türev tabanlı yaklaşımların daha doğru sonuçlara yol açtığını göstermiştir. Dördüncü türev, hasar lokalizasyonunda en iyi stabiliteye sağlarken, ölçüm gürültüsüne daha duyarlı olduğu araştırmacılar tarafından gösterilmiştir. İkinci türevin kullanılması RC konsol tipte modellemelerde daha ciddi hasarlar için yanlış tahminlere neden olduğu da yazarlar tarafından ifade edilmektedir. Aksine, Pandey ve diğerleri (1991), ikinci türevi tarafından elde edilen mod şeklinin eğriliğini kullanarak hasar tanımlanabilirliği için iyi sonuçlar vermektedir. Nispeten az sayıda ayrı ölçülen konum nedeniyle mod şekilli kolayca elde edilemez (Chance ve diğerleri, 1994; Corwell ve diğerleri, 1999). Mod şeklinin eğriliği şekildeğiştirme çifti ile orantılıdır (Pandey ve diğerleri, 1991; Ratcliffe, 1997). Bu nedenle, mod şekli kullanılmasına rağmen, şekildeğiştirme ölçerler

kullanılarak elde edilen şekildeğiştirmeler modu şekli de hasar konumlarını potansiyel olarak lokalize eder (Yao ve diğerleri, 1992; Chen ve diğerleri, 1995). Modal gerginlik bilgisi hasar tespiti için bir sonraki hedef haline gelir.

Hasar gören seviyeler ve bunlardaki hasar oranları, modal analiz yöntem esasları ve enerjinin değişim prensipleri yardımıyla yapısal model olmadan üretilen bir yöntem kullanılarak tahmin edilmektedir. Geçerli ve gerçekçi bir yaklaşım olan, bu metotla hasar görmemiş ve hasarlı yapı durumları arasındaki yapının tepkilerindeki değişiklikler üzerinden elde edilen DI'ler belirlenmektedir. DI'ler, doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümleme faktörleri, vb. gibi birincil titreşim özelliklerindeki değişikliklere ve mod şekli türevleri, esneklik ve moda ait şekildeğiştirme enerjisi olarak bilinen ikincil titreşim özelliklerine dayanılarak oluşturulmaktadır.

Alvandi ve Cremona (2006), mod şekli eğrilik yöntemi ve esneklik yöntemi ile karşılaştırıldığında, MSE tabanlı yöntemlerinin hasar tanımlama için en yüksek kararlılığı gerçekleştirdiğini belirtmiştir. MSE tabanlı yaklaşımların gücü de Ndambi (2001) tarafından doğrulanmıştır.

Corwell ve diğerleri (1999) bir alüminyum plaka örneği üzerinde yaptıkları çalışmada MSE tabanlı hasarı tespit yöntemi geliştirmiştir. Hasar, numunenin iki nokatasında bir kesim ile gerçekleştirilmiş ve bunun tahmini gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hasar senaryosunun başarıyla tespit edildiği görülmektedir. Ancak, çoklu hasar durumundaki farklı hasar şiddetleri yöntem için soruna neden olduğu da yine ifade edilmektedir. Düşük hasar şiddetleri için ise yöntemin yanlış pozitif tahminlere yol açtığı yine çalışmada ifade edilmektedir.

Bu tür yaklaşımlar ilk olarak Kim ve Stubbs (1995 a, b) tarafından sıklıkla kullanılmıştır. Yaklaşımın en belirgin özelliği, sadece birkaç mevcut modda ve karmaşık yapılarda etkili olması olarak görülmektedir. Kim ve Stubbs, hasarı tespit etmek ve hasar düzeyini tahmin etmek için A ve B isimleri verdikleri iki yöntem geliştirdiler. İlk endeks gerçek hasar şiddetlerinden daha yüksek değerler verirken, ikinci endeks ise düzensiz varsayımlar nedeniyle gerçeğe nazaran daha az tahminler ortaya koymaktadır. Yazarlar tarafından yapılan çalışmalarda, daha sonra C metodu olarak isimlendirdikleri yaklaşımla yöntemin tahmin doğruluğunu ve limitlerini geliştirmişlerdir (Kim ve Stubbs, 2002). DI C genel

olarak önceki hasarların daha az doğru olduğu ifade edilen ilk iki yaklaşımda belirlenen yaklaşımlara göre daga düşük hasar rijitliklerinin elde edilmesine neden olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hasar şiddeti tahmini çalışması da yeterli görülmemekte ve literatürde mod şekli sayısının sonuçlar üzerindeki etkisi de hali hazırda tartışma konusudur.

Shi ve diğerleri (2000) MSE'nin hasara karşı hassasiyetini araştırmıştır. Yazarlar, hasarsız ve hasarlı durumları elde eden MSE değişim oranına (MSECR) dayalı hasar yeri göstergesi oluşturmuşlardır. Ölçülen DOF sayısında bir sınırlama olarak tam boyutlu bir öz-vektör elde etmek için bir mod şekli genişletmesi uygulandı. Sabit destekli bir kirişin bir Sonlu Eleman Yöntemini (FEM) test edilerek kiriş 12 elemana ayrıldı. Ölçülen beş mod şekli kullanılarak çalışmada denetimler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında mod şekilleri % 5 ve % 7 oranlarında rastgele gürültü ile kirletilmişlerdir. Hasar elemanları muhtemelen gürültü varlığına bakılmaksızın tespit edilmiş ve şiddet tahmini için, yöntem aynı zamanda hasar miktarını da benzer oranlarda yüksek elde edildikleri gösterilmektedir. DI gürültüye karşı duyarlı olmaları ve hasar türlerine bağlı olduklarından tek bir hasar % 7 gürültünün altında başarıyla tespit edilebildiği çalışmada gösterilmektedir. Bununla birlikte, çoklu hasar senaryosu için, % 5 gürültü, gürültü seviyesi % 10'a yükseldikçe daha az başarılı tahmin ve hatta yanlış algılamaya neden olduğu çalışmanın sonucu olarak verilmektedir. Çalışmada, 20 mod kullanılarak elde edilen sonuçların daha gerçekçi olduğu gösterilmiştir. Bu yöntemin mod şekillerinin sayısına bağlı olduğu bilindiğinden daha yüksek mod şekillerinin zorlukla belirlenmesinin problemlere neden olabileceği çalışmada ifade edilmektedir. Yazar ayrıca önerilen yaklaşımı iki katlı tek açıklıklı çerçeve üzerinde deneysel olarak doğrulamaktadır. Sadece iki mod kullanarak hasar lokalizasyonun elde edilebileceği de bu çalışmada gösterilmektedir.

Yan ve diğerleri (2010) ile Yan ve Ren (2011) eleman MSE tabanlı hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarda MSE elemanının birinci dereceden duyarlılık formülleri, eleman MSE'nin yapısal geometrik ve fiziksel parametrelere duyarlılığı, eleman MSE'nin hasardan kaynaklanan yapısal parametre varyasyonlarına duyarlılığı ve gürültünün eleman MSE duyarlılıkları üzerindeki etkiler incelenmektedir. Yapısal geometrik parametreler (kesit alanı, A ve atalet momenti, I) tüm modlara çok duyarlıdır.

Öte yandan, fiziksel ve mekanik parametreler (Young'ın elastik modülü, *E* ve yoğunluk, ρ) geometrik parametrelere kıyasla çok hassas değildir. En hassas parametre *I*, en küçük hassasiyet gösteren parametre ise *E* dir. Yazar, daha yüksek modların MSE'ye daha fazla duyarlılık sağladığını göstermiştir. Bu yaklaşımda, hasar tespiti için yoğun şekilde bir eleman ağının kullanılması gerektiği ifade edilmektedir. Uygulamada, MSE elemanının hasar tespiti için hakim veya alt modlara olan duyarlılığının kullanılması mümkündür. Çalışmada gürültü öz değerler ve öz vektörler, % 1 ila % 15 arasında rastgele bir seviyede gürültü ile kirletilmiştir. MSE elementi gürültüye karşı oldukça hassastır. Sadece % 1 seviyesi hassasiyette büyük bir değişikliğe neden olabilir. MSE elemanı, öz-değer sonuçlarının bozulmasına, öz-vektörlerinkinden daha hassas cevap vermektedir. Düşük modlar gürültüye karşı çok daha az hassaslığa yol açarken, MSE duyarlılığının etkili bir cebirsel algoritması, üç katlı tek açıklıklı beton bir çerçeve olan simüle edilmiş sürekli bir kiriş üzerinde doğrulanmıştır. Bu çalışmalarını sonucu olarak gürültü etkisinin yapı tiplerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Kiriş için, yöntem % 5'lik bir gürültü seviyesi ile iyi çalışır. Genel olarak, % 5'in üzerinde bir gürültü seviyesi yanlış hasar tahminine neden olduğu ifade edilmektedir. Çalışma aynı zamanda gerçek ve daha karmaşık yapılara da uygulanmalıdır. Daha da önemlisi, yöntem kütle normalize edilmiş mod şekilleri gerektirdiğinden, uygulamada zorluklara neden olmaktadır.

Wahalthantri ve diğerleri (2012), tek ve çoklu mod tabanlı MSE hasar endekslerinin (MSEDI) farklı formlarını tanıtmıştır. Yaklaşım, ciddi hasar bölgesinin çevresini doğru bir şekilde lokalize etmektedir. Hasar, ABAQUS'taki beton hasar plastisite modeli (CDPM) kullanılarak modellenmiştir. Yazarlar, hasar tespiti sonuçlarının daha yüksek modların bir kombinasyonu kullanılarak iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Optimum matris güncellemesi ayrıca hasar tanımlaması için alternatif bir çözümdür. Deneysel olarak ölçülen yanıttan (statik ve dinamik), tekrarlama ve optimizasyon işlemi ile sertlik, kütle ve sönümleme gibi güncellenmiş bir yapısal parametre matrisi elde edilmektedir. Güncellenmiş matrisler ile orijinalleri arasındaki karşılaştırma, hasar belirtisine işaret etmektedir. Güncelleme işlemi, optimum bir matris güncellemesi, duyarlılık temelli yöntem ve öz yapı atama yöntemi olarak isimlendirilmektedir.

Fujita ve Takewaki'ye (2016) göre bir kesme yapı modeli, yüksek binaları temsil etmek için en basit geleneksel model olabilir. Ancak yüksek binalarda eğilme deformasyonu üstübeçtir. Temel mod şekli için, tanımlanan kesme modeli, kesme-eğilme modeline benzer. Yüksek katlı bir binada rijitlik tanımlaması için bir kesme-eğilme (SB) modeli tanıttı (Fujita ve Takewaki, 2018). Modelde her kat sonsuz rijit bir kütle olarak kabul edilmiştir. Düşey, yatay ve rotasyonel olarak üç DOF kabul edilir. SB modelinin kesme ve eğilme rijitlikleri, ters mod yöntemi ile belirlenir. Yalnızca en düşük mod gereklidir. Altuzay yönteminden türetilen transfer fonksiyonlarının genliği, en düşük modu tanımlamak için kullanılır. Yazarlar, 10 katlı bir bina çerçevesi üzerinde sayısal bir doğrulama yaptıktan sonra, SB modelinin, doğal frekanslar açısından kayma tipi modelden daha yüksek binaları modellemek için daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Önerilen prosedürlerle tanımlanan SB modelinin doğru doğal frekanslar sağlayabileceğini gösterdi (Fujita ve Takewaki, 2016). Her katta DOF'leri ölçmek zordur.

Yüksek yapılarda eğilmeye bağlı deformasyonunun daha büyüktür (Takabatake ve diğerleri, 2019). Toplam yanal ötelenme, kesme ve eğilme deformasyonu toplanarak hesaplanmalıdır. Toplanmış kütle yaklaşımı ile elde edilmiş eğilme-kesme modelinde, doğrusal olmayan davranış kesme deformasyonu için, doğrusal deformasyon ise eğilme kısmı için dikkate alınmaktadır. Eğilme deformasyonu, kesitleri her zaman düzlem olan eşdeğer bir konsol kiriş modeli kullanılarak elde edilir.

Chang ve diğerleri (2018), yüksek bir yapıdaki hasarlı elemanların azalan rijitliğine bağlı olarak modal verileri tersine çevirmenin büyük bir zorluk olduğunu belirtmiştir. Yazarlar tipik bir yedi katlı binayı simüle ettiler. Yığılı kütle yaklaşımı ile konsol kiriş idealleştirilmesi yapılan bu çalışmada, en düşük yedi frekans ve mod şekli toplanmıştır. Her kat için % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 rijitlik eksikliği dikkate alınarak, ağ için giriş verileri oluşturulurken toplam 279 936 kombinasyon dikkate alınmıştır. Veri tabanının % 75'i eğitim desenleri olarak rastgele seçilirken, diğer % 25'i ise doğrulama desenleri için kullanılmıştır. Ağda gizli katmanlar seçilerek optimum performansa ulaşmak için bir dizi deneme yanılma sonrasında her biri için düğüm sayısı 140 olarak belirlenmiştir. Maksimum eğitim döngüleri 30000 olarak ayarlanmıştır. Ağ, ortalama hatanın karesi (*mse*) 10^{-3}'e ulaşana kadar eğitilmiş, önerilen ANN modeli, konsol sistemi üzerindeki hasarlı elemanları muhtemelen tespit ettiği ifade edilmiştir. Yaklaşımı

doğrulamak için bir deney de yapılarak, operasyonel modal analiz ile yapıların doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için stokastik alt uzay sistemi tanımlaması ile uygulamalar yapılmıştır. Modal veriler, basitleştirilmiş bir sayısal model oluşturmak için kullanılmış ve çeşitli rijitlik değişikliklerine karşılık gelen bir modal özellikler veri tabanı oluşturulmuştur.

Pratikte sadece sınırlı sayıda sensör uygulaması ile enstrümantasyon gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle tam manasıyla bu boyutta bir yapıda öz vektörlerin eksiksi elde edilebilmesi oldukça güçtür. Söz konusu güçlükler nedeniyle eksik elde edilen modal vektörlerdeki belirsizlikler titreşim modu genişletmesi ile çözülebilmektedir. Ancak, titreşim modu genişletilmesi ile ölçümden kaynaklanacak hatalara ek hatalar doğmakta bu da hasar konusunda uygun sonuçların elde edilmesini güçleştirmektedir (Yan ve diğerleri, 2007).

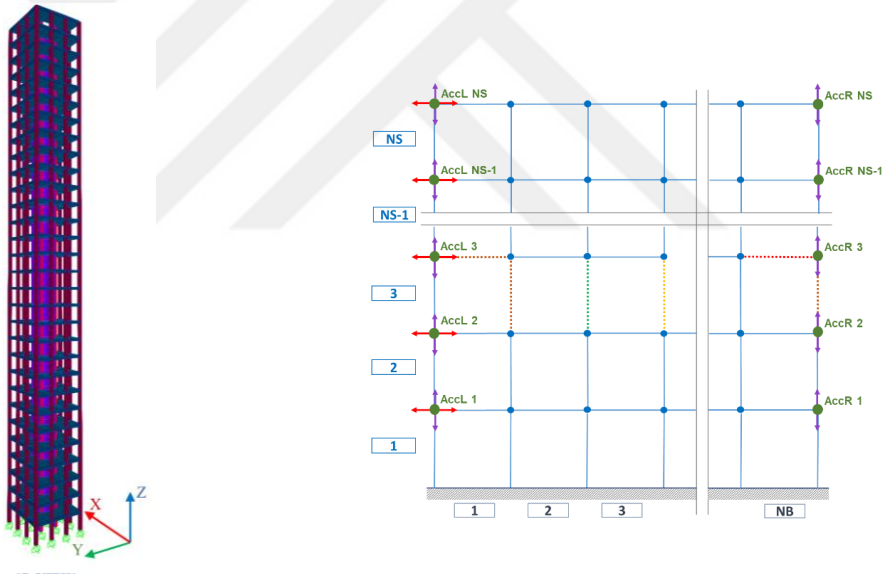
Bakhary (2008), beton plakalar ve portal çerçeve üzerindeki hasarı tespit etmek ve değerlendirmek için ANN uygulamıştır. ANN modeli, girdi verileri olarak frekanslar ve mod şekilleri kullanılarak oluşturulmuşken, her bir üyenin hasar parametresi, Elastisite Modülü, *E* verisi çıktı olarak seçilmektedir. Hem giriş hem de çıkış verileri normalleştirilir. *E*'nin çarpanı 0,2 ile 1,5 arasında değişir. ANN, 1 giriş katmanı, 1 gizli katman ve 1 çıkış katmanı ile tasarlanmıştır. Eğitim verileri ile doğrulama verileri arasındaki oran 2/3'tür. Yöntem, tekli ve çoklu hasar durumları için sayısal ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Sonuç olarak, sayısal uygulama için, frekans ve mod şekli verilerini kullanan ANN, doğru hasar konumları verirken, ciddiyet tahmini için bazı küçük hatalar vermektedir. Ayrıca, girdi verilerinin türlerine ilişkin bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Hem yerel hem de global modal verilerle tasarlanan ANN modelleri, giriş verileri olarak yalnızca frekansı kullananlara göre daha kesin hasar tahminine yol açar. Daha fazla girdi verisi uygulandıkça, girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişki daha etkili bir şekilde kurulduğu çalışmada gösterilmektedir. Testler için betonarme döşeme oluşturularak, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki fark, sırasıyla mod 1 ve mod 2 için % 2,2 ve % 10,8 olarak çalışmada hesaplanmaktadır. Sapma, karşılık gelen mod şekillerinde açıkça gösterilmektedir. Sonuç olarak, sayısal veriler kullanılarak eğitilen ANN modeli, gürültüyle kirlenmiş veriler uygulandığında tamamen başarısız olmaktadır. Yazar, sonlu eleman modelindeki ve veri ölçümündeki belirsizliklerden kaynaklanan

hataların yanlış tahmin için potansiyel nedenler olduğunu ifade etmektedir. Belirsizlikler göz önünde bulundurularak ANN analizi oluşturularak, olasılık teorisi belirsizlikleri gidermek için kullanılmıştır. Modelleme hatası ve ölçüm gürültüsünün sıfır ortalamayla ve spesifik varyansla normal olarak dağıtıldığı varsayılarak, gürültü, değişkenlik katsayısı (C.O.V.) cinsinden uygulanarak çalışmada veriler sunulmaktadır. Bu durumda hasar bulunma olasılığı (PDE), hasarsız ve hasarlı modellerin olasılık dağılımı karşılaştırılarak tahmin edilmektedir. Frekanslar ve mod şekilleri için % 2 ve % 15 rasgele hatalar (C.O.V) kullanılarak, gürültü ile kirlenmiş girdi verileri istatistiksel bir ANN modelini eğitmek için yeni testler gerçekleştirilmiştir. Test verilerine, giriş verileriyle aynı şekilde gürültü de eklenerek gerçekleştirilen çalışmalarda, sonuç olarak istatistiksel ANN modelinin kesin hasar tahmini ürettiği sonucu çalışmada sunulmaktadır.

Paral ve diğerleri (2019), birinci mod şekil eğimlerini (CFMSS) hasar indeksindeki değişiklikleri ANN modelinin girdi verileri olarak uygulamıştır. Bu yolla elde edilen ANN modeli, 9 katlı bir kesme çerçevesinin hasarlı katlarını tahmin etmek için sayısal olarak uygulanmıştır. Tek ve çift hasar durumları başarıyla elde edilirken, bunun yanı sıra, 3 katlı bir kesme çerçevesi üzerinde deneysel bir doğrulama da başarıyla uygulanmıştır. Hasar, % 0 ile % 20 arasında değişen şiddette kolon genişliğinin azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Çalışmda veri setine % 5 rastgele gürültülü eklenmiştir. Önerme durumunun pratik uygulamasına potansiyel olarak meydan okuyan bazı problemler vardır. İlk olarak, CFMSS'ye dayalı hasar indeksi, her kattaki dönme ile ilişkili serbestlikleri ihmal edildiği kesme çerçeveleri için oluşturulmuştur. Bu kapsamda, çalışmadan CFMSS tabanlı hasar endeksinin hasara karşı çok hassas olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, dönme ile ilişkili serbestlik derecelerinin rolü daha sorumlu olduğu için, çalışmada geliştirilmesi gereken bir unsur olarak daha sonra yapılacak çalışmalara bir öneri olarak sunulmaktadır. İkinci olarak, ANN modelini eğitmek için veri oluştururken, örnekleme durumları oluşturmak için etkili bir yol kullanılmamıştır. Deneysel testte sadece 3 kat vardır ancak yazar toplam 720 hasar durumu etmiştir. Bu, büyük yapıların çok sayıda serbestlik derecesi nedeniyle pratikte imkansızdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

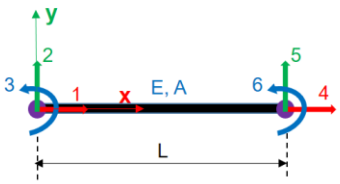
Bu tezin temel amacı, 3D yüksek katlı binaların kat seviyelerinde ve yapısal elemanlarında hasarın belirli bir yaklaşıklıkla tespitidir. Örneğin, Şekil 3.1 a'daki tipik bina perde duvarlar, kolonlar, kirişler ve döşemelerden oluşmaktadır. Yapının karmaşıklığı nedeniyle hasar tespiti iki adıma ayrılmaktadır. İlk adım, hasarlı katları tespit etmektir. İkinci adımda ise perde duvar, kolon gibi hasarlı elemanların tespiti amaçlanmaktadır. Ancak bu çalışmada 2D bir problemi ele alarak basit bir noktadan başlamaktadır (Şekil 3.1 b). Daha sonra önerilen yöntem 3D probleme uygulanır. Birinci amacı ele almak için bu çalışmada iki yöntem incelenmiştir. Bunlardan biri MSE tabanlı bir yaklaşımıdır. Diğeri ise öz değer problemine tabanlı bu çalışmada geliştirilmiş ters çözümdür. Hasarlı katlar tespit edildikten sonra, hasar tanımlaması, ANN yöntemi kullanılarak hasarlı elemanların tanımlanması için genişletilmektedir.



Şekil 3.1. 3D model ile 2D arasındaki idealleştirme.

Bu çalışmada gerçekleştirilen araştırmaların büyük bir kısmı sayısal modellemeye dayanmaktadır. Bunlara ek olarak geliştirilen modellere ilişkin sınırlı sayıda deneysel çalışmalar ile doğrulamada gerçekleştirilmektedir. İlk olarak yapılan iki boyutlu çalışmalarda çerçeveler MATLAB R2020b kullanılarak modellenmiştir FEM teorisine göre bir kiriş elemanının rijitlik matrisi ve kütle matrislerinin nasıl elde edildiği yaygın şekilde bilinen teorik eşitlikler aşağıda sunulmaktadır. Bir kiriş elemanı, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 6 serbestlik derecesi içerir. *bxh* kesiti *A* olan bir eleman. Malzemesi

Young'ın E elastik modülü ve ρ kütle yoğunluğuna sahiptir. Rijitlik ve kütle matrisleri Şekil 3.2'de sunulduğu gibi elde edilebilir. Rijitlik matrisi için, kesme etkisi de şekle dahil edilmiştir. Kütle matrisi, toplanmış kütle teorisi, $M_e{}^{lumped}$, ve dağıtılmış kütle teorisi, $M_e{}^{distributed}$, temel alınarak iki farklı şekilde burada oluşturulmuştur.



$$M_e^{lumped} = \rho LA \begin{array}{c} \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$K_{element} = E \begin{array}{c} \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{A}{L} & 0 & 0 & \frac{-A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12I}{(1+\phi_y)L^3} & \frac{6I}{(1+\phi_y)L^2} & 0 & \frac{-12I}{(1+\phi_y)L^3} & \frac{6I}{(1+\phi_y)L^2} \\ 0 & \frac{6I}{(1+\phi_y)L^2} & \frac{(4+\phi_y)I}{(1+\phi_y)L} & 0 & \frac{-6I}{(1+\phi_y)L^2} & \frac{(2-\phi_y)I}{(1+\phi_y)L} \\ \frac{-A}{L} & 0 & 0 & \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12I}{(1+\phi_y)L^3} & \frac{-6I}{(1+\phi_y)L^2} & 0 & \frac{12I}{(1+\phi_y)L^3} & \frac{-6I}{(1+\phi_y)L^2} \\ 0 & \frac{6I}{(1+\phi_y)L^2} & \frac{(2-\phi_y)I}{(1+\phi_y)L} & 0 & \frac{-6I}{(1+\phi_y)L^2} & \frac{(4+\phi_y)I}{(1+\phi_y)L} \end{bmatrix} \end{array}$$

$$M_e^{distributed} = \frac{\rho LA}{420} \begin{array}{c} \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 210 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 210 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Kesit alanı: $A = bh$;

Atalet momenti: $I = \frac{bh^3}{12}$;

Kesme katsayısı: $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$;

$\phi_y = \frac{12EIk_y}{AGL^2}$ ile $k_y = 1.2$ dikdörtgen profiller için;

Şekil 3.2. 2D kiriş elemanı

3D problem için binalar doğrudan SAP2000 v.22'de modellenmiştir. Rijitlik ve kütle matrisleri, Application Programming Interface (API) kullanılarak doğrudan SAP2000'den MATLAB'a aktarılır. API, SAP2000 ve MATLAB arasında doğrudan iki yönlü bir bilgi aktarımı gerçekleştirilmesi için bir araç olarak kullanılmakta olup, yüksek binalar gibi büyük ve karmaşık modeller için hızlı çıktı sağlamaktadır.

Burada ve takip eden başlıklarda ifade edilen tüm materyal ve metotlara ilişkin değerlendirmeler ve elde edilen sonuçlara ilişkin tartışmalar bulgular başlığında verilmektedir.

3.1. Hasar İndeksi DI B Tabanlı NL Güncelleme Prosedürü

Önceki başlıklarda MSE tabanlı yöntemler anlatılırken DI yöntemleri tanıtılmıştı. Bu başlıkta DI Orijinal çalışmanın sonuçlarına dayanarak, DI yöntemlerinin sonuçları

sorgulanmaktadır. Bu yöntemlerin ilgili çalışmalarda iyi sonuçlar ürettikleri gösterilmekle birlikte, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda, hasar lokalizasyonunda ve özellikle şiddet tahmininde önemli ölçüde hatalı tahminler ürettikleri görülmüştür. Bu yaklaşımlardan DI B'ye dayanarak, yaklaşımın hasarı tam olarak tanımlamak ve hasar şiddetini daha doğru tahmin etmek için bu çalışma kapsamında yeni geliştirilen NL güncelleme prosedürü ile daha gerçekçi sonuçlar üretebilmesi amaçlanmakta ve bununla birlikte söz konusu yöntemlerin dezavantajlarının ortadan kaldırıldığı gösterilmektedir. Söz konusu yöntem DI NL olarak isimlendirilmektedir.

3.1.1. Hasar İndeksi DI NL Yöntemi

Daha önceki başlıklarda detayları verildiği üzere DI B'den (denklem 2.18) elde edilen ilk sonuç çifti E^*_{j1} ve β^*_{j1}'dir. Varsayıldığı üzere, ilk olarak elde edilen çiftten gerçek sonuçlarak daha yakın başka bir çiftin olduğu bilinmektedir. Buradan hareketle elde edilecek olan E^*_{j2} ve β^*_{j2}' çiftinin gerçeğe daha yakın sonuçlar olacağı kabul edilebilir. Eğer ilk çift doğruysa, ilk çiftteki her değer, son çiftteki karşılığı ile aynıdır ve bunun tersi de geçerlidir. j'inci elemanının hasarlı durumdaki sistem rijitlik matrisine katkısı C^*_j, denklem (3.1) olarak yazılırsa, hasarı temsil eden E^*_{j1} iken , hasardan sonra C_{jo}'ın hala sabit kaldığı düşünülmektedir. Bu durumda, E_j sabit kalırken ikinci terimin hasarlı bir parametreyi işaret ettiği denklem (3.2)'deki ifadeyi tersinden düşünülebilir. Daha sonra, denklem (3.3)'te olduğu gibi C^*_j'yi $C^*_{j_updated_1}$ olarak güncellemek için bir yöntem kullanılarak, E^*_{j2} değerinin E^*_{j1}'den küçük olduğu varsayılır. Bu güncelleme adımı burada Anahtar 1 olarak isimlendirilmektedir. Denklem (2.13)'e benzer şekilde, ikinci çiftin denklemler (3.4) ve (3.5) olarak tanımlanması için bir denklem yazılabilir. Denklemlerden (3.4), hasarlı durumdaki sistem rijitlik matrisi, $C^*_{u_1}$ tahmini DI, β_{ij_1} kullanılarak güncellenir. Bu adım Anahtar 2 olarak adlandırılır. Ardından, denklemden (3.6), $E/E^*_{j2} \approx E/E^*_{j1} = \beta_{ij_1}$ olduğu varsayılır. Bu yaklaşım Anahtar 3 olarak adlandırılır. Son olarak, ardışık DI, β_{ij_2}, denklem (3.7)'de olduğu gibi DI, β_{ij_1}'den güncellenebilir. Bu şekilde, genel bir çözüme ulaşılmak istenirse, formül, başlangıç noktasından, β_{ij_1} güncellenmesinin n'inci yinelemesinde DI, β_{ij_n}, denklem (3.8) olarak yazılabilir. Hasar endeksi β_{ij_n}, bir önceki adımda elde edilen endeks kullanılarak güncellenir ve gerçek değere ulaşması beklenir. Burada n adet

döngüden sonra DI β_{ij_n} ve DI β_{ij_n-1} arasında anlamlı bir fark olmayıncaya kadar devam ettirilmektedir. Bu durumda en iyi sonuca ulaşıldığı anlamına gelmektedir. Ek olarak, birinci mod şeklinin çoğunlukla hasar lokalizasyonunda daha doğru sonuçlara yol açtığını gözlemlendiğinden, güncelleme modu, yani NL güncelleme prosedürü için ilk mod şeklinin (i = 1) tercih edilmesi uygun olmaktadır. İşlemle elde edilen DI'nin nihai değerine DI NL denir. Prosedür, Şekil 3.3'de verilen akış şemasında kısaca gösterilmektedir.

$$C_j^* = E_{j1}^* C_{jo} \tag{3.1}$$

$$C_j^* = E_j C_{jo_1}^* = E C_{jo_1}^* \tag{3.2}$$

$$C_{j_updated_1}^* = C_{j_u_1}^* = E_{j2}^* C_{jo_1}^* \tag{3.3}$$

$$1 = \frac{E_{j2}^* \left[\phi_i^{*T} C_{jo_1} \phi_i^* + \frac{1}{E_{j2}^*} \phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^* \right]}{E_j \left[\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \frac{1}{E_j} \phi_i^T C \phi_i \right]} \frac{\phi_i^T C \phi_i}{\phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^*} \tag{3.4}$$

$$\beta_{ij_2} = \frac{E_j}{E_{j2}^*} = \frac{\left[\phi_i^{*T} C_{jo_1} \phi_i^* + \frac{1}{E_{j2}^*} \phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^* \right]}{\left[\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \frac{1}{E_j} \phi_i^T C \phi_i \right]} \frac{\phi_i^T C \phi_i}{\phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^*} \tag{3.5}$$

$$\beta_{ij_2} = \frac{E_j}{E_{j2}^*} = \frac{\left[\phi_i^{*T} C_{jo_1} \phi_i^* + \frac{E}{E_{j2}^*} \phi_i^{*T} \frac{C_{u_1}^*}{E} \phi_i^* \right]}{\left[\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \phi_i^T \frac{C}{E_j} \phi_i \right]} \frac{\phi_i^T C \phi_i}{\phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^*} \tag{3.6}$$

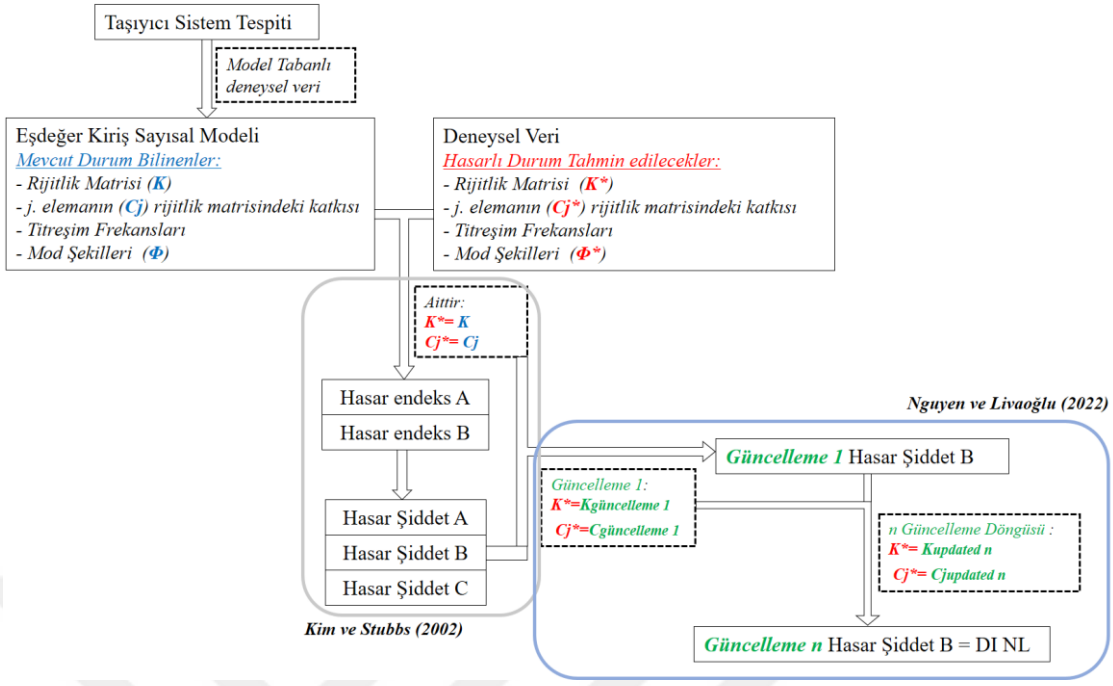
$$\beta_{ij_2} = \frac{E_j}{E_{j2}^*} = \frac{\left[\phi_i^{*T} C_{jo_1} \phi_i^* + \beta_{ij_1} \phi_i^{*T} \frac{C_{u_1}^*}{E} \phi_i^* \right]}{\left[\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \phi_i^T \frac{C}{E_j} \phi_i \right]} \frac{\phi_i^T C \phi_i}{\phi_i^{*T} C_{u_1}^* \phi_i^*} \tag{3.7}$$

$$\beta_{ij_n} = \frac{E_j}{E_{j_n}^*} = \frac{\left[\phi_i^{*T} C_{jo_(n-1)} \phi_i^* + \beta_{ij_(n-1)} \phi_i^{*T} \frac{C_{u_(n-1)}^*}{E} \phi_i^* \right]}{\left[\phi_i^T C_{jo} \phi_i + \phi_i^T \frac{C}{E_j} \phi_i \right]} \frac{\phi_i^T C \phi_i}{\phi_i^{*T} C_{u_(n-1)}^* \phi_i^*} \tag{3.8}$$

3.1.2. Hasar İndeksi DI NL için sayısal doğrulama

Mevcut DI'lere kıyasla DI NL'nin göze çarpan en belirgin özellikleri sayısal bir araştırma ile burada verilmektedir. Mevcut olanların artıları ve eksileri açıkça verilmekte, bundan sonra, DI NL'nin üstünlükleri ve mevcut yöntemlerin bıraktığı boşlukları nasıl doldurduğu ifade edilmeye çalışılmaktadır. Bu maksatla çelik konsol kiriş bu bölümdeki sayısal örnek olarak seçilmiştir. Elastik modülü (E) 210 GPa olan ve 7850 kg/m^3 birim hacim ağırlığa sahip çelik bir sistem için bu değerlendirmeler yapılmıştır. Söz konusu kirişin sabit kesiti, boyutları 40x3 mm^2 ve (L) uzunluğu 1125 mm'dir. Sayısal modellemede, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi x-y koordinatında iki boyutlu bir problem olarak dikkate alınmıştır. Rijitlik ve kütle matrisleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bununla birlikte, basitleştirme amacıyla, kesme etkisi göz ardı edilmektedir ve bunun yanında bu bölümde dağıtılmış kütle matrisi kullanılmaktadır.

Sayısal modal analiz MATLAB® kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal test, üç mevcut DI'nin performansını değerlendirir. Bundan sonra, güncellenmiş olan DI NL doğrulanır. Her şeyden önce, DI'ler tek hasardan çoklu hasarlara kadar farklı durumlar için denenmektedir. Hasar şiddeti % 0-30 arasında değiştiği kabulüyle tüm bu analizler farklı senaryolar için gerçekleştirilmektedir. Duyarlılık analizi, ekleme modlarının sayısının hasar tanımlanabilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılmakta ve tüm bu çalışmalar sırasında ilk dört mod şekli, NM = 4 alınmaktadır. Bundan sonra, ardışık hasar yerlerinin durumu ve hasar uzunluğunun uzatılması da yine araştırmaya konu edilmektedir. Araştırma ayrıca ağ boyutu duyarlılık analizi hakkında bilgi verir. Bu bölümde NE'nin maksimum değeri 20'dir, ancak çalışmada eleman sayısı NE adım adım azaltılarak 4'e düşürülmektedir.



Şekil 3.3. NL güncelleme prosedürü metodu için genel akiş diyagramı

3.2. 2D yapılar için hasar tespiti - NL2D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN)

Özdeğer problemlerinin ters çözümünü etkinleştirmek için Guyan yoğunlaştırma yöntemi sayesinde mekanik özelliklerin matrisleri önemli ölçüde küçültülebilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak, istenen bir yapının mevcut rijitlik matrisini yaklaşık olarak belirlemek için bir güncelleme prosedürü oluşturmuştur. Alternatif olarak, kütle matrisindeki değişiklikler yapının modal özelliklerinde değişikliğe neden olduğundan, yapının kütle matrisini tanımak için benzer bir güncelleme prosedürü de yine bu maksatla kullanılmaktadır. Yapının rijjitlik matrisini elde etme prosedürü için sayısal bir doğrulama yöntemi oluşturulmuştur. İzlenen yapıların kat sayıları 3-30 arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra, güncelleme prosedürüne hem ağır hem de hafif hasarların tespitinde etkin bir şekilde kullanılabilmekte ve simetrik ya da asimetrik hasar senaryoları bu yaklaşımla değerlendirilebilmektedir. Öte yandan, bir kata fazladan bir kütle ekledikten sonra 3 katlı bir yapının kütle matrisini tanımak için deneysel bir doğrulama da yapılarak yöntemin geçerliliği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

3.2.1. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı güncelleme prosedürü

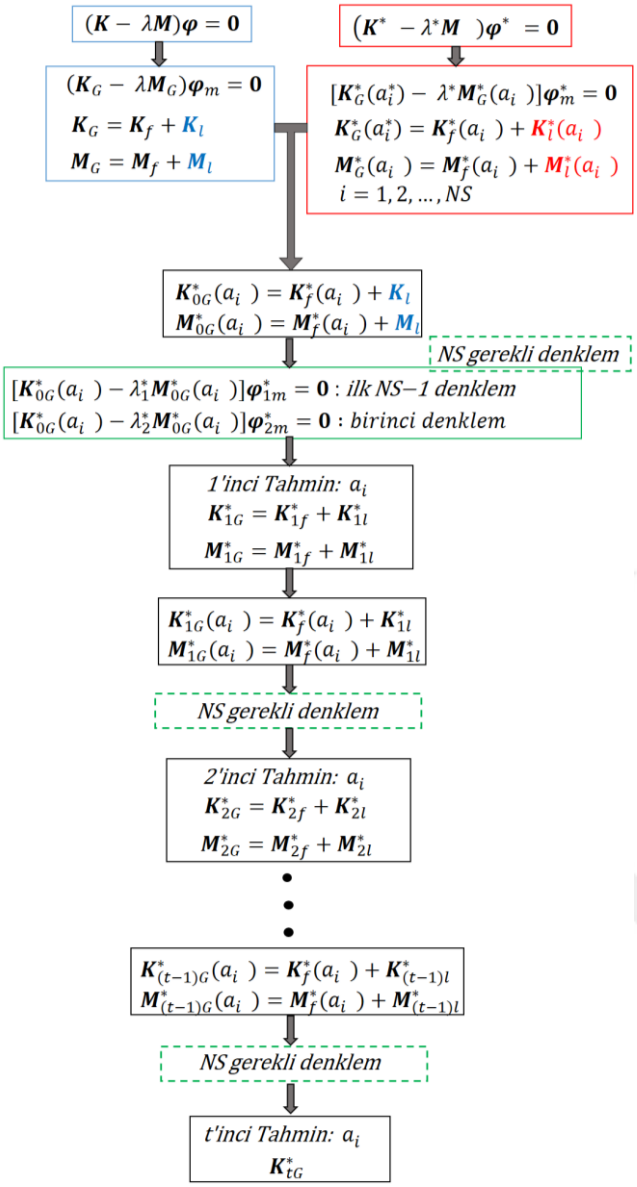
Guyan matris yoğunlaştırma yöntemine dayalı yoğunlaştırma işleminden sonra, *NS* boyutuna sahip kare indirgenmiş matrisler artık yalnızca yanal DOF'lardan oluşan kiriş benzeri bir yapının mekanik özelliklerini içeren bir ideal model olarak kabul edilmektedir. Yapının *i*'inci katının ($i = 1, 2, \ldots, NS$) sağlığı, sadece bir esneklik modülü değeri $\alpha_i E$ ile tanımlanır. α_i değerleri, tamamen hasarlı durum ile sağlıklı durum arasında sırasıyla 0 ile 1 arasında değişmektedir. Sonuç olarak, azaltılmış rijitlik matrisi $\boldsymbol{K}_G$ içinde bulunan toplam *NS* adet bilinmeyen değişkene sahiptirler. Yerinde ölçülen *j*'inci özdeğerler (λ_j^*) ve özvektörler (Φ^*_{mj}) herhangi bir hasarlı durumdan elde edildiğinde, bilinmeyen değişkenler yaklaşık olarak denklem (2.27) kullanılarak elde edilebilir. Modal analizde yaygın olarak kullanılan çözüme göre, değişkenler azaltılmış rijitlik matrisinde yer aldığından, gerekli ölçülen mod sayısı burada sadece iki adettir. Bu çalışmada, ilk iki en düşük mod dikkate alınarak değerlendirme yapılmaktadır.

NS değişkenleri için çözüm karmaşıktır ancak bazı varsayımlarla bu karmaşıklık ortadan kaldırılabilir. Denklem (2.28)'de yazılan hasarlı durumdaki rijitlik matrisi iki kısımdan oluşur ve her ikisi de bilinmeyen değişkenler içerir. İkinci terim, $\boldsymbol{K}_l^*$ yaklaşık olarak hasarsız durumdaki $\boldsymbol{K}_l$'ye eşit olarak seçilebilir. Bağımlı DOF'lerin önemsiz katkısı nedeniyle bu yaklaşım mümkündür. Dönmeye ait serbestlikler için bir kütle atanmadığından, yoğuşma sonrası bu işlem modal sonuçları etkilemeyecektir. Düşey DOF'ler katkısı düşünüldüğünde ise en düşük modlarda yanal DOF'lerin baskın rolüne kıyasla dikkate değer etkiler ortaya çıkmamaktadır. Son olarak, aynı seviyedeki düğümler arasında önemli bir sapma olmadığı için bu, yoğunlaştırmadan sonraki sonuçları büyük bir olasılıkla etkilemediğinden ana DOF'ler dışındaki bazı yanal DOF'lerın da göz ardı edilmesi sonuç üzerinde kayda değer bir etki yapmamaktadır. Elbette bu durumun bazı özel sınır koşulları için farklılık arz etmesi mümkündür. Sisteme ait taşıyıcı özellikleri ve döşeme sistemlerindeki boşlukların tasarımcı tarafından değerlendirilerek taşıyıcı sistemin özelliklerine bağlı olarak bu yöntemin kullanılması gerekmektedir. Ancak genel olarak bu tür yüksek yapı sistemlerinde taşıyıcı sistem sürekliliği ve düzeni düşünüldüğünde DOF'lerın yanal yer değiştirmesi aynı seviyedeki diğer DOF'ler için benzer kabul edilebilir ve bu nedenle burada sunulan yaklaşım önemli hatalara neden olmaz. Bu nedenlerden ötürü, ikinci terim, yoğunlaştırılmış rijitlik matrislerine önemsiz

bir şekilde katkıda bulunur. Hasarsız duruma kıyasla hasar sonrası durumlardaki değişimlerin de dikkate değer olmadığı varsayılır.

Bu yöntemde bilinmeyen değişkenleri içeren indirgenmiş rijitlik matrisinin ikinci terimi, başlangıçta sağlıklı durumdaki eşdeğeri olan ikinci terimine eşit olduğu varsayılır. Aynı bakış açısıyla, kütle matrisinin hasarlı durumdaki ikinci kısmı olan $\boldsymbol{M}_1^*$ de başlangıçta hasarsız durumdaki muadili olarak seçilebilir, $\boldsymbol{M}_1$. Bu durumda, indirgenmiş rijitlik ve kütle matrislerinin yalnızca ilk kısmı hala bilinmeyen değişkenler içermektedir. *NS* adet bilinmeyen değişkeni bulmak için, en azından *NS* adet denklem üretmek gerekmektedir. Kurulacak *NS*-1 adet denklemi, ölçülen ilk özdeğerler ($\boldsymbol{\lambda}_1$) ve özvektörler ($\boldsymbol{\Phi}_1$) denklem (2.27) ile ikame edilerek elde edilebilir. Bunun nedeni, ilk *NS*-1 adet denklemin tüm *NS* adet bilinmeyen değişkeni, α_i'yi içermesidir. Daha sonra ikinci ölçülen modun denklem (2.27) ile ikame edilmesiyle elde edilen ilk denklem gerekli sayıda denklem olan *N*S'ye eklenir. Sonuç olarak, bilinmeyen değişkenler hızlı bir şekilde hesaplanabilir. Mevcut sonuçlar, hasar senaryosu için ilk yaklaşık tahmini verir ve daha da önemlisi, bu bir güncelleme işlemi kullanarak gerçek hasar durumuna giden yolda bir başlangıç noktasıdır.

Yukarıda belirtilen düzensiz varsayımlar nedeniyle ilk yapılacak tahminin hataları içerecek şekilde yaklaşık olarak elde edilmesi oldukça olasıdır. Hasarlı durum için halihazırda elde edilen rijitlik matrisinden sonra, yoğuşma prosedürü nedeniyle yeni bir azaltılmış rijitlik ve kütle matrisi hızla hesaplanabilir. Aynı anda, bu her matris için yeni bir ikinci bölüm oluşturur. Bu durumda indirgenmiş matrislerin elde edilen son kısımları, $\boldsymbol{K}^*_{1G}$ ve $\boldsymbol{M}^*_{1G}$'yi güncellemek gerekmektedir. Sonuç olarak, yeni bir sistem, aynı şekilde elde edilebilen *NS* adet gerekli denklemlerden oluşur. *NS* denklem sistemi güncellenir ve hızla çözülerek, bir güncelleme prosedürü genel olarak, *t*'inci ardışık hesaplamada önceki verilere dayanılarak hesaplandığı denklemlerde (3.9-3.11) olduğu gibi gösterilebilir. Prosedür A'a ait akış diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Hasar tanımlama için güncelleme prosedür A

$$(\boldsymbol{K}_G^* - \lambda^* \boldsymbol{M}_G^*)\boldsymbol{\varphi}_m^* = \boldsymbol{0} \tag{3.9}$$

$$\boldsymbol{K}_G^* = \boldsymbol{K}_f^* + \boldsymbol{K}_l^* \tag{3.10}$$

$$\boldsymbol{M}_G^* = \boldsymbol{M}_f^* + \boldsymbol{M}_l^* \tag{3.11}$$

Daha önce bahsedildiği gibi, mod 1'deki ilk sabit *NS*-1 adet denklem ile mod 2'deki bir denklem arasındaki herhangi bir kombinasyon ile, önceden güncellenmiş ve güncellenmiş durumların her biri için tahmin edilen α-vektörü ile elde edilebilir. Mod 2'den ilk denklem Şekil 3.4'te seçilmiştir. Bu yaklaşım Prosedür A olarak adlandırılır. Alternatif olarak, sabit *NS*-1 denklemlerinin mod 2'deki *NS* denklemlerinin her biri ile birleştirildiği

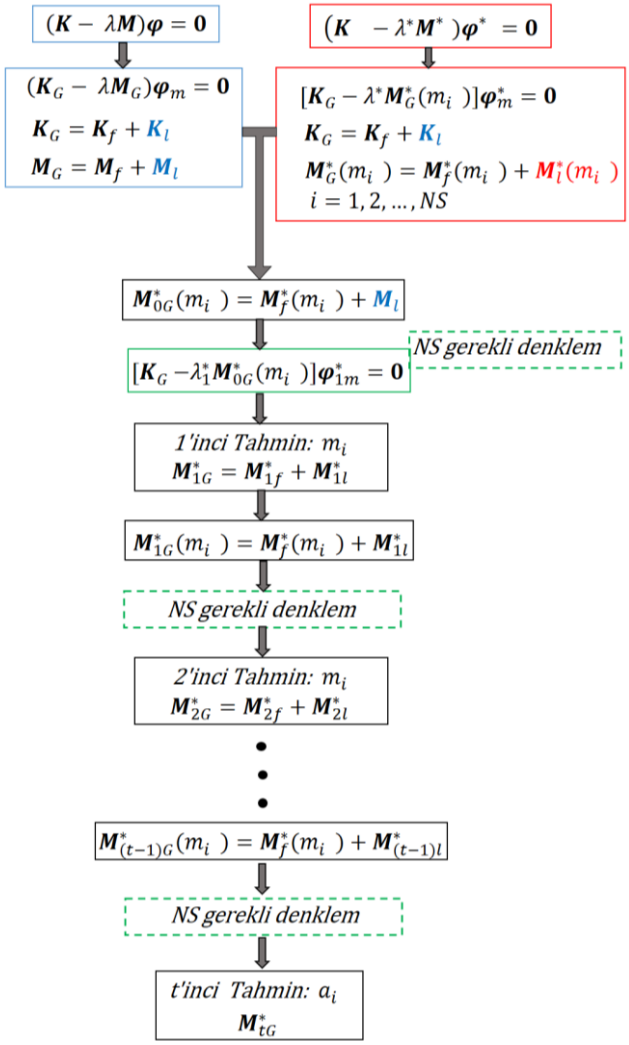
seçenekler düşünülebilir. Prosedür A için yapılanla aynı şekilde kullanılarak, önceden güncellenmiş ve güncellenmiş vakaların her biri için *NS* tarafından öngörülen α-vektörleri elde edilir. Daha sonra, her durum için, her a katsayısı, ayrı *NS* değerlerinin ortalaması alınarak elde edilir. Hasarı tespit etmek için iki ortalama α-vektörü (önceden güncellenmiş ve güncellenmiş) hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım ise Prosedür B olarak isimlendirilmektedir.

Önerilen hasar tanımlama prosedürü MATLAB®'da hazırlanan bir kod yardımıyla 2 boyutlu çerçevelerde sayısal olarak doğrulanmıştır. 3 ila 30 kat arasında değişen farklı örnekler üzerinde 4 farklı açıklık için bu doğrulama işlemleri farklı hasar senaryoları üzerinden elde edilmiştir. Öncelikle hasar senaryoları yüksek hasar düzeyleri ve simetrik olan 5 çerçeve için test edilmiştir. Zemin kat seviyesinde tüm kolon ve kirişlerin aynı düzeyde hasar gördüğü bu senaryolarda yukarıda ifade edilen prosedür başarıyla test edilmiştir. Benzer şekilde, önerilen yöntemin gücü, hafif hasar ve asimetrik konfigürasyona sahip hasar senaryoları için test edilmiştir. Bu bağlamda 20 katlı ve 4 açıklı yapı sistemi farklı hasar kategorileri kullanılarak incelenmiştir.

3.2.2. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı kütle tanıma prosedürü

Rijitlik matrisi sabit tutulurken katlara kütle ekleyerek kütle matrisindeki değişiklikler de modal verilerde değişikliklere neden olacağından bu yaklaşım tarzı da hasar tespiti konusunda bu tez kapsamında geliştirilmektedir. Bununla birlikte deneysel olarak işlem görmüş çelik elemanlarda malzeme özellikleri başlangıç durumuna göre önemli farklılıklara neden olduğundan, rijitlik tabanlı değerlendirme yerine genel manada öz değer problem tabanlı metotların doğrulanması için bu yöntem kullanılmıştır. Bu yolla rijitlikleri hasar vererek değiştirmek yerine aynı eşitliklerdeki kütle matrisini değiştirecek şekilde doğrulama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu sayede hasar tespiti için oluşturulan aynı yaklaşıma dayanan bu çalışmada, kütle ekleme adı verilen başka bir yaklaşımda benzer konular için değerlendirilmiştir. Genel olarak kütle eklenmesi, bu çalışmada önerilen hasar tanımlama prosedürü ile karşılaştırılmakta ve geçerliliği sınanmaktadır. Yoğunlaştırma prosedüründen ve öz değer probleminden elde edilen indirgenmiş matrisler de mevcut tekniğin omurgasını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, rijitlik matrisi değişmeden tutulurken, değişkenlerin artık kütle matrisinde bulunduğu bir yaklaşımla problemde hasar tespiti araştırılmaktadır. Bu nedenle problem, kütle

matrisinin basit formu nedeniyle daha basittir. Yoğunlaştırmadan sonra değişkenler, indirgenmiş kütle matrisinin köşegen çizgisinde görünür. Örneğin, kütle ekleme konfigürasyonu bağımsız olarak değerlendirilebiliyor ise, kütle matrisi artık *NS* adet bilinmeyen değişkene, m_i (i=1, 2, …, *NS*) sahiptir. Hasar tespiti için yukarıda bahsedilen güncelleme prosedürü ile mevcut sorun da yaklaşık olarak çözülebilir. (Şekil 3.5)



Şekil 3.5. Kütle tanıma için güncelleme prosedürü

İki prosedür arasında büyük bir farktan bahsetmek mümkündür. Guyan statik yoğunlaşması nedeniyle, hasar tanımlama prosedüründe hem rijitlik matrisi hem de kütle matrisi bilinmeyen değişkenler içerirken, kütle tanıma probleminde sadece kütle matrisi bilinmeyen değişkenleri içerir. Bu, hesaplamayı daha basit hale getirir. Bilinmeyen toplam kütleler öz değer problemdeki değişkenler olduğundan, her biri kütle matrisinin diyagonalinde yalnızca bir kez görünür. Değişkenlerin sayısı aynı zamanda kat sayısı, *NS*

ve ölçülen veri sayısıdır. Sonuç olarak, değişkenler yaklaşık olarak yalnızca temel mod kullanılarak belirlenebilir. Bu, hasar tanımlama prosedürüne göre bir diğer ikinci farktır. Prosedüre ait akış (Şekil 3.5) şemasında kısaca gösterilmektedir.

Kütle tanıma tekniğini doğrulamak için deneysel bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunun için 3 katlı tek açıklıklı bir çerçeve test edilmiş, çerçevenin bir kat seviyesine kütle eklenerek, konumu tespit edilir ve ağırlığı, kütle tanıma tekniği kullanılarak tahmin edilmiştir.

3.2.3. Eleman düzeyinde tespiti - ANN Tasarımı

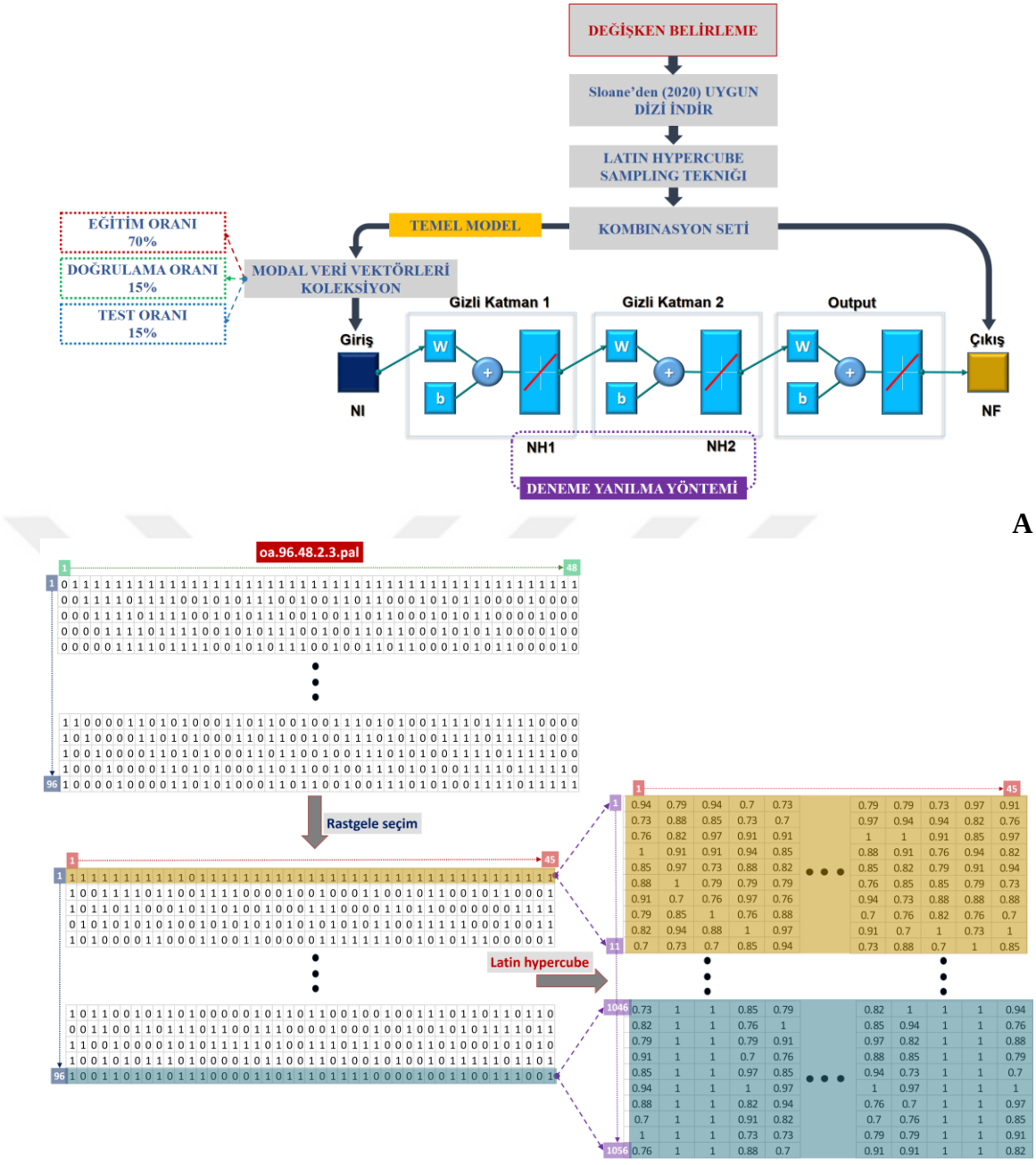
Hafif ve asimetrik kategorilerle hasar gören 20 katlı çerçeve bu bölümde incelenmiştir. Ters çözüme dayalı yöntemden potansiyel hasar adaylarının listesini belirledikten sonra, her hasar seviyesinin gerçek hasar senaryosunu belirlemek için bir ANN modeli tasarlanmaktadır. Bu yaklaşımda her bileşene sağlığı için bir E değeri atanmaktadır. Bu metotla yapılan araştırmada hasarı karakterize eden hasar yoğunluk aralığı $0{,}7E$ ile E arasında değiştiği sınırlar içerisinde araştırma gerçekleştirilmektedir. Her kattaki hasarı belirlemek için bir ANN modeli tasarlanmıştır. MATLAB® ile entegre edilen araç, yani function fitting neural network sayısal çalışmalarda kullanılmaktadır.

Her hasar senaryosuna göre, frekanslar ve mod şekilleri gibi bir dizi moda ait karakteristikler elde edilmektedir. Eğitimli bir ağ mod verileri alır ve ardından bu davranışa neden olan hasar kategorisini tanıması sağlanır. Bu amaca ulaşmak için, uygun bir ağ etkin bir şekilde tasarlanmalı ve eğitilmelidir. Ağı eğitmek için, çok çeşitli olası hasar vakaları dikkate alınarak elde edilen sebep ve sonuç çiftlerinden oluşan bir veri tabanı tanımlanmalıdır. Bu durumda dikkate alınan unsurların toplam NF sayısı varsa, bunların her biri hasar görebilir veya hasar görmemiş olabilir statüsünde kombinasyonların tam sayısını 2^{NF}'adet olasılığa ulaştırmaktadır. Bu en basit değerlendirmedir çünkü her üyede 2'den fazla olasılık vardır. Bu problemin üstesinden gelmek için, Orthogonal arayüz tekniği Hedayat ve diğerleri (1999) hasarlı veya hasarsız 2 seviye durumunda kombinasyon sayısını önemli ölçüde azaltmak için uygulamıştır. Bundan sonra, elde edilen her kombinasyon için, hasarlı elemanlardan değerleri $0{,}7E$ ile E arasında değişen Latin hypercube sampling tekniğine göre (Helton ve Davis, 2003) dağınık olarak düzenlenmiştir. Bir dizi kombinasyon elde edildikten sonra, her biri yapıya

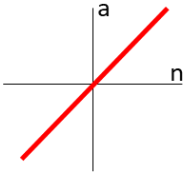
atanır ve bir modal analiz gerçekleştirilir. Her hasar senaryosu veya kombinasyonu veri tabanının nedeni olarak kaydedilir. İlk üç doğal frekanstan ve karşılık gelen mod şekillerinden oluşan modal bilgiler, etki karşılığı olarak veri tabanına eklenir. Sebep ve sonuç çiftlerinin sayısı, kombinasyonların veya çalıştırmaların sayısı ile aynıdır. Ağ, kombinasyon setinde sonuçlandırılmayan hasar senaryolarını tanımak için veri seti kullanılarak eğitilir. Bu tezde, ağı eğitmek için kullanılan iki tür modal veri vardır. İlk tip, yalnızca ilk üç frekansı ve yanal yer değiştirme modu şekillerini içerir. İkinci tür vektör, birincisine benzer ancak her katın dönme serbestlik dereceleri ile ilgili bilgileri içerir. Son modal bilgi, her katın başlangıç ve bitiş noktalarında ölçülen modal düşey yer değiştirmeler arasındaki oransal değişim yaklaşık olarak aynı kabul edilir.

Hagan ve diğerleri (1995), pratik nöral ağların çoğunda sadece iki veya üç katman bulunurken, daha yüksek sıralar nadiren uygulanır. Ancak, birden fazla gizli katman, öğrenme sürecinde genelleme için daha fazla esneklik sağlar ve Shih'e (1994) göre daha fazla nöron ihtiyacını dikkate değer şekilde azaltabilir. Yazar ayrıca, bir ağın iki ila altı katmana ve her gizli katman için nöron sayısında çok çeşitli varyasyonlara sahip olabileceğini öne sürmektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve iki gizli katman içeren bir ANN mimarisi uygulanmaktadır. Şekilde *NI*, giriş vektörünün eleman sayısıdır. *NF*, faktörlerin veya dikkate alınan parametrelerin sayısıdır. *NH1* ve *NH2*, sırasıyla gizli katmandaki 1 ve 2'deki nöronların sayısıdır. Bu çalışmada burada önerilen bu ANN mimarisi kullanılmıştır.

Ayrıca genel olarak -1 ile 1 aralığında değişen ancak aralıktan biraz sapma olabilen giriş ve çıkış verilerinin türü nedeniyle tüm katmanlarda transfer fonksiyonları olarak purelin fonksiyonu (Şekil 3.7) seçilmektedir. Fonksiyon, giriş değerine (n) eşit bir çıkış değeri (a) ile sonuçlanır. Diğer taraftan burada kullanılan ANN modeli, Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılarak eğitilmiştir. *mse* değer ANN'nın performansını ifade eder. Veri tabanı, eğitim için % 70, doğrulama için % 15 ve test için % 15 olmak üzere üç alt gruba ayrılmıştır. Eğitim işlemini durdurmak için erken durdurma tekniği uygulanır. Her döngüden sonra doğrulama alt kümesi uygulanır. Eğitim, doğrulama performansı sürekli 6 döngüden sonra iyileşmeyi başaramadığında duracak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.6. ANN yöntemi. **A**) Önerilen ANN mimarisi **B**) Latin hypercube uygulama örneği



Şekil 3.7. Purelin transfer fonksiyon

3.3. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL3D_INVSOL_ANN)

3.3.1. Kat düzeyinde tespiti - Öz değer problem tabanlı ortalama şeması

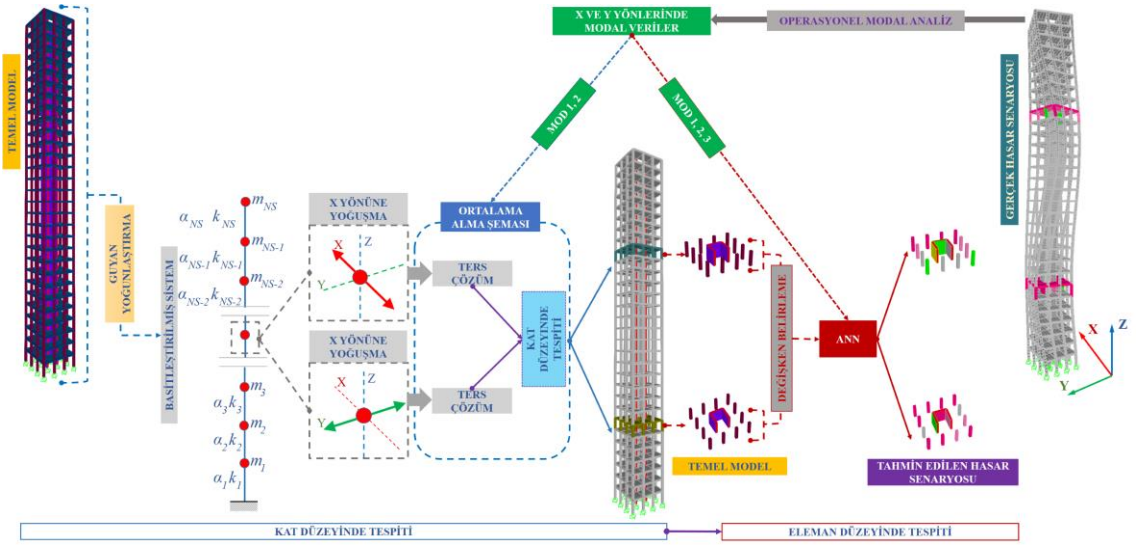
Yüksek binaların hasar tespiti için prosedür, ilgili sonuçlar bulgular bölümünde verilmek üzere, 2D çerçeve üzerinde başarıyla doğrulanmıştır. 2D problemine benzer şekilde, öncelikle kat seviyeleri ve ardından eleman seviyeleri için hasar tespiti elde edilir. Kat düzeyinde tespit için özdeğer problemine dayalı ters çözüm uygulanır. Ancak önerilen yöntemi bir 3D problem üzerinde uygularken bazı idealleştirmelere gerek duyulmaktadır. Eleman düzeyinde algılama için ANN yöntemi uygulanır. Ek olarak, 3D binalarda hasar tespit edilirken ölçüm gürültüsünün etkileri de dikkate alınmaktadır.

Bu aşamada, en düşük eğilme modlarından birkaçını kullanarak 3D yüksek yapıların hasar tespitini araştırılmaktadır. Binanın karmaşıklığından bağımsız olarak, her kata yalnızca bir çift eksenli ivmeölçer monte edildiğinde sensör ağı basittir. Akış şeması (Şekil 3.8 a) hibrit tekniği açıkça göstermektedir. Önerilen yöntem, özdeğer problemine dayalı ters çözüm kullanarak kat düzeyinde algılama ve ANN yöntemine dayalı eleman düzeyinde algılama olmak üzere iki ana adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, tam 3D yapı, Guyan statik yoğunlaştırma tekniği kullanılarak her bir yöne (X ve Y) karşılık gelen iki ayrı kiriş benzeri sistemde dönüştürülmektedir. Şekilde k_i ve m_i, i'inci katın S_i'nin idealleştirilmiş rijitliği ve yığılmış kütlesidir. α_i değeri, S_i üzerindeki tüm elementlerin sağlığını ifade eder. Her yönde, ilk iki eğilme modunu kullanarak, basitleştirilmiş sistemin hasarlı elemanlarını, diğer bir ifade ile binanın hasarlı katlarını ve daha sonra da hasarlı elemanları tespit etmek için özdeğer problemine dayalı ters çözüm uygulanır. Bununla birlikte, ters çözüm, hasarı doğrudan lokalize etmez. Bunun yerine, hasarı tespit etmek için Şekil 3.8 b'de ayrıntılı olarak açıklanan önerilen bir ortalama alma şeması uygulanır. Kat düzeyinde algılamadan sonra, hasarlı perde duvarları ve kolonları tespit etmek için yalnızca belirlenen katlara odaklanan bir ANN modeli oluşturulur. Doğrudan tüm binadan elde edilen, her yöndeki ilk en düşük üç eğilme modundan gelen mod verileri, ağı eğitmek için kullanılır.

2D problem için yapılan çözüme benzer şekilde, kat düzeyinde tespit için, basitleştirilmiş sistemlerde özdeğer problemi tabanlı ters çözüm etkinleştirilir. Tekniğin her yönde (X ve Y) ayrı ayrı uygulandığı not edilmelidir. Ancak, 3D problemler için bazı dikkate değer

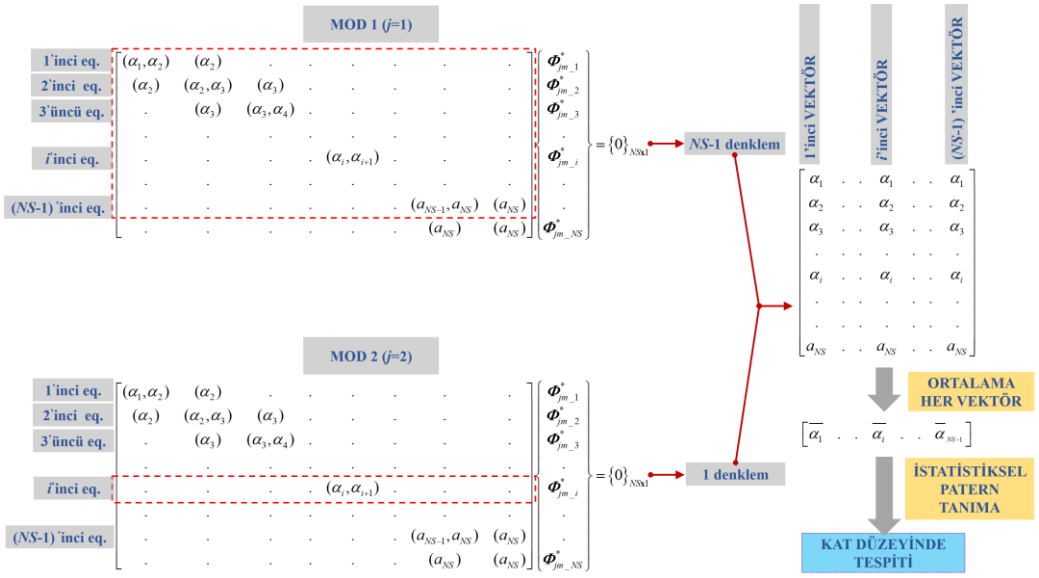
farklılıklar vardır. 2D problemde, *NS* bilinmeyen değişkenleri bulmak için, mod 1'deki ilk *NS*-1 denklemleri, ikinci moddaki ilk denklemle birleştirilir. Bununla birlikte, aynı şekilde kullanılarak, α-değeri tahmini, 3D binanın katlarının sağlığını doğrudan içermez. Sonuç olarak, önerilen bir yöntem ortalama şema olarak bu bölümde tanıtılmaktadır (Şekil 3.8 b).

Şekil 3.8 b'de önerilen ortalama alma şeması açık bir şekilde gösterilmektedir. Özellikle, mod 1'den sabit denklem sisteminin ve mod 2'den bir denklemin her bir kombinasyonu bir α-vektörü ile sonuçlanır. Bu şekilde, mod 2'deki *NS*-1 denklemlerine karşılık gelen *NS*-1 öngörülen α-vektörleri hesaplanır. Tahmin edilen her α-vektörünün ortalaması alınır, bu da bir vektörün *NS*-1 ortalamalı ortalama α-değerlerini içermesini sağlar. Sabit denklem sistemi, bunlardan birinin veya her ikisinin de hasar gördüğü iki α değeri içeren bir denklem ile birleştiğinde, karşılık gelen ortalamanın birinden oldukça düşük olduğu ve bir hasar belirtisi bildirdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, mod 2'den 7'inci denklem, ortalaması alınan vektördeki 7'inci değer düşükse, 7'nci katı ayırt edilebilir hale getirerek α_7 ve α_8'i içerir. Önerilen şemayı derinlemesine anlamak için özel durumların sayısal olarak incelenmesi gereklidir.

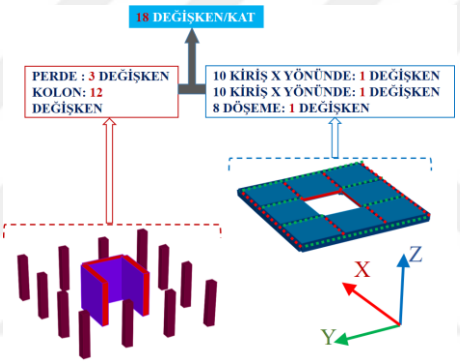


A

Şekil 3.8. Önerilen hasar tespit tekniğinin akış şeması. **A**) NL3D-Ters Çözüm-ANN prosedürü **B**) Ortalama şeması **C**) Değişken belirleme örneği



B

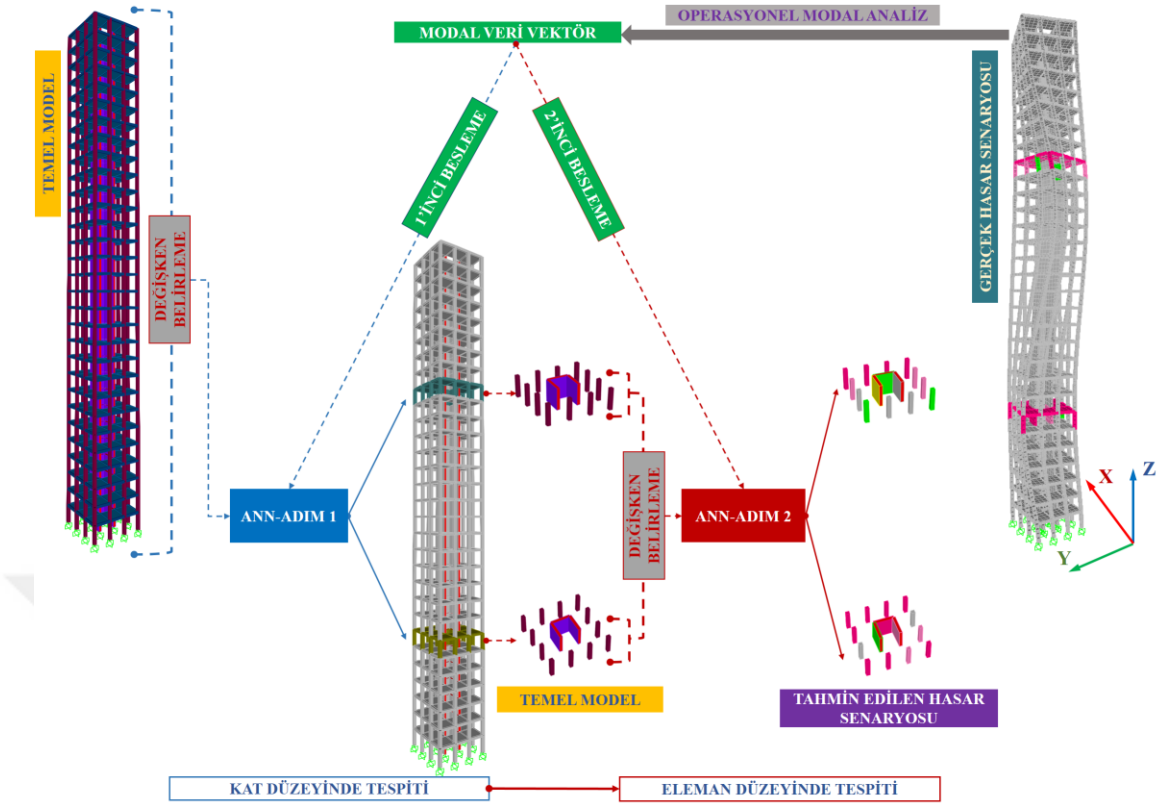


C

Şekil 3.8. Önerilen hasar tespit tekniğinin akış şeması. **A**) NL3D-Ters Çözüm-ANN prosedürü **B**) Ortalama şeması **C**) Değişken belirleme örneği (devam)

3.3.2. Kat düzeyinde tespiti - ANN tabanlı prosedürü

Bir önceki bölüme benzer şekilde, Şekil 3.8'de gösterilen 30 katlı binanın kat seviyesinde tespiti burada da hedeflenmiştir, ancak ANN yöntemi kullanılarak. Şekil 3.9'daki akış şeması, yüksek binaların hasar tespiti için ANN tabanlı bir hibrit stratejiyi göstermektedir. Yüksek katlı bir binanın, en azından birkaç en düşük modda, kiriş benzeri bir sistemle yaklaşık olarak aynı şekilde davrandığı varsayılmaktadır (Tributsch & Adam, 2018). Chang ve diğerleri (2018), hasarlı katları tespit etmek için tam çok katlı binaları toplu kütle modeline aktardıkları benzer bir kabul literatürde bulunmaktadır.



Şekil 3.9. NL3D-ANN-ANN prosedürü

Bu aşamada giriş verilerini oluşturmak için basitleştirilmiş sistem kullanılmaktadır. Yüksek binalardaki ve kiriş benzeri sistemlerdeki hasarın muhtemelen en düşük modlara göre tespit edilebilir olduğu rahatlıkla söylenebilir. Böylece bir kat hasar gördüğünde, üzerinde bulunan perde, kolon, kiriş, döşeme gibi tüm elemanların rijitlik parametresinin aynı oranda azaldığı kabul edilir. Bu nedenle, gerçek hasar senaryosundan bağımsız olarak, katın yanal yer değiştirmeye direnen rijitliği, katın sağlığını temsil eden bir azaltma faktörü ile tespit edilebilir. Bu basitlikten dolayı, bir ANN modeli, ilk üç en düşük eğilme modunun frekansları ve mod şekilleri açısından farklılıklara dayalı olarak her katın azaltma faktörünü yakalamak için tasarlanmıştır. Modal veriler, pratikte ortam koşulları altında tanımlanabilir. Önerilen yaklaşımın fizibilitesi ve etkinliği, moda ait veriler gürültüsüz ve kirlenmemiş olduğunda araştırılır. Bir sonraki bölümde hasarlı katlar tespit edildikten sonra hasarlı duvarlar ve kolonların tespiti hedeflenmektedir.

3.3.3. Eleman düzeyinde tespiti - ANN tabanlı prosedürü

Bu çalışmada, hasarlı katların tespiti için yerelleştirme sürecinden sonra, 3D yapı üzerindeki hasarlı perde duvar ve kolonların tespiti için ANN yönteminin

kullanılması amaçlanmıştır. Mod bilgisi, özellikle X yönü ve Y yönü'deki ilk en düşük üç eğilme modu, ağı eğitmek için kullanılır. Hasarlı perde duvarların ve kolonların lokalizasyonuna odaklanılır. Döşeme ve kirişlerdeki hasarlar dikkate alınmaz. Bunun nedeni, perde duvarların ve kolonların yüksek yapıların dayanımında diğerlerine göre daha önemli rol oynamasıdır. Ayrıca, kirişlerin ve döşemelerin rijitliklerindeki değişikliklerin, en azından en düşük modlarda, yüksek binaların eğilme davranışını önemli ölçüde etkilendiği varsayılarak elde edilmektedir. Ek olarak, tüm elemanların hesaba katılması durumlarında, ANN modeli önemli ölçüde büyümektedir ve bu durumda eğitim, maliyetli ve zaman alıcı bir süreçle çözüme ulaşmada zorluklar doğurmaktadır.

Ek olarak, gürültülü koşullar altında hasarı tespit etmek için, sayısal olarak elde edilen modal veriler, yukarıda belirtilen veri pertürbasyon şeması kullanılarak kirletilmektedir. Önerilen yöntemin gürültü duyarlılığı, düşükten yükseğe ayarlanmış gürültü seviyeleri kullanılarak test edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

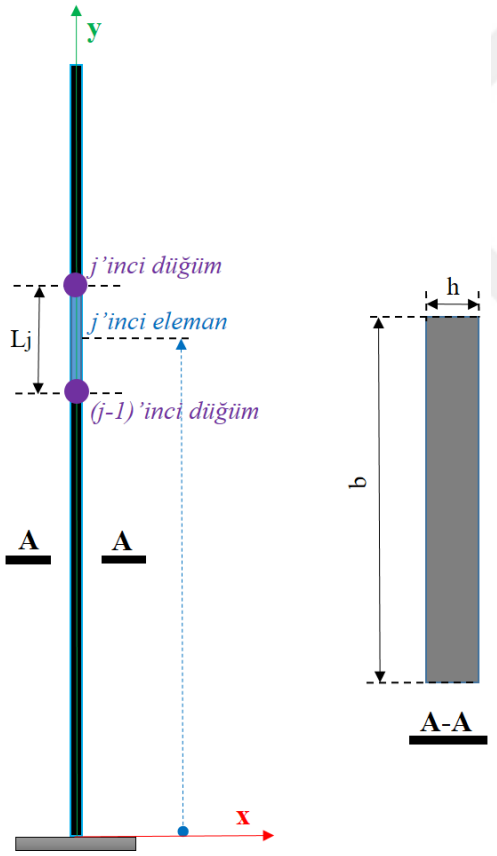
4.1. MSE tabanlı DI'lerin performansı

MSE tabanlı yaklaşımlar irdelendiğinde, Kim ve Stubbs'un (1995, 1996, 2002) mevcut üç hasar indeks yaklaşımlarını (DI) (A, B, ve C) kullanarak, hasarlı yerini saptama konusunda kimi durumlarda oldukça verimli sonuçlar üretebildiğini göstermişlerdir. Ancak hasar şiddetini ve yerini tespitte gerekli nokta sayısı arttıkça söz konusu yöntem gerçekçi tahmin için oldukça büyük boyutta girdiye ihtiyaç duymaktadır. Söz konusu verinin toplanması ve derlenmesi izleme mantığını oldukça pahalı bir hale getirdiği gibi değerlendirmeyi ve buna bağlı sonuç üretmeyi de oldukça zor bir noktaya taşımaktadır. Diğer taraftan hasar şiddeti tahminine ilişkin yöntemlerin güvenilirliğine ilişkin çalışmalar konusunda da bir değerlendirme ve literatürde destekleyici bir veriye de rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada, hasar şiddetini % 15'den daha az (hedef olarak maksimum % 10) hata garantisi ile tahmin etmek için B yönteminin bakış açısına benzer yeni bir yaklaşım kurgulanmaktadır. İkinci olarak, mevcut üç DI, izlenen yapılarda bir dizi ardışık nokta ve her bir noktada üç serbestlik derecesinde (DOF) (2 ötelenme ve 1 dönme) dikkate alındığında oldukça gerçekçi sonuçlar üretirken uygulamada, orta seviyede bir yükseklik için ise bunun sağlanması ne veri toplama kabiliyeti ne de veri işleme kabiliyeti açısında mümkün olmayacaktır. Daha da önemlisi, yaygın olarak ivmeölçerlerden doğrusal olarak bilgi almak mümkündür. Dönmeye ait veriler ancak birden fazla ivme ölçerin verisi kullanılarak tahmin edilebilir ki bu da enstrümantasyonu oldukça karmaşık bir noktaya getirmektedir. Ek olarak, tek eksenli ivmeölçerler genellikle diğerlerinden ziyade daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde MSE tabanlı yöntemler, burada ifade edilen sorunlarla karşı karşıya kaldıklarında uygulamaları ne denli mümkündür sorusu, yüksek ve karmaşık yapılar için büyük bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, MSE yöntemine dayalı olarak mevcut yöntemin avantaj ve dezavantajlarını göstermek, daha sonra, mevcut yöntemi iyileştirmek için güncellenmiş bir prosedür ortaya koymak, daha da önemlisi ve son aşama olarak MSE tabanlı yüksek binalarda pratik uygulama için güçlü ve sağlam niteliklere sahip yeni bir prosedür ile hasar yerini tespit edebilmek ve şiddetini değerlendirmek temel amaç olarak seçilmiştir.

4.1.1. Mevcut DI'lerin araştırılması

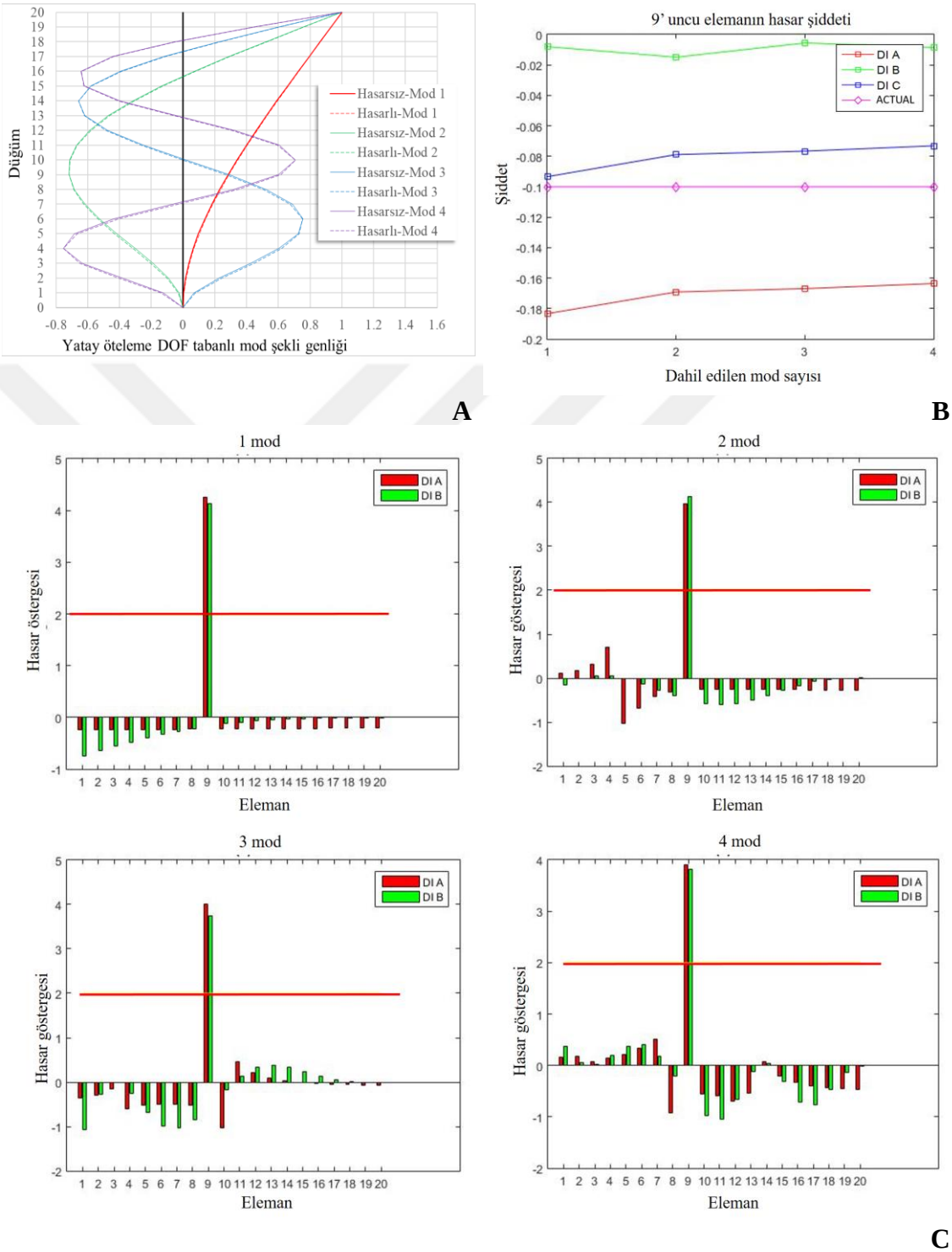
Bu çalışmada hasar indekslerinin (DI) güvenilirliği, basit bir konsol kiriş kullanılarak sayısal olarak değerlendirilmiştir. Elastik modülü (E) 210 GPa olan ve 78.5 kN/m^3 birim hacim ağırlığa sahip çelik bir sistem için bu değerlendirmeler yapılmıştır. Söz konusu kirişin sabit kesiti, boyutları 40x3 mm^2 ve (L) uzunluğu 1125'mm dir (Şekil 4.1). Sayısal modellemede, Şekil 4,1'de görüldüğü gibi x-y koordinatında iki boyutlu bir problem olarak dikkate alınmıştır. Söz konusu bu model kullanılarak birçok farklı senaryo parametrik olarak mevcut 3 farklı hasar indeksi yöntemi kullanılarak irdelenmektedir. Bu 10 farklı senaryoya ait bilgiler Çizelge 4.1'de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Dikkate alınan konsol detayları

Eşdeğer modelin j'inci elemanının sağlığı (Şekil 4.1) DI A, B, ve C kullanılarak tanımlanmaktadır. Eleman numaralarında mantığında ilk elemanın tabanda olduğu varsayılmaktadır. Her bir senaryo için yalnızca bir tek lokasyonda hasar olduğu varsayılarak 10 farklı hasar senaryosu burada araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında

MATLAB®’ yardımıyla yazılan kod adlı *NL_MSE.mat* (Nguyen ve Livaoğlu, 2019) ile elde edilen tipik sonuçlar Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. S4a sonuçları. **A**) Mod şekli karşılaştırması **B**) Hasar şiddet tahmini **C**) DI’ler

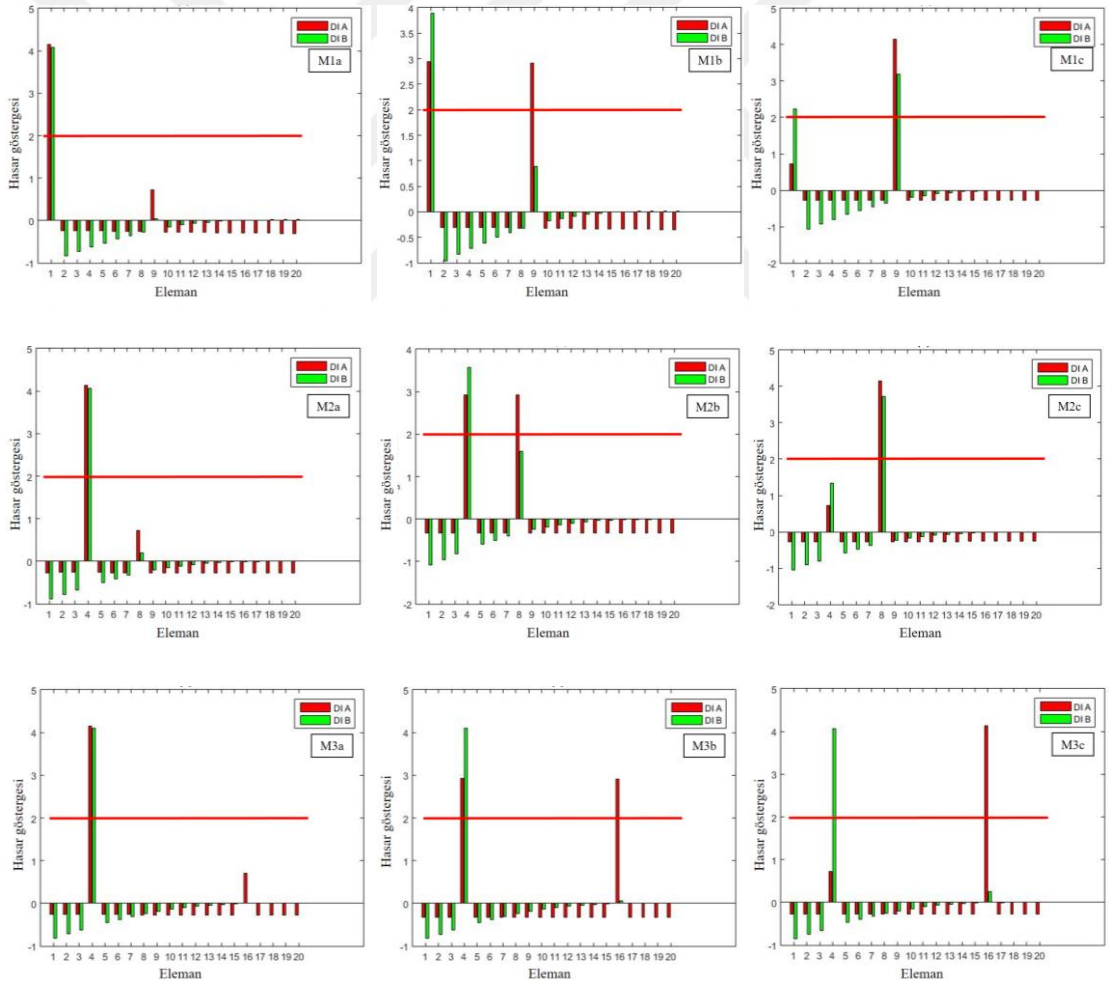
Mevcut DI'lere dayalı hasar tanımlama sonuçları sırasıyla tek hasar ve çoklu hasar durumları için Çizelge 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. Çizelgede, "✓" işaretlerinin hasar lokalizasyonunu doğru temsil ettiğini ifade etmektedir. Öte yandan, kırmızı kalın numaralara ve "✗" işaretlerine sahip gölgeli alanlar yanlış hasar tanımlaması anlamına gelir. Son olarak, "☑", bir eleman için hasar göstergesinin daha önce tanımlanan endeksler olanan daha küçük sonuçlar üretmesi durumunda kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1. Tek hasar tanımlaması

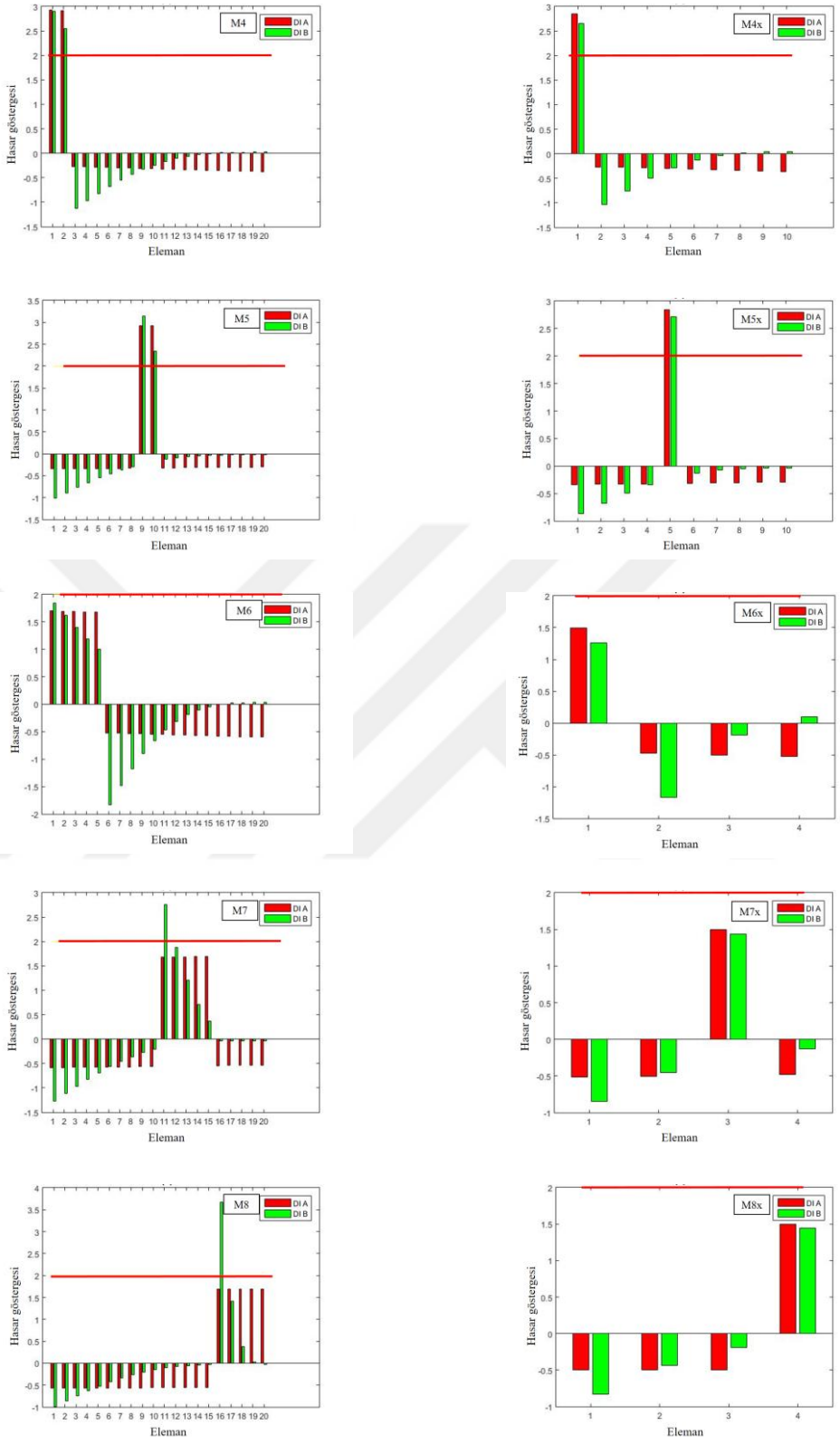
Scenaryo	Hasarlı eleman	Gerçek şiddet, α	Hasar göstergesi								Tahmini şiddet, α_p											
			1 Mod		2 Mod		3 Mod		4 Mod		1 Mod			2 Mod			3 Mod			4 Mod		
			A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
S1	1	-0,2	✓	✓	2	✓	✓	✓	2	✓	-0,29	-0,06	-0,13	✗	-0,04	-0,08	-0,25	-0,03	-0,04	✗	-0,02	✗
S2	4	-0,2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,32	-0,05	-0,16	-0,32	0,00	-0,16	-0,33	-0,01	-0,17	-0,31	-0,03	-0,15
S3	7	-0,2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,34	-0,03	-0,18	-0,33	-0,02	-0,17	-0,30	-0,03	-0,14	-0,31	-0,01	-0,14
S4	9	-0,2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,35	-0,02	-0,19	-0,32	-0,03	-0,16	-0,32	-0,01	-0,16	-0,31	-0,02	-0,15
S5	12	-0,2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,36	-0,01	-0,20	-0,32	-0,04	-0,16	-0,32	-0,02	-0,15	-0,31	-0,02	-0,15
S6	16	-0,2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,36	0,00	-0,20	-0,36	-0,01	-0,20	-0,33	-0,04	-0,17	-0,29	-0,04	-0,13
S1a	1	-0,1	✓	✓	**1,2**	✓	✓	✓	2	✓	-0,16	-0,03	-0,07	✗	-0,02	-0,04	-0,11	-0,01	-0,02	✗	-0,01	✗
S1b	1	-0,3	✓	✓	**2**	✓	**1,2**	✓	**2**	✓	-0,42	-0,10	-0,20	✗	-0,07	-0,13	✗	-0,05	-0,06	✗	-0,03	-0,01
S4a	9	-0,1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,18	-0,01	-0,09	-0,17	-0,01	-0,08	-0,17	-0,01	-0,08	-0,16	-0,01	-0,07
S4b	9	-0,3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-0,49	-0,03	-0,28	-0,46	-0,06	-0,24	-0,45	-0,03	-0,24	-0,44	-0,03	-0,23

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2'teki grafikler MSE tabanlı hasar tanımlamasına ilişkin yaklaşımın geçerliliğini göstermektedir. Birinci modun kullanılması DI A ve DI B için doğru şekilde hasar tespitinin yapılmasına olanak sağlar. Bunun yanı sıra DI B her zaman hasar yerlerini doğru olarak göstermekte olduğundan, diğer yaklaşımlara nazaran daha güçlü bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Sorun, hasarlı konumlara ve yüksek mod şekillerinin etkisine bağlıdır. Hasar lokalizasyonu için, sadece ilk mod şekli uygulandığında DI'ler tarafından doğru tahminler her zaman elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, DI B daha güçlü bir şekilde doğrulanmaktadır. DI A tarafından bazı yanlış tahminler elde edilmiş olmakla birlikte, bunun nedeni olarak yüksek mod şekilleri uygulandığında hasarın birinci katta meydana geldiği senaryolar için bu durumun geliştiği yapılan parametrik çalışmalardan anlaşılmaktadır. Diğer taraftan şiddet tahmini için DI A gerçeğe nazaran yüksek tahminlere neden olurken, DI B'den gerçeğe nazaran daha küçük tahminler elde edilmektedir. DI C ise genellikle bu her iki yaklaşımın arasında sonuç vermektedir.

Şekil 4.3 ve Çizelge 4.2'de çoklu hasar durumları bakımından DI'lerin performansı irdelenmektedir. Genel olarak, tüm hasarlı noktalar doğru bir şekilde tespit edilmiş olmakla birlikte, birden fazla hasar gerçekleşmesi durumunda genellikle DI A ve DI B'nin tahminin doğruluğunun azaldığı görülmektedir. DI C için ise birçok yanlış tahmin gözlemlendiğinden çoğunlukla yöntemin gücünü bu tür senaryolarda kaybettiği gözlemlenmektedir. Diğer taraftan, hemen bütün senaryolarda DI B her zaman senaryoda ön koşul olarak verilen hasardan daha küçük sonuçlar tahmin ettiği gözlemlenmektedir. DI A ise kimi durumlarda olduğundan büyük sonuçlar verebildiği gibi kimi durumlarda da küçük sonuçlar da üretebilmektedir. Bu nedenle tüm bu yaklaşımlar içerisinde gerçekleştirilen parametrik çalışmalardan diğerlerine nazaran DI B'nin daha kararlı bir araç olarak kabul edilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Çoklu ayrı hasar tanımlaması



A **B**

Şekil 4.4. Çoklu hasar. **A**) Ardışık hasarlar **B**) hasar uzunluğu uzatması

Şekil 4.4 ve Çizelge 4.3 sürekli bulunan çoklu hasarın sonuçlarını göstermektedir. Bu, DI'lerin hasar uzunluğunun eleman içerisinde artması durumunda duyarlılığı hakkında bir gözlemdir. Sonuç olarak, DI B'nin ciddiyet tahmini açısından öngörülebilirliği doğrulanmıştır. Öte yandan, DI A bu durumda kararsız bir tahmin sergilemektedir.

Çizelge 4.2. Çok hasar tanımlaması

Scenaryo	Hasarlı	Gerçek şiddet,	Hasar göstergesi		Tahmini şiddet, α_p		
			DI A	DI B	DI A	DI B	DI C
M1a	1	-0,3	✓	☑	-0,41	-0,10	-0,31
	9	-0,1	✓	☑	-0,02	0,00	✗
M1b	1	-0,2	✓	✓	-0,28	-0,06	-0,19
	9	-0,2	✓	☑	-0,28	-0,01	✗
M1c	1	-0,1	☑	✓	-0,12	-0,02	-0,05
	9	-0,3	✓	✓	-0,47	-0,03	-0,22
M2a	4	-0,3	✓	✓	-0,45	-0,08	-0,33
	8	-0,1	☑	☑	-0,08	0,00	✗
M2b	4	-0,2	✓	✓	-0,30	-0,04	-0,19
	8	-0,2	✓	☑	-0,30	-0,02	-0,03
M2c	4	-0,1	☑	☑	-0,13	-0,01	-0,01
	8	-0,3	✓	✓	-0,47	-0,04	-0,30
M3a	4	-0,3	✓	✓	-0,45	-0,08	-0,35
	16	-0,1	☑	✗	-0,09	0,00	✗
M3b	4	-0,2	✓	✓	-0,32	-0,05	-0,24
	16	-0,2	✓	☑	-0,32	0,00	✗
M3c	4	-0,1	☑	✓	-0,17	-0,02	-0,12
	16	-0,3	✓	☑	-0,50	0,00	✗

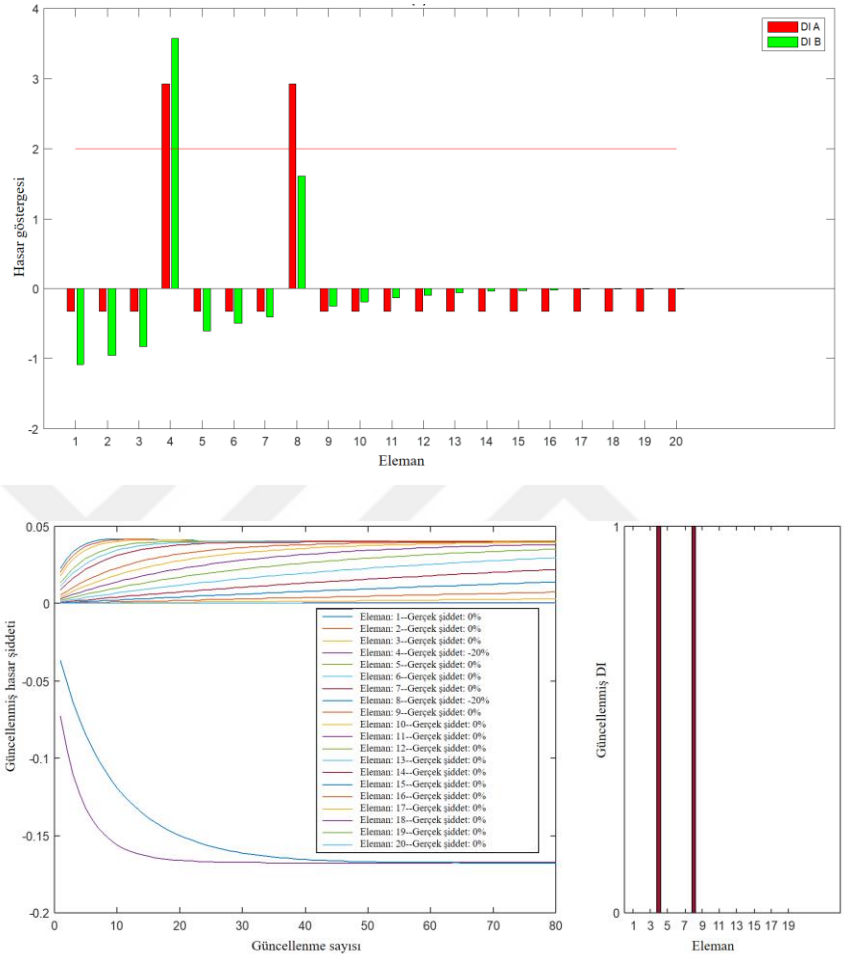
Çizelge 4.3. Ardışık hasarlar tanımlaması

Scenaryo	Hasarlı eleman	Gerçek şiddet, α	Hasar göstergesi		Tahmini şiddet, α_p		
			DI A	DI B	DI A	DI B	DI C
M4	1	-0,2	✓	✓	-0,24	-0,05	-0,08
	2		✓	✓	-0,24	-0,04	-0,06
M4x	1		✓	✓	-0,24	-0,07	-0,07
M5	9		✓	✓	-0,34	-0,02	-0,20
	10		✓	✓	-0,34	-0,01	-0,15
M5x	5		✓	✓	-0,34	-0,03	-0,18
M6	1		☑	☑	-0,11	-0,02	✗
	2		☑	☑	-0,11	-0,02	✗
	3		☑	☑	-0,11	-0,01	✗
	4		☑	☑	-0,11	-0,01	✗
	5		☑	☑	-0,11	-0,01	✗
M6x	1		☑	☑	-0,11	-0,05	✗
M7	11		☑	✓	-0,35	-0,01	-0,27
	12		☑	☑	-0,35	-0,01	-0,23
	13		☑	☑	-0,35	0,00	-0,16
	14		☑	☑	-0,35	0,00	-0,04
	15		☑	☑	-0,35	0,00	✗
M7x	3		☑	☑	-0,35	-0,02	-0,19
M8	16		☑	✓	-0,36	0,00	-0,31
	17		☑	☑	-0,36	0,00	-0,24
	18		☑	☑	-0,36	0,00	✗
	19		☑	☑	-0,36	0,00	✗
	20		☑	✗	-0,36	✗	✗
M8x	4		☑	☑	-0,36	0,00	-0,20

4.1.2. DI NL'nin değerlendirilmesi

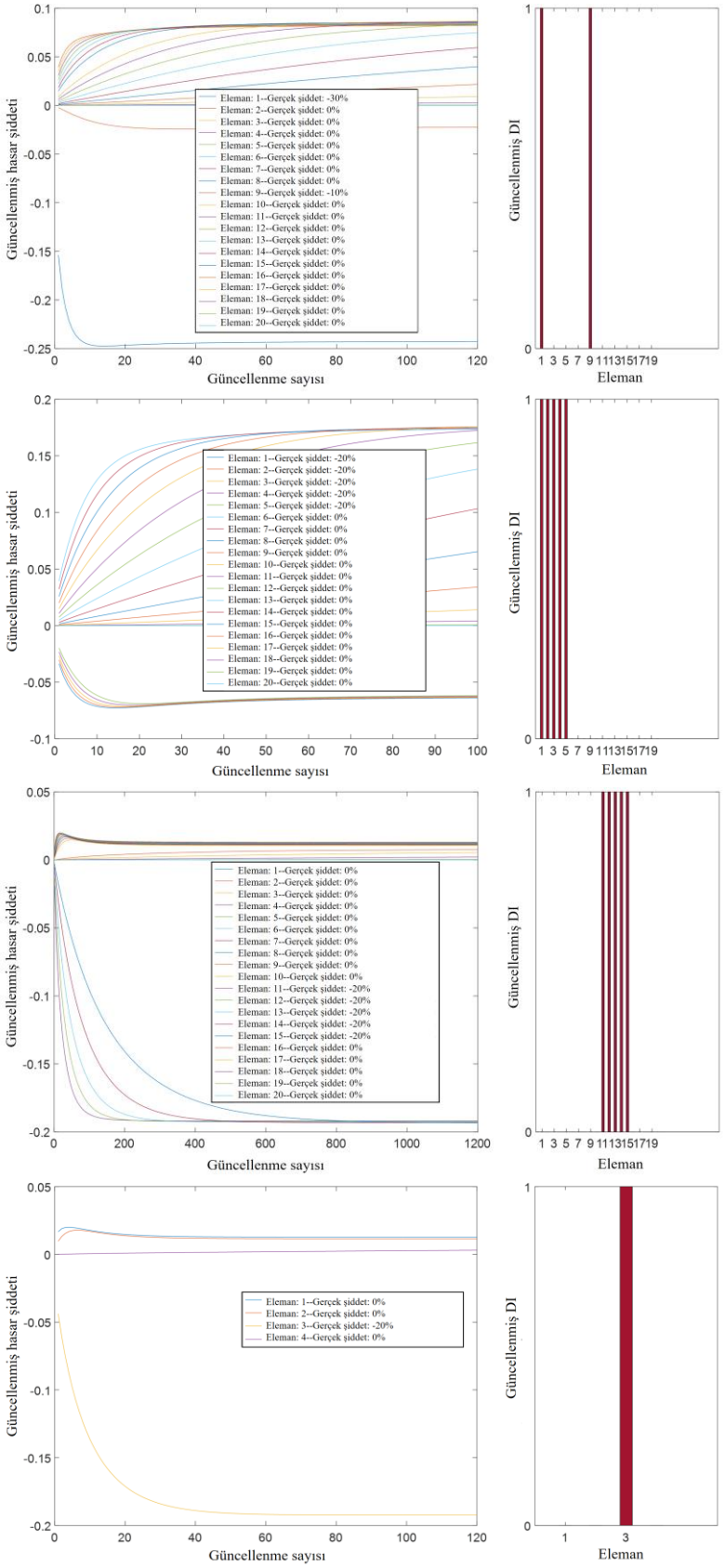
Yukarıda ifade edilmeye çalışılan tüm bu karşılaştırmalardan, tek ve çoklu hasar vakaları için hasar tanımlama sonuçları sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, ve Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Çizelge 4.1'den, yalnızca mod 1 kullanılarak elde edilen sonuçlar kararlı bir şekilde belirlenirken hesaplamaya daha yüksek modlar eklenmesinin bazı hatalara neden olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 4.2'den, DI C'nin en son önerilen ve diğer indekslerdeki hataları ortadan kaldırmak maksadıyla geliştirilen bir yaklaşım olmasına karşın, çoğunlukla çoklu hasar vakalarının hasar şiddetini tahmin ederken hataya neden olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan DI A istikrarlı bir eğilim sergilemezken DI B her zaman sunucu tahmininde, hasar oranlarını olduğundan daha düşük şekilde de olsa diğerlerine nazaran daha gerçekçi sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, DI

B bazen Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'da görüldüğü gibi hasar endeksi 2 kriterinden daha düşük olan hasar göstergesinin elde edilmesine neden olmaktadır. DI B'ye göre bu çalışmada geliştirilen NL güncelleme prosedürü hasar tespiti için önemli ölçüde bir iyileşme sağlamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Senaryo M2b için güncellenmiş sonuçlar. **A**) Mevcut prosedür **B**) NL güncelleme prosedürü

DI NL'ye göre güncelleme işleminden sonra bir yakınsamaya ulaşıldığında yaklaşım önemli oranda bütün yöntem eksikliklerini ortadan kaldırmaktadır. Bu yaklaşımda elemanlar iki gruba ayrılır. Bunlardan ilki hasarsız elemanlar, diğeri ise hasarlı elemanlardır. Bu şekilde elde edilen sonuçlar Şekil 4.5 b'de verilmektedir.



Şekil 4.6. DI NL için güncelleme prosedürü

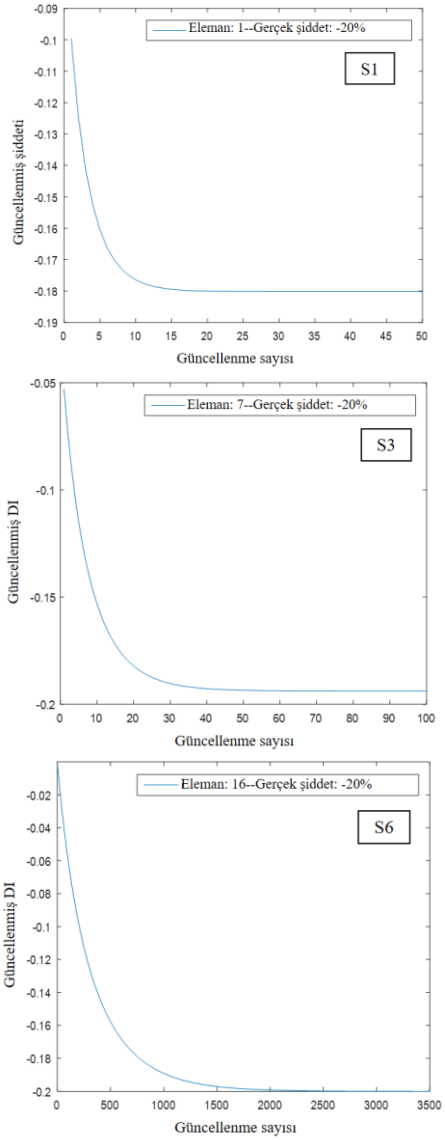
Önerilen hasar indeks yaklaşımında en önemli başarı, hasarlı elemanların hasar yüzdelerinin gerçeğe oldukça yakın bir şekilde bu yolla tahmin edilebilmesidir. Önerilen bu prosedür ile diğer senaryolar için gerçekleştirilmiş çözümlere ait sonuçlar Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu örneklerde de görüldüğü gibi prosedürün diğer yaklaşımlara göre daha iyi sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.4, Şekil 4.7, ve Şekil 4.8, şiddet güncellemesi ile ilgili NL güncelleme prosedürünün performansını göstermektedir. Tek hasar için Şekil 4.6'da gösterildiği gibi % 10'dan daha az bir hata ile başarılı bir şekilde sonuca ulaşabildiği görülmektedir. Daha düşük konumlardaki noktalar için hata daha belirgin hale gelirken, yüksek konumlar için daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak bu durumda yöntemde daha fazla yineleme gerektirir. Bununla birlikte, bu çalışmadaki tüm vakaların hesaplanması açısından işlem zamanı sadece birkaç saniyelerle ifade edilebilir.

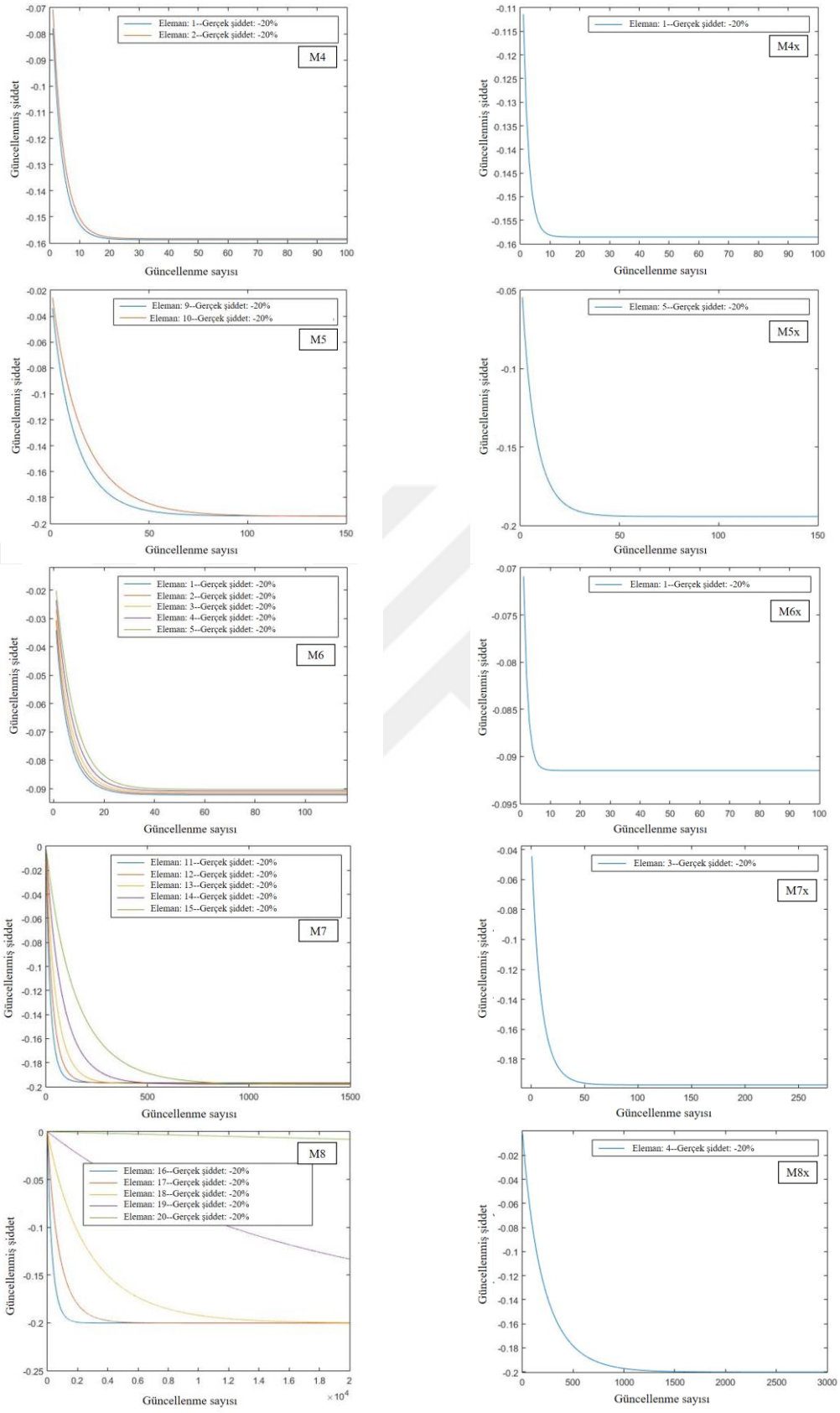
Çizelge 4.4. Güncelleme prosedürünün sonuçları

Scenaryo	Hasarlı eleman	Gerçek şiddet, α	İlk tahmini şiddet, α_p	Güncelleme prosedürü		
				Son tahmini şiddet, α_u	Fark $\frac{\alpha_u - \alpha_p}{\alpha_u} 100$	n gerekli entegrasyonlar
S1	1	-0,2	-0,06	-0,180	-10,00	20
S2	4	-0,2	-0,05	-0,188	-6,15	25
S3	7	-0,2	-0,03	-0,194	-3,25	50
S4	9	-0,2	-0,02	-0,195	-2,45	60
S5	12	-0,2	-0,01	-0,199	-0,75	200
S6	16	-0,2	0,00	-0,200	-0,05	2500
S1a	1	-0,1	-0,03	-0,090	-9,92	20
S1b	1	-0,3	-0,10	-0,270	-10,10	20
S4a	9	-0,1	-0,01	-0,098	-2,00	75
S4b	9	-0,3	-0,33	-0,295	-1,83	80
M1a	1	-0,3	-0,10	-0,267	-11,00	20
	9	-0,1	0,00	-0,054	-45,75	100
M1b	1	-0,2	-0,06	-0,175	-12,50	50
	9	-0,2	-0,01	-0,174	-13,25	100
M1c	1	-0,1	-0,02	-0,081	-19,00	50
	9	-0,3	-0,03	-0,286	-4,83	100
M2a	4	-0,3	-0,08	-0,279	-7,17	30
	8	-0,1	0,00	-0,072	-27,80	55
M2b	4	-0,2	-0,04	-0,182	-9,25	35
	8	-0,2	-0,02	-0,182	-9,15	60
M2c	4	-0,1	-0,01	-0,083	-16,80	55
	8	-0,3	-0,04	-0,287	-4,20	75
M3a	4	-0,3	-0,08	-0,281	-6,23	40
	16	-0,1	0,00	-0,075	-25,44	2500
M3b	4	-0,2	-0,05	-0,187	-6,35	30
	16	-0,2	0,00	-0,186	-6,95	1950
M3c	4	-0,1	-0,02	-0,093	-6,74	40
	16	-0,3	0,00	-0,295	-1,73	2500

Scenaryo	Hasarlı eleman	Gerçek şiddet, α	İlk tahmini şiddet, α_p	Güncelleme prosedürü		
				Son tahmini şiddet, α_u	Fark $\frac{\alpha_u - \alpha_p}{\alpha_u} 100$	n gerekli entegrasyonlar
M4	1	-0,2	-0,05	-0,159	-20,65	30
	2		-0,04	-0,158	-20,80	30
M4x	1	-0,2	-0,07	-0,159	-20,70	20
M5	9	-0,2	-0,02	-0,194	-2,95	100
	10		-0,01	-0,194	-2,90	120
M5x	5	-0,2	-0,03	-0,194	-2,85	70
M6	1	-0,2	-0,02	-0,092	-53,93	40
	2		-0,02	-0,091	-54,63	40
	3		-0,01	-0,091	-54,37	40
	4		-0,01	-0,091	-54,64	40
	5		-0,01	-0,090	-55,00	40
M6x	1	-0,2	-0,05	-0,091	-54,26	12
M7	11	-0,2	-0,01	-0,196	-1,80	200
	12		-0,01	-0,197	-1,55	300
	13		0,00	-0,197	-1,45	350
	14		0,00	-0,1975	-1,25	600
	15		0,00	-0,1976	-1,20	1000
M7x	3	-0,2	-0,02	-0,197	-1,40	100
M8	16	-0,2	0,00	-0,200	0,00	2500
	17		0,00	-0,200	0,00	6000
	18		0,00	-0,200	-0,25	18000
	19		0,00	✗		
	20		✗	✗		
M8x	4	-0,2	0,00	-0,200	0,00	1760



Şekil 4.7. Tek hasar için NL prosedüründe yakınsama sorunu

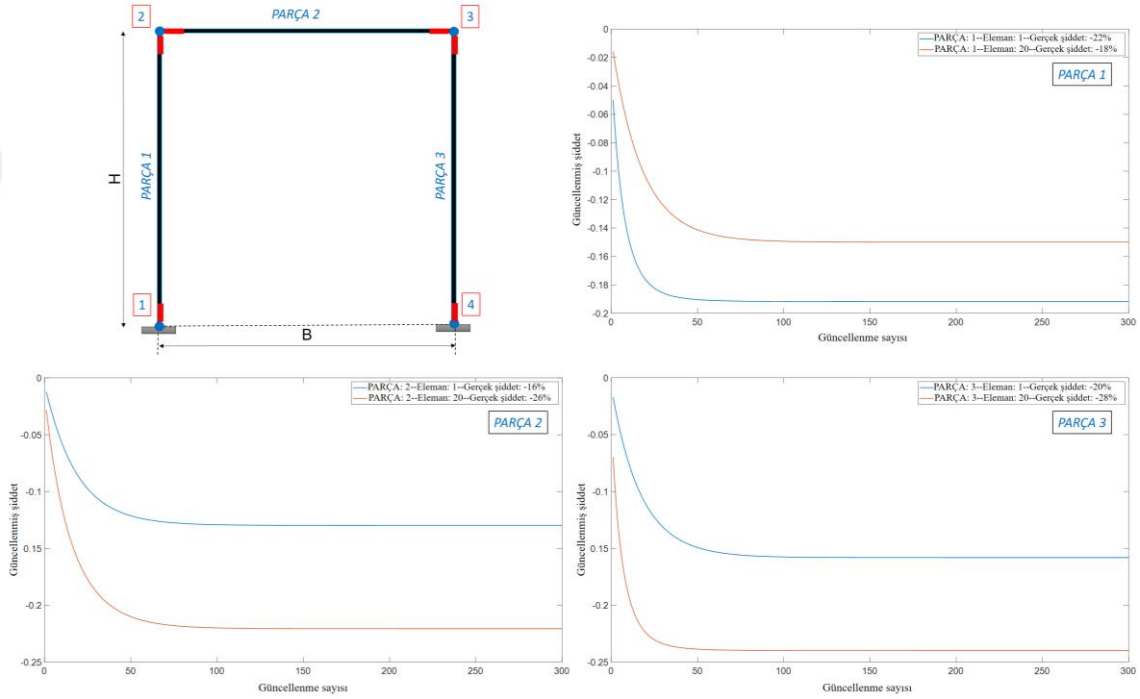


Şekil 4.8. NL prosedüründe yakınsama sorunu

DI NL prosedürü için hesaplama süresi, her bir hasar senaryosu için farklı süreler almaktadır. En düşük düzeyde hasar konumlandırması durumunda, Senaryo M6'daki beş elemanın tümü için 40'ıncı döngünde yakınsama sağlanırken, Senaryo M6x'ta karşılık gelen tek bir öğenin güncelleme işlemi daha hızlı bir hesaplama ile 12'nci döngüde sonuçlanmaktadır. Hasar daha yüksek elemanlarda olduğunda daha değişik sonuçlar da elde edilebilmektedir. Hasarlı bir gruptaki her bir eleman için yakınsamaya ulaşmak için farklı sayıda yineleme gerekir. Daha yüksek döngüler, Senaryo M7'de eleman 11 için 200 döngü ile, eleman 15 için ise 1 000 döngü ile sonuca daha gerçekçi bir şekilde ulaşmak mümkün olabilmektedir. M8 senaryosunda, hasarın 16'dan 20'ye kadar daha yüksek elemanlarda bulunduğu durumlarda ise tüm bunlardan daha fazla sayıda döngüye ihtiyaç duyulmaktadır. Gruptaki en düşük elemanın parametresi 2500'dür ve bunu bir sonraki eleman için 6 000 takip eder ve eleman 18 için üç katı daha külfetli bir hesaplama ile bu sayı 18 000'e yükselir. M8 senaryosu için diğer elemanlarda hasarın olması durumunda söz konusu döngü sayısının daha da yüksek gerçekleşeceği de bilinmektedir (bkz. Çizelge 4.4). Bu nedenle, geri kalan iki eleman için elde edilmeyen güncellenme sayısına rağmen, Senaryo M8 için Şekil 7'de gösterilen performans nedeniyle hasarların muhtemelen tahmin edilebildiği anlaşılmaktadır. Öte yandan, sırasıyla tek bir eleman hasarını ifade eden M8x, M7x ve M6x gibi senaryolar düşünüldüğünde, sırasıyla 1 760, 100 ve 12 yinelemeyle doğru sonuçlara ulaşılabilir olduğu ve hesaplama süresinin ise oldukça makul olduğu anlaşılmaktadır. Güncelleme prosedürü için gereken tekrar sayısı DI B tarafından başlangıçta elde edilen sonucun gerçeğe yakınlığını oldukça bağlıdır. Daha yüksek başlangıç değeri, daha hızlı güncellenir. Bunun nedeni, önceki hesaplamada alınan sonuca göre mevcut hasar endeksinin güncellenmesidir. Bir öncekinin güncellenmiş sistem rijitlik matrisinin küçük olması ve öğenin güncellenmiş rijitlik matrisine katkısı küçük bir miktarda değişikliğe karşılık gelmektedir. Bu güncelleme prosedürünün yavaş çalışmasını sağlar. Bu, Çizelge 4.4'te kanıtlanmıştır. Genel olarak, bu sonuçlar daha düşük hasar şiddetinin, daha az sayıda yineleme kullanılarak, ancak daha belirgin bir fark ile güncellendiği sonucuna işaret etmektedir. Diğer taraftan gerçek hasar sonucuna daha yakın bir sonuçla çözüme başalanması durumunda ise sonucu elde etmek için daha fazla tekrarlama gerektiği yapılan çözümlemelerden anlaşılmaktadır.

DI NL prosedürünün geçerliliğini kanıtlamak açısından, portal çerçeveler üzerinde de denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde tek katlı-tek açıklıklı ve üç katlı-iki açıklıklı

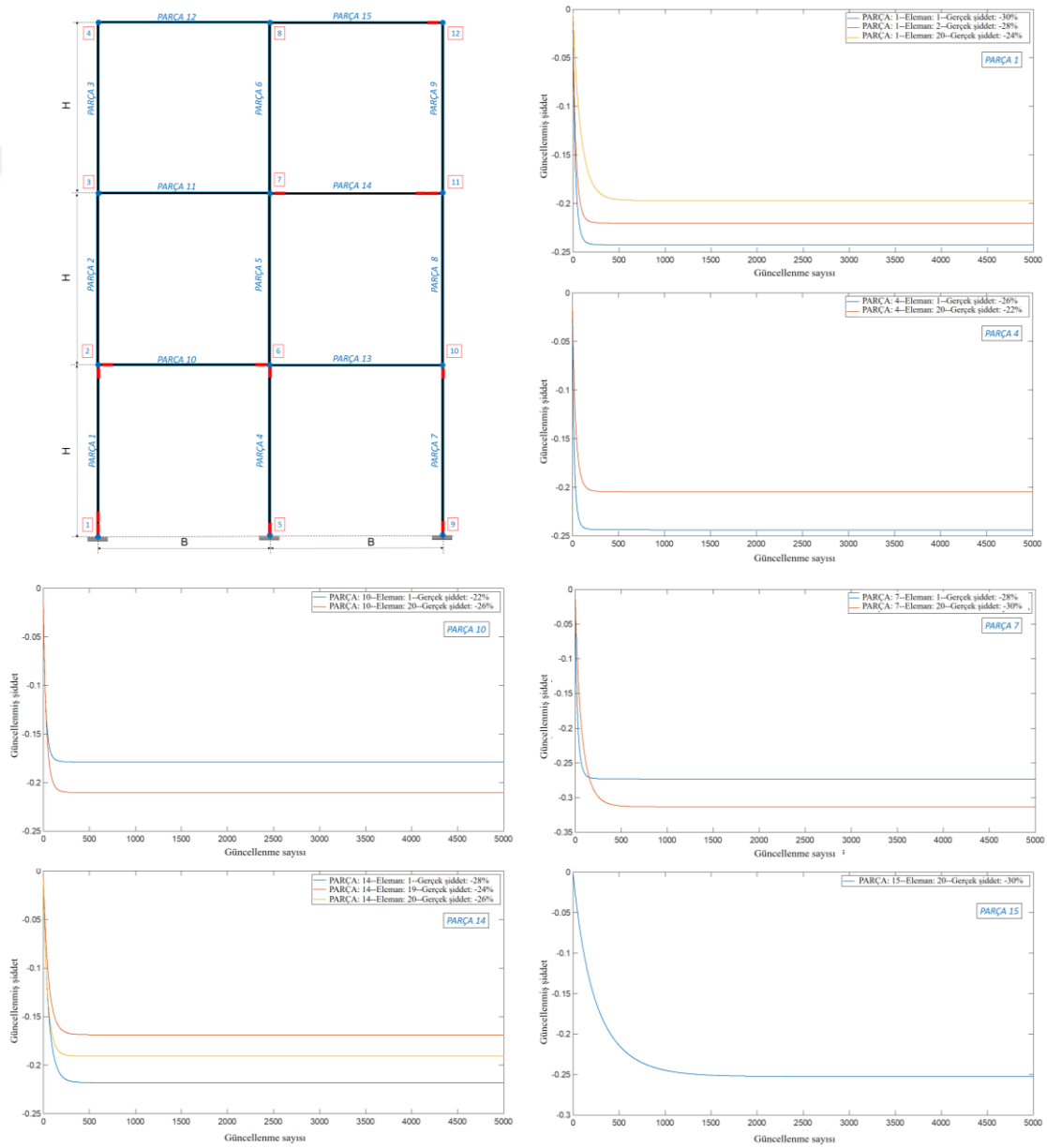
portal çerçeve örnek olarak seçilmiştir. Her katın yüksekliği (H) ve açıklığı (B) 375 mm olarak belirlenmiştir. Enkesit boyutları ve malzeme özellikleri daha önce ifade edildiği gibidir. Her bileşenin elemanlarının sırası, düşük düğüm sayısından başlar ve yüksek düğümde bitecek şekilde numaralandırılmaktadır. Her bileşen 20 aralığa bölünmüştür. Her bir bileşenin üzerindeki kırmızı parçalar, hasarlı öğeleri temsil eder. Bu çözümlemelerde yalnızca birinci mod dikkate alınır. Çerçeveler için hasarlı elemanların hasar şiddeti Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Tek katlı portal çerçeve için hasar indeksi güncellemesi

Şekil 4.9 ve 4.10'da, güncelleme tekniğinin çerçeveler üzerinde iyi çalıştığını göstermektedir. Çerçevelerin karmaşıklığının yanı sıra hasar senaryolarından bağımsız olarak güncelleme prosedürünün güvenilir sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, hasarlı elemanların hasar şiddeti etkin bir şekilde güncellenir ve gerçek değere yaklaşır. Ancak, izlenen çerçevelerin karmaşıklığı işlem zamanı açısından zorluklara neden olabilmektedir. Özellikle tek katlı çerçevedeki tüm bileşenler için yakınsamanın yaklaşık 100 iterasyonda meydana gelmesi buna örnek gösterilebilir (Şekil 4.9). Öte yandan, 3 katlı çerçeve için bu değer yaklaşık 500 iterasyona ulaşmaktadır (Şekil 4.10). Ayrıca, güncelleme prosedürü sistemin üst kısımlarındaki elemanlar için daha fazla döngü gerektirmektedir. Örneğin, en üst düzeydeki bir kiriş 15'inci parçada bulunan

20’nci elemanda hasar şiddetinin güncellenmesi için yaklaşık 2000 yineleme gerektirmesi buna örnek verilebilir. Ek olarak, her PARÇA için, daha yüksek elemanlar da daha fazla döngü kullanılarak güncellendiği genellemesi rahatlıkla yapılabilir. 1’inci kattaki bir sütun olan PARÇA 1’in 20’inci elemanı, 1’inci ve 2’nci elemanlardan oldukça sonra güncellenir. Bu, PARÇA 7’de de görülmektedir. Genel olarak güncelleme işlemi, çerçevelerde hasarlı parçaların yerlerine ve parçalarda hasarlı elemanların yerlerine de bağlıdır.



Şekil 4.10. Üç katlı portal çerçevesi için hasar indeksi güncellemesi

4.2. 2D yapılar için hasar tespiti - NL2D-Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN)

Özdeğer probleminin ters çözümüne dayanan güncelleme prosedürü sayısal ve deneysel olarak burada doğrulanmaktadır. Hasar tespit prosedürünün sayısal bir incelemesi, tek ve çok katlı çerçevelerde uygulanırken, öte yandan, kütle tanıma tekniği deneysel olarak doğrulanarak sonuçları takip eden başlıklarda verilmektedir.

4.2.1. Kat düzeyinde tespiti - Basit hasar senaryoları için hasar tespiti prosedürü

Bu bölümde basit hasar senaryoları ele alınmaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi, bir kat hasar gördüğünde, varsayım olarak üzerindeki tüm elemanların rijitlik parametresi (E) de aynı oranda azalmaktadır. Bu bölümün amaçları, yapıların karmaşıklığını, özellikle açıklık ve kat sayısını artırarak önerilen tekniğe sınırlarını zorlayarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu bölümde hasar senaryoları basittir, bu nedenle sadece Prosedür A ile ifade edilen yaklaşım kullanılmaktadır.

Önerilen güncelleme prosedürünün sayısal doğrulaması, yapıların karmaşıklığının çözülmesi ile elde edilmektedir. Sayısal doğrulama işlemi MATLAB® da yazılan kod adlı *NL2D_INVSOL_ANN.mat* (Nguyen ve Livaoğlu, 2020) ile gerçekleştirilmektedir. Kat ve açıklıkların sayısının artmasıyla karmaşıklık arttığından yöntemin etkinliğinin irdelenmesi beş çerçeve üzerinde yapılan sayısal testlerle gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal araştırmada, tüm mekanik özellikler, kesit boyutları, her katın yüksekliği (H) ve her bir açıklığın (B) boyutu diğer örnekler ile aynı şekilde seçilmiştir. Sayısal doğrulama ile ilgili genel bilgiler Çizelge 4.5'te verilmektedir.

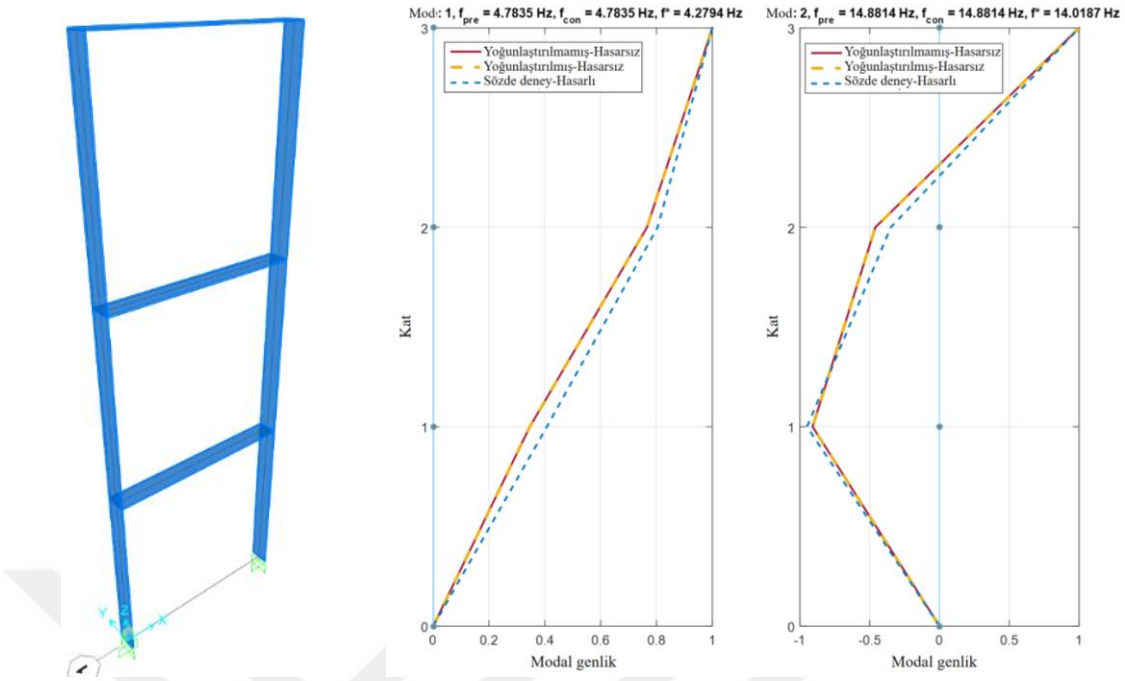
Çizelge 4.5. Çerçevelerle ilgili genel bilgiler

Çerçeve	Kat No.	Açıklık No.	Mod 1			Mod 2			DOF No.	Ana DOF'lerin yüzdesi (%)	Gerekli iterasyon
			f_{pre} (Hz)	f_{con} (Hz)	f^* (Hz)	f_{pre} (Hz)	f_{con} (Hz)	f^* (Hz)			
3S1B	3	1	4,784	4,784	4,279	14,881	14,881	14,019	18	16,7	20
20S1B	20	1	0,657	0,657	0,617	1,980	1,980	1,828	120	16,7	32
20S2B	20	2	0,668	0,668	0,627	2,010	2,010	1,854	180	11,1	25
20S4B	20	4	0,678	0,678	0,637	2,041	2,041	1,882	300	6,7	25
30S4B	30	4	0,451	0,451	0,427	1,355	1,355	1,280	450	6,7	25

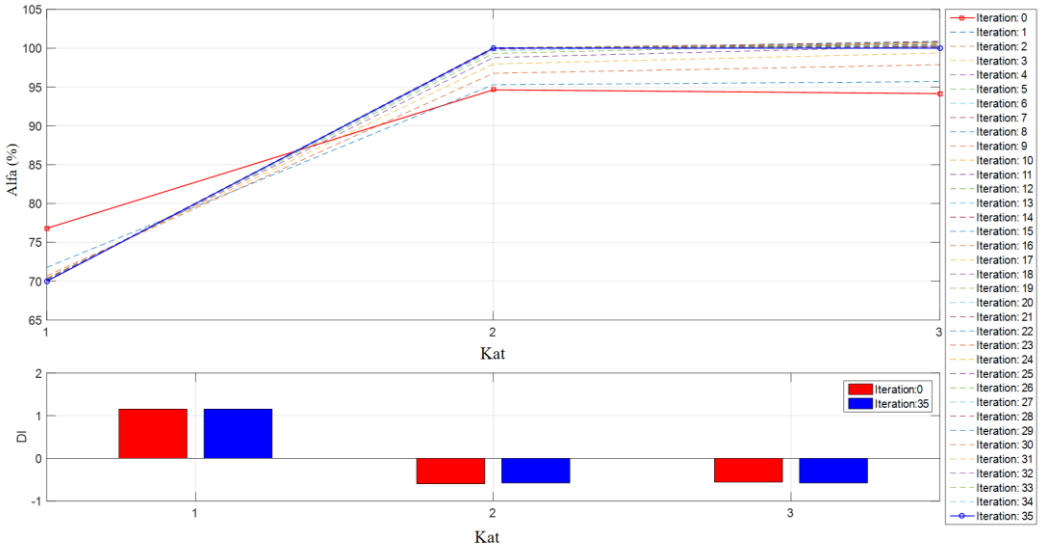
Sayısal örneklerin kat sayıları 3 ila 30 kat arasında değişmektedir. 20 katlı çerçevelerde,

açıklık sayısı 1 ila 4 arasında değişmektedir. Dikkate değer ilk nokta, yoğunlaştırma prosedüründen önce ve sonra elde edilen doğal frekansların, karmaşıklıktan bağımsız olarak tüm durumlar için kayda değer hiçbir değişim göstermemiş olmasıdır. Çizelgede listelendiği gibi, her çerçeve için, ana DOF sayısının yüzdesi, toplam DOF sayısına kıyasla oldukça küçüktür. Bu değer 3S1B için yalnızca % 16,7 ve 30S4B için ise sadece % 6,7 olarak gerçekleşmektedir. Bu, yoğunlaştırma prosedürünün kullanımının hesap zamanı açısında önemli ölçüde değerli bir parametre olduğu açıktır Elde edilen performanslar, uygulamadan oldukça az sayıda ivmeölçer kullanılarak enstrümanda edilen ağlarının yeterli olduğunu ve indirgenmiş matrislerin potansiyel olarak bunu temsil edebileceğini göstermektedir.

Güncelleme prosedürü kullanımıyla, tüm katlar için α değerinin yaklaşık 20 iterasyondan sonra yakınsamanın meydana gelmesi nedeniyle tüm değerler başarıyla güncellenmekte ve senaryoda hedeflenen hasar miktarı ve konumu tespit edilebilmektedir. S1 için gerçek α değeri, ilk tahminde % 77'den 10'uncu iterasyonda % 70'lik gerçek değerini alırken, öte yandan, 18'inci döngüde diğer tüm katlar için senaryo hedeflerine yüksek doğrulukla ulaşılabilmektedir. Bunun yanı sıra, Şekil 4.11-4.12'den, ilk kata ait senaryo sonucunun en hızlı şekilde elde edilebildiği görülmektedir. Yalnızca 10 döngüden sonra, α'nın değeri % 70'e sıçraması, diğerleri ile karşılaştırıldığında oldukça hızlı bir şekilde sonuca ulaştığına işaret etmektedir. Dikkat çeken bir diğer nokta da güncelleme prosedürü sırasında, en yüksek kat olan S3 için α değerleri bazen sınırlar dışında gerçekleşirken (hatta % 100 değerini aştığı iterasyon sonuçlarına ulaşılırken) S1 ve S2 için tahmin edilen tüm değerlerin birinci ve son iterasyonda eşik değerler arasında kalmasıdır.



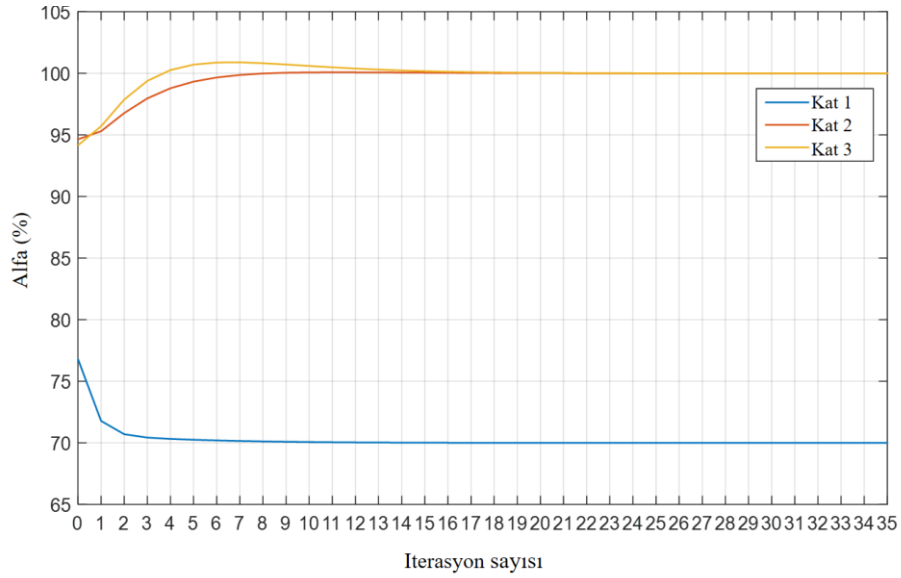
Şekil 4.11. Model 3S1B, birinci ve ikinci modları



Şekil 4.12. Model 3S1B için iterasyon tabanlı DI

Şekil 4.11-4.13'te, 3 katlı çerçeve üzerinde hasar tespiti için sonuçları göstermektedir. Yakınsama, indirgenmiş matrislerin son terimlerinin etkili bir şekilde güncellendiğini göstermektedir. İlk hesaplamadaki küçük hatalar, diğer DOF'lerin katkısının yukarıda varsayıldığı gibi önemsiz olduğuna işaret etmektedir. İlk sayısal doğrulamadan, hızla elde edilen ilk sonuçların hasar lokalizasyonu kabul edilebilir doğrulukta verebileceği göstermiştir. Bundan sonra, sözde hasar senaryosu, güncelleme prosedürüne dayalı olarak

doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Burada belirtmek gerekir ki önerilen yöntemin bu basit örnekten ziyade daha karmaşık örnekler için denenmesi gerekliliği açıktır.



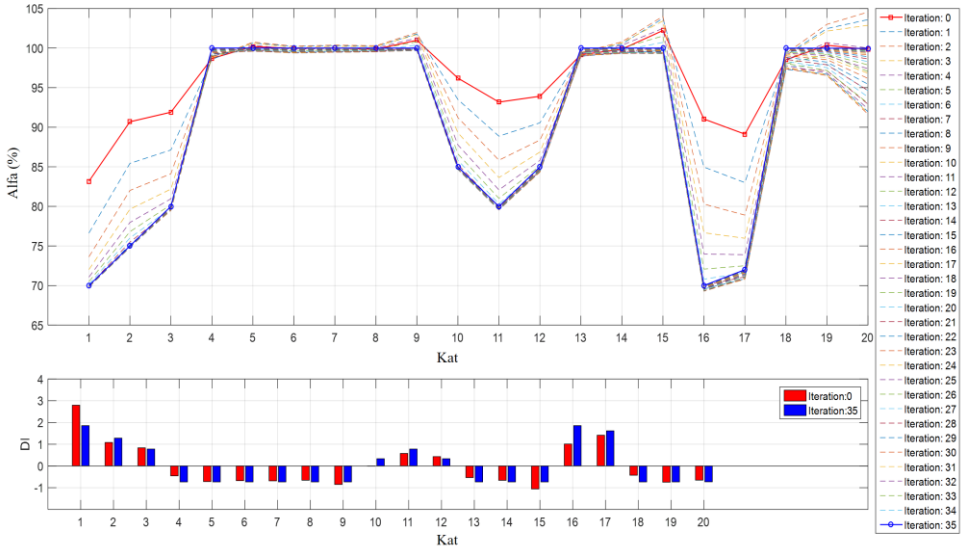
Şekil 4.13. Model 3S1B için güncelleme prosedürü

Yukarıda verilen örnekten farklı olarak kat sayısı 20 ve 30'a yükseltilmiş, açıklık sayısı ise 4'e çıkartılarak prosedürün bu tür örnekler üzerinde nasıl sonuçlar vereceği yine aynı mantıkla araştırılmıştır. Tüm sayısal örnekler karmaşık hasar senaryolarına göre tasarlanarak önceki örneğin performansına benzer şekilde, önerilen yönteme dayalı doğru hasar tespitinin elde edilebildiği Şekil (4.14-4.16)'de gösterilmektedir.

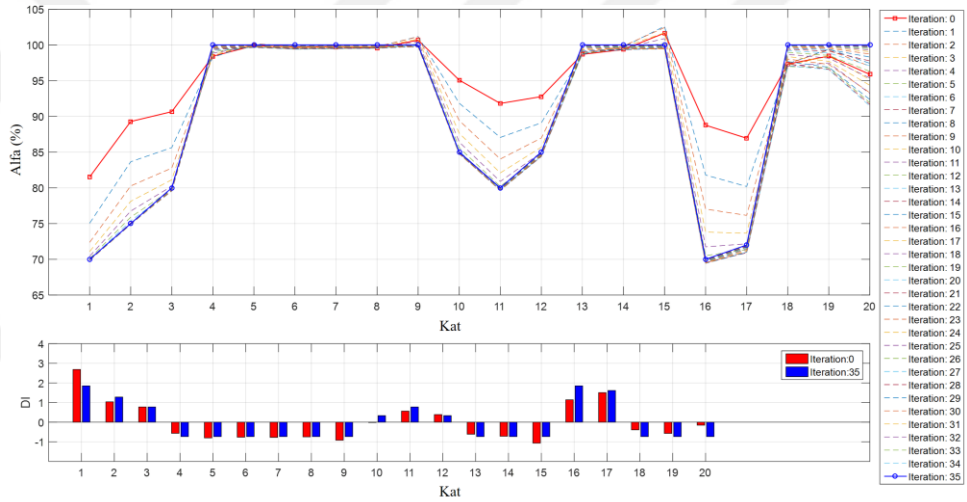
Şekillerden de anlaşılabileceği üzere, kat sayısını ve açıklık sayısını artırıldığı bu örneklere ait sonuçlardan yüksek ve çok açıklı sistemlerde de prosedürün hasarı doğru tahmin edebildiği görülmektedir. Sonuçların en belirgin çıkarımlarından biri, tüm sözde hasar konfigürasyonlarının karmaşıklığından bağımsız olarak yaklaşık 30 iterasyon içinde kesin olarak senaryo değerlerinin tahmin edilebilmesidir. Diğer taraftan bir diğer bulgu ise yakınsamaların hasarlı katlar için hasarsız katlar ile karşılaştırıldığında daha hızlı gerçekleşmesidir. Bu, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da açıkça görülebilir. Özellikle, hasarlı zemin katlar için α değerleri, 20'nci iterasyondan önce gerçek değerlerini alırken, hasarız kat parametrelerinin yakınsaması için daha fazla iterasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Burada 20 katlı çerçeveler için sadece bir hasar kategorisi uygulanmaktadır. Şekil 4.14 a ve Şekil 4.14 b'deki gibi hasar tanımlamasında önemli bir

fark yoktur. Hasar lokalizasyonu açısından, genel olarak birinci ve 35'inci tahmin birbiriyle aynı kabul edilebilir. Bu, yakınsamanın gerçekleşmesini beklemeden muhtemelen erken bir anda elde edilen bir hasar lokalizasyonu ile hasara karar verilebilir. İlk tahminde yanlış bir gösterge olmamasına karşın S10'da DI değerinin 0 olması yaklaşık % 50 güvene işaret etmektedir. Yine çalışma sonuçlarından görülebileceği gibi DI'ler, artan iterasyon sayısı ile azalma eğilimindedirler. Bu durum hasarın olduğu S1 seviyesi dışında her seviye için bu şekilde gerçekleşmektedir.

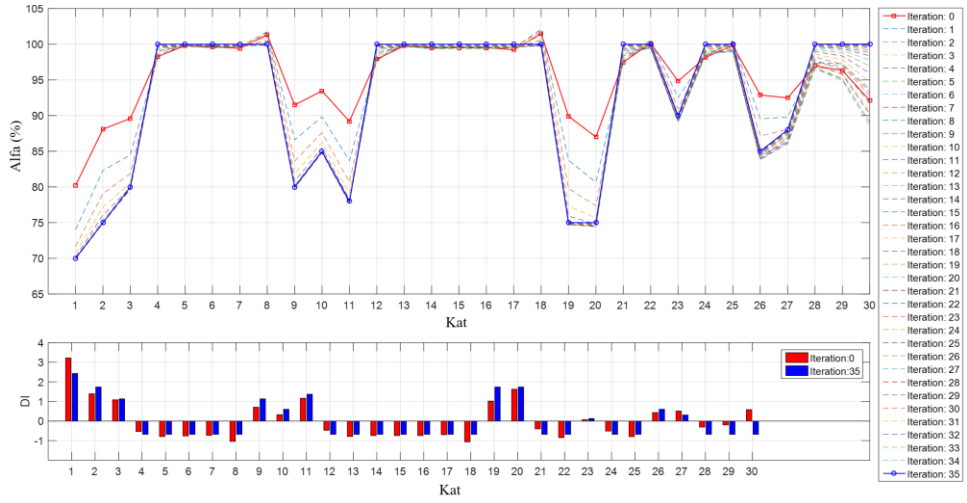
20 katlı çerçeveler arasındaki benzer performansa rağmen, açıklık sayısının etkisinden kaynaklanan bazı farklılıklardan bahsetmek mümkündür. En dikkat çekici tutarsızlık en yüksek iki katta, 20S1B'nin S19 ve S20 seviyelerinde meydana gelmektedir. Bu iki seviyede % 100 değerinde dikkate değer bir sapma var. Öte yandan, her iki kat için ilk tahmin, gerçek değerle yaklaşık olarak aynıdır. Daha karmaşık bir çerçeve olan 20S2B'nin muadilleri, öncelikle gerçek senaryo beklentilerinde daha düşük sonuç vermelerine karşın güncelleme işleminden sonra sapma ortadan kalkmakta, ancak özellikle S20 için dalgalanma diğer hasarsız katlardan daha yüksek gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra, karmaşıklık arttıkça, en büyük hasarsız katlar için ilk tahmin % 100'ün altında tahmin edilebilmektedir. Sonuç olarak, bu kararsızlık, karmaşıklık arttıkça daha önemli hale gelebilir ve daha sonra, istatistik nedeniyle hızlı hasar göstergesi için olası hatalara neden olabilir.



A

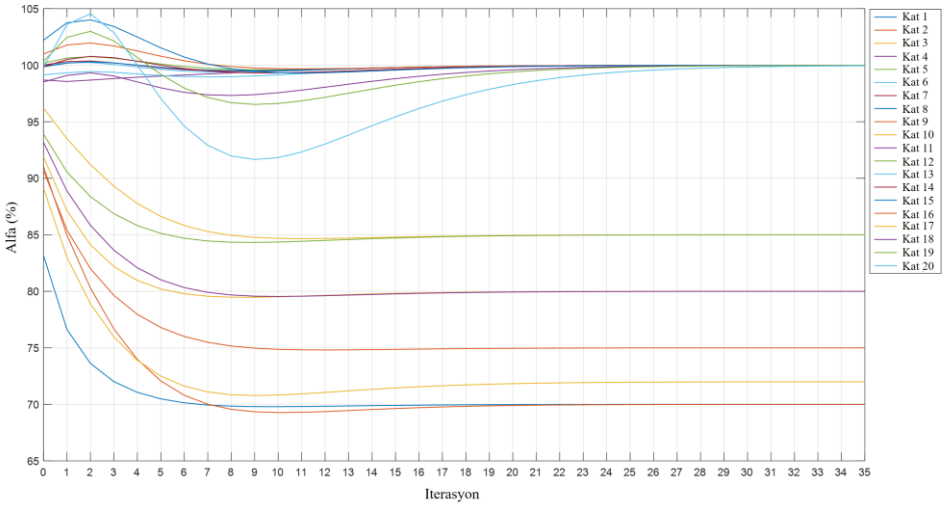


B



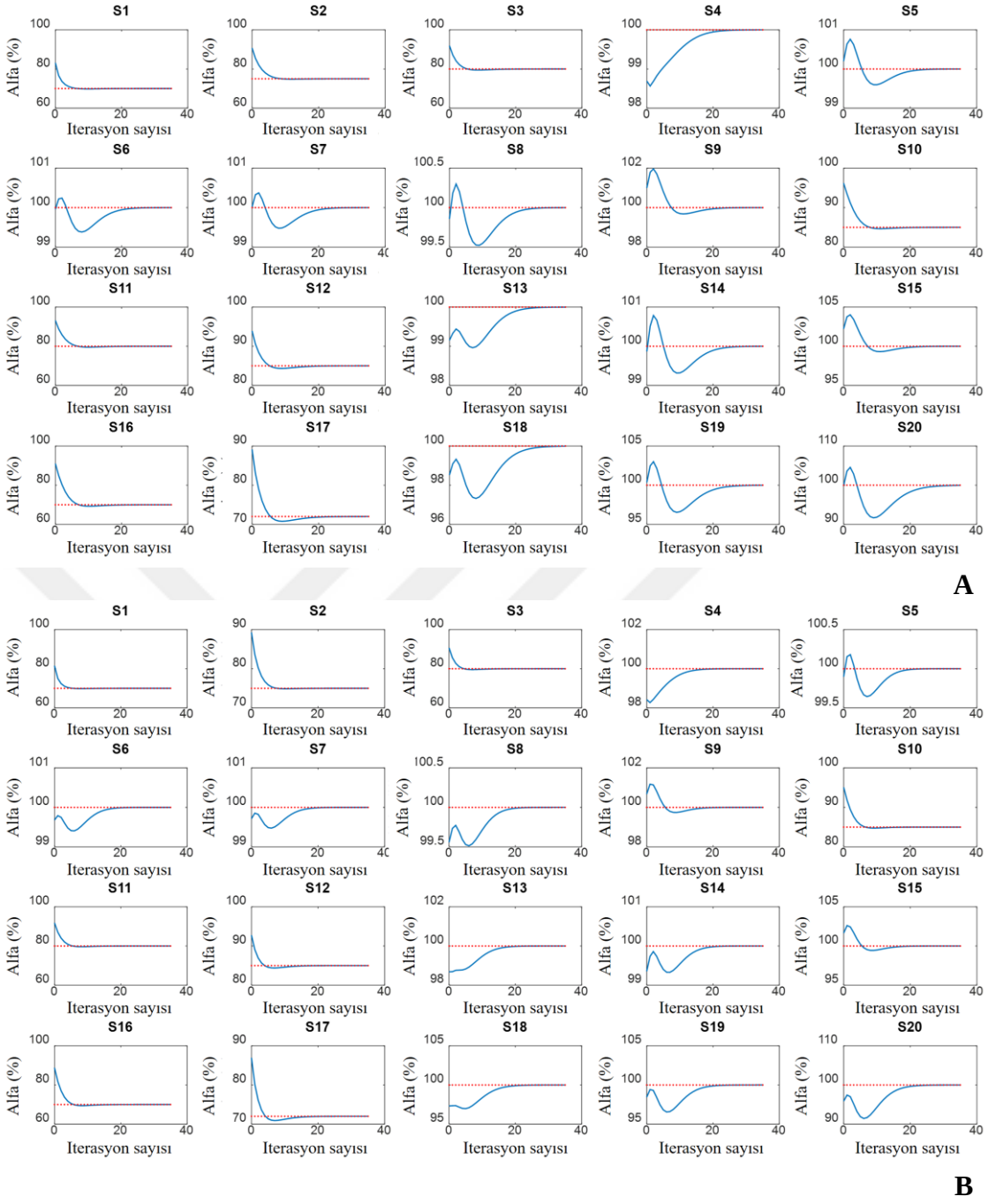
C

Şekil 4.14. Güncelleme prosedürü. **A**) 20S1B **B**) 20S2B **C**) 30S4B

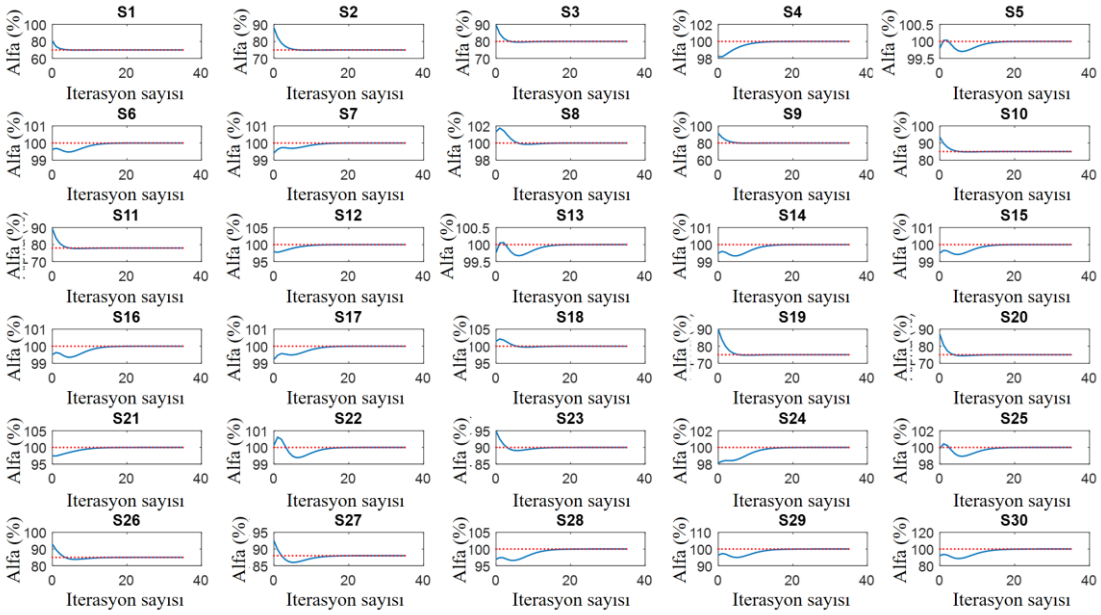


Şekil 4.15. 20S1B için güncelleme prosedürü

Benzer şekilde, yukarıda ifade edilmeye çalışılan hata olasılığı, DOF sayısı 450 olan ve % 6,7'lik düşük bir ana DOF oranı ile modellenen 30S4B'de için gerçekleşmektedir. İlk yaklaşım, Şekil 4.14 c'de görüldüğü gibi en üst kat için hatalı hasar göstergesi vermektedir. Uygulamada, en üst katta meydana gelen hasara oldukça nadiren rastlanmasına karşın, ilk tahmin en üst katlardaki hasar tahminlerden oluşuyorsa, hızlı hasar lokalizasyonu karmaşıklık arttıkça hatalı sonuçlar üretebilir. Bu nedenle, en üst katların ilk verileri, DI'leri hesaplamak için kullanılan vektörlerde içerilmeyebilir. Hasar göstergesinin sonuçları sadece 15, 18, 21, 24 ve 27 kat ve 30 kat üzerinde dikkate alınırsa, Şekil 4.17'da gösterildiği gibi hala kabul edilebilir doğrulukta tahminler üretmektedir. DI'lerin değeri, dikkate alınan kat sayısına bağlı olarak değişebilmesine rağmen, hasarlı ve hasarsız katlar, % 50'den daha yüksek bir güvenle ayırt edilebilir.

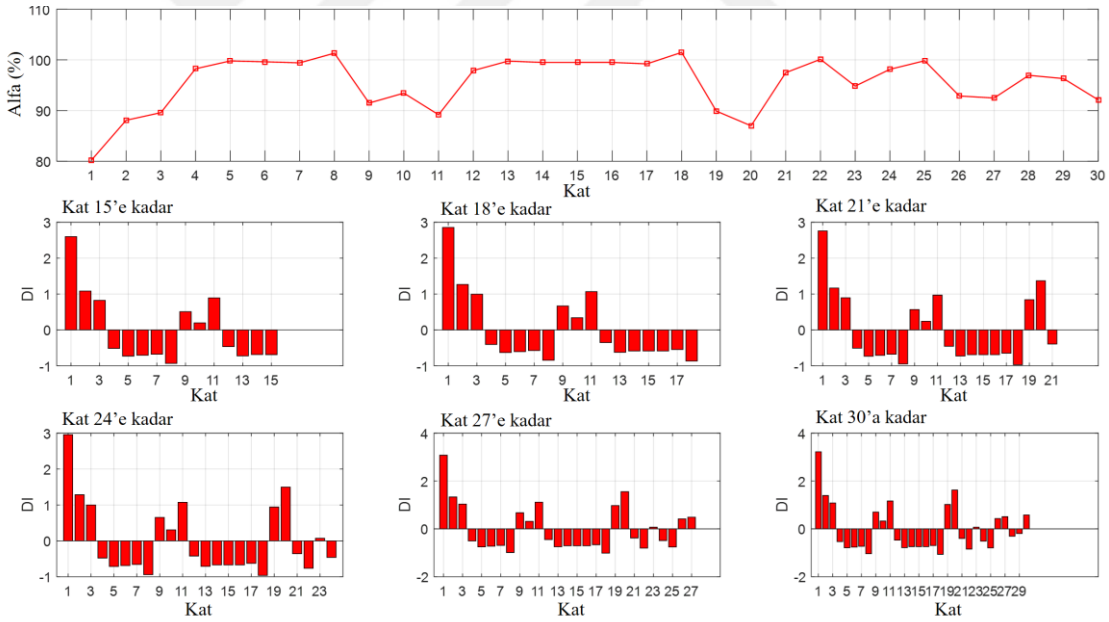


Şekil 4.16. Güncelleme prosedürü. **A**) 20S1B **B**) 20S2B **C**) 30S4B



C

Şekil 4.16. Güncelleme prosedürü. **A**) 20S1B **B**) 20S2B **C**) 30S4B (devam)



Şekil 4.17. 30S4B için Hızlı hasar tespiti

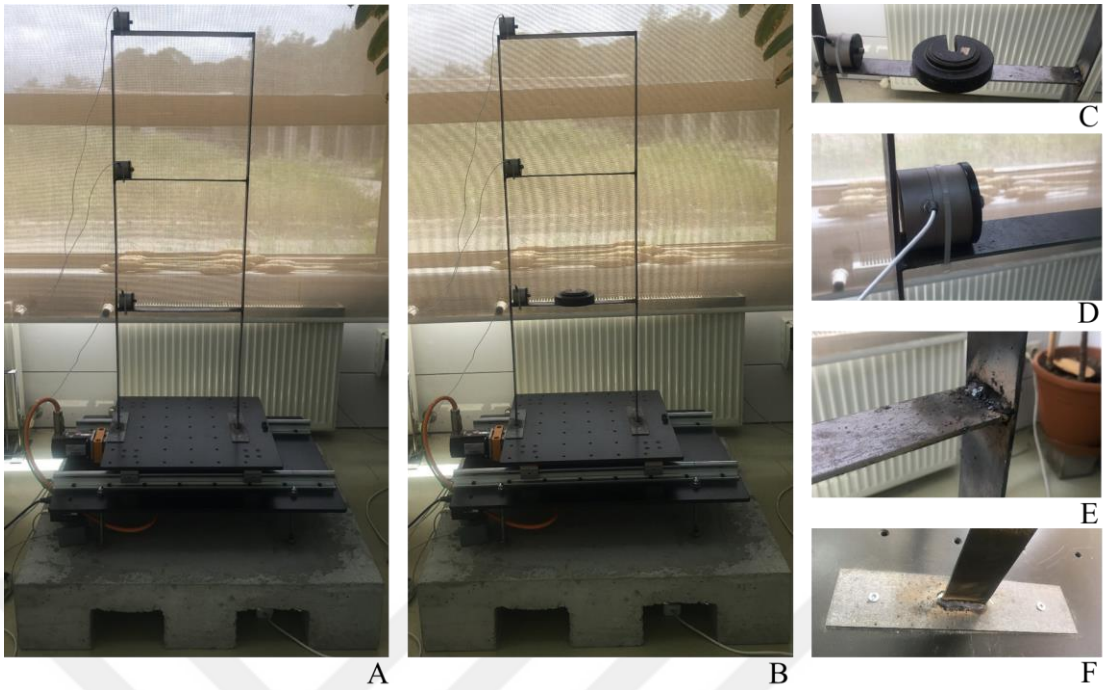
Güncelleme prosedürü, yapıların karmaşıklığından bağımsız olarak iyi derecede tahminler üretmekte ve oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Hızlı hasar tespiti, kat seviyesinde hasar tespitlerini kabul edilebilir düzeyde doğrulukla vermektedir. Bir sonraki araştırma, hasarların yalnızca bir katın bazı elemanlarında lokalize olduğu hasar senaryolarını kullanarak öz değer problem tabanlı güncelleme prosedürünün gücünü

arttırmaktadır. Bunun yanında bu şekilde gerçekleştirilecek kat seviyesi hasar tahminlerinde asimetrik hasar senaryoları da dikkate alınabilmektedir.

4.2.2. Kat düzeyinde tespiti - Kütle tanıma tekniği için deneysel bir doğrulama

Daha önce de ifade edildiği gibi, kütle tanıma tekniği deneysel olarak da test edilmiştir. Bu bağlamda araştırmaya konu edilen çerçeve, Şekil 4.18 a'da görüldüğü gibi her kata bağlanmış üç ivmeölçerle enstrümanda edilmiştir. Söz konusu çerçeve referans çerçeve (RF) olarak isimlendirilmektedir. Çerçeve 6 kolon ve 3 kirişten oluşmaktadır. Young modülü (E) 210 GPa ve kütle yoğunluğu (ρ) 7850 kg/m^3 olan çelik lamalar ile modellenen bu deney düzeneğinde çubuk kesit boyutları 40x3 mm^2 olan bir dikdörtgen olarak seçilmiştir. Her katın eşit yüksekliği (H) ve açıklığın genişliği (B) 375 mm'dir. Kalınlık, 40 mm lik genişliğe kıyasla sadece 3 mm olarak seçilmiştir. Bunun nedeni, rotasyonel DOF'lerin rijitlik matrisine katkısının, Guyan statik yoğuşma prosedürünün yaklaşımı nedeniyle önerilen yöntemin etkinliğini daha iyi bir şekilde araştırabilmektir. Yoğunlaştırılmış DOF'lerin indirgenmiş matrislere ne kadar dikkate değer katkısı olursa, o düzeyde fazla hataya neden olunabileceği açıktır. Testte üretim teknikleri nedeniyle olası hataları önlemek için üç ayrı kısa kolon (375 mm) birleştirmek yerine uzunluğu 1125 mm olan iki uzun çubuk hazırlanmış ve kirişler belirlenen yükseklikler için bu elemanlara kaynaklanmıştır. Bu bağlamda çerçeve, kaynak tekniği ile beş ayrı eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Kolon-kiriş ve kolon-taban bağlantıları sırasıyla Şekil 4.18 e ve Şekil 4.18 f' den görülebilir. Boyutları 50x210x3 mm^3 olan taban da mekanik özellikleri açısından yukarıda verilen benzer özelliklere sahip elemanlar kullanılmıştır. Taban, Şekil 4.18 f'deki gibi tamamen sabit sınır koşulları beklentisiyle sarsma tablasının üstüne cıvatalarla sabitlenmiştir.

Bundan sonra, kütlenin bilinmeyen konfigürasyonunu belirleyebilmek için, Şekil 4.18 b'de gösterildiği gibi çerçevenin ilk katına bir kütle bağlanır. Çalışmada kütlenin eklendiği çerçeve AF olarak isimlendirilmektedir. Testin amacı, kütleye bağlanılan katın yerini tespit etmek ve ardından iki durum, RF ve AF arasındaki ilk moddaki farklılığa dayanarak kütlenin ağırlığını tahmin etmektir.



Şekil 4.18. Test kurulumu. **A**) RF **B**) AF **C**) Kütle ekleme **D**) Acc **E**) Kiriş-kolon birleşimi **F**) Kolon-taban birleşimi

Kütle tanıma tekniği, yukarıda verilen yaklaşım ile sayısal olarak incelenmiştir. 3 katlı tek açıklıklı çerçeve üzerinde söz konusu yöntem gerek sayısal gerekse deneysel olarak doğrulanmıştır. İlk durumda, çerçeve Şekil 4.18'de anlatıldığı gibi her kata bağlanmış üç ivmeölçerle test edilmiştir. Bu çalışmada 3 katlı tek açıklıklı çerçeve üzerinde sadece bir deneysel test sonuçları sunulmuştur. Numune küçük olduğundan, bazı iş adımları numunenin mekanik özelliklerinde öngörülemeyen değişikliklere yol açabilmektedir. Bu, örnekte potansiyel değişikliklere neden olabilir ve tahmin edilemez. Sonuç olarak, her bir bileşenin malzemesinin mekanik özellikleri, özellikle ısınmadan etkilenen kolon-kiriş ve kolon-taban bağlantılarında orijinaliyle aynı olmayabileceği mekanik özelliklerde değişimlerin olduğu göz önünde tutulmalıdır. Bu potansiyel sorunlar fark edildiğinden tüm testler yalnızca bir çerçeve üzerinde gerçekleştirilmiştir. Referans durumundan farklı olarak (RF) çerçeve daha sonra katlara kütleler eklenerek diğer çerçeveler elde edilmiştir. Bir kütle eklendikçe, çerçevenin doğal titreşim özelliklerinin tamamen aynı olmayacağı, ancak rijitliğin bozulmasına benzer etkiler nedeniyle söz konusu karşılaştırmaların yapılabileceği açıktır. Çözüm, pratik koşullar için daha uygundur, çünkü yalnızca bir çerçeve test edildiğinden, diğer aşamalarla karşılaştırıldığında ilk koşul veya referans durum sağlanabilir. Genel olarak, sorun artık hasar tespitinden ziyade kütle eklenen katı

belirleyen ve kütlenin ağırlığını elde eden kütlesel tanıma yaklaşımını gerçekleştirmekten ibarettir. Ancak dinamik karakteristiklerde ve mod şekillerindeki değişimin rijitlik kaynaklı olarak ortaya çıkması ile kütle kaynaklı ortaya çıkması açısından temel manada bir farklılık yoktur.

Bu deneyde, Şekil 4.18 c'de görüldüğü gibi çerçevenin ilk katına 2 kg'lık bir kütle eklenmiştir. Kütle, ilk katın % 30 oranında hasar gördüğü sanal bir testten alınan bir ön hesaplamayla belirlenen doğal titreşim özelliklerinden elde edilmiştir. Bu bağlamda sayısal olarak elde edilen baskın frekans ve mod şekline dayalı olarak, aynı davranışa neden olacak kütlenin ağırlığını yaklaşık olarak bulmak için bir ters hesaplama yapılmıştır. Sonuç olarak 2,33 kg'lık bir kütle ile bunun modellenme şansı olduğu görülmüştür. Bu deney için hasarın derecesini tahmin etmekte önemli bir parametre söz konusu kütlenin tahmini deneye konu edilmektedir.

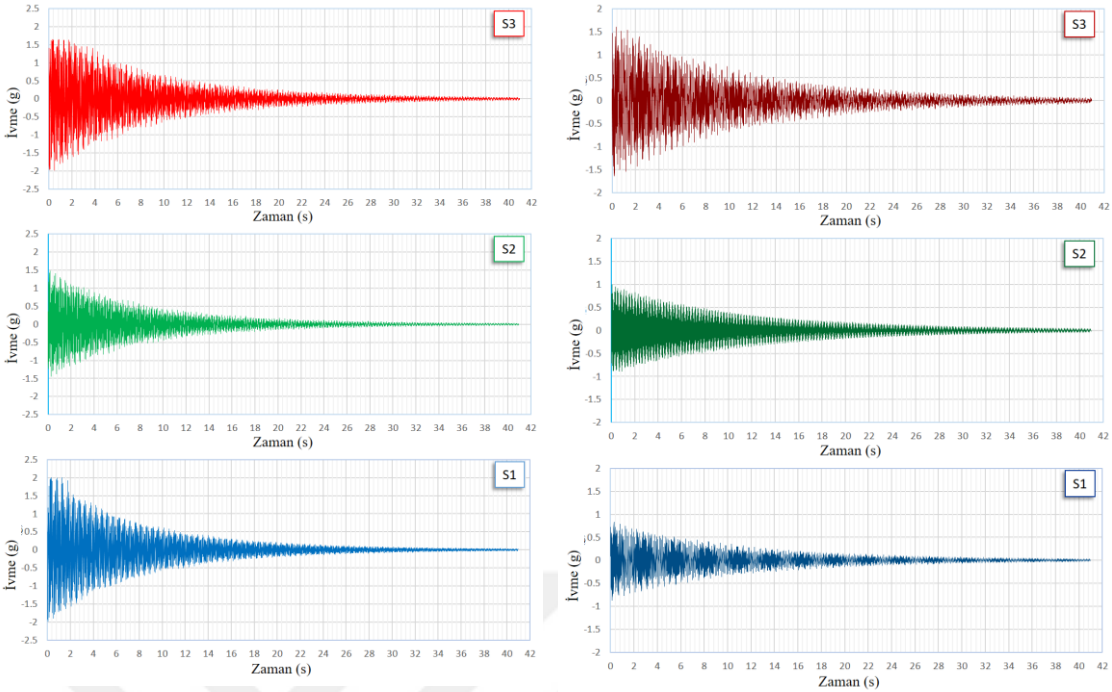
Doğrulamada, RF ve AF'nin yalnızca temel frekans ve mod şekli önemlidir. RF mod verileri, rijitliği ve kütle matrisini elde etmek için sayısal modeli güncellemek için kullanılır. Daha sonra AF'nin doğal özellikleri de ölçülerek deneysel modal analiz (EMA), Şekil 4.18'deki her katta kirişe yerleştirilen üç ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeölçer türü, 20 Hz ve 22^{o}C'de referans hassasiyetle KB 12VD'dir. Her ivmeölçerin kütlesi 0,15 kg'dır. Şekil 4.18 d'deki gibi sisteme her bir kirişin bitiş düğümünün yanına sabit bir şekilde bağlanmaktadırlar. İvmeölçerler tarafından ivme biçiminde toplanan sinyal, üç kablo boyunca USB-powered Quattro analizör platformuna dayalı olarak dijitalleştirilmiştir.

Bir ön sayısal modal analiz (NMA) ile sonuçların elde edilmesi ve EMA sonuçlarının değerlendirilmesi çözümün gerçekçi bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için büyük öneme sahiptir. Sözde testler yoluyla, yapının frekanslarının ilk tahmini, hayati ipuçları verir. RF'nin sayısal sonuçları için, en düşük üç frekans 4,441 Hz, 14,585 Hz, ve 26,076 Hz iken, ardışık olan modlar 51,793 Hz'ye kadardır. Bu, EMA'da odaklanılması gereken frekans aralığını belirlemek için önemli ipuçlarına işaret eder. Mevcut ekipman türlerinden elde edilebilecek doğruluk nedeniyle, ilk üç mod bu testte parametre olarak dikkate alınmaktadır. Ek olarak, problemi daha basit hale getirmek ve ardından kütle tanıma tekniğini uygulayabilmek için bazı varsayımların etkisini değerlendirmek

maksadıyla sayısal modellemeden yararlanılabilir. Öncelikle, Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, ivmeölçerlerin konumu tam olarak kirişlerin bitiş noktasında değildir. Bununla birlikte, bir kiriş üzerindeki tüm düğümlerdeki yanal yer değiştirmenin, eksenindeki yüksek rijitik nedeniyle birbirine yaklaşık olarak özdeş olduğu varsayılmaktadır. İkinci olarak, 2 kg'lık kütle eklenmesi, dairesel şekilli bir çelik eleman ile gerçekleştirilmektedir. Bu eleman yaklaşık 123 mm uzunluğunda kiriş yüzeyiyle etkileşime girer. Her kirişte çizgisel bir kütle olarak düşünülmelidir. Bununla birlikte, hasar tanıma tekniği, toplanmış kütle için düşünülmüş bir teknik olduğundan varsayımı değerlendirmek için parametrik bir araştırma gerekliliği açıktır.

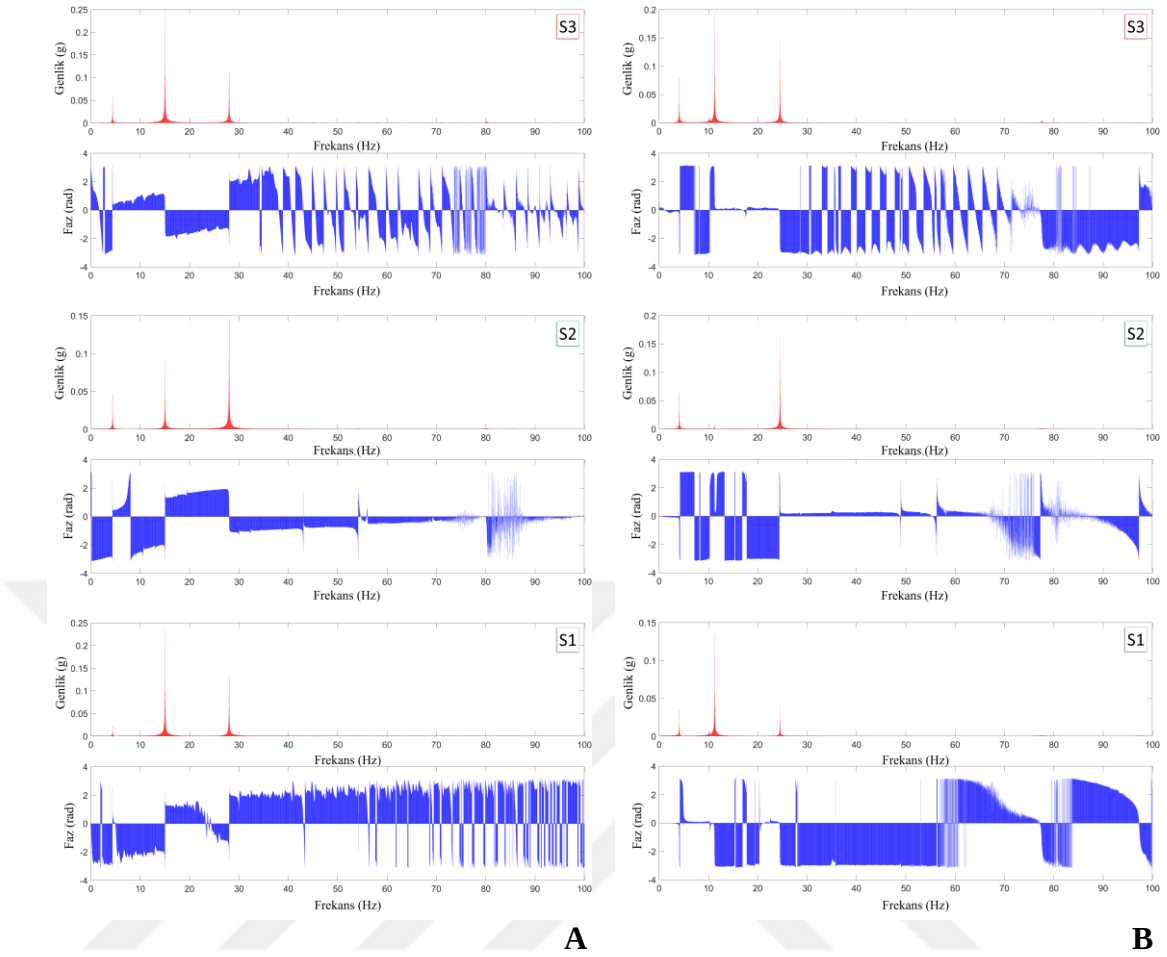
Şekil 4.18 b'de görüldüğü gibi, bir çizgisel kütleye (AF_line_mass) sahip bir çerçeve gerçek koşullar altında simüle edilirken, bir diğeri, yani AF_lumped_mass, basitçe toplanmış kütle varsayımı kullanılarak modellenmiştir. Dolu parçanın uzunluğu nedeniyle, her bir yapısal elemanın 12 bölüme (31,25 mm uzunluk) bölündüğü kabul edilmiştir. AF_lumped_mass'nin birinci katı için, kirişin merkez noktasında 2 kg'lık toplanmış bir kütle dikkate alınmaktadır. Sonuç olarak, iki kütle tanımı durumu arasında kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Diğer taraftan doğal titreşim frekansları incelendiğinde de aralarında kayda değer bir farklılık olmadığı görülmektedir. Örneğin AF_lumped_mass için 4,1286 Hz, AF_line_mass için 4,1282 Hz olarak 1'inci doğal titreşim frekansı elde edilmiştir. Söz konusu bu değerlere karşılık gelen mod şekillerinin karşılaştırılmasından mod şekillerinin üst üste düştüğü görülmektedir. Tüm bu gerekçeler ışığında sayısal araştırma boyunca, toplanmış kütle prosedürünün kullanılabileceği sonucuna varılmaktadır.

Çerçeve, sarsma masası kullanılarak farklı yüklemeler etkisinde test edilmiştir. Yukarıdaki sistemi sarsmak için dikdörtgen şekilli şoklar uygulanmıştır. Sonuç olarak, Şekil 4.19'de gösterildiği gibi üç kata bağlanılmış üç ivmeölçere karşılık gelen veriler işlenmiştir. Her durum için S1, S2, ve S3'ün sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü katlarda sinyal ölçümünü temsil ettiği söz konusu grafiklerde toplanan verilerin türü yerçekimi ivmesi ile normalize edilmiştir.



Şekil 4.19. Zaman tanım alanında işlenmemiş ham veriler. **A)** RF **B)** AF

Sinyal verileri FFT kullanılarak analiz edilmiştir. Prosedür, Cooley ve Tukey'e (1965) göre FFT prosedürünün yardımıyla MATLAB® kullanılarak kodlanmıştır. Çalışma kapsamında yazılan kod adlı *FFT_KT.mat* (Nguyen ve Livaoğlu, 2020) kullanılmaktadır. FFT'nin ürünleri, genellikle rezonans frekansları ve karşılık gelen fazlar hakkında bilgi veren Bode grafikleri olarak alınır (Şekil 4.20). Alternatif sonuçlar, gerçek kısım ve sanal kısımdır ve frekans bağımlıdırlar. Her sinyal için modal analiz teorisine göre, rezonansta, gerçek kısım nötr eksenle kesişirken, sanal kısım pozitif veya negatif olabilen bir tepe değer alır. Sanal kısmın genliği, Bode grafiklerinde görülen büyüklük ile orantılıdır. Sanal ve frekans grafiklerinin zirveleri, yapının yüksekliği ile birlikte tüm veriler sayısallaştırıldığında mod şekilleri hakkında bilgi verir. Her bir sinyalin sanal kısmı sadece büyüklüklerini değil, aynı zamanda sinyalin rezonans frekanslarındaki fazlarını da içerir. Bu çalışmada, her bir katın tüm sanal kısmı ve frekansı belirlendiğinden, her bir rezonans için mod şekli, özellikle de temel mod hızlı bir şekilde elde edilmektedir.



Şekil 4.20. Bode grafikler. **A**) RF **B**) AF

SignalCalc 900 Series Dynamic Signal Analyzer yazılımı tarafından işlenen Şekil 4.19'deki sinyal verileri, RF ve AF'nin temel mod şeklini elde etmek için kullanılmaktadır. Zaman alanında, kat seviyesindeki tepkiler, 40,955 saniyelik bir pencere boyutu (T) ile 0.005 saniyeye eşit olan her zaman aralığından (t) ölçülmüştür. Bu, FFT'de 8 192 örneklik bir blok boyutu (N) ve saniyede 200 örnek örnekleme hızına (FS) işaret etmektedir. Örnekleme oranı, faz frekansı, mod 1'den yaklaşık 50 kat daha hızlıdır. Sonuç olarak, frekans alanında, bant genişliği veya maksimum frekans (F_{max}), Şekil 4.20'da görüldüğü gibi ilk frekansın 24 katına eşit ve yaklaşık 100 Hz'dir. Spektral çizgilerinin (SL) sayısı, 0,0244 Hz frekans çözünürlüğü (Δf) ise 4 096'dır. Sonuç olarak, FRF'den alınan Bode grafikleri bu şekilde elde edilmiştir. Buradaki en önemli gözlem, şekilde elde edilen ilk iki frekansın SignalCalc 900 Series Dynamic Signal Analyzer yazılımı kullanılarak belirlenenlerle tamamen aynı olmasıdır. Bu, mod şeklini bulmak için uygulanan kod için güçlü bir onaydır. Belirlenen temel mod ayrıntılı olarak Çizelge

4.6'de verilmektedir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen mod şekilleri Şekil 24 a'da gösterilmektedir.

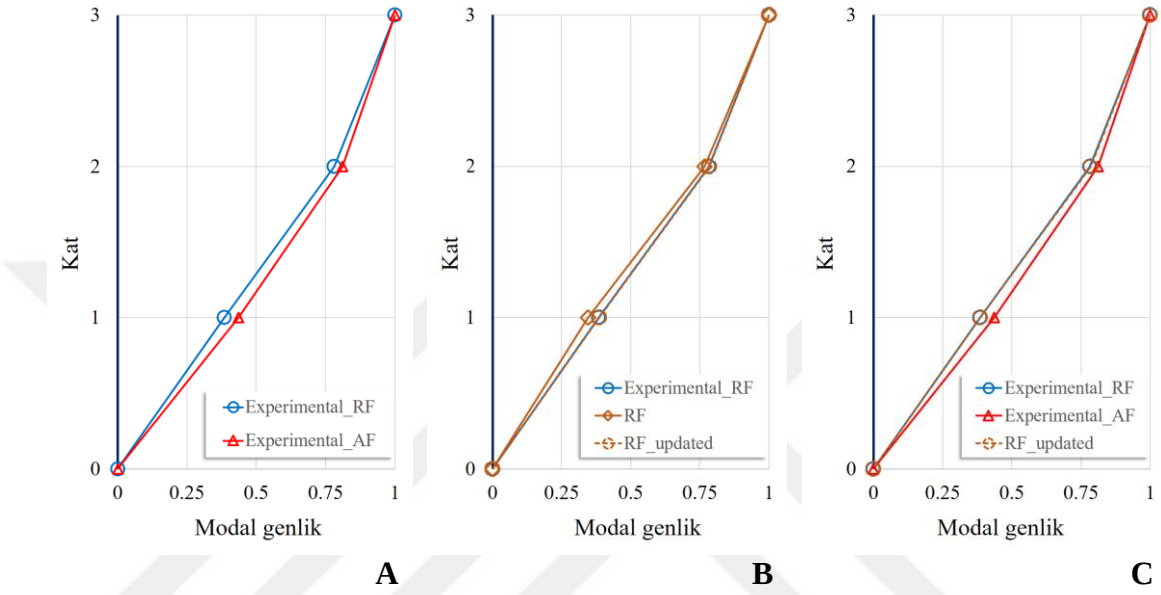
Çizelge 4.6. Modal modları

Mod 1 / Çerçeve		Deneysel		Sayısal	
		RF	AF	RF	RF_updated
Frekans (Hz)		4,419	4,102	4,441	4,419
Mod şekli	S3	1	1	1	1
	S2	0,782	0,812	0,766	0,785
	S1	0,385	0,436	0,346	0,386

Çizelge 4.6'de görüldüğü gibi, RF için sayısal olarak belirlenen ilk frekans 4,441 Hz, deneysel karşılığı olan 4,419 Hz'dir. Literatürde verilen mekanik özellikler ile elde edilen sayısal model ile deneysel model arasında farklılıkların olması normaldir. Söz konusu farklılıklar Çizelge 4.6'den görülebilir. Bu, sayısal sistemin mekanik özelliklerinin gerçek sistemle tamamen aynı olmadığı dolayısıyla parametrik bir çalışmayla sayısal modelin kalibre edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Söz konusu parametrik çalışma için kullanılabilecek parametreler her bir elemanın rjitlik ve kütlesini kontrol eden Young modülü (E) ve malzemenin yoğunluğu (ρ) olduğundan yapı sürecine ve üretim tekniğine bağlı olarak farklılıklar gösterebilecek bu değerler kalibrasyonda kullanılmıştır. İlk olarak, kiriş-kolon birleşim yerlerinde çelik malzemenin ısınmadan dolayı diğerlerinden daha rijit olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle onlar için Young modülü değerinin, diğer parçalara atanan E değerine kıyasla arttığı varsayılmıştır. İkinci olarak, tabanlar sarsma masasının üstüne sabit şekilde monte edilmiş olmalarına karşın sınır koşulları beklendiği gibi tam olarak sabitlenmemiş olabilmektedir. Sonuç olarak, tabanlara yakın elemanlar için elastik modülünün RF'deki ilk öngörüye göre kabul edilebileceği varsayılmaktadır. Bu varsayımlara dayanarak, RF_experiment'in deneysel karşılığı ile yaklaşık olarak aynı olan mod şeklini elde etmek için Şekil 4.22'de açıkça görüldüğü gibi her eleman için E'nin değeri parametrik çalışma için ayarlanmıştır. Bu bağlamda şekilde, aynı renge sahip elemanlara aynı E değeri atanmıştır. Bununla birlikte, frekans 4,419 Hz ile karşılaştırıldığında 4,391 Hz deneysel olandan daha düşüktür. Tüm yapının kütlesindeki hafif azalmanın muhtemelen frekansı artırdığı, buna karşılık gelen mod şeklinin yaklaşık olarak değişmeden kaldığı varsayılmıştır. Böylelikle tüm elemanların yoğunluğu kademeli olarak düşürülmüş ve parametrik bir çalışmayla, ρ

değeri 7681 kg/m^3 olarak ayarlanarak hedefe ulaşılmıştır. Sonuç olarak, RF_updated olarak adlandırılan güncellenmiş model, Şekil 4.21 b'de görüldüğü gibi deneysel olanla yaklaşık olarak aynı olan mod şeklini verir. Son olarak, referans durum RF'nin rijitliği ve kütle matrisi dahil olmak üzere mekanik özellikler güncellenerek kalibrasyon işlemi bitirilmiştir.

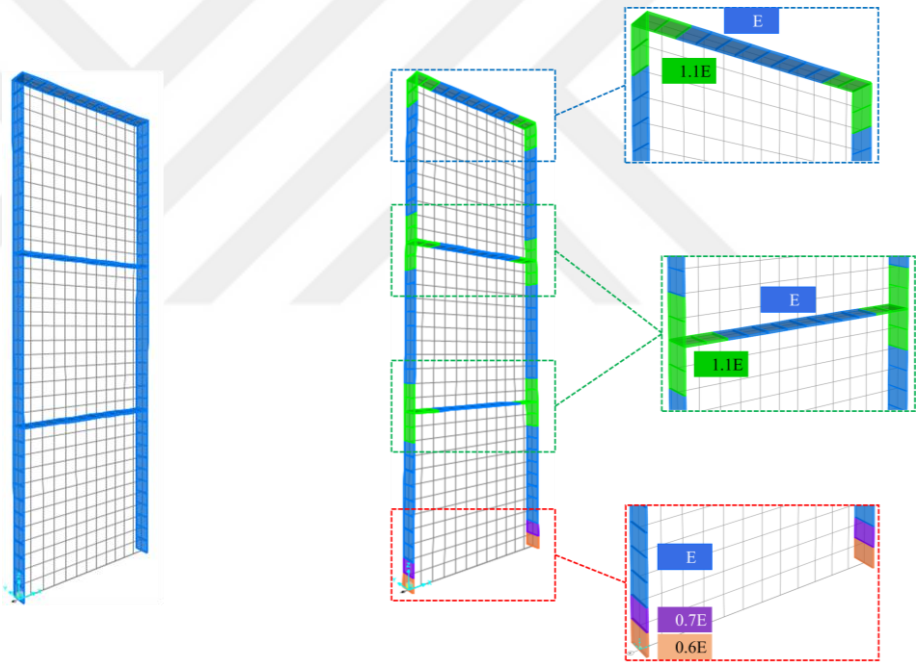


Şekil 4.21. Mod karşılaştırması. **A**) Deneysel **B**) Model güncelleme **C**) Deneysel ve sayısal

Referans durumun rijitlik ve kütle matrisleri ile yerinde ölçülen mod şekli kullanılarak deney düzeneğine ait matrisler belirlendikten sonra. İki temel mod arasındaki deneysel olarak elde edilen farklılıklar (Şekil 4.21 c) kütle tanıma yöntemi kullanarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, önerilen prosedür S1'de kütle eklemenin tespit edilmesi konusunda başarılı sonuçlar vermiştir. Kütlenin konumunu seviye olarak doğru tahmin edebilen bu yöntem, tespit edilen kütle için yaklaşık % 12'lik bir hata ile 2 kg'lık kütleyi 1,757 kg olarak tahmin edebilmiştir.

Birtakım olası nedenden dolayı burada yapılan deneysel doğrulamada olduğu gibi uygulamada da ağırlığın tahmininde hatalarla karşılaşılabilir. Bunlardan başlıca etmen olarak güncellenmiş model olan RF_updated'den elde edilen rijitlik ve kütle matrislerinin her durumda gerçekle bir miktar farklılarının muhtemel olması gösterilebilir. Uygulamada, sayısal model bir şekilde gerçek sisteme nazaran kalibre edilmeye çalışılmakla birlikte, ne denli çaba gösterilirse gösterilsin bunu teorik olarak yapabilmek

mümkün değildir. Diğer taraftan elle numune hazırlama sırasında, sayısal güncelleme sürecinde tam olarak tahmin edilemeyen bazı mekanik değişiklikler olabilir. Dahası, numunenin ölçeği küçük olduğundan, el işçiliğinin neden olduğu öngörülemeyen küçük bir hata muhtemelen gerçek matrislerde kayda değer bir sapmaya neden olacaktır. Güncelleme sürecinde, bu deneyde yapıldığı gibi yalnızca bir tahmin elde edilir. Ancak gerçek yapılar izlendiğinde, yapıların ölçeği büyüdükçe bu tür problemler azalabilir. Bir diğer hata kaynağı olarak veri ölçümünden gelecek belirsizlikler gösterilebilir. Özellikle, toplanan sinyalin gürültü ile kirlenmiş olması durumu bu etmenlerin başında gösterilebilir. Bu, ilk olarak model güncelleme prosedürü için kesin olmayan bir girdi verisine neden olurken. Bunun yanında, gürültü içeren veriler, öz değer problemin çözümünü de doğrudan etkiler.



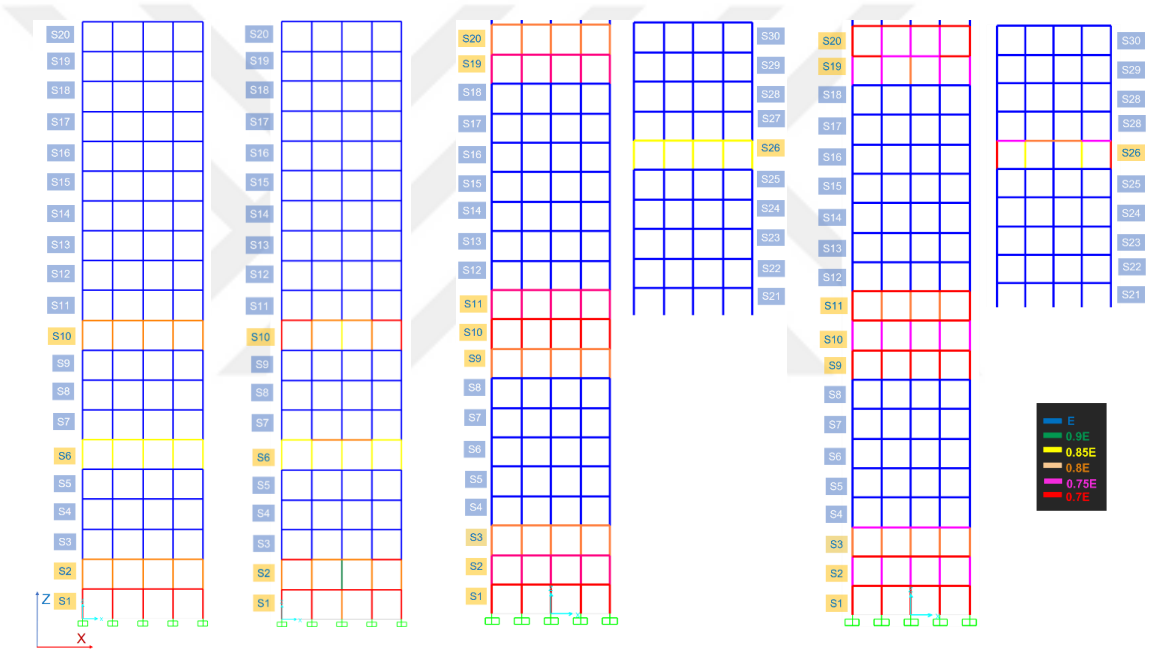
Şekil 4.22. Model güncelleme. **A**) RF **B**) RF_updated

Bu deneyde görülen hafif sapmaya rağmen, kütle tanıma prosedürünün deneysel araştırmada başarılı bir şekilde doğrulandığı görülmektedir. Genel olarak, % 12'lik eksik tahmin pratik koşullarda kabul edilebilir düzeydedir. Sahada veri ölçümü için daha doğru teknikler kullanılarak hatalar azaltılabilir. Aynı zamanda bu yolla modal veriler daha doğru ölçülebilir. Daha kesin olarak güncellenen modeller ve yerinde ölçülen modal veriler yöntemin uygulanabilirliği açısından en önemli parametrelerin başında

gelmektedir. Bu doğrulama, rijitlik ve kütle matrisleri gibi mekanik özelliklerdeki herhangi bir değişikliği tespit etmek için öz değer probleminin kullanıldığı yaklaşım için anlamlıdır.

4.2.3. Kat düzeyinde tespiti - Simetrik hasar senaryoları için hasar tespiti prosedürü

Bu bölümde, hasar senaryoları önceki bölümdekilerden daha karmaşıktır. Kat hasarında elemanların hasar şiddetlerinin birbirlerinden farklı olduğu durum modellenmeye çalışılmaktadır. Söz konusu durum, önerilen yöntemin ana varsayımından farklıdır. Karşılaştırma için iki adet 20 katlı çerçeve ve iki adet 30 katlı çerçeve ele alınmıştır (Şekil 4.23).

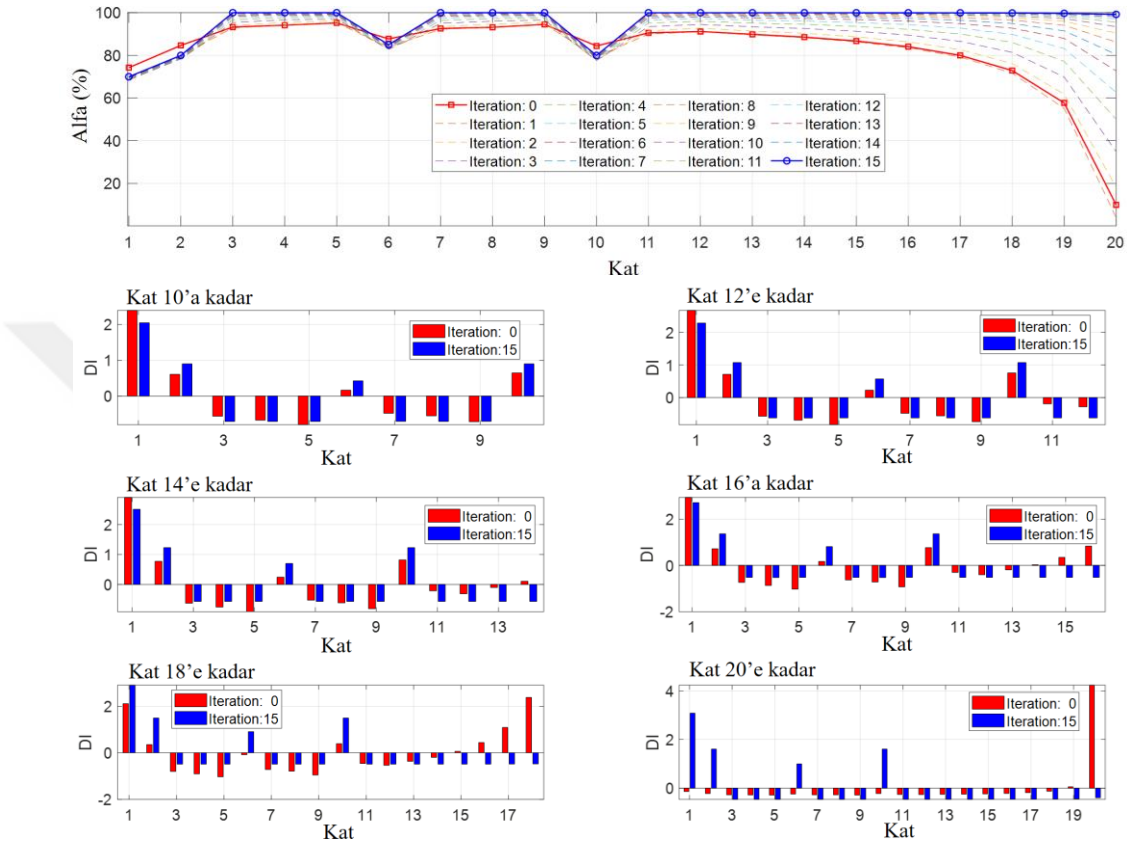


A **B** **C** **D**

Şekil 4.23. Sayısal örnekler. **A**) 20S **B**) 20SX **C**) 30S **D**) 30SX

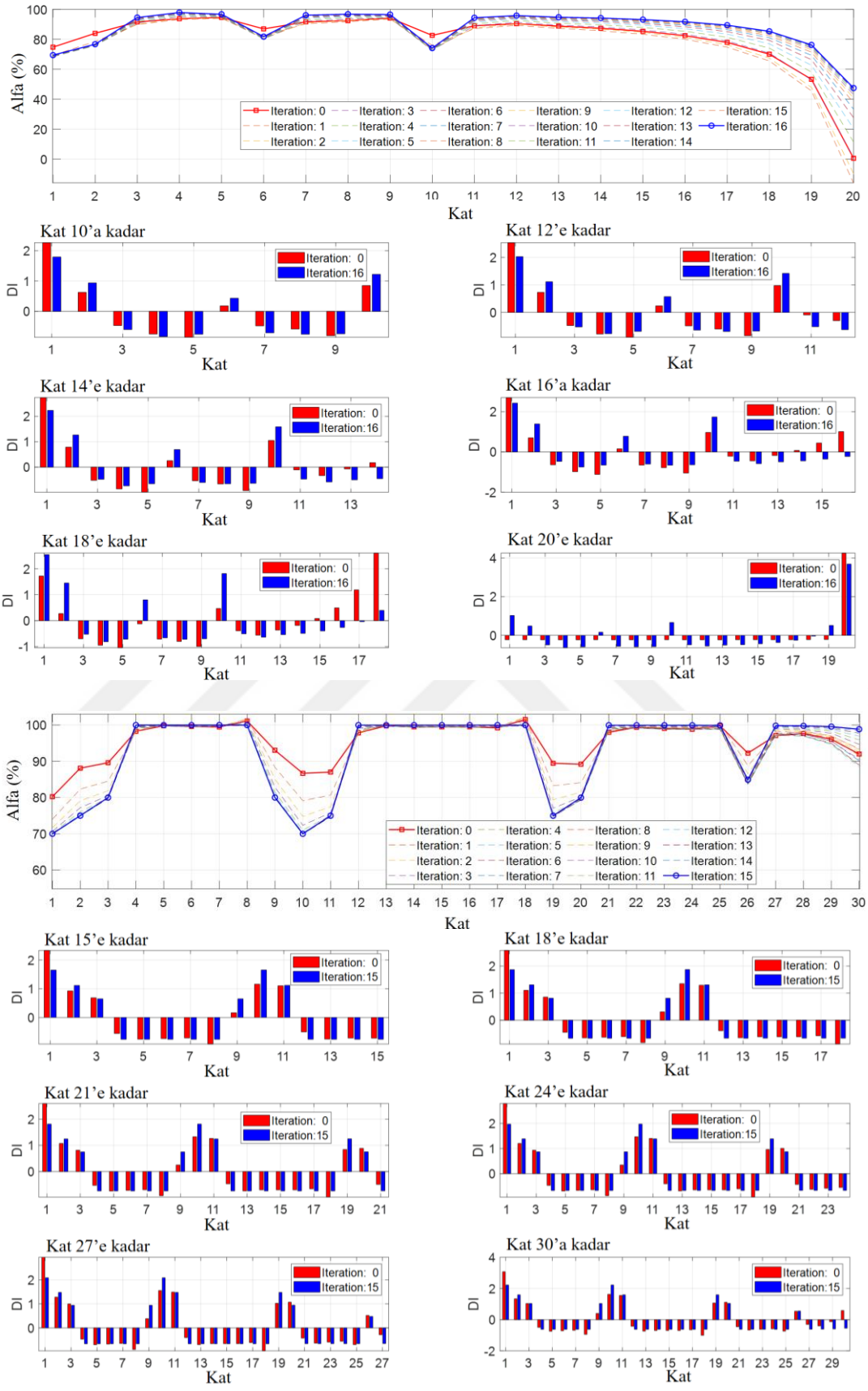
Her çift için aynı seviyelerde hasar meydana geldiği varsayılmaktadır ancak her seviyedeki senaryolar farklıdır. Bunlardan biri temel tip iken diğeri bu bölümde anlatıldığı gibi daha karmaşıktır. Tüm durumlar için açıklık sayısı 4 olarak sabitlenmiştir. Hasar senaryolarının karmaşık olması nedeniyle hasar tahmininin doğruluğunun düşebileceği beklenmektedir. Bu nedenle hem Prosedür A hem de Prosedür B bu bölümde uygulanmaktadır. Prosedür B için güncelleme işlemi birden çok kez etkinleştirilir. Güncelleme prosedürünün her zaman yakınsamaya yol açtığı, özellikle Şekil 4.16'da bir

önceki bölümde gözlemlenmiştir. Bu nedenle zaman kaybı sorununu önlemek için bir durdurma kriteri oluşturulmalıdır. Özellikle, güncellenen her parametre için mevcut tahmin ile önceki tahmin arasındaki mutlak farklılık % 0,5'ten az olduğunda süreç otomatik olarak sona erecek şekilde bu sınır seçilmiştir.

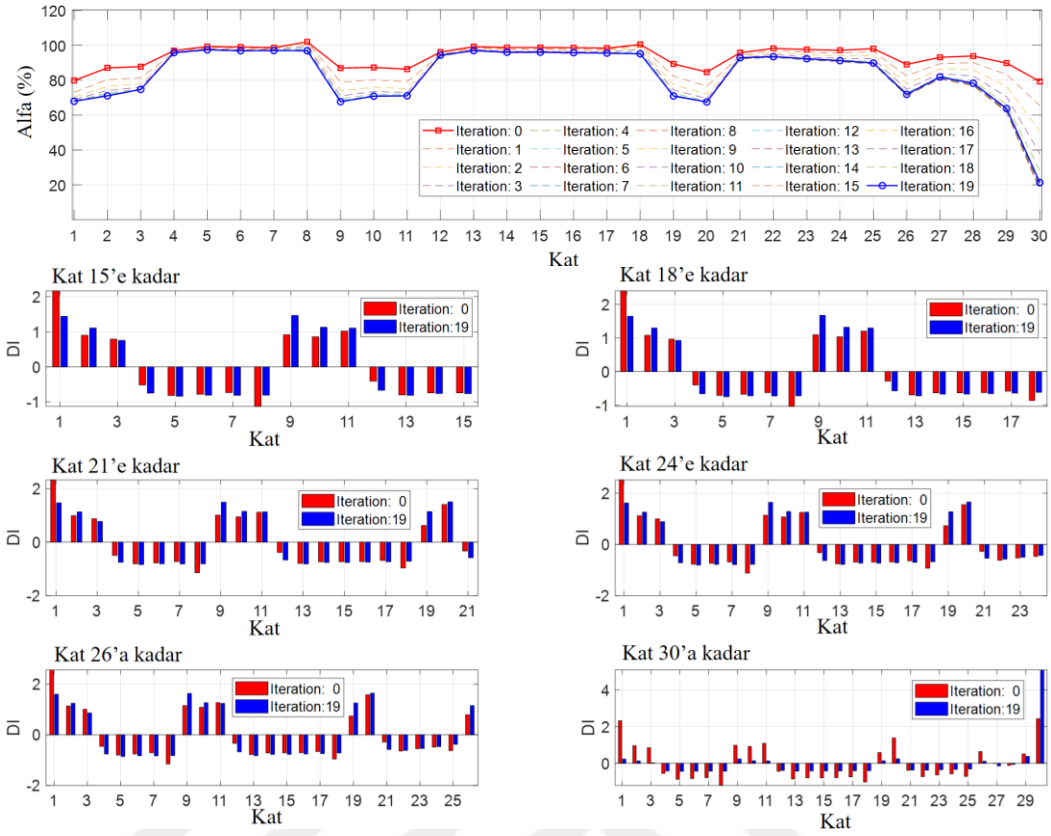


A

Şekil 4.24. Prosedür A tabanlı hasar tespiti. **A**) 20S **B**) 20SX **C**) 30S **D**) 30SX



Şekil 4.24. Prosedür A tabanlı hasar tespiti. **A**) 20S **B**) 20SX **C**) 30S **D**) 30SX (devam)



D

Şekil 4.24. Prosedür A tabanlı hasar tespiti. **A**) 20S **B**) 20SX **C**) 30S **D**) 30SX (devam)

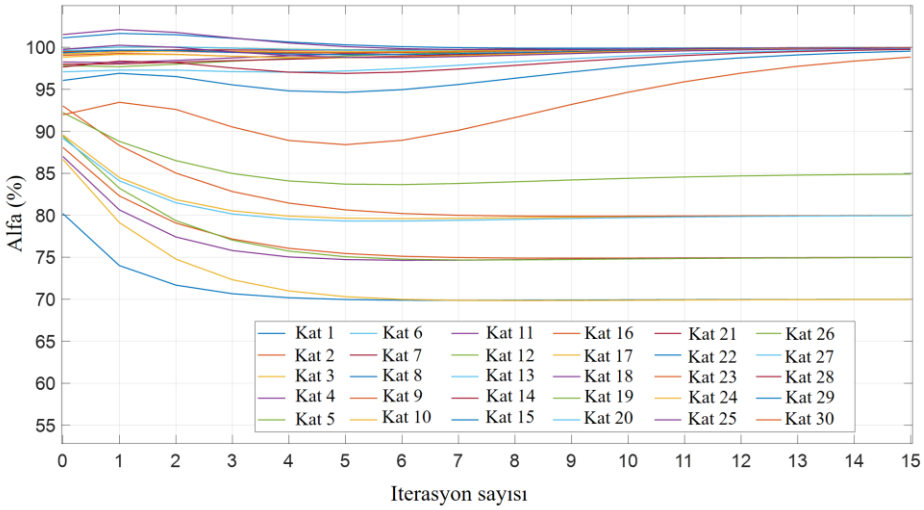
Prosedür A'ya dayalı olarak önerilen hasar tespit tekniğinin güvenilirliği burada araştırılmaktadır. Özellikle mod 2'den elde edilen ilk denklem kullanılarak söz konusu prosedür uygulanmaktadır. Şekil 4.24'te gösterilen, Prosedür A ile elde edilen doğru hasar tahmini, tüm hasarlı katlar için başarılı sonuçlar üretmektedir. İlk tahminler (Iteration 0'da) genellikle kat düzeyinde algılamanın kabul edilebilir sonuçlar ürettiği görülmektedir. Bundan sonra, güncelleme prosedürü sonuçları daha yüksek hassasiyet seviyelerine ulaşmaya yardımcı olmaktadır.

İlk iterasyonda (Iteration 0), her çerçeve için, her bir elemanın (α) kalan E değerini içeren bir vektör tahmin edilir. Şekil 4.24'te gösterildiği gibi, vektörün genel eğilimine kıyasla önemli değişiklikler hasar belirtileridir. Vektör daha sonra hasarlı katları tespit etmek için istatistiksel olarak değerlendirilir. Örnek olarak verilen model 30S'de vektörün 30 parametresinin tamamı kontrol edildiğinden, sonuç grafikte, yani Şekil 4.24c'de (Kat 30'a kadar) takip edilebilir. S1, S2, S3, S9, S10, S11, S19, S20, ve S26'ya düşen tüm eğimler, hepsi 0'dan büyük olan ilgili DI'ler nedeniyle kesin bir tahminle bu katlardaki

hasarı göstermektedir. Ancak hasarsız olan S30 katında da hasar gösteriliyor olması, iterasyonun en başında (Iteration 0) elde edilen ve yöntemin henüz ilk değerlendirmelerine dayanan pozitif bir yanlış tahmin olarak kabul edilmektedir. Pozitif yanlış tahmin, hasarsız bir katın hatalı olarak hasarlı olduğunun gösterildiği durum anlamına gelmektedir. Sorun, S26'dan sonraki katlardaki tahmininden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.24c'de görüldüğü gibi, S27'den S30'a kadar olan çizgide herhangi bir eğim bulunmamaktadır, ancak kademeli olarak azaldığı şekilden görülmektedir. Bu nedenle DI değerleri yükseliş eğilimindedir. Sonuç olarak, sorunun üstesinden gelmek için, istatistiksel teknik uygulanırken bu katlar vektörden çıkartılarak değerlendirme yapılmalıdır. Şekil 4.24c'de, (Kat 27'e kadar adlı grafik), yalnızca en alt 27 kat dikkate alındığında yine de doğru bir tahmin üretmektedir. Öngörülen vektörün trendine dayalı olarak sınırlı sayıda kat göz önüne alındığında, bu yönteme Tendency Based Solution ismi verilmektedir. Böylece 20S ve 20SX durumlarında da aynı sorun giderilebilir. Bu örneklerde, her binada en yüksek eğim S10'da elde edilir. Hat S11'e geri döner. Ardından S11'den S20'ye kademeli bir düşüş gözlemlenir. Bu katlar yok sayıldığında, (Kat 12'e kadar) elde edilen tahmin doğru sonuç üretmektedir.

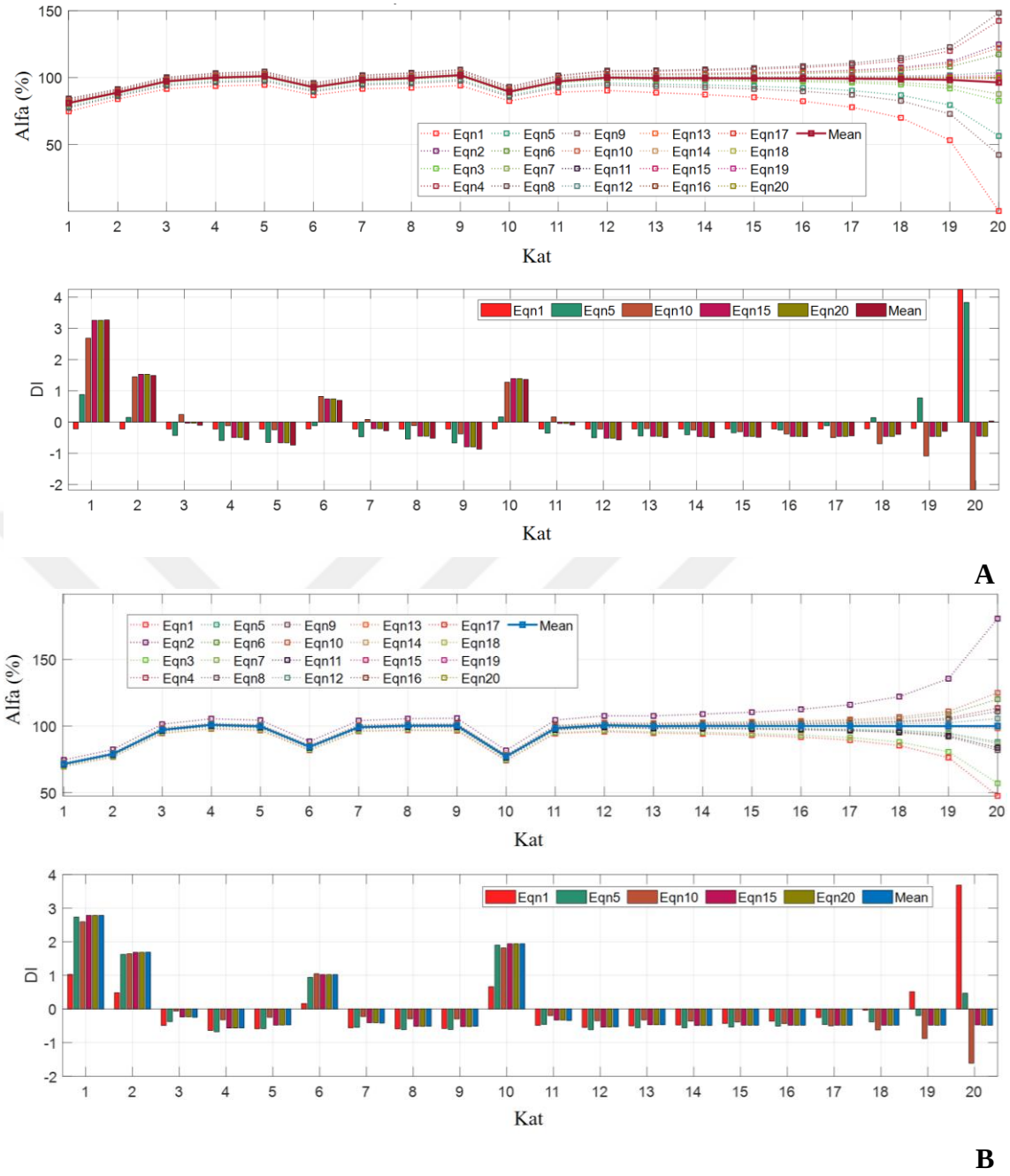
Tahminlerin doğruluğu, Şekil 4.24'te görüldüğü gibi güncelleme prosedürü ile geliştirilebilir. Örneğin, 30S için α güncelleme prosedürü Şekil 4.24 c ve Şekil 4.25'te gösterilmektedir. Güncelleme yapılmayan ilk tahmine (Iteration 0) dayalı olarak, her bir yinelemeden sonra her katın α değeri güncellenir. Parametreler daha sonra belirli değerlere yakınsar. Durdurma kriterine göre güncelleme işlemi otomatik olarak durur. 30S'de yakınsama işlemi 15'inci adımda hedefe ulaşmaktadır. Sonradan güncellenen α-vektörü, ilk yaklaşıma kıyasla daha doğrudur. Şekil 4.24 c'de görüldüğü gibi, gerçek hasarlı katlarda güncellenen α değerleri düşmektedir. Öte yandan, sağlıklı olanların parametresi yavaş yavaş hasarsız sonuçlar üretecek şekilde 1'e geri döner. Bu durum S27'den S30'a kadar olan kısımda açıkça görülebilir. Sonuç olarak, tüm katlar (Kat 30'a kadar) dikkate alındığında dahi güncelleme sonunda doğru tahminlerin elde edilebildiği yine bu şekilden görülmektedir. Güncelleme prosedürünün etkinliği 20S için elde edilen çözümlerden de görülmektedir. Bu çerçevede, S11'den S20'ye güncellenen vektör, ilk tahminle karşılaştırıldığında önemli bir şekilde gelişmektedir. Nihai sonuç (Kat 20'e kadar) tamamen doğrudur. Burada gerçekleştirilen çözümlemelerden ön görülen

senaryolar için 20S ve 30S'deki hasarlı katların, güncelleme prosedürü kullanılarak hassas bir şekilde elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 4.25. 30S için Prosedür A tabanlı güncelleme prosedürü

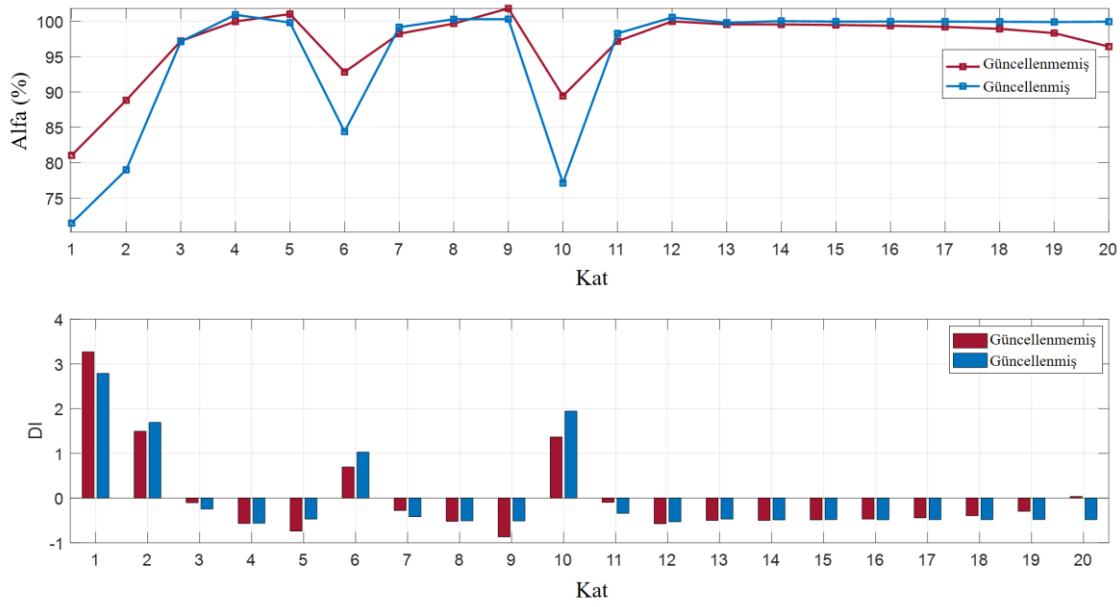
Diğer taraftan, sırasıyla 20S ve 30S durumlarında olduğu gibi aynı hasarlı kat konumlarına fakat farklı şiddetlerde hasarlı oldukları kabul edilen elemanlara sahip olan diğer iki model 20SX ve 30SX dikkate alındığında bazı uyarılar yapılmalıdır. Her bir elemanın hasar şiddeti bağımsız olduğundan, fiilen hasar görmemiş katların güncellenen α değerleri, özellikle yüksek katların için olmak üzere, tam olarak bir değerine ulaşmamaktadır. 20SX için, S11'den S20'ye güncellenen satır, bir değerinden önemli ölçüde sapma göstermektedir. Ayrıca, S20X için güncellenen parametre yaklaşık % 50'de sona eriyor olması bunun % 100'den önemli ölçüde düşük bir değer olarak gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, 20S için (Kat 20'e kadar) güncellenmiş tahmin, S19 ve S20 için yanlış tahmine neden olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için en alt kat sayısını belirlemeden önce Tendency Based Solution düşünülmelidir. Özellikle güncellenen vektörün performansına bağlı olarak en yüksek düşüş S10'da görülmektedir. Kat 10'a kadar'a doğru bir tahmin elde edilebilir. 30SX için hasarlı katlarda güncellenen hat derinleşirken, bozulmamış katlardaki parametre ilk tahminden daha iyi bir noktaya götürülememektedir. Sorun, yüksek katlarda daha belirgindir. Bununla birlikte, güncellenen vektöre dayanarak, 20SX için yapılanla benzer şekilde tam bir hasar tespiti elde edilebilir. En yüksek eğim S26'ya düştüğü için sadece en düşük 26 kat dikkate alınır. Sonuç olarak, Kat 26'a kadar'taki tahmin kesindir.



Şekil 4.26. 20SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti. **A)** Güncellenmemiş **B)** Güncellenmiş

Prosedür B, özellikle 20SX ve 30SX'in yüksek katları için, Prosedür A'yı kullanırken karşılaşılan sorunların üstesinden gelmek için kullanılmaktadır. 20SX için Prosedür B tabanlı tahminler, Şekil 4.26'da ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Hem önceden güncellenmiş hem de güncellenmemiş hasar tespit sonuçları, mod 2'den *NS* denklemin seçilmesine bağlıdır. 1'inci ve 2'nci moddan elde edilen #th denklemin birleştirilmesi ile edilen tüm tahmin edilen α-vektörlerinin sonuçları Şekil 4.26'da DI cinsinden

gösterilmektedir. Prosedür A tabanlı algılamaya benzer şekilde (Şekil 4.24 b), her bir Eqn#, alt katlarda sabit tahminler gösterirken, üst kısımda dikkate değer sapmalar meydana gelir ve bazen yanlış tahminlere neden olur. Bazı sonuçlar üst kısımda iyi tahminlere yol açar ancak en önemli sorun hangisinin seçilmesi gerektiğidir. Her bir ayrı tahminin alt kısımda istikrarlı bir performans gösterdiği, bazılarının üst kısımdaki katlar için yüksek α değerleri verdiği, bazılarının ise düşük α değerleri tahmin ettiği görülmektedir. Her α-parametresi, *NS*'nin ayrı sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilirse, sorun etkin bir şekilde ortadan kaldırılabilir. 20SX için, hem önceden güncellenmiş (Şekil 4.26 a) hem de güncellenmiş (Şekil 4.26 b) durum için, ortalama (mean) α-vektörleri, üst katların α değerleri yaklaşık olarak bire yöneldiğinde doğru hasar tespiti ile sonuç elde edilmiş olmaktadır.

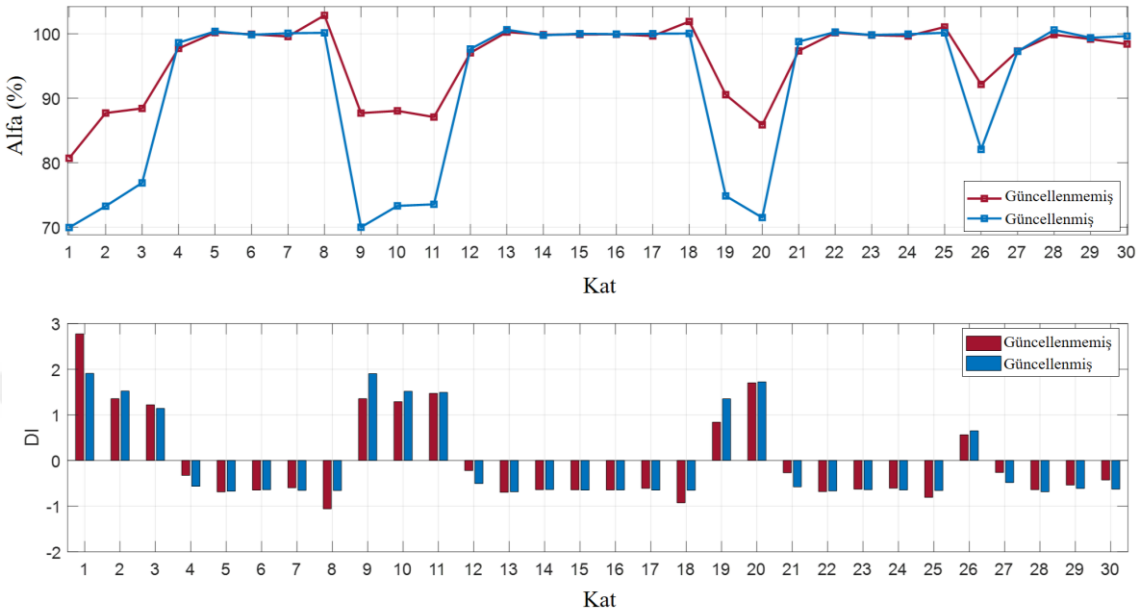


Şekil 4.27. 20SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti

Önceden güncellenmiş ve güncellenmiş tahmine dayalı ortalama vektörler arasında bir karşılaştırma Şekil 4.27'de görülebilir. Güncelleme prosedürünün etkinliği nedeniyle, güncellenmiş yöntemin sonuçlarının daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak güncelleme yapılmadan hesaplanan da kabul edilebilir olduğu ve güncelleme yapılmadan daha hızlı sonuçlar elde edilebildiği de burada ifade edilmelidir.

Böylece, 30SX için, Şekil 4.24 a'da gösterilen Prosedür A tabanlı tahminle karşılaştırıldığında, Prosedür B daha kesin hasar tahminiyle sonuçlanmaktadır (Şekil

4.28). Bu durum, üst kısımla ilgili sorunun her iki tahminle de üstesinden gelinebildiğine işaret etmektedir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde, Şema 2'ye dayalı olarak önerilen hasar tespit yönteminin yeterli güvenilirlikle sonuç üretebildiği sonucuna varılabilir.



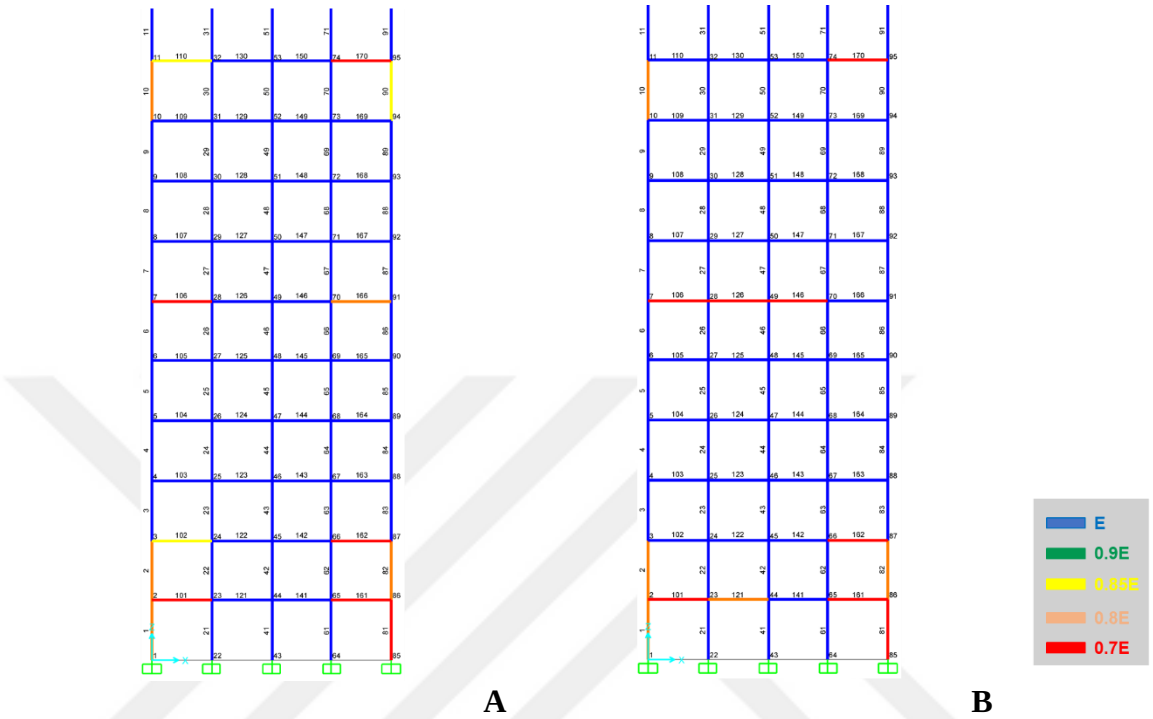
Şekil 4.28. 30SX için Prosedür B tabanlı hasar tespiti

20 katlı ve 30 katlı çerçeveler üzerinde yapılan incelemeyle, özellikle basit ve karmaşık senaryolar için Prosedür B'nin Prosedür A'dan daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, Prosedür A ile elde edilen hasar tespit sonuçları, Tendency Based Solution dikkate alındığında da kullanılabilir düzeyde doğru sonuçlar üretmektedir. Ayrıca, Prosedür A kullanılarak, Prosedür B'den daha hızlı tahminlerin elde edilebiliyor olması bu yaklaşım için bir avantaj olarak burada ifade edilmek durumundadır.

4.2.4. Kat düzeyinde tespiti – Asimetrik ve hafif hasar senaryoları için hasar tanıma

Hasar tespiti için ters çözüme dayalı güncelleme prosedürü iyi bir performans göstermektedir. Kat sayısı 30'a kadar olan yapılarda bu yöntem (Prosedür A ve Prosedür B) sayısal olarak doğrulanmıştır. Karşılaştırılabilir bir teknik olan kütle tanıma prosedürü de yine bu çalışma kapsamında deneysel olarak doğrulanmıştır. Ancak önceki bölümlerde, hasar senaryoları ciddi düzeylerde ve simetrik oldukları varsayılmaktadır. Bunun yanında söz konusu önerilen yöntemler ile sadece hasarlı katlar tespit edilirken hasarlı elemanlara ilişkin bu yöntemler ile elemanların hasar tespiti ve DI'leri konusunda

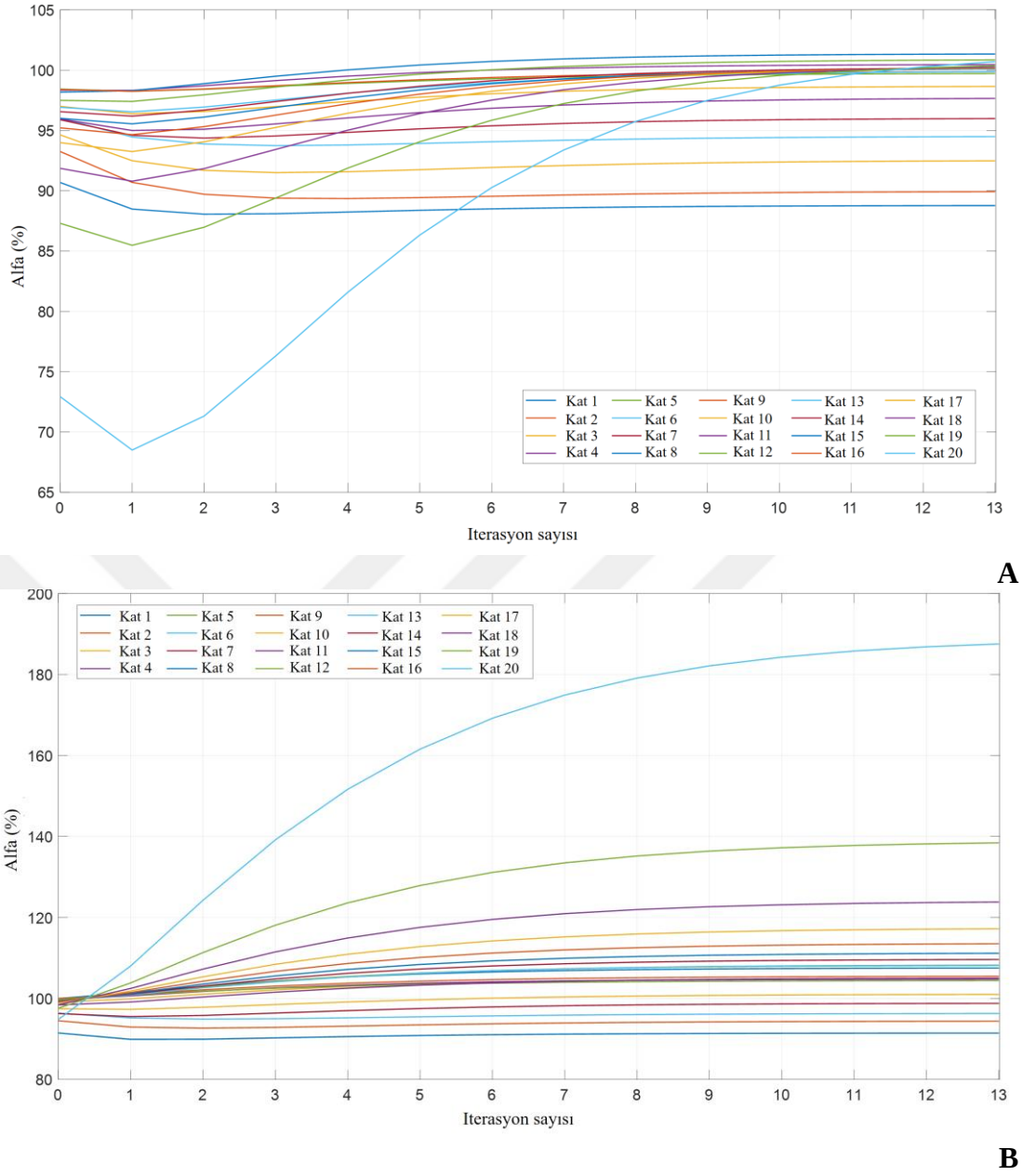
bu aşamada bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bir sonraki bölümünde, bu yöntemin geçerliliği hafif ve asimetrik hasar senaryoları için araştırılacaktır. Bundan sonra, tespit edilen her kattaki hasarlı kolon ve kirişler ANN kullanılarak elde edilecektir.



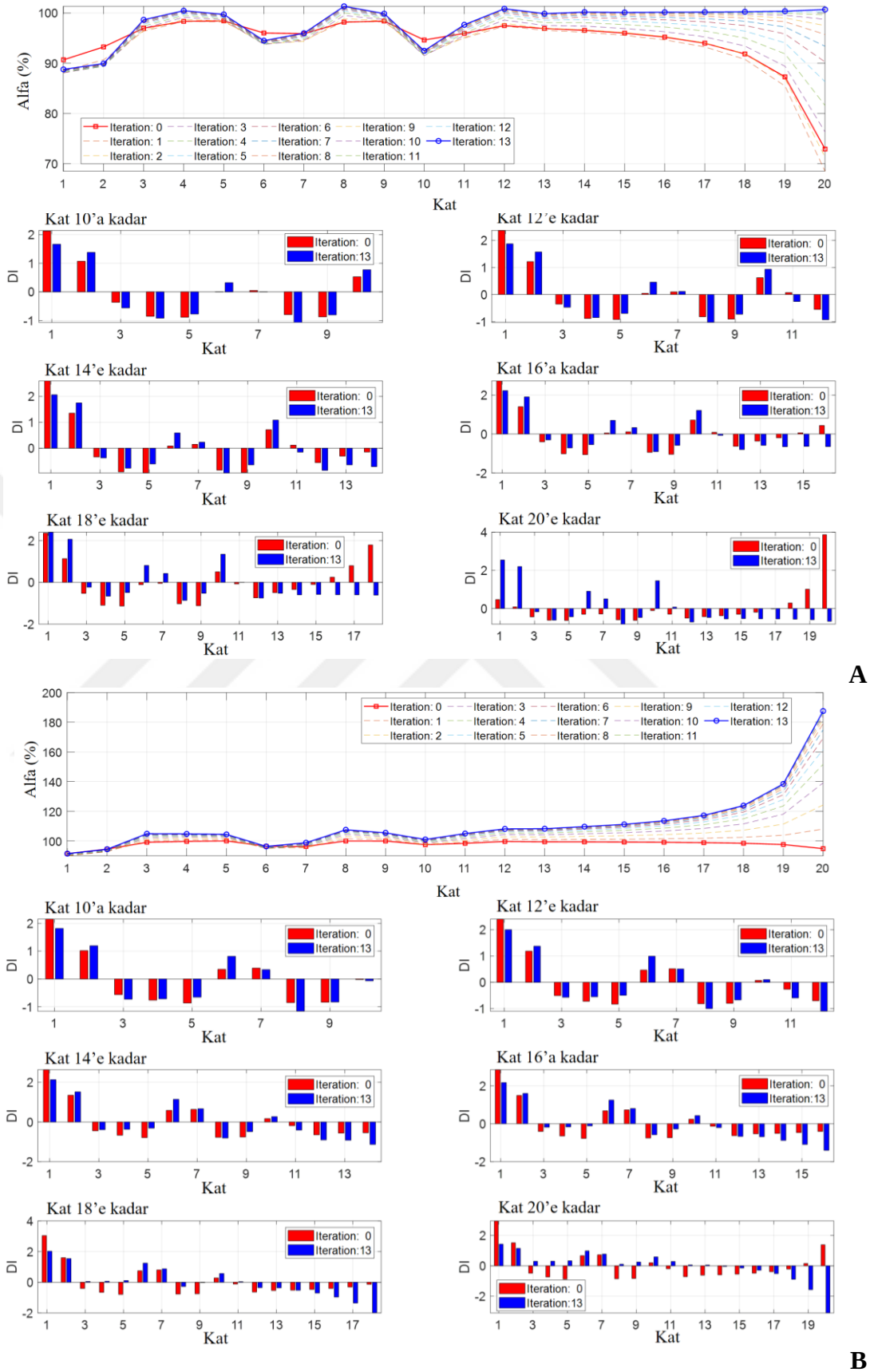
Şekil 4.29. Sayısal model. **A**) SYM **B**) ASY

Bu bölümde 20 katlı 4 açıklıklı çerçeve üzerinde karmaşık ve hafif hasar senaryoları ele alınmıştır. Özellikle Şekil 4.29'da gösterilen iki senaryonun kat düzeyinde tespiti Prosedür A ve B kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Senaryo simetrik olduğu için ilk model SYM olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.29 a). İkinci model ise asimetrik kategorisi nedeniyle ASY olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.29 b). Malzeme özellikleri, kesitler, her katın yüksekliği ve her açıklığın genişliği bir önceki bölüme benzer olarak seçilmiştir.

Prosedür A ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.30 ve 4.31'de gösterilmektedir. Yakınsama, her durum için önceki bölümlerde tanımlananla aynı şekilde sağlanır. *E* değerleri için ilk tahminde bir miktar sapma vardır, ancak yakınsamadan sonra tüm elemanlar için tahmin doğru şekilde tahmin edilebilmektedir.



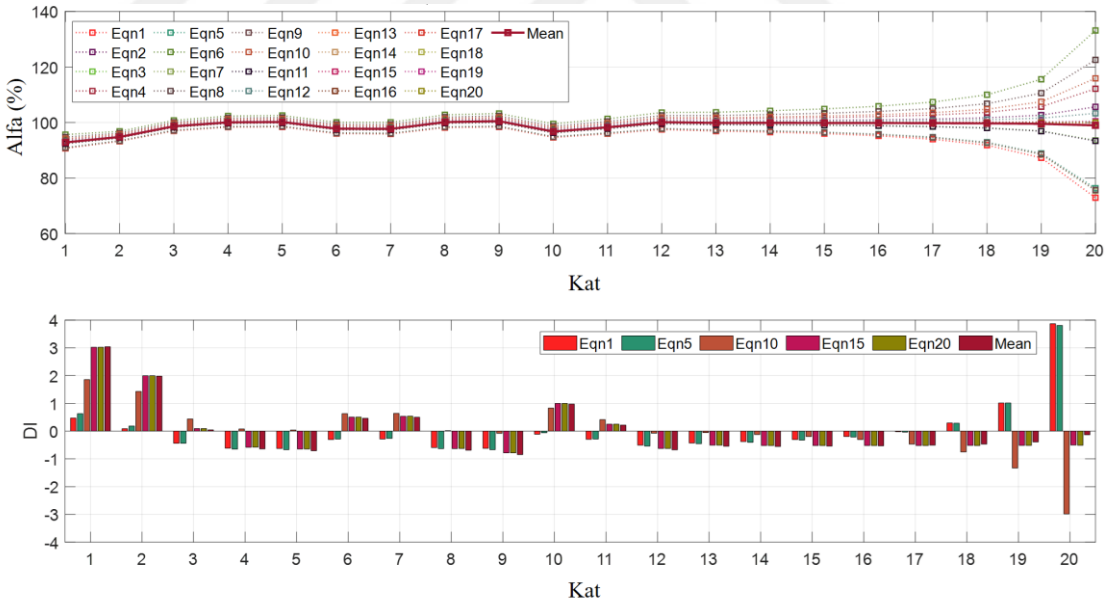
Şekil 4.30. Güncelleme prosedürü. **A**) SYM **B**) ASY



Şekil 4.31. Prosedür A tabanlı hasarlı kat tespiti**. A**) SYM **B**) ASY

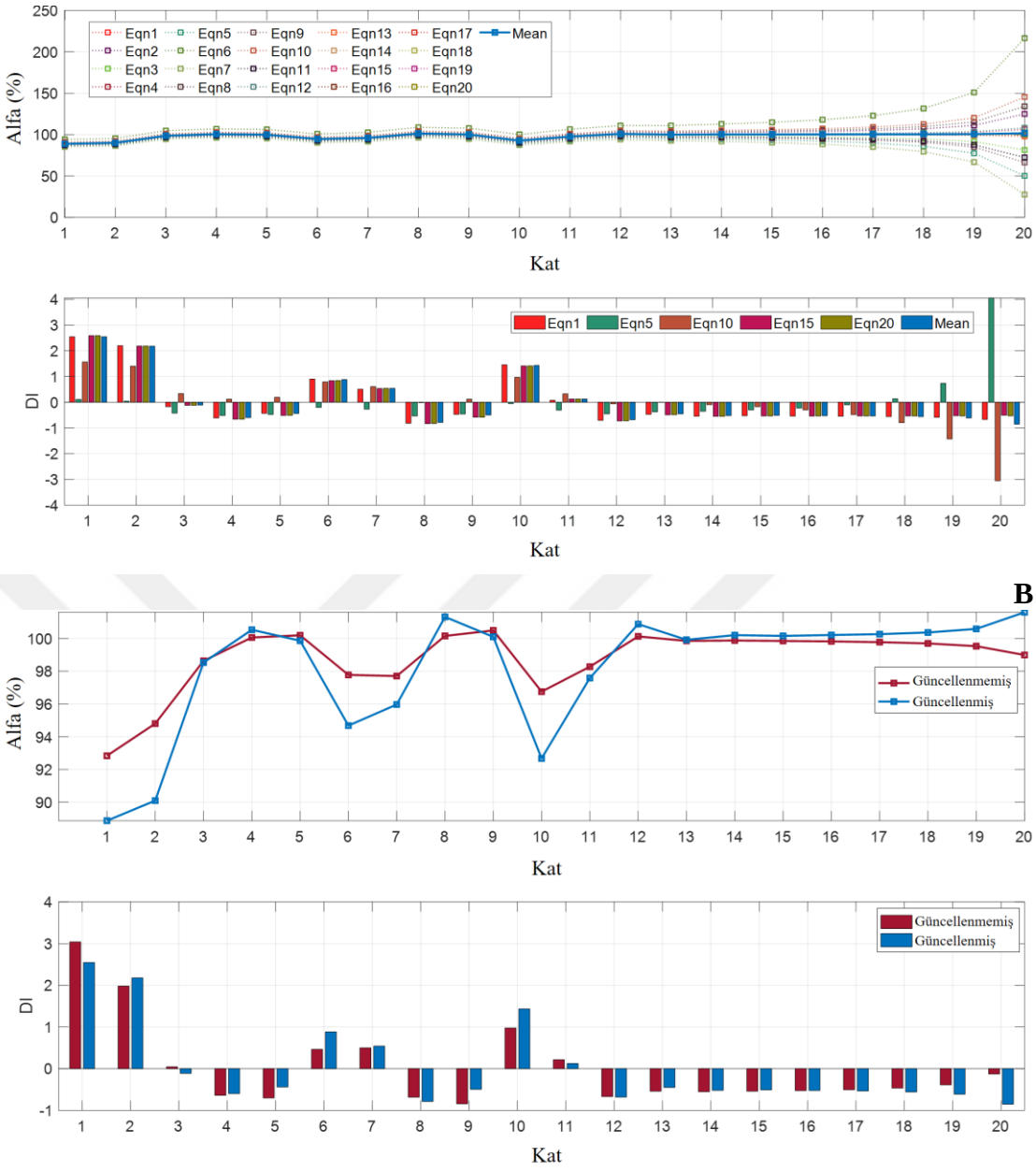
Şekil 4.31, SYM ve ASY'nin kat düzeyinde tespitini göstermektedir. Güncellenmiş tahminler, önceden güncellenmiş olanlara nazaran hasarlı katları daha doğru tahmin etmektedirler. Hasar kriterinin 0 (% 50 güven seviyesi) olarak seçilmesine dikkat edilmelidir. SYM için, önceden güncellenmiş ve güncellenmiş sonuçlara dayanarak kabul edilebilir sonuçlar elde edilebilir. Bununla birlikte, ASY'deki nispeten daha az hasarlı ve hasar lokasyonları itibari ile karmaşık senaryo, özellikle istatistiksel teknik kullanılarak tüm katlar göz önüne alındığında daha zor tespit edilebildiği sonuçlardan görülmektedir.

Prosedür A nedeniyle ortaya çıkan bazı sorunlar Prosedür B kullanılarak üstesinden gelinebilir. SYM ve ASY için sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.23'te gösterildiği gibi hasarların bu yolla güvenilir bir şekilde tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Genel olarak, tüm hasarlı katlar doğru bir şekilde tespit edilir. Şekil 4.32 c'de görüldüğü gibi güncellendikten sonra bile S11 0'dan biraz daha yüksek olduğunda SYM'de bazı problemler ile karşılaşılabilmektedir. Ancak bu problemin önüne hasar kriteri 0,25'e yükseltilerek çözülebilmektedir.

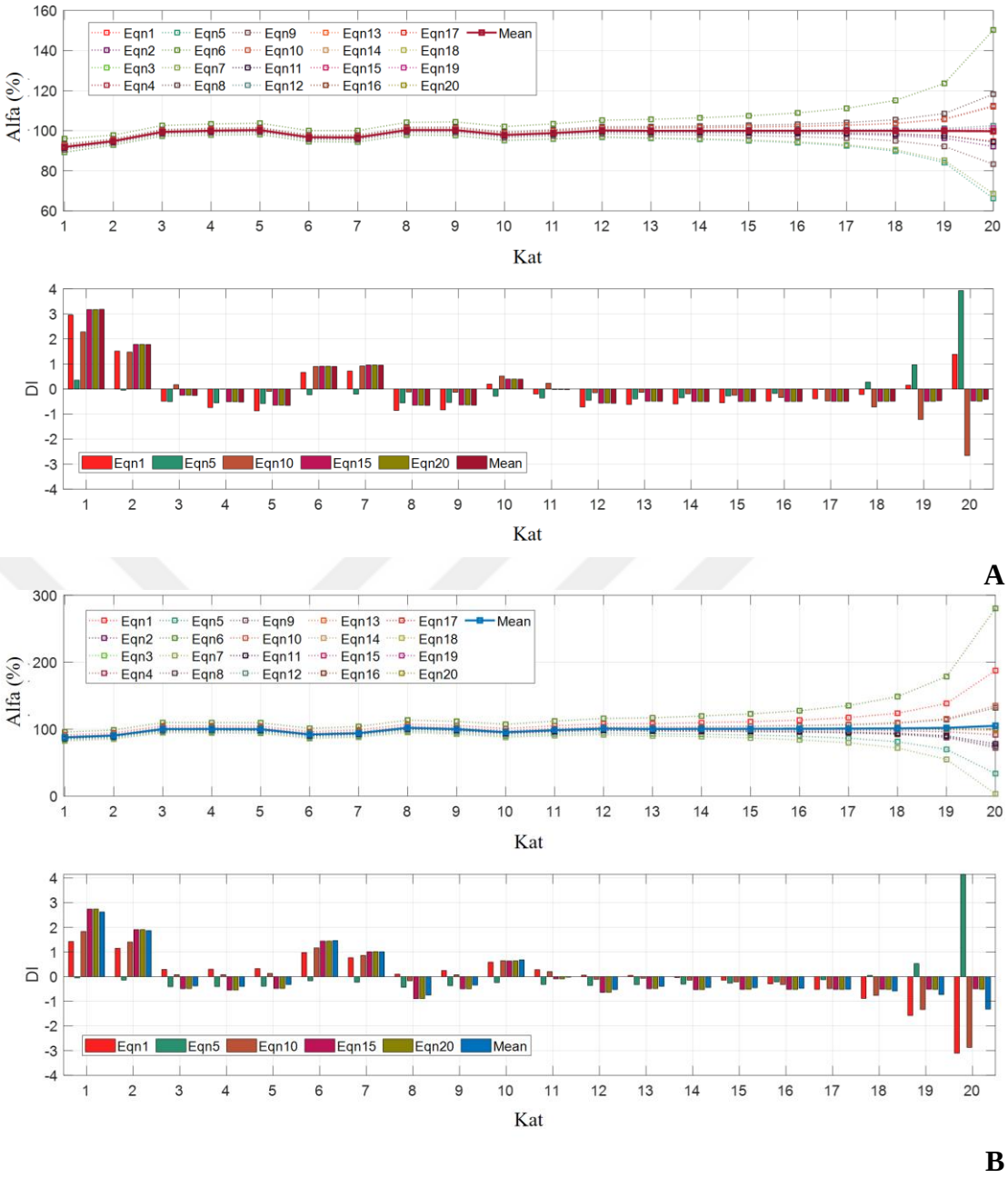


A

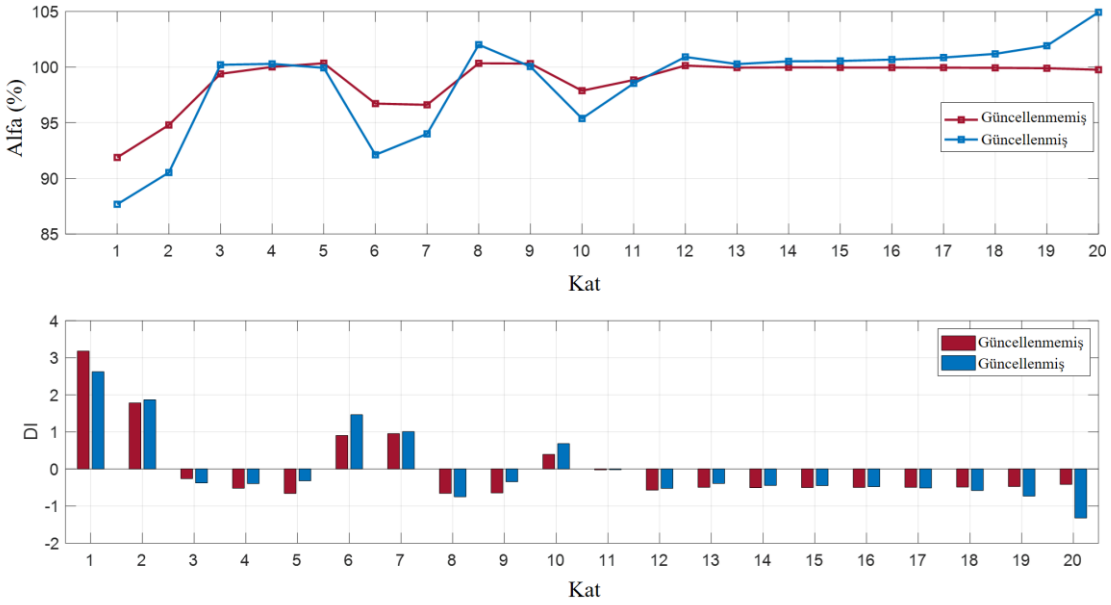
Şekil 4.32. SYM için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. **A**) Güncellenmemiş **B**) Güncellenmiş **C**) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.32. SYM için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. **A**) Güncellenmemiş **B**) Güncellenmiş **C**) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması (devam)



Şekil 4.33. ASY için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. **A**) Güncellenmemiş **B**) Güncellenmiş **C**) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması



C

Şekil 4.33. ASY için Prosedür B tabanlı hasarlı kat tespiti. **A**) Güncellenmemiş **B**) Güncellenmiş **C**) Güncellenmemiş ve güncellenmemiş sonuçların karşılaştırılması (devam)

Prosedür A ve Prosedür B'ye dayalı olarak bu bölümdeki inceleme sayesinde, hasar senaryolarının karmaşıklığından ve hasar derecesinden bağımsız olarak güvenilir kat düzeyinde tespitlere ulaşabildiği görülmektedir.

4.2.5. Eleman (kolon ve kiriş) düzeyinde tespiti - ANN tabanlı hasar tespiti

Bu bölümde, SYM ve ASY için özdeğer problemine dayalı model güncelleme prosedürü ile elde edilen sonuçlara göre, potansiyel hasar adayı olan katlardaki hasarlı elemanların yerelleştirilmesi için bir ANN modeli tasarlanmıştır. MATLAB®'a entegre edilen fonksiyon uydurma sinir ağı kullanılarak geliştirilen bir araç yardımıyla işlemler gerçekleştirilmektedir. Önceden hasarlı olduğu tespit edilen katlarda (S1, S2, S6, S7, ve S10), Şekil 3.6'da seçilen çok katmanlı bir ANN modeli yardımıyla hasarlı kolon ve kirişlerin yerelleştirilmesi ve tespiti yapılmaktadır.

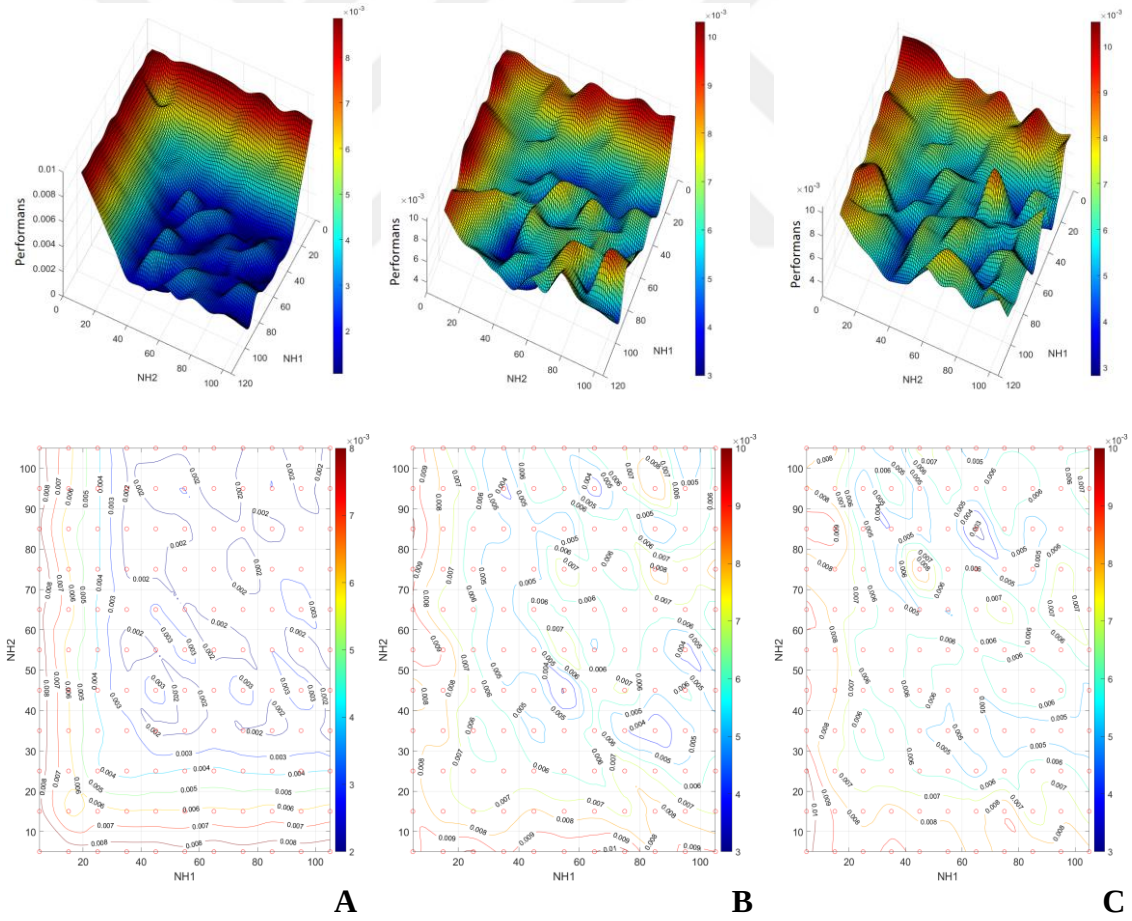
Giriş (*NI*) ve çıkış (*NF*) vektörlerinin boyutları, harici problem özelliklerine göre belirlenmektedir. Hasarlı katlardaki her eleman, ağın çıktı katmanında bilinmeyen bir faktör olarak atanır. Bu durum toplam *NF* adet faktöre denk gelmektedir (*NF* = 45 faktör). Giriş verilerinin uzunluğu (*NI*), ağı eğitmek için seçilen bilgilere bağlıdır. Bu çalışmada,

modal veriler, eğitim durumuna karşılık gelen her bir hasar senaryosu nedeniyle istenen binaların tepkisini ifade eden girdi verileri olarak kabul edilir.

Bu çalışmada iki tür girdi vektörü ele alınmıştır. Tip 1 olarak adlandırılan birincisi, ilk üç öz-değerden ve karşılık gelen mod şekillerinden oluşur. Sonuç olarak, Tip 1 burada dikkate alınan örnekler için 66 üye içerir. Bu mod şekilleri, güncelleme prosedüründe aynı ölçüm noktası ağından elde edilen yanal yer değiştirme ya da daha doğru ifade ile ötelenme modlarıdır. İkinci vektör, yani Tip 2 daha karmaşıktır, Şekil 3.1 b'da görüldüğü gibi her kattan üç bilgi, Tip 1'deki ile aynı yanal yer değiştirmeyi, başlangıç ve katın bitiş noktasında iki düşey yer değiştirmeyi içerir. İki düşey bilgi arasındaki oran girdi vektörüne eklenir. Bu bilgi yaklaşık olarak katın dönüşünü ifade eder. Sonuç olarak, Tip 2 için giriş vektörünün boyutu 126'dır. İki tip için, öz değerlerinin en yüksek değerlere normalleştirildiği ve mod şeklinin en üst katta ölçülen genliklere göre normalleştirildiği belirtmek burada uygun olacaktır.

45 faktör içeren ağı eğitmek için çok sayıda kombinasyon gereklidir. Sadece 2 seviyeli, hasarsız ve hasarlı durum dikkate alınsa dahi, toplam 2^{45} kombinasyon analiz edilmelidir. Sorunu çözmek için, orthogonal array (OA) yöntemi uygulanabilir (Hedayat diğerleri, 1999). *OA.96.48.2.3.pal* dizisi, Sloane (2020) kütüphanesinde oluşturulmuş ve yayınlanmıştır. Şekil 3.6 b'de, *OA.96.48.2.3.pal* dizinin Latin hypercube sampling tekniği uygulaması ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Veriler, 2 seviyeli 48 faktör durumu için oluşturulmuştur. 2^{45}'e kıyasla önemli ölçüde düşük, 96 analiz veya kombinasyon vardır. Dizi, sırasıyla hasarlı ve hasarsız anlamına gelen 1 ve 0 rakamlarını içerir. Dahası, dizinin gücü 3'tür. 45 faktör durumunda, 48 sütundan 45'inin rastgele seçildiği ve aynı sayıda satırın (96) tutulduğu yeni bir dizi, problem için oluşturulur. Bundan sonra, MATLAB® ile entegre Latin hypercube sampling tekniği, halihazırda oluşturulmuş diziye 1 basamaklı hasar şiddetlerini düzenlemek için uygulanır. 0,7*E* ile *E* arasında değişen şiddet, belirli bir aralık sayısına bölünmüştür. Örneğin, hasar aralığı 10 aralık (11 noktalı bölme) kullanılarak bölündüğünden ağı eğitmek için 1056 analiz gerçekleştirmek gerekmektedir. Bunların % 75'i ağı eğitmek için, % 15'i doğrulama için ve % 15'i test etmek için kullanılmaktadır. Doğrulama verilerini kullanarak sürekli altı yinelemeden sonra hiçbir gelişme olmadığı için model analizi sonlandırmaktadır.

Gizli katmanların boyutu söz konusu olduğunda, her gizli katman için uygun sayıda nöron seçmenin standart bir kuralı yoktur. Parametre, sorun türlerine bağlıdır. Gately (1996), gizli düğümlerin sayısının toplam giriş ve çıkış sayısına eşit olarak ayarlanabileceğini önermiştir. Bakhary (2008), benzersiz bir gizli katmana sahip bir ağ için nöron sayısını seçmek maksadıyla bir deneme yanılma yöntemi önermektedir. En düşük performans (*mse*) değerine göre uygun sayıda nöron belirleyen bu çalışmada, ağ daha karmaşıktır. İki gizli katmanda (*NH1* ve *NH2*) nöron sayısını seçmek için bir ilk ipucu aramak ve bir deneme yanılma yöntemi uygulanmaktadır. 0,7*E*'den *E*'ye kadar olan hasar aralığından, hasar şiddeti üç aralığa (dört nokta) bölünmüştür. Bu şemaya 4 noktalı bölme denir. Tip 2, girdi veri kümesini oluşturmak için kullanılır. *NH1* ve *NH2* değerleri, 10'luk bir aralıkla 5 ila 105 arasında değişir ve 121 kombinasyon 121 *mse* değerine eşdeğerdir. Performans yüzeyleri Şekil 4.34'te gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Performans yüzeyi. **A**) Eğitim (Training) B) Doğrulama (Validation) **C**) Test (Testing)

Şekil 4.34'da, *NH1* ve *NH2*'nin her bir kombinasyonu ile elde edilen mse değerine dayalı performans yüzeyini göstermektedir. Üç boyutlu yüzeye ve karşılık gelen konturlara göre, *NH1* ve *NH2*'nin 35'ten yüksek kombinasyonlarının muhtemelen iyi tahminlere yol açtığı görülmektedir. Her şeyden önce, eğitim performansı (Şekil 4.34 a), daha düşük *mse* değerleri içeren vadileri gösterir. İki parametre yaklaşık 10'dan küçük kombinasyonlar için yüzey 0,008 civarındaki yüksek genliklerden başlar. Genel eğilim olarak söz konusu değer 30'a yükseldikçe kademeli bir düşüş yaşanır ve burada mse 0,003 değerine ulaşır. Nöron sayısı 35'ten fazla artmaya devam ettikçe, yüzeyler 0,002 *mse* değerine ulaşmaktadır. Hafif bir durgunluk ile vadide benzersiz derinlik gösterilmese de, *mse*'nin değeri önemli ölçüde değişmez. Vadide 0,003 genlikli bazı zirveler olmakla birlikte, hafif sapmalar çok önemli değildir. Buradaki tahminler, rastgele seçilen ağırlık ve sapma matrisleri kullanılarak elde edilir. Daha fazla tekrar, nisbeten farklı yüzeyler verebilir. Dahası, bu yüzeyin sadece *NH1* ve *NH2'*nin 10'luk bir aralıkla bölündüğü şekilde oluşturulmuş bir yaklaşım olduğu ve çok rafine bir bölme işleminden bahsetmenin mümkün olmadığı dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, yüzey, nöron sayısını seçmek ve bu bağlamda bir sonuç çıkartmak için yeterlidir.

Doğrulama ve test performansı için (Şekil 4.34 b, c), vadide biraz karmaşık performanslar dahi yaklaşık olarak benzer yüzeyler işaret etmektedir. Doğrulama ve test alt kümeleri kullanılarak elde edilen *mse* değerleri genellikle eğitim verilerini kullanarak elde edilenlerden daha yüksek sonuçlar üretmektedir. Gizli katmanlarda 5-20'den daha az nöron bulunan ağlar, *mse* değerleri 0,009'dan 0,007'ye düşmektedir Bundan sonra, değerler kademeli olarak azalır ancak eğitim seti kullanılarak elde edilen vadi değerlerinden daha yüksektir. Vadideki *mse* değerleri 0,004 ile 0,008 arasında değişmektedir. 0,04 ve 0,03 *mse* değerleri de tahmin edilmektedir, ancak vadilerde baskın değildir. Tüm bu değişimlerden hareketle doğrulama ve test performansları yaklaşık olarak benzer bir performansa işaret ettikleri anlaşılmaktadır.

Veritabanının % 70'ini eğitim maksatlı kullanıldığı düşünüldüğünde, eğitimin vadisi daha pürüzsüz ve daha kararlı olan net bir yüzeyle daha iyi bir performans sağlanan sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır. 35'in üzerindeki gizli katmanlardaki nöron sayısı kullanımını, eğitim yüzeyine göre 0,002 olan *mse* değerinde önemli bir değişikliğe neden olmayabilir. Diğer taraftan, eğitim performansında, her gizli katmanda 35'ten fazla nöron

kullanıldığında, *NH1* ve *NH2* arasındaki orana bakılmaksızın iyi eğitilmiş bir ağın elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, *NH1* ve *NH2* sayısı 35'ten yüksek olan eğitim performans yüzeyine dayalı olarak bir ilk ipucu elde edilebilir ve gizli katmanlar aynı sayıda nörona sahip olabilirler. Bu gerekçeler ışığında iki gizli katman için 45 nöronun seçilmesine karar verilmiştir. Bu çalışmada özellikle 126:45:45:45'lik bir ANN mimarisi, Tip 2 giriş verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Gizli katmanların boyutu eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansına bağlı olarak ayarlanabilir. Ayrıca, istenen hedefler ve tahmin edilen çıktılar arasındaki korelasyon katsayısı, *R*-değeri de ayarlama için dikkate alınmaktadır.

Önerilen ANN modeli, hafif ve asimetrik bir hasar senaryosu için ANN'nin hasar senaryosunu tahmin edebilmek maksadıyla gerçekleştirilmektedir. Tip 2 eğitimli ANN eğitildikten sonra kolonlar ve kirişler için toplam 45 *E* değeri elde edilmektedir. Burada bir kez daha ifade edilmesi gerekir ki birden düşük değerler teorik olarak hasar olarak tanımlanmaktadır. Bbu yaklaşımda hasarsız elemanların bazı *E* değerleri, birden biraz daha az tahmin edilebilir. 45 üyenin tamamı dikkate alındığından hasarlı üyelerin DI değerlerine bağlı olarak hasar tespiti yapabilmek için bir kez daha model tanıma tekniği uygulanmaktadır. Bu adımda, hasar kriteri, yaklaşık % 70'lik güvene eşdeğer 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu ağı kullanan ASY üzerindeki hasar senaryosu için tahminler Şekil 4.35 a ve Şekil 4.36 a'da gösterilmektedir.

Hasar aralığı için (0,7'den *1*'e kadar) üç aralıklı bir ölçeklendirme ile oluşturulan girdi verileri, ASY'deki gerçek hasar senaryosunu genellikle tespit edebilmektedir. Önceki adımda pozitif yanlış tahmin olarak tespit edilmiş, kat S7, gerçek durum olarak hasarsız olarak ayarlanır. İki ağ modelinin öngördüğü gibi S7'de herhangi bir hasar bulunmamaktadır. S7 üzerindeki tüm elemanların *E* değeri yaklaşık olarak birim değere ulaşır. "0" dan küçük DI değerleri, tüm öğelerin sağlığını doğrular. Gerçek hasarlı katlardaki hasarlı bileşenler, S1'deki bir yanlış tahmin dışında genellikle yüksek doğrulukla tahmin edilmektedir. Hasar kriteri 0,5 olarak ayarlandığında, S1 üzerindeki bir kiriş olan 121 numaralı eleman için olumsuz bir yanlış tahmin yapılmaktadır. Ayrıca, S1 üzerindeki 141 numaralı eleman ve S10'daki 50 elemanı, 0.5'ten biraz daha küçük bir DI değerine sahiptir. Ağ başka bir ağırlık ve sapma matrisleri kullanılarak yeniden eğitilirse muhtemelen daha yüksek seviyelerde tahmin

kabiliyetine ulaşmak mümkün olur. Bunun nedeni, bu hasarsız elemanlar için tahmin edilen *E* değerlerinin, birim değerden önemli ölçüde daha az olmasıdır. Ek olarak, Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi, *R* değeri sadece 0,8539'dur. Bunun yanı sıra, doğrulama performansı test performansının karşılığı olan 0,005'ten 0,0062'ye göre farklılık göstermektedir. Daha iyi sonuçlar için ağ iyileştirmesi yapılmalıdır. Girdi için daha rafine veriler oluşturmak için girdi veri kümeleri oluşturmak gerekmektedir. Bu maksatla daha yüksek aralıklar, 6 ve 11 uygulanarak bunlardan elde edilen sonuçlar Şekil 4.34 (b, c) ve Şekil 4.35 (b, c)'de sunulmaktadır.

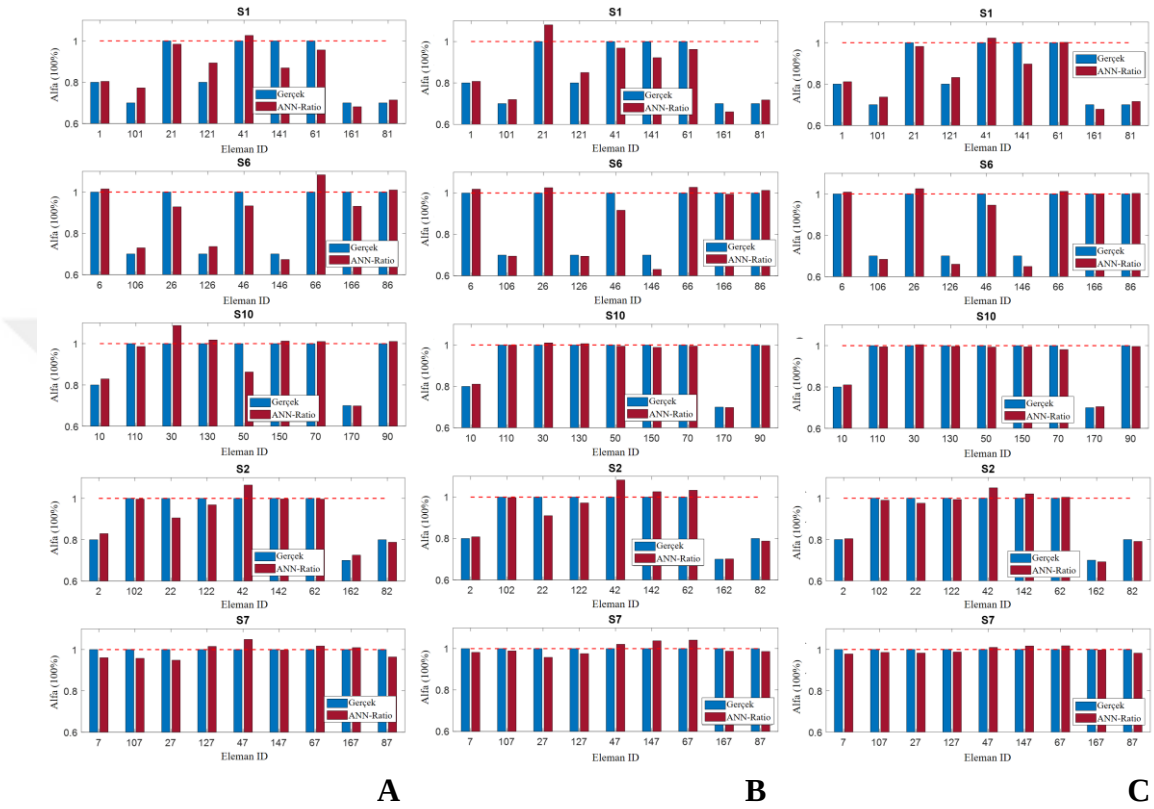
Çizelge 4.7. Çerçevelerle ilgili genel bilgiler

Bölme	Performans			*R*_değeri
	Eğitim	Doğrulama	Test	
4-nokta	0,0022	0,0050	0,0062	0,8539
6-nokta	0,0014	0,0025	0,0023	0,9185
11-nokta	0,0014	0,0018	0,0019	0,9216

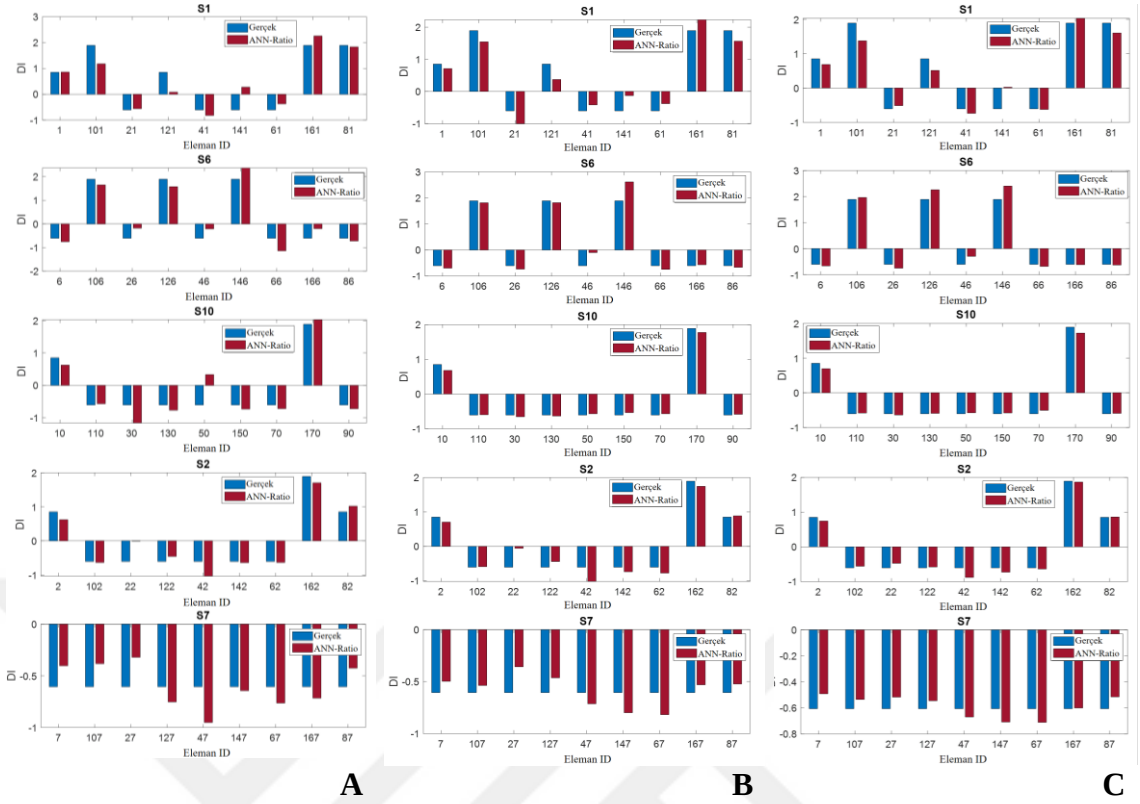
Şekil 4.35 ve Şekil 4.36, hasar aralığı daha yüksek çözünürlüklere bölündüğü için iyileştirilmiş hasar tanımlamasını göstermektedir. Aralık sayısı arttıkça kabul edilebilir tahminler elde edilebilir. 121 bileşenindeki olumsuz yanlış tahmin, 11 nokta bölümünde sabitlenmiştir. 4 noktalı bölmede elde edilen değere göre bu kirişin DI değeri 6 noktalı bölmede gerçek senaryoya daha da yaklaşmakta, ancak yine de 0,5'ten az olarak gerçekleşmektedir. 11 noktalık bölümde hasar kriterine ulaşır. Ayrıca, bileşen 50 ile ilgili sorun, *E* değeri yaklaşık olarak birliğe yükseltildiği için 6 noktalık bölümden düzeltilmiştir. Yüksek çözünürlük, *R*-değeri kabul edilebilir bir değer olan 0,9216'ya kadar çıktığı için en iyi performansı verir. 0,93'e ulaşan parametre iyi bir tahmin vermektedir (Beale ve diğerleri, 2018). Ayrıca, eğitim, doğrulama ve test alt seti için performanslar da birbirine benzer gerçekleşir. Bu nedenle nihai model, kabul edilebilir bir *R* değeri ve iyi performansa sahip en iyi model olarak kabul edilir.

Eğitim sürecini hızlandırmak için, 3 mod yerine sadece mod 1'den gelen bilgiler kullanılarak Tip 2 girişinin boyutu küçültülür ve ardından sonuçlar Şekil 4.37'deki gibi elde edilir. Yalnızca mod 1'i kullanan bilgiler, doğru sonuçlar elde etmek için yetersizdir. Hasar lokalizasyonu açısından, en kötü tahmin S1'de ortaya çıkar. Özellikle, 101 ve 161 kirişleri için hasar tespit edilemez. Hasarlı kolon, eleman 121 de tahmin edilememektedir. Bu kabul edilemez çünkü kolonlar kirişlere göre oldukça kritik elemanlardır. Hasar tespiti

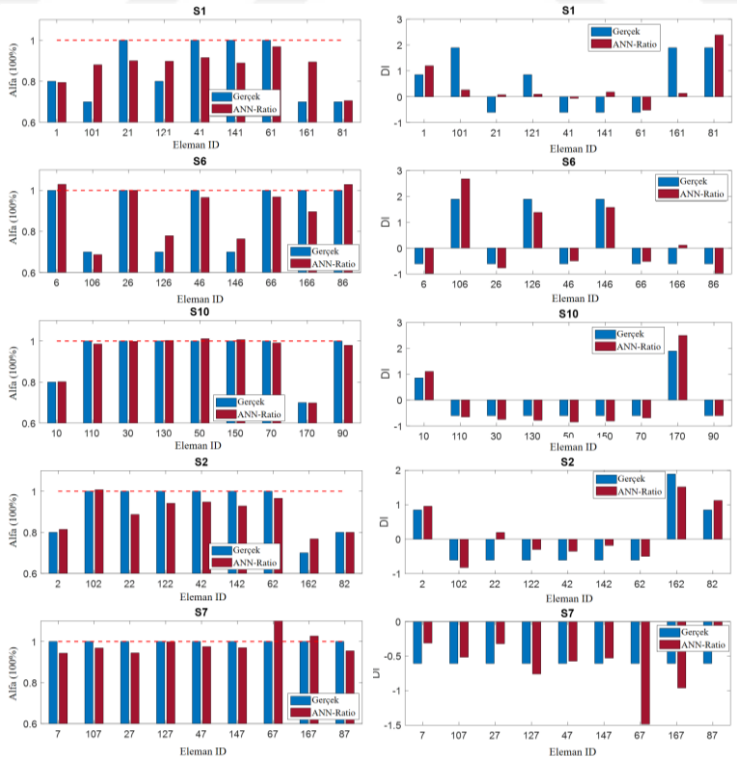
genellikle diğer katlarda kesindir ve S7'nin hasarsız olduğu başarıyla tahmin edilir. Bununla birlikte, özellikle S1'de öğelerin şiddeti doğru bir şekilde tahmin edilemez. Yalnızca ilk modu kullanan giriş verileri bir ağı eğitmek için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.35. ASY için ANN tabanlı *E* tahmini. **A)** 4 noktalı **B)** 6 noktalı **C)** 11 noktalı bölme



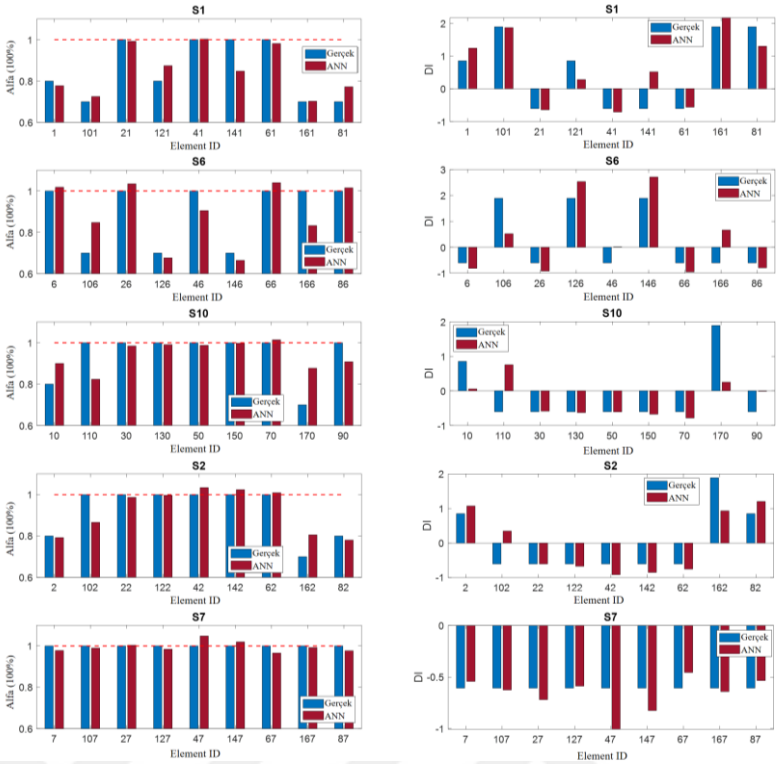
Şekil 4.36. ASY için ANN tabanlı DI tahmini. **A**) 4 noktalı **B**) 6 noktalı **C**) 11 noktalı bölme



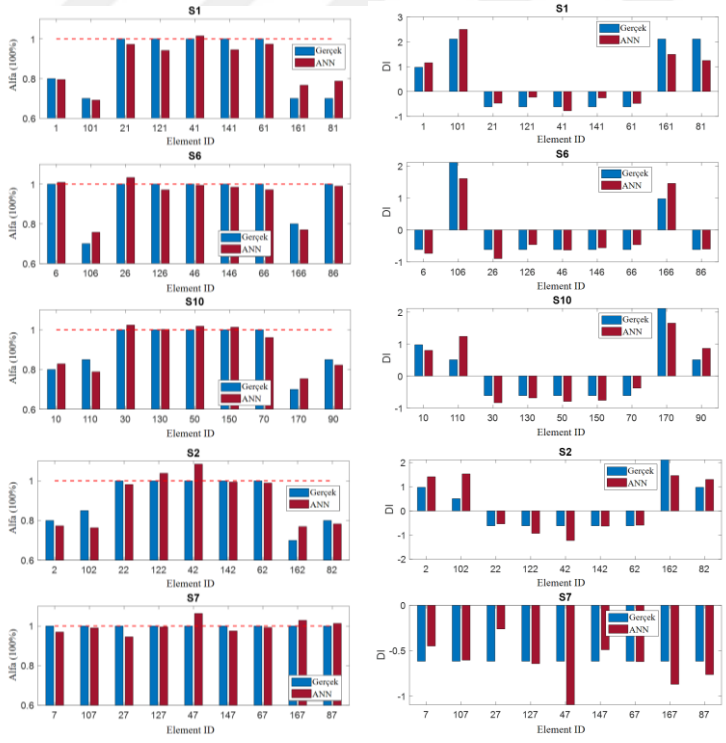
Şekil 4.37. Yalnızca mod 1 ile ASY için sonuçlar

Şekil 4.38, Tip 1 giriş verilerini kullanarak ASY için hasar tanımlama sonuçlarını gösterir. Yalnızca yatay yer değiştirmeler söz konusudur. Katların dönüşü ile ilgili bilgiler dikkate alınmaz. Genel olarak Tip 1 (ANN) kullanılarak eğitilen ağın güçlü olmadığını ve S7'nin zarar görmediğini tahmin edebildiğini gözlemlemek mümkündür Tip 1 kullanılarak eğitilen modelin üretimi, sonuçları yaklaşık olarak simetrik bir formda verir. Ayrıca, bazı unsurların hasar şiddeti, özellikle S1 için hatalı olarak tahmin edilmektedir. Bu, 141, 166, 110 gibi bazı bileşenler için pozitif yanlış tahminlere neden olur. Ek olarak, 121, 106, 10, 170 elemanları, DI'leri kriterden daha az olduğu için gözden kaçmaktadırlar. ANN-Ratio durumunda tüm bu sorunlar görülmez. Tip 1'in ağı eğitmek için yetersiz bilgi olduğu sonucuna varılabilir. Bunun nedeni, yalnızca yanal yer değiştirme modlarının kullanılması asimetrik olarak meydana gelen hasarı ayırt edememesidir. Bu nedenle nihai tahminler doğru değildir. Aksine, SYM gibi simetrik kategoriler için muhtemelen kabul edilebilir tahminlere yol açmaktadır.

Daha az bilgi kullanan Tip 1 girdi verileri, asimetrik bir hasar kategorisini tahmin etmek için yeterince güçlü değildir, ancak Şekil 4.39'de görüldüğü gibi simetrik bir hasar senaryosu için iyi şekilde hasar tahmini yapabilmektedir. SYM gibi sistemde hasar simetrik olarak meydana geldiğinde, her bir simetrik çiftin şiddeti açısından farktan bağımsız olarak tüm hasarlı elemanlar doğru bir şekilde gösterilir. Örneğin, S6'da 106 ve 166 elemanları farklı seviyelerde hasar görmüş ancak Tip 1 verileri kullanılarak hassas bir şekilde tespit edilmiştir. Ayrıca, ASY örneğinde görüldüğü gibi, S7 burada da sağlıklı bir kat olarak onaylanmıştır. Yalnızca yatay yer değiştirme bilgilerini kullanan Tip 1 girdi verilerinin, çoğunlukla simetrik olarak hasar gören yapılardaki hasarı tanımlamak için yeterli sonuçlar ürettiği sonucuna varılabilir. Daha da önemlisi, düşey serbestliklerden elde edilecek bilgiler genellikle yanal olanlardan daha küçük olduklarında bunları ölçmek oldukça zor olabilmektedir.



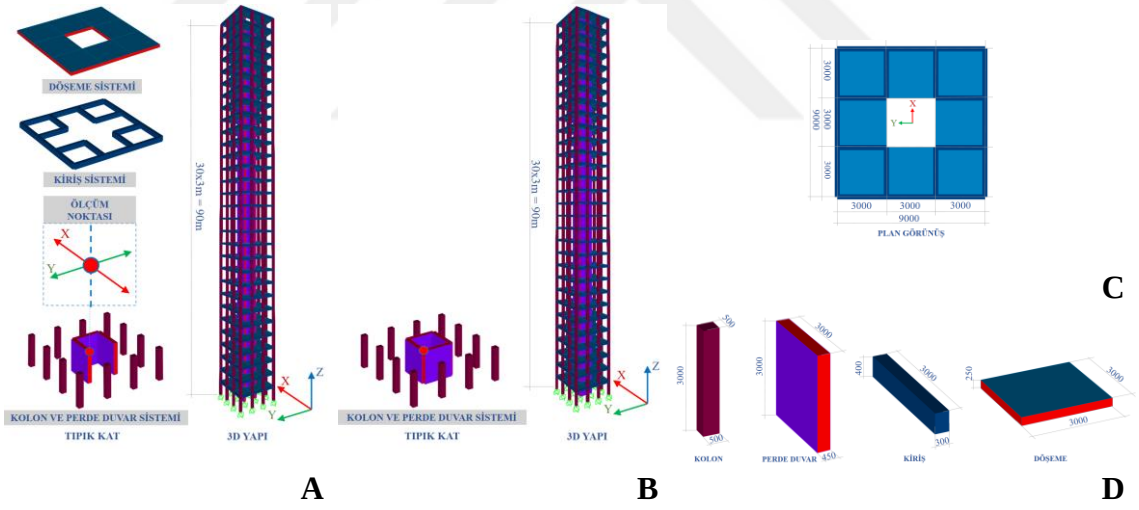
Şekil 4.38. Tip 1 kullanılarak ASY için hasar tespiti



Şekil 4.39. Tip 1 kullanılarak SYM için hasar tespiti

4.3. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-Ters Çözüm-ANN tabanlı prosedürü

Önerilen hibrit yöntemi doğrulamak için Şekil 4.40'daki 30 katlı betonarme yapılar (H=90 m) analiz edilmektedir. Yapılar perde duvarlar, kolonlar, kirişler ve döşemelerden oluşmaktadır. İncelemeye konu edilen yapılar çoğu açıdan birbirine benzerlik göstermelerine karşın, yapıların çekirdekleri birbirinden farklıdır. Şekil 4.40 a'daki binanın çekirdeği yalnızca üç perde duvar içerir, şekilden de görülebileceği üzere X ekseninde simetrik, Y ekseninde asimetrik olan bir yapı sistemini tarif eder. Bu yapı ASY-3D olarak adlandırılır. Şekil 4.40 b'deki binanın çekirdek sisteminde her iki eksende simetrik olacak şekilde dört adet perde duvar bulunmaktadır. SYM-3D olarak adlandırılır. Ancak çekirdek sistemdeki düzensizliği hesaba katmak için öncelikle ASY-3D üzerinde tam bir inceleme yapılır. Daha sonra önerilen Teknik, simetrik yapı olan SYM-3D üzerinde de uygulanmıştır. Çalışma kapsamında MATLAB®'dan yardımıyla yazılan kod adlı *NL3D_INVSOL_ANN.mat* (Nguyen ve Livaoğlu, 2021) kullanılmaktadır.



Şekil 4.40. Durum çalışması. **A)** ASY-3D **B)** SYM-3D **C**) Plan görünüş (mm) **D)** Eleman boyutları (mm)

Her katın yüksekliği 3 m olarak seçilmiştir. Çekirdek ve kolonların temelde ankastre olarak mesnetlendikleri varsayılmaktadır. Ayrıntılı boyutlar Şekil 4.40'ta verilmektedir. Sadeleştirme için, her bir bileşen (perde duvar, kolon, kiriş, ve döşeme) bir eleman olarak kabul edilir. Tüm bileşenler için sadece bir sınıf beton kullanılır. Özellikle Young modülü E 24,855 GPa, Poisson oranı 0,2 ve kütle yoğunluğu ρ 2403 kg/m^3 seçilmiştir. Pratik bir

durumu modelleyebilmek için, döşemeler üzerindeki düzgün yayılı yükleri, sabit yükü (zati yükleri hariç 2 kN/m^2) ve hareketli yükü (3,5 kN/m^2) içerir.

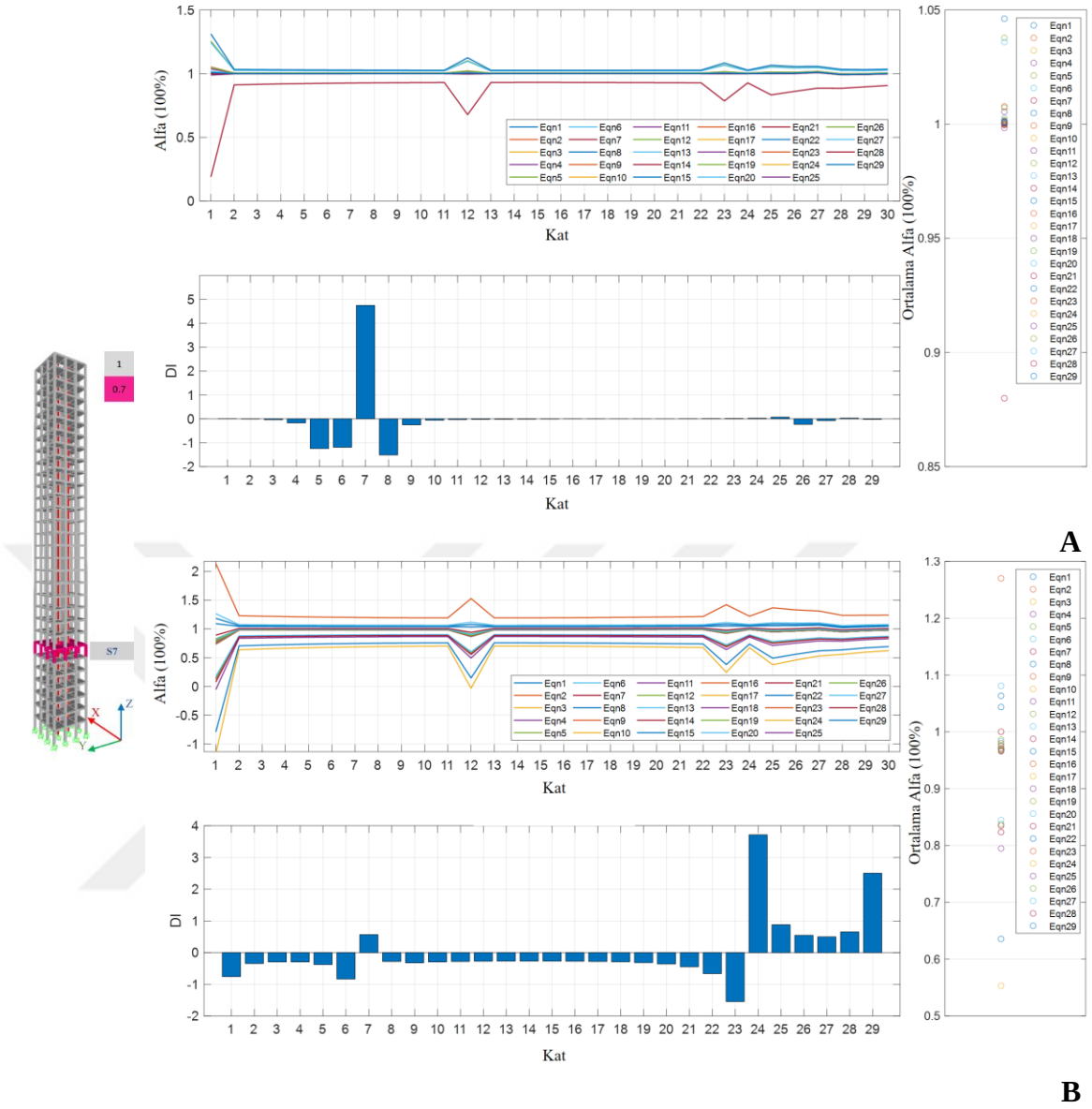
İki yönde (X ve Y) ilk iki eğilme modu kütle katılım oranları Çizelge 4.8'de gösterilmektedir. Çizelge 4.8'de "*U*" harfinin yanal yer değiştirmeyi, "*R*" harfinin ise dönme yer değiştirmesini temsil ettiği not edilmiştir. Örneğin, "*RZ*" terimi, Z eksenine göre dönmeyi temsil etmektedir. ASY-3D'de X-doğrultusundaki her iki mod için de kütle katılımı ilgili sütundan görülebilir. ASY sisteminin bir perde duvarın olmaması nedeniyle sitemde simetriyi bozması ASY-3D ile SYM-3D arasında ilk modlarda burulma katkılarının varlığı doğrudan bu durum ile açıklanabilir.

Çizelge 4.8. Hasarsız durum için ASY-3D ve SYM-3D kütle katılım oranları

Yapı	Eksen	Mod	Periyod	Modal Katılım Kitle Oranları				
				UX	UY	RX	RY	RZ
			Saniye	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz
ASY	X	1	3.247	0.66	0	0	0.35	0
		2	0.731	0.19	0	0	0.28	0
	Y	1	3.226	0	0.65	0.33	0	0.02184
		2	0.784	0	0.15	0.22	0	0.0092
SYM	X	1	3.186	0.65	0	0	0.36	0
		2	0.685	0.19	0	0	0.27	0

4.3.1. Asimetrik yapı (ASY-3D) için hasar tespiti

İlk inceleme ASY-3D'de sadece tek bir hasar senaryosu dikkate alınarak yapılmıştır. Önerilen yöntemde varsayıldığı gibi, hasarlı bir kat üzerindeki tüm bileşenlerin *E* değerleri aynı miktarda α kadar azaltılır. Bu kısımda parametre 0,7, % 30 hasarı karakterize edecek şekilde seçilmiştir. Önerilen ortalama alma şemasının performansı, hasarın S7'de meydana geldiği M1 modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Hasar senaryosu Şekil 4.41'de verilmektedir. Yüzey renkleri her bir elemanın α değerini temsil etmektedir. Tek hasar için kriter 2 olarak belirlenmiştir (% 97,7 güven).



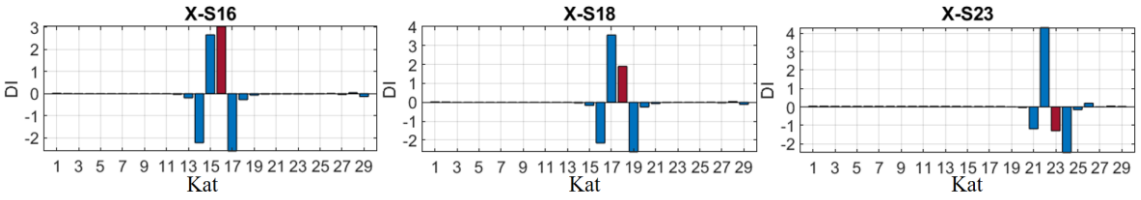
Şekil 4.41. M1 için hasar tahmin sonuçları. **A)** X yönü **B)** Y yönü

Şekil 4.41'de verilen sonuçların denklem 7 ile mod 1'den sabit 29 denklem ve mod 2'den 7'nci denklem kullanılarak elde edilen α-vektörü yardımıyla elde edilmiştir. 7'nci denklem α_7 ve α_8 olmak üzere iki değişken içermektedir. Ortalama alma şemasını uygularken, ortalaması alınan vektörün 7'nci üyesi önemli ölçüde 1'den düşüktür, diğerleri ise bundan farklıdır, bu da istatistiksel tekniğin yüksek bir DI üretmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, S7'de hasar bu yolla tespit edilebilmektedir. Öte yandan, Y doğrultusu sonuçları kullanarak tahmin yapılmak istendiğinde diğer doğrultudan daha zayıf şekilde sonuçlar elde edilebildiği görülmektedir. ASY-3D için X-yönündeki basitleştirilmiş sistemin hasarını tespit etmek için yeterli olduğu burada ifade edilebilir.

Önerilen yöntemin performansına ilişkin farklı açılardan irdelemeler takip eden örneklerde yapılmaktadır.

Şekil 4.42, genel olarak, hasarın binanın alt katlarından üste doğru hareket ettiğinde hasar tespit sonuçlarının değişimi görülmektedir. Elde edilen tüm sonuçların sadece bir kısmı burada gösterilmektedir. Her grafiğin adı açık bir şekilde ifade edilmek istenirse, örneğin, X-S16 grafiği, hasarın gerçekte S16'da meydana geldiği ve tahminin X yönünde elde edilen modal veriler dikkate alınarak yapıldığı anlamına gelir. Her grafikte, kırmızı renkteki DI değeri, gerçekte hasar görmüş katı temsil eder.

Tek hasar yerinin tam olarak araştırması, binanın yüksekliği (alçak, orta, ve yüksek) ile değişen seviyelerde genellikle üç tür performansın olduğunu göstermektedir. İlk olarak, düşük bir yükseklikte hasar meydana gelmesi durumunda, doğrudan yüksek DI'lere dayalı olarak önerilen yöntem ile hasarın tespiti rahatlıkla mümkün olabilmektedir. Örneğin, Şekil 4.41 a'da, S7'nin DI'si, komşularının DI'lerinden önemli ölçüde yüksektir. Benzer şekilde bu durum, tek hasarın S1'den S11'e kadar olan katlarda yani binanın alt kısmında oluşması durumunda verilen örneğe benzer şekilde gerçekleşmektedir. Bu tür elemanlar konumları itibari ile burada GroupX_I olarak sınıflandırılırlar. Başka bir deyişle, bu gruptaki katlar doğrudan DI'lerine göre tespit edilebilir.



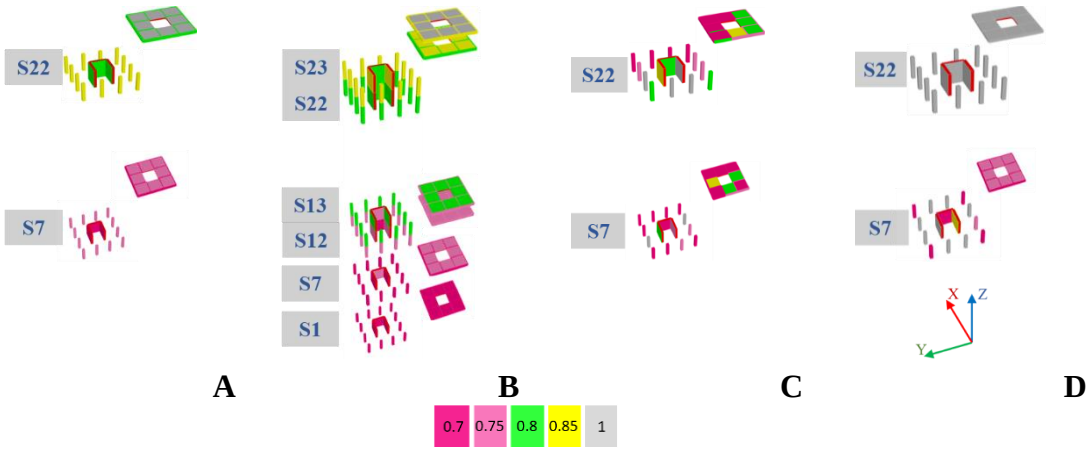
Şekil 4.42. Hasar yerine bağlı DI'lerin tespitindeki hassasiyet

İkinci olarak, sistemin orta kısmında (S12'den S20'ye) hasar oluştuğunda, hasarlı bir katın DI'si giderek azalmakta ve yöntemin sonuçları itibari ile alt komşusunun DI'si ise artmaktadır. Örneğin, Şekil 4.42'teki X-S16 ve X-S18'in sonucunda bu durum görülmektedir. Her durumda, gerçekten hasar görmüş katın ve onun alt komşu katının DI'leri diğerlerinden önemli ölçüde yüksektir. Genel olarak, hasar iki katta yer alabilir, ancak gerçek hasarı tespit etmek için DI'lerin eğilimine dayalı başka bir gözlem yapılmalıdır. Özellikle X-S16 örneğini ele alalım. S16'nın DI'si (gerçek hasar), S15'in

DI'sinden (hasarsız) daha yüksektir. Gerçek hasara sahip olan kata ait DI'nin alt komşusunun DI'sinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Durum S12'den S16'ya kadar olan katlarda bu şekilde gerçekleşirken, S17'den S20'ye ters bir eğilim görülmektedir. Örneğin, X-S18'de, hasarlı katın DI'si, S18, hasarsız komşusu S17'nin DI'sinden daha düşüktür. Böylece, S12'den S20'ye kadar hasarı doğru tespit etmek için iki farklı eğilim dikkate alınmalıdır. Binanın orta kısmındaki katlar (S12'den S20'ye) GroupX_II olarak sınıflandırılır. GroupX_I ile karşılaştırıldığında, GroupX_II'deki katlar, alt komşularının DI'leri de yüksek olduğu için daha zor tespit edilir. Ancak iki eğilim de dikkatli bir şekilde ele alındığında gerçek hasar doğru bir şekilde tespit edilebilir.

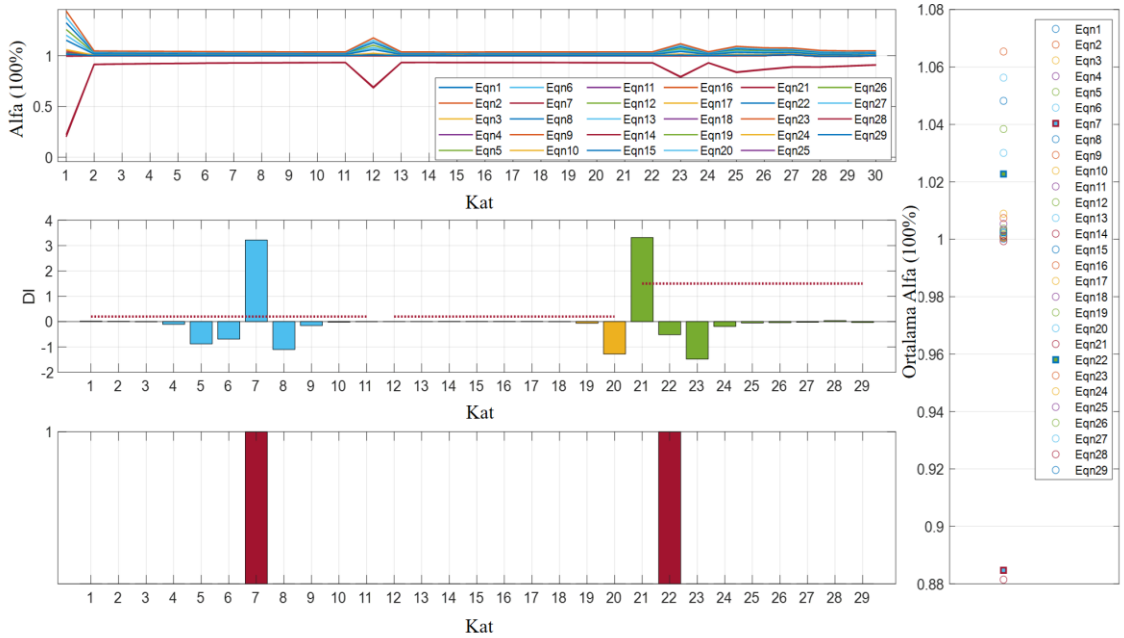
Üçüncü olarak, S21'den S26'ya kadar binanın üst kısmında tek bir hasar meydana geldiğinde, hasar tespiti daha zor hale gelir. Şekil 4.42'deki X-S23 sonucu örnek olarak alınabilir. Hasarlı katın (S23) DI'si sıfırdan düşüktür. Öte yandan, alt komşusunun DI'si önemli ölçüde yüksektir ve kriteri geçmektedir. Bu nedenle, GroupX_I ve GroupX_II için uygulanan kurallar bu katlar için çalışmaz. Neyse ki, sadece komşunun gerçek hasarının DI'si yüksekken, diğerleri sıfırdan az elde edilmektedir. Bu gözlemin sayesinde, gerçek hasar, alt komşusunun DI'sinden istifade edilerek dolaylı olarak tahmin edilebilir. Örneğin, bu yöntem ile gerçekleştirilen birçok örnek sonucuna benzer şekilde yüksek katlardan S22'nin yüksek DI değerine sahip olması S23'teki hasarı işaret etmektedir. Böylece S21'den S26'ya kadar olan katların hasar tespitinde bu hususun dikkate alınması gerekmektedir. Söz konusu yüksek katlardaki bu grup Group X_III olarak sınıflandırılır. Son olarak, 30 katlı bir bina için, S27'den S30'a kadar en üst katlarda nadiren hasar meydana gelir. Bu nedenle, kolaylık için hepsi aynı zamanda GroupX_III olarak sınıflandırılmıştır.

Tekli hasar senaryolarında yapılan incelemelerin ardından, çoklu hasar için de tam bir hasar tespit yöntemi burada tanıtılmaktadır. Ayrıca, hasarlı her katta, hasar senaryoları tüm elemanların aynı şiddette hasar gördüğü basit hasar durumuna göre daha karmaşıktır. Bunlardan bazı hasar senaryolarının gösterimi Şekil 4.43'te gösterilmektedir.



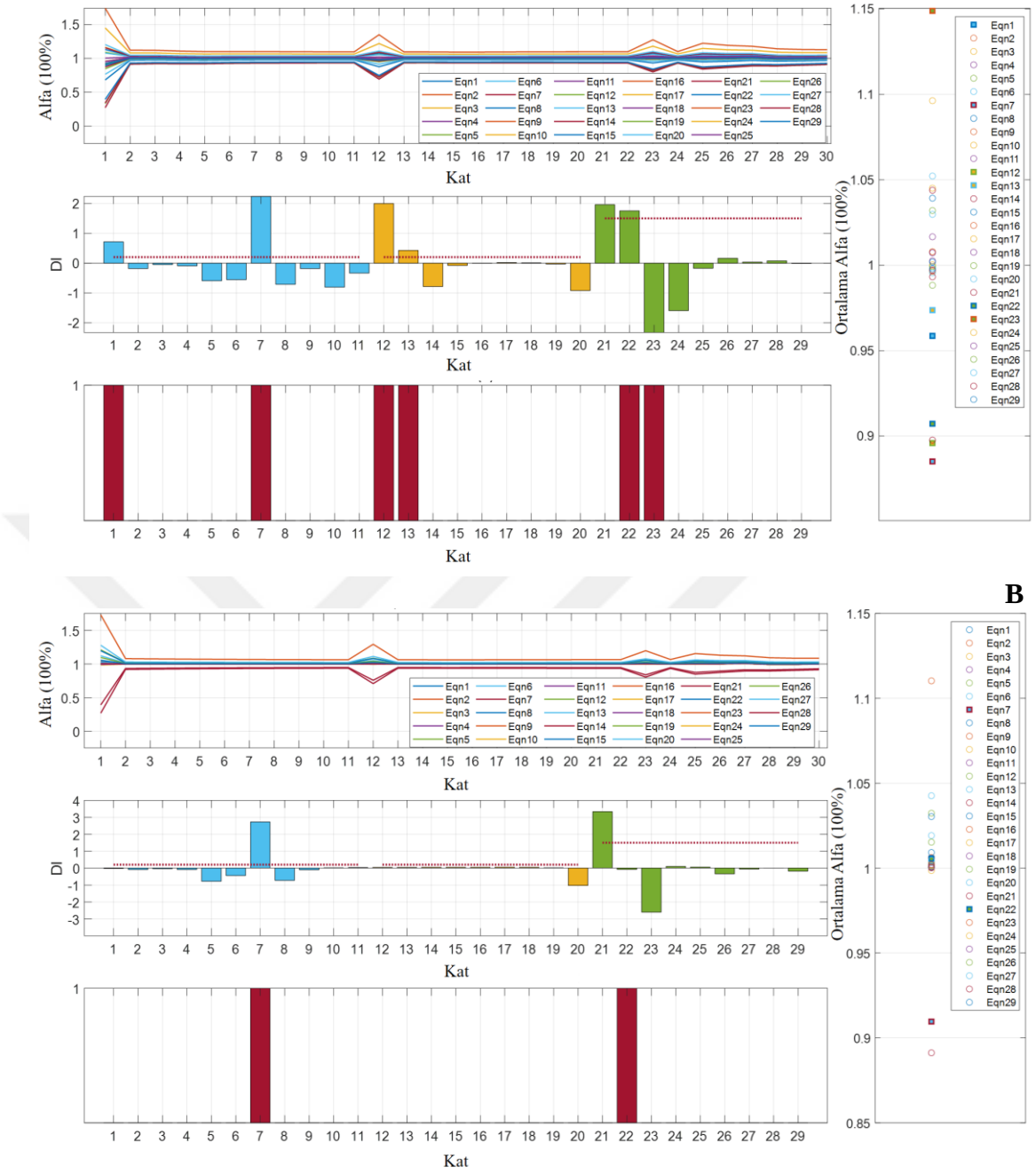
Şekil 4.43. Hasar senaryoları. **A**) M2, B) M3, **C**) M4, **D**) M5

Şekil 4.44, M2 ve M3 senaryoları için hasar tahmin sonuçlarını göstermektedir. Söz konusu bu hasarlar çoklu hasar durumu için yalnızca X deki değerlendirmeleri içermektedir. Group_I ve Group_II için hasar kriteri 0,2 (yaklaşık % 60 güven düzeyi) olarak belirlenmiştir. Group_III için ise 1,5 değeri (yaklaşık % 90 güven düzeyi) seçilmiştir. Kriterler önceki incelemeye göre düşüktür. Ayrıca, yüksek yapıların alt ve orta kısımlarında daha çok hasar meydana geldiği için kriterler her grup için farklı belirlenmiştir.



A

Şekil 4.44. Hasar tespit tekniğinin performansı. **A)** M2, **B)** M3, **C)** M4



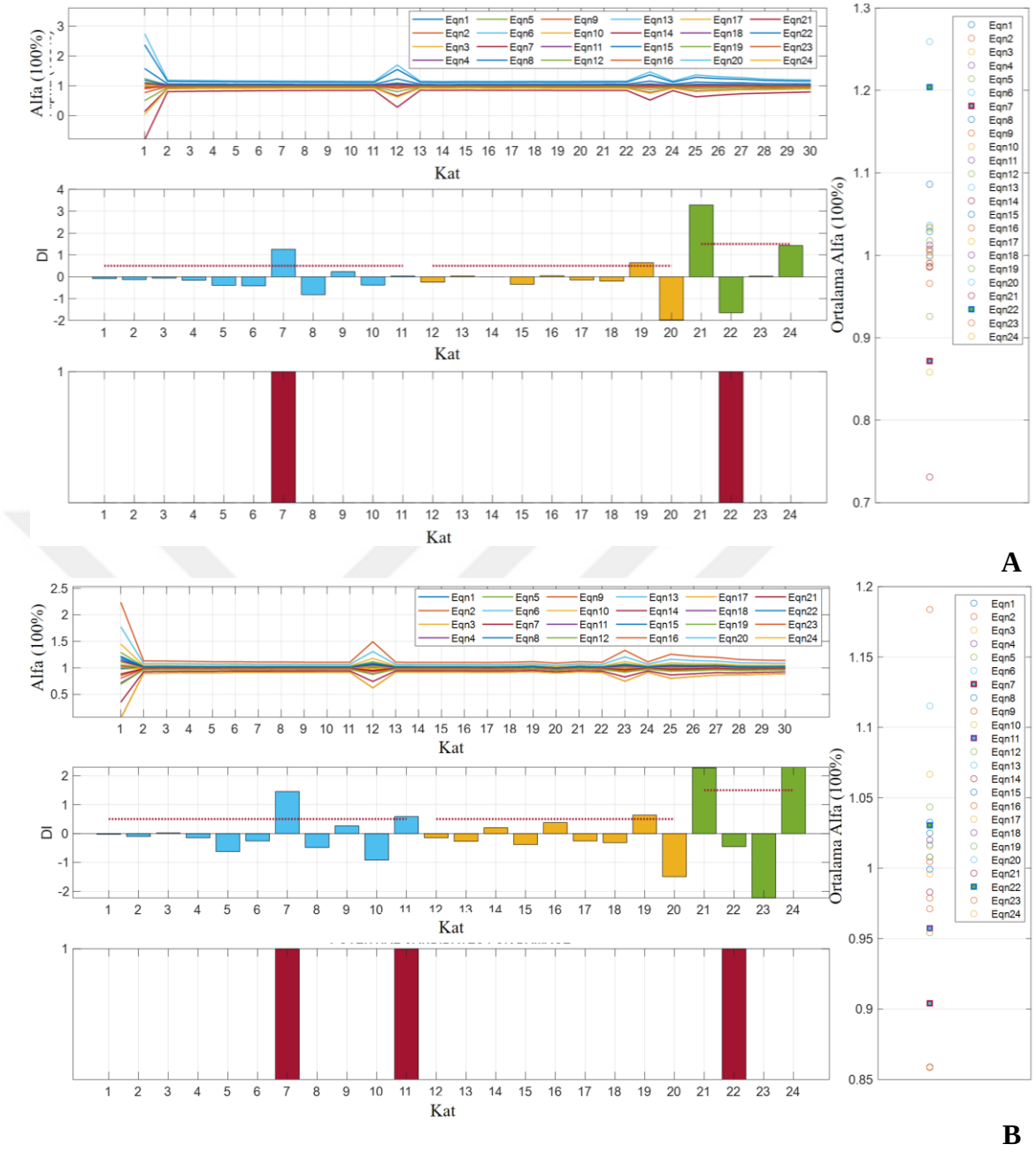
Şekil 4.44. Hasar tespit tekniğinin performansı. **A)** M2, **B)** M3, **C)** M4 (devam)

M2 hasar senaryosu için S7 DI'sine göre doğrudan tespit edilebilmektedir. Öte yandan, S21 DI hasar kriterine ulaştığı için S22 dolaylı olarak tespit edilebilmektedir. M3'deki hasar senaryosu daha karmaşıktır. Bununla birlikte, önerilen teknik hasarlı katları hala doğru bir şekilde göstermektedir. Group_I'e ait olan S1 ve S7 doğrudan tespit edilmektedir. Group_II için, S12 ve S13'ün DI'leri kriter değerlerine ulaşmaktadır. S12'nin DI'si ise daha önce anlatıldığı üzere S13'ün hasarını doğrular. S12 için, sadece

S13'ün hasar görmesi durumunda, Şekil 4.42'te incelendiği gibi S13'ün DI'sinin S12'den daha yüksek olması gerektiği hatırlatılmalıdır. S12'nin DI'si S13'ten daha yüksektir ve bu S12'nin de hasar gördüğü anlamına gelir. Binanın üst kısmında, S22 ve S21'in DI'si sırasıyla S23 ve S22'de hasarı gösterir. Sonuç olarak, M3'teki tüm hasarlı hikayeler başarıyla tahmin edilmiş olmaktadır.

Önerilen yöntemin çoklu hasarları lokalize edebildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, dikkate alınan hasar senaryoları karmaşık ve ciddi düzeydedirler. Her kattaki elemanların çoğunun hasarlı olması onları kolayca tespit edilebilir hale getirir. Yöntem daha sonra M4'te görüldüğü gibi daha az hasarlı elemanın bulunduğu katları tespit etmek için denenmektedir. M4 için tahmin, Şekil 4.44 c'de tarif edilmektedir. Her hasarlı kattaki hasar senaryosu, yöntemi oluşturmak için kullanılan kabülle karşılaştırıldığında çok karmaşıktır. Önerilen teknik, mod verileri doğru bir şekilde elde edilebildiğinde oldukça umut vericidir.

Ölçüm gürültüsünün önerilen tekniğin sağlamlığı üzerindeki etkileri de bu çalışmada değerlendirilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, gürültü içeren modal veriler, sayısal olarak elde edilen kesin modal verilere doğrudan random gürültü eklenerek simüle edilmektedir. Samami ve Oyadiji (2016), sonlu elemanlar analizinden elde edilen yer değiştirme modu şekilleri için gürültüyü simüle etmek için % 0,001'den % 0,01'e kadar gelişigüzel gürültü seviyeleri uygulamıştır. Yang ve Wang (2010), doğal frekansların diğer modal parametrelere kıyasla yüksek doğrulukla ölçülebileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, frekanslar için gürültü seviyesi mod şekilleri için olanın beşte biri olarak seçilmiştir. Modal veriler gürültüyle kirlendiğinden, hasarsız katların DI değerleri muhtemelen gürültüsüz veri durumlarından daha fazla sapma gösterir. Bu nedenle hasar kriterleri artırılmalıdır. Bu nedenle burada özellikle, GroupX_I ve GroupX_II için 0,5'lik bir kriter belirlenirken, GrupX_III için 1,5 kriter olarak belirlenir. Ayrıca, yüksek katlarda nadiren hasarın meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu nedenle bunların dikkate alınması alt katların DI değerlerini etkileyebilir. Bu çalışmada S24 üstü hasar senaryolarının değerlendirmeye alınmamasına karar verilmiştir. Bu örnekte gürültünün S7 ve S22 üzerinde hasar görmüş M2, M4 üzerindeki etkileri incelenmiştir.

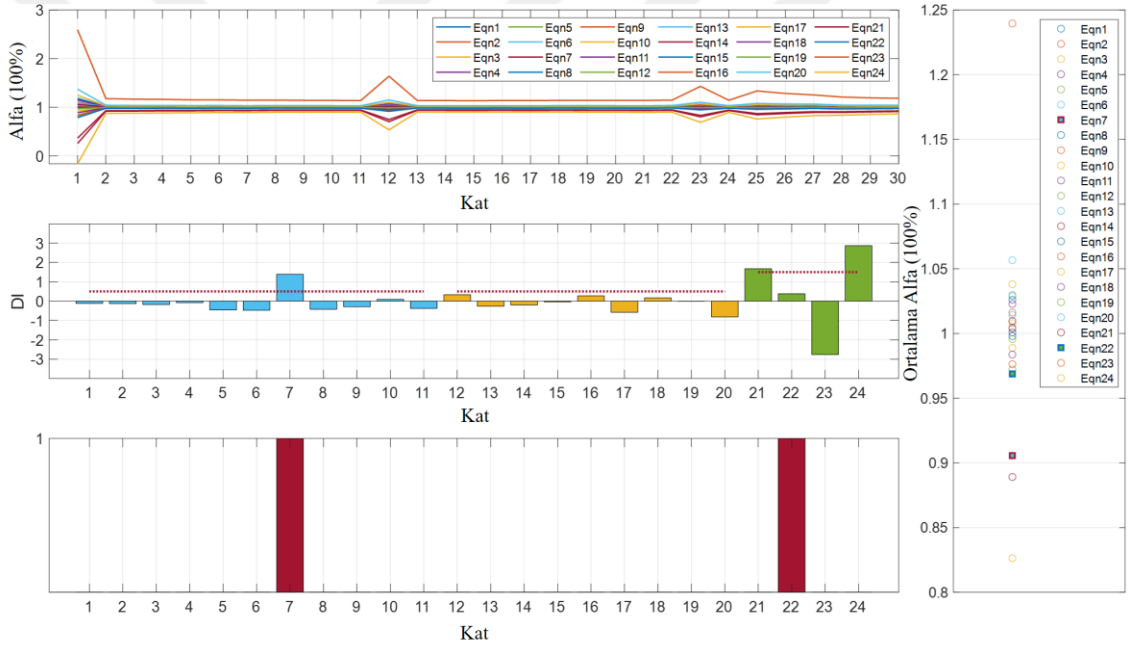


Şekil 4.45. M2 için hasar tespiti. **A**) 0,015-0,003 **B**) 0,02-0,004

Şekil 4.45, M2 senaryosu için hasar tespit sonuçlarını göstermektedir. Tüm perde duvarlar ve kolonlar hasar gördüğü için hasarlı her katın hasar senaryosu oldukça ağır bir düzeyi işaret eder. İki sonuçlar, 0,015-0,03 ve 0,02-0,004 olmak üzere iki gürültü durumu için elde edilmektedir. 0,02-0,004 terimi, mod şekillerindeki rastgele gürültü seviyelerinin % 0,02, frekanslara eklenen gürültü seviyesinin ise % 0.004 olarak seçildiği anlamına gelmektedir. M2 senaryosundaki hasarlı katlar, S7 ve S22, gürültü seviyeleri çifti ise 0,015-0,03 olarak seçilmiştir. Gürültü seviyeleri arttıkça doğruluk

azalır. Özellikle S11, pozitif bir yanlış tahmin olarak görünmektedir. Ancak, aslında hasarlı senaryolar hala tespit edilebilir durumdadırlar.

M2 ile karşılaştırıldığında, M4'teki hasar senaryosu daha hafif ancak daha karmaşıktır. M4 için tahminlerin doğruluğu azalır, ancak gerçek hasarlar genellikle Şekil 4.46'de görüldüğü gibi tespit edilebilir. Özellikle gürültü seviyeleri 0,01-0,002 arasında sınırlandırılırsa doğru hasar tahmini elde edilebilir. M2 ve M4'teki hasar tahminine dayanarak, önerilen hasar tahmin tekniğinin hasar senaryoları hafiflediğinde gürültüye karşı daha duyarlı olduğu görülmektedir. Önerilen tekniğin, gürültü düşük seviyelerde, özellikle 0,01-0,002 düzeylerinde hasar yerinin tespiti konusunda yeterli düzeyde sonuçlar ürettiği görülmektedir.



Şekil 4.46. M4 için 0,01-0,002 seviyelerinde hasar tespiti

Hasarlı katları tespit etmek için yerelleştirme sürecinden sonra, bu çalışma, S7 ve S22'deki hasarlı elemanları tespit etmek için ANN modelini eğiterek elemanların tespitini amaçlamaktadır. Ağın mimarisi Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Gürültüsüz ve gürültülü modal veriler dikkate alınarak, birbirine dik iki yöndeki modalara ait (X ve Y) frekanslar ve mod şekillerini içeren ilk üç eğilme modu kullanılmaktadır.

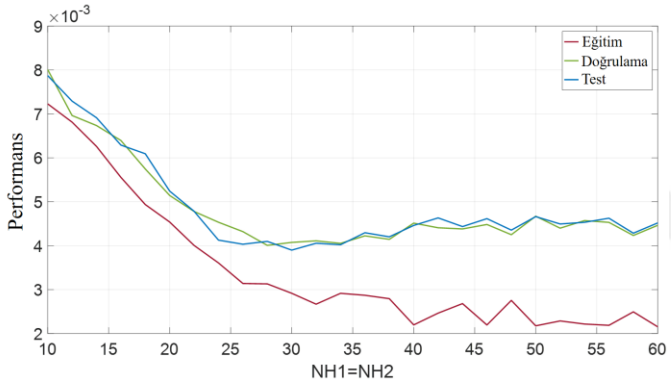
Burada, bir elamanın sağlığının $\alpha_e E$' ile ifade edildiği daha önceki bölümlerden hatırlanacaktır (e =1, 2, 3…, NF). α_e değerlerinin 0 ile 1 arasında olması beklenir. Her katta hasarlı katlardaki perde duvar ve kolonların her biri ağın çıkış katmanında bilinmeyen bir faktöre atanır (Şekil 3.8 c). Özellikle 12 kolon ve 3 perde duvar tam olarak dikkate alınmaktadır. Bunun yanı sıra, her kattaki tüm döşemeler sadece bir faktöre atanmaktadır. Her kattaki kirişler biri X yönü, diğeri Y yönü olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Daha sonra her grup bir faktöre atanır. Sonuç olarak, her kat için toplam 18 faktör vardır. Sonuç olarak, çıktı katmanındaki faktör sayısı, NF, 36'ya eşittir.

Her iki yöndeki ilk üç eğilme moduna ait veriler dikkate alınmaktadır. Gelişigüzel bir hasar meydana geldiğinden, binanın muhtemelen sadece bir yönde veya en düşük üç modda her iki yönde titreştiği not edilmelidir. Bununla birlikte, her titreşimde yalnızca baskın modun dikkate alındığı durumda, tipik bir girdi vektörünün (NI) uzunluğu 186 değerini almaktadır. Daha iyi eğitim verimliliği için her özvektörün maksimum değerine normalize edildiğine dikkat edilmelidir.

36 faktörlü ağ veri tabanını oluşturmak maksadıyla, 2 basit durum (hasarsız ve hasarlı) dikkate alınarak örnekleri belirlemek için OA yöntemi uygulanarak elde edilmektedir. NF (36) değerine dayalı olarak, Sloane (2020) kütüphanesindeki *oa.72.36.2.3.will* dizisi uygulanır. Bundan sonra, 11 noktalı bölme kullanılarak Latin hypercube sampling tekniği uyarlanarak, mevcut dizinin her çalışmasında 0,7 ile 1 arasında değişen önem dereceleri hasarlı üyeler halinde düzenlenir. Sonuç olarak, 792 kombinasyon oluşturulmuştur. Bunların % 75'i eğitim kalıpları için, diğer % 15'i doğrulama süreci için ve geri kalan % 15'i de test prosedürü için gelişigüzel seçilmiştir. Eğitim süreci, *mse* açısından herhangi bir iyileştirme olmaksızın sürekli altı yinelemeden sonra otomatik olarak durur.

Gizli katmanlardaki ($NH1$ ve $NH2$) nöron sayısını seçmek için deneme yanılma yöntemi uygulanır. Bunun yanı sıra, 2D problem için elde edilen sonuçlara dayanarak (Şekil 4.34), 2 katmanlı bir ağın, gizli katmanlarda aynı sayıda nöron kullanılarak, $NH1 = NH2$ iyi bir şekilde eğitilebileceği bilinmektedir. Deneme yanılma işlemi, nöron sayısı 10'dan 60'a 2 ara ile artırılarak 26 sonuç elde edilerek gerçekleştirilir.

Deneme yanılma işlemi gürültülü giriş verileri kullanılarak yapılır. An (1996), hız eğitimi süreci açısından gürültü enjeksiyonunun etkinliğini göstermiştir. Giriş verilerini kirletmek için kullanılan gürültü seviyeleri uygun şekilde seçilmelidir. Karıştırıcı gürültünün varyansı, Hjelmstad ve Shin'de (1997) görüldüğü gibi ölçüm gürültüsünün varyansıyla aynı olmalıdır. Daha önce değerlendirildiği gibi, Adım 1, düşük gürültü seviyelerinde (0,01-0,002) kabul edilebilir sonuçlar verebilir. Bu kısımda ağın giriş verileri bu gürültü seviyeleri ile kirlenmektedir. Deneme yanılma sürecinin sonuçları daha sonra Şekil 4.47'da gösterilmektedir. 32 nöron sayısından sonra eğitim, doğrulama ve test bölümlerinin performansı gelişmez. İki ağı eğitmek için her gizli katmanda 32 nöron sayısı seçilir. Gürültüsüz girdi verileri kullanılarak eğitilen modele Deterministik ANN, gürültülü girdi verileri kullanılarak eğitilen ağa ise İstatistiksel ANN isimleri verilmektedir.



Şekil 4.47. ANN performansı

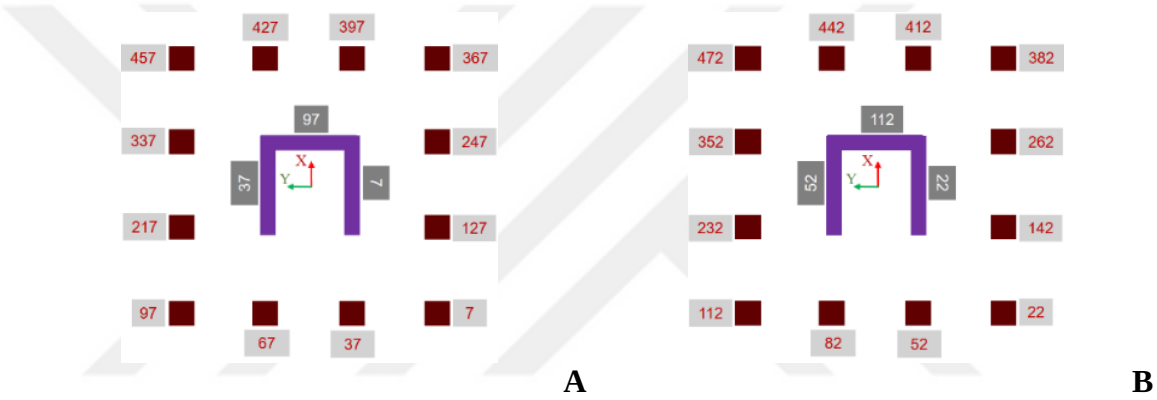
İki eğitilmiş ağın performansları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir. Deterministik ANN, İstatistiksel ANN'den daha yüksek doğrulukla elde edilir ve dahası hızlı eğitilir. Deterministik ANN'nın *mse* değeri düşüktür, bu değer Chang ve diğerleri (2018) tarafından hedeflendiği gibi yaklaşık olarak 10^{-3}'e eşittir. Doğrulama ve test bölümlerinin performansı arasında önemli bir fark yoktur. *R* değeri ise 0,9401 olarak hesaplanmaktadır. Bu değer Beale ve diğerleri (2018) tarafından önerilen 0,93 değerinden daha yüksektir. İstatistiksel ANN ise daha düşük doğruluk düzeyinde, ancak hızlı bir şekilde elde edilir. Bunun yanı sıra, bu bölümün amacı, hasarlı elemanların şiddetini tam olarak tahmin etmekten ziyade yerini belirlemektir. Bu nedenle, İstatistiksel ANN'nin performansı da kabul edilebilir düzeydedir.

Çizelge 4.9. ANN performansı

Ağ	Performans			*R_değeri*	Zaman (Dakika)
	Eğitim	Doğrulama	Test		
Deterministik ANN	0.0012	0.0015	0.0014	0.9401	88*
İstatistiksel ANN	0.0024	0.0041	0.004	0.8713	13*

*işlem zamanları Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2650 v3 @ 2.30GHz (x2 işlemci), 128 GB RAM içindir

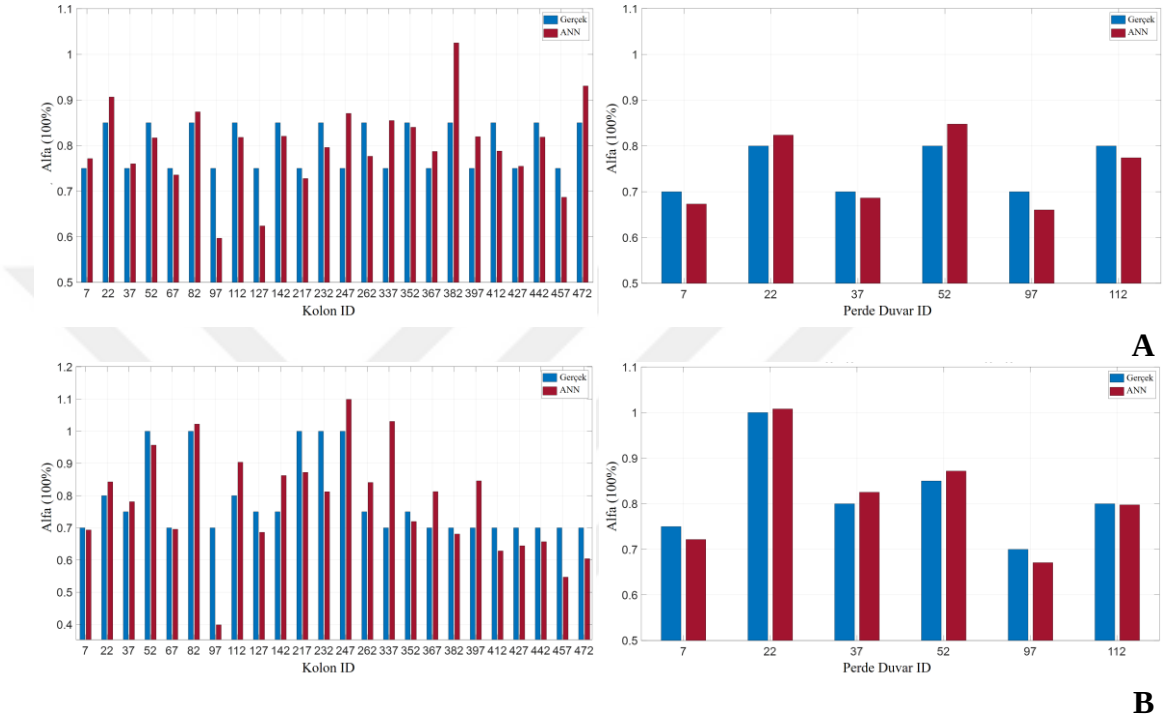
M2 ve M4 üzerindeki hasar tespit edilirken Deterministik ANN'nin sağlamlığı değerlendirilir. Eğitilmiş ağları test etmeden önce, Şekil 4.40'ta S7 ve S22 üzerindeki perde duvarların ve kolonların kimliklerini (ID) temsile den numaralar net bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.48. Kimlik numaraları (ID). **A)** S7 **B)** S22

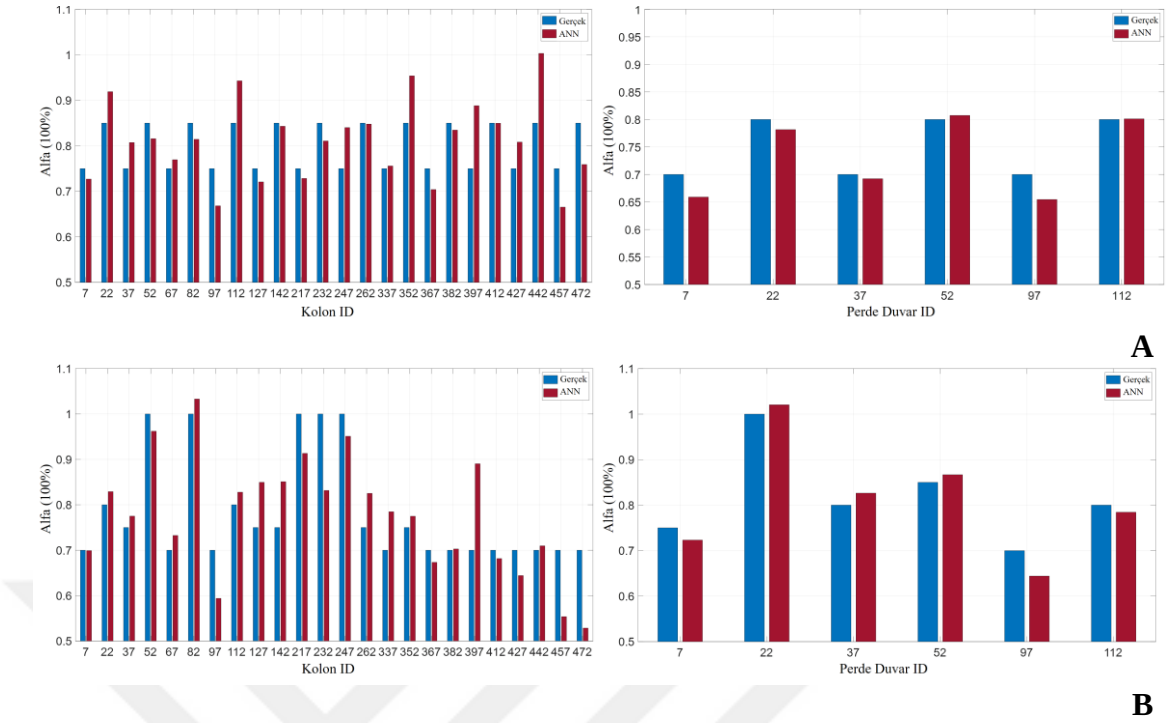
Şekil 4.49'de görüldüğü gibi, S7 ve S22 üzerindeki hasarlı perde duvarlar ve kolonlar, hasar senaryolarının karmaşıklığına bakılmaksızın eğitimli ANN kullanılarak başarılı bir şekilde gösterilir. Modeller için, tüm perde duvarların tahmin edilen α değerleri, gerçek muadilleriyle yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle hasarlı perde duvarlar doğru bir şekilde tespit edilebilmektedir. Öte yandan, kolonlar için, gerçek ve tahmini parametreler arasında bazı küçük sapmalar vardır. Yüksek binalarda perde duvarların gerek yatay gerekse düşey taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlar olduğunu, kolonların ise çoğunlukla düşey taşıyıcı sistemin bir parçası olduklarını hatırlatmak uygun olacaktır. Bu, perde duvarların daha doğru algılanmasını sağlar. Bununla birlikte, örneğin 0,90'dan küçük bir hasar kriteri belirlenirse, hasarlı kolonlar doğru bir şekilde ayırt edilebilir. Sonuç olarak, dört modeldeki çoğu hasarlı kolon tespit edilirken, M2 ve M4'te bazı yanlış tahminler yapılabilmektedir. Ancak, toplam doğru tahmin sayısına kıyasla hata sayısı son derece düşük olduğu aşağıda verilen değerlendirmelerden görülebilmektedir.

Ölçülen mod verileri gürültüye maruz kaldığından, Deterministik ANN artık doğru hasar tahmini yapamamaktadır. Öngörülen α değerleri güvenilir değildir. Elde edilen sonuçlar buna işaret etmektedir. Sorunu çözmek için ölçülen gürültülü veriler İstatistiksel ANN tarafından test edilmelidir. İstatistiksel ANN'nın M2, M4 üzerindeki hasarı tespit ederken gösterdiği performans Şekil 4.50'de gösterilmektedir.

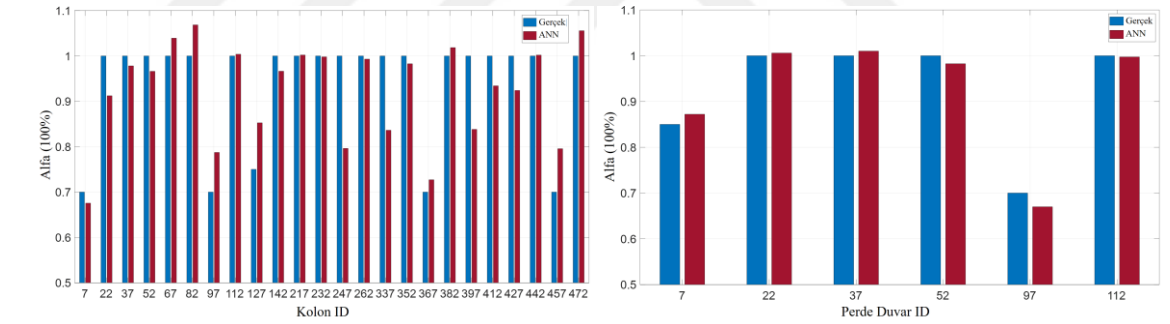


Şekil 4.49. Deterministik ANN tabanlı hasar tahminleri. **A**) M2 **B**) M4

İstatistiksel ANN genel olarak, ölçülen veriler gürültüyle kirlendiğinde kabul edilebilir hasar tahminleri üretebilmektedir. Deterministik ANN ile elde edilen tahminlere benzer şekilde, hasar senaryolarının karmaşıklığı ve dikkate alınan gürültü seviyeleri bakılmaksızın, perde duvarların tahmini α değerleri yaklaşık olarak gerçek değerlere eşit bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Öte yandan, sütunların tahmin edilen α değerleri, Deterministik ANN'ya göre gerçek değerlerden daha fazla sapma gösterir.



Şekil 4.50. Deterministik ANN tabanlı hasar tahmini. **A)** M2 (0,01-0,002) **B)** M4 (0,005-0,001)



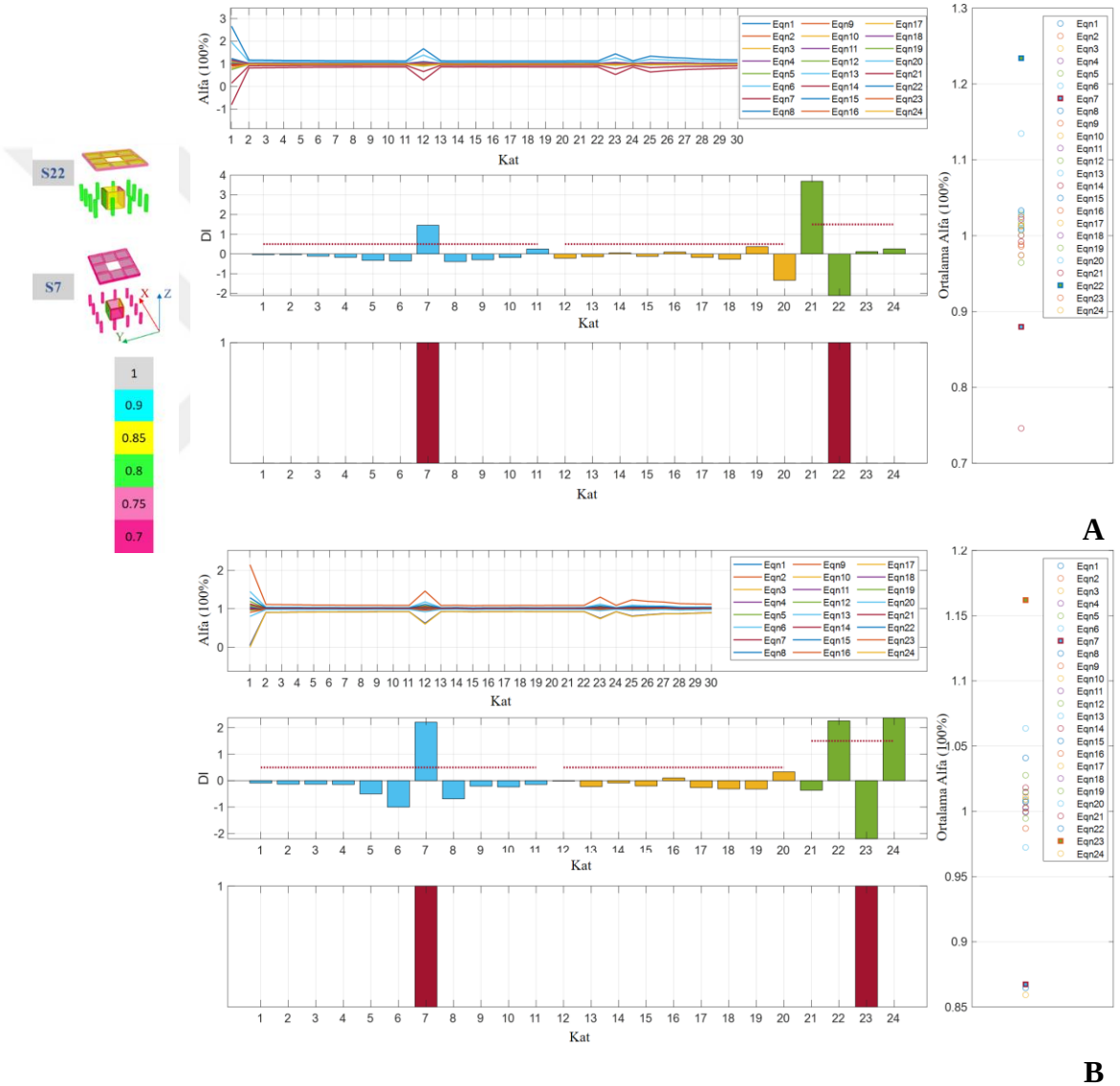
Şekil 4.51. İstatistiksel ANN (0,01-0,002) tabanlı M5 (0,01-0,001) için hasar tahminleri

ANN tabanlı yaklaşım, Adım 1'de elde edilen (varsa) pozitif yanlış tahminler için hasar durumunu da doğrulayabilir. Özellikle gürültü seviyeleri yüksek olduğunda, 1'inciadımda, gürültü nedeniyle potansiyel adaylar olarak bazı olumlu yanlış tahminler yapılabilmektedir. Sorun genelde yüksek katlarda oluşur. 2'nci adımda ANN modelleri oluşturulurken bu yanlış tahminler dikkate alınır. Örneğin, Şekil 4.51'teki M5 modeli sadece S7'de hasar tespit ederken S22 pozitif bir yanlış tahmindir. İstatistiksel ANN kullanılarak S22 hasarsız olarak doğrulanmaktadır. Özellikle S22'de perde duvarlar ve kolonlar için öngörülen α değerlerine dayanarak, üzerinde herhangi bir hasarın olmadığı

sonucuna varılabilir. S7'deki hasarlı elemanlar da kabul edilebilir şekilde tahmin edilmektedir.

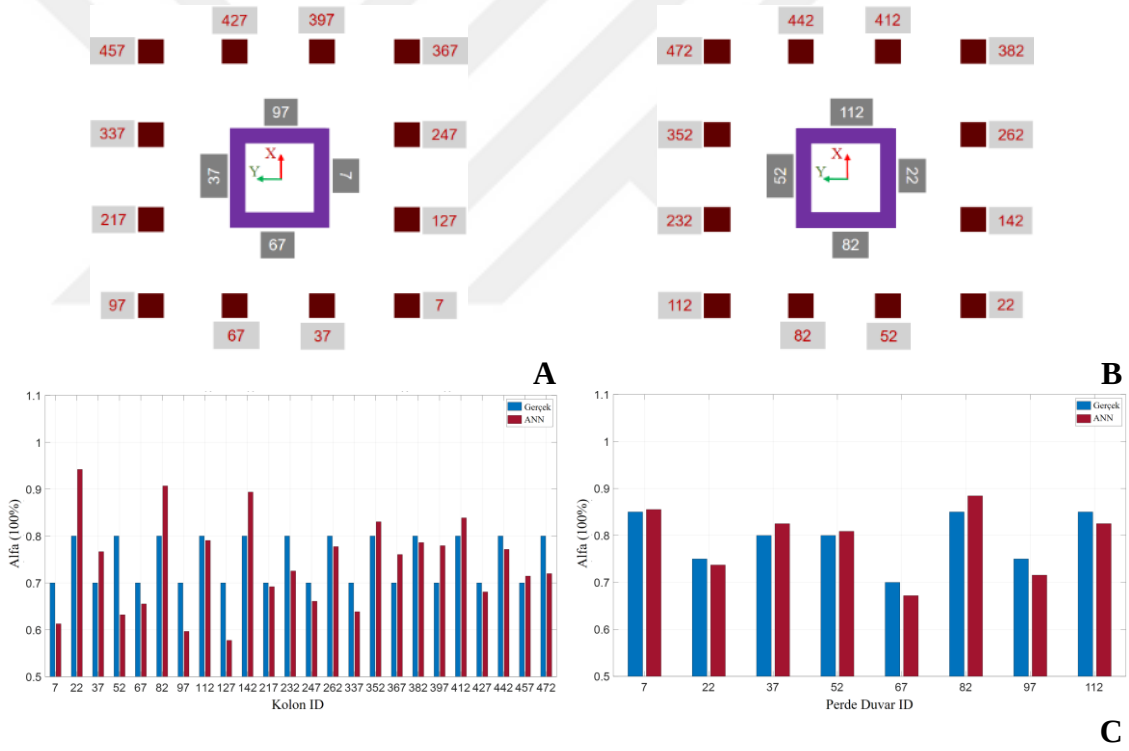
4.3.2. Simetrik yapı (SYM-3D) için hasar tespiti

ANN üzerinde başarılı bir şekilde doğrulanmış olan iki aşamalı teknik, simetrik bir bina olan SYM-3D üzerindeki bir hasar senaryosunu tespit etmek için burada uygulanmaktadır.



Şekil 4.52. 0,01-0,002 gürültü seviyeleri ile SYM-3D'de eleman düzeyinde hasar tespiti sonuçları. **A)** X-dir **B)** Y-dir

Bir hasar kategorisinin kat seviyesinde ve eleman seviyesinde tespiti sırasıyla Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te gösterilmektedir. SYM-3D üzerindeki hasarlı katlar (S7 ve S22), mod verileri 0,01-0,002 gürültü seviyesi ile kirlendiğinde doğru bir şekilde bulunmaktadır. Bununla birlikte, simetri nedeniyle hem X yönü hem de Y yönündeki kat düzeyindeki hasar tahminlerinin her ikisi de SYM-3D için senaryo kesin sonuçlarına ulaşmaktadır. Daha sonra bu katlardaki hasarlı elemanlar bir ANN modeli kullanılarak tespit edilmektedir. ANN, gürültülü veriler kullanılarak, özellikle 0,01-0,002 seviyeleri kullanılarak eğitilir. Perde duvarların tahmini α değerleri, gerçek değerlerle yaklaşık olarak aynıdır. Öte yandan, yalnızca iki dikkate değer eşitsizliğe tanık olunmakta ve bu da yedekte yanlış tahminlerde bulunulmaktadır (kolon ID 22 ve 82). Ancak, daha önce belirtildiği gibi bir sorun değildir.



Şekil 4.53. SYM-3D eleman düzeyinde hasar tespiti. **A**) S7'deki eleman numaraları, **B**) S22'deki eleman numaraları, **C)** ANN (0,01-0,002) tabanlı tahminler.

4.4. 3D yapılar için hasar tespiti - NL3D-ANN-ANN prosedürü (NL3D_ANN_ANN)

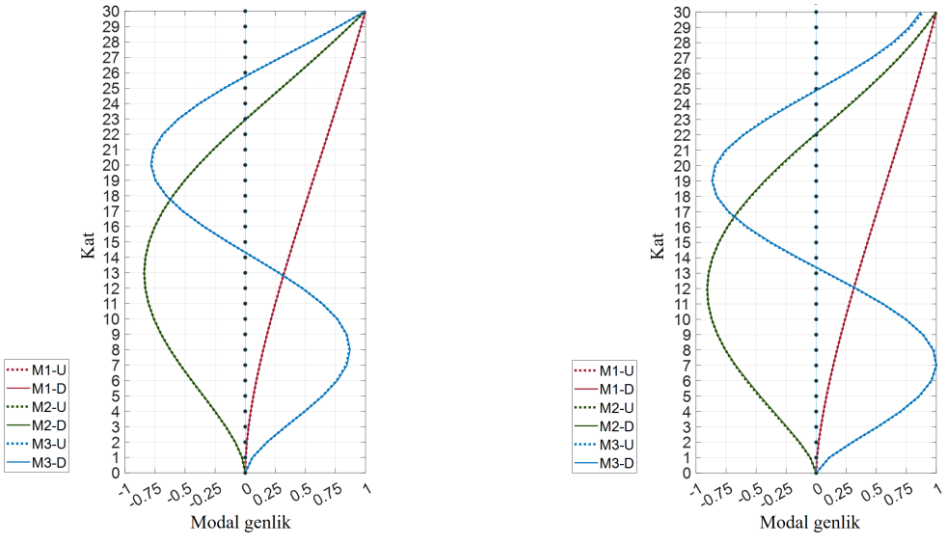
Bu bölümde, 3D 30 katlı yüksek binanın (ASY-3D) hasar tespiti için ANN tabanlı bir hibrit strateji su nulmaktadır. Söz konusu yapı ile ilgili tanımlanan yapısal özellikler bir önceki bölümde verilen ile aynıdır. Kat düzeyinde ve eleman düzeyinde tespiti için ANN

tabanlı yöntemler, ilk modlarda moda ait verilere ilişkin değişiklikleri dikkate alır. İki yönde (X yönü ve Y yönü) ilk üç eğilme modunun kütle katılım oranları Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. "*U*" harfi öteleme anlamına gelirken "*R*" harfi dönmeleri temsil eder. "*RZ*" terimi, Z ekseni etrafında dönmeyi temsil etmektedir. X yönü'deki simetriklikten dolayı, üç salınım modu için kütle sadece UX ve RY'ye dağıtılırken RZ'nin katkısı yoktur. Öte yandan, Y yönünde, RZ burulma etkisi üç modda görülür. Bu durumda safi eğilme modunun etkisinden ziyade bu yapıda burulma modlarının etkisi de ortaya çıkarmaktadır. Çalışma kapsamında MATLAB®'dan yardımıyla yazılan kod adlı *NL3D_ANN_ANN.mat* (Nguyen ve Livaoğlu, 2021) kullanılmaktadır.

Çizelge 4.10. ASY-3D için bozulmamış aşamanın kalıcı bilgileri

Eksen	Mod	T	Modal Katılımcı Kitle Oranları				
			UX	UY	RX	RY	RZ
		(Saniye)	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz
X	1	3,39397	0,66	0	0	0,34	0
	2	0,80006	0,18	0	0	0,29	0
	3	0,36068	0,05158	0	0	0,09841	0
Y	1	3,34076	0	0,65	0,32	0	0,0288
	2	0,83982	0	0,15	0,22	0	0,0077
	3	0,44724	0	0,0341	0,0668	0	0,0071

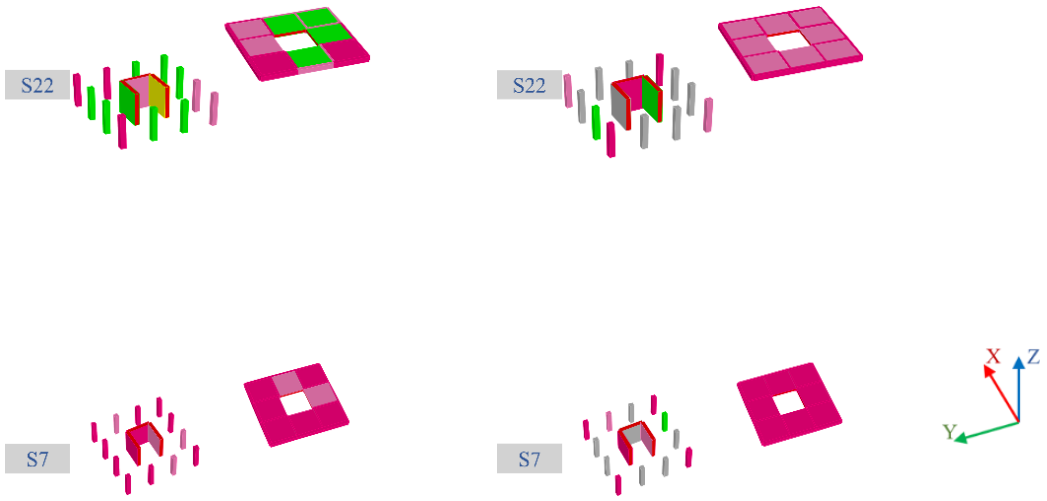
Düzensizliğin etkileri Şekil 4.54'teki mod şekillerinden de görülebilir. Her modun bir kuralla yazıldığı not edilir. Örneğin, her yönde M1-U, hasarsız binanın ilk modu anlamına gelirken, M1-D, hasarlı bir durumun temel modudur. Bozulmamış binanın her bir yönündeki ilk üç eğilme mod şekli noktalı çizgiler kullanılarak gösterilmiştir. Y yönüne göre mod şekilleri, X yönündeki muadillerine benzer görünmektedir. Ancak X yönü'de 3' üncü modda görüldüğü gibi ufak bir fark gözlemlenebilmektedir. En üst kata rağmen maksimum yatay genlik 7'nci katta meydana gelir. Genel olarak, seçilen binanın mod şekilleri, diğer yüksek binalara kıyasla düzenli olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.54. Hasarsız ve hasarlı durumda mod şekilleri. **A**) X yönü **B**) Y yönü

Şekil 4.55'te gösterilen iki hasar senaryosunun (B1 ve B2) önerilen teknikle tespit edilebilirliği takip eden bölümlerde incelenmiştir. Hasar, her iki durumda da S7 ve S22 katlarında bulunur. Hasarlı olarak öngörülen katlarda, her üye sağlığını temsil eden belirli bir renk kullanılarak hasar karakterize edilmektedir. Hasarsız bileşenler gri renkle gösterilmiştir ve Young modülü açısından bütünlüğün *E* olduğu anlamına gelen "*1*" olarak numaralandırılmıştır. Katsayı, hasarlı elemanlar için 0,7, 0,75, 0,8, ve 0,85 gibi 1'den küçük indirgeme faktörleri ile çarpılır. İlk kategori olan B1, tüm elemanları zarar gördüğü ağır bir senaryo dikkate almaktadır. Öte yandan, diğer senaryo, hasar yalnızca bazı üyelerde rastgele meydana geldiğinde hafif ve karmaşıktır.

Hasarlı yapıların üç farklı gürültü düzeyi için sonuçları Çizelge 4.11'de gösterilirken, hasarsız duruma karşılık gelen mod şekilleri Şekil 4.54'te sürekli çizgiler kullanılarak gösterilmektedir. Sol sütunun X yönündeki mod şekillerini, sağ sütunun ise Y yönündekini gösterdiği not edilmelidir. Gürültüsüz mod verileri için hasarlı binaların (B1 ve B2) frekansları Tablo 4.11'in 4'üncü sütununda listelenmiştir. Bunun yanı sıra, hasarsız bina ile B2 arasındaki mod şekli karşılaştırması Şekil 4.54'te gösterilmiştir. Modal veriler açısından farklılıklara dayalı olarak, önerilen teknik kullanılarak kat düzeyinde ve eleman düzeyinde hasar algılamaya ulaşılmaktadır.



Şekil 4.55. S7 ve S22'de hasar senaryoları. **A**) B1 **B**) B2

Çizelge 4.11. Hasarlı yapıların frekansları

Senaryo	Eksen	Mod	Gürültüsüz	0,025-0,005		0,3-0,06		1,5-0,3	
			T (Saniye)	T (Saniye)	Hata	T (Saniye)	Error	T (Saniye)	Hata
B1	X	1	3,43738	3,43749	0,003%	3,43844	0,031%	3,43141	-0,174%
		2	0,80862	0,80860	-0,003%	0,80827	-0,043%	0,80992	0,161%
		3	0,36414	0,36414	0,000%	0,36419	0,015%	0,36394	-0,054%
	Y	1	3,38459	3,38453	-0,002%	3,38442	-0,005%	3,37557	-0,266%
		2	0,85005	0,85008	0,003%	0,84978	-0,032%	0,84990	-0,018%
		3	0,45053	0,45053	-0,001%	0,45028	-0,056%	0,45096	0,095%
B2	X	1	3,42169	3,42156	-0,004%	3,42001	-0,049%	3,42558	0,114%
		2	0,80713	0,80711	-0,002%	0,80686	-0,033%	0,80941	0,282%
		3	0,36298	0,36297	-0,004%	0,36295	-0,008%	0,36320	0,061%
	Y	1	3,36979	3,36990	0,003%	3,36937	-0,012%	3,36306	-0,200%
		2	0,84827	0,84825	-0,003%	0,84816	-0,014%	0,85026	0,235%
		3	0,44992	0,44993	0,002%	0,44979	-0,029%	0,44934	-0,129%

4.4.1. Kat düzeyinde hasar tespiti

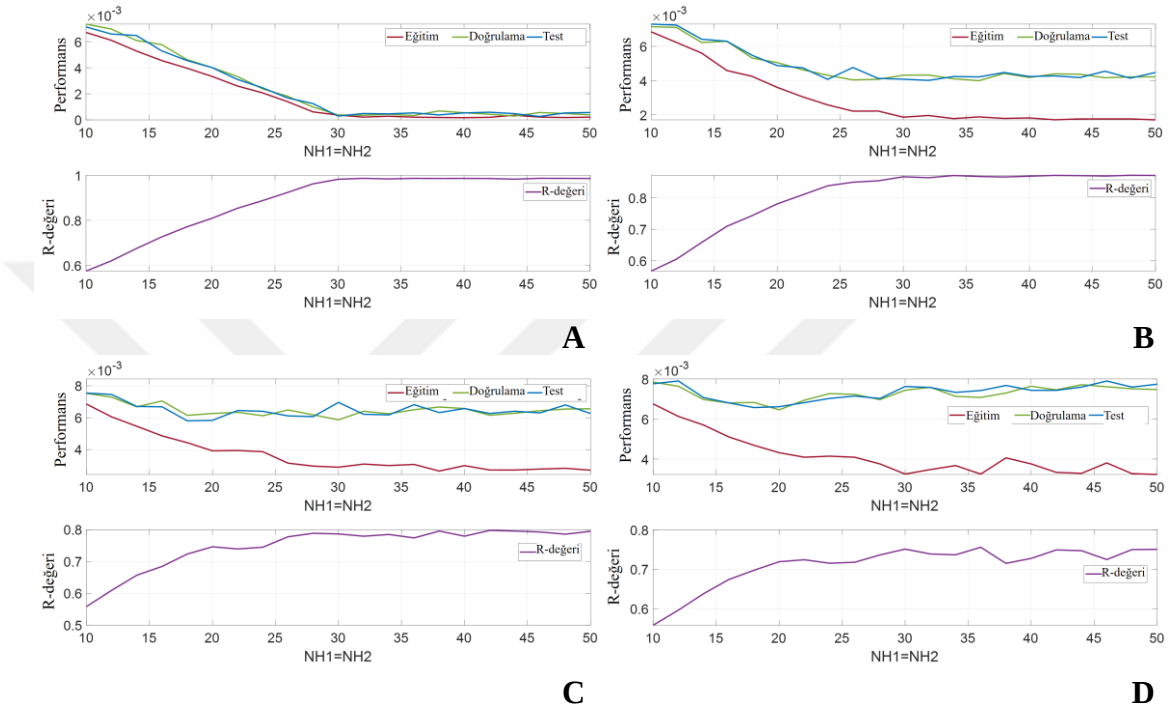
Şekil 4.3'te tanıtılan çok katmanlı ağ bu kapsamdaki analizlerde kullanılmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi, bir katın tüm elemanları α_i (i=1, 2, 3…, NF) bilinmeyen değişkeni tarafından temsil edilmektedir. Bu durum çıktı katmanının (NF) uzunluğunu burada dikakte alınan örnek için 30'a eşit yapar. Çalışmada, her iki yöndeki ilk üç eğilme modu ele alındığı ve α-değerlerinin 0 ile 1 arasında değerler almakta olduğu daha önce de ifade edilmişti. Hasar meydana geldikten sonra izlenen bina istenilen modlarda sadece bir eksende veya her iki yönde salınım yapabilmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.56'da verilen örnekte mod şekilleri, her bir girdi vektörüne ağa ait 2x3x30 düğümün katkıda

bulunduğu ve yalnızca her yöndeki baskın örüntülerin dikkate alındığı duruma ait değerlendirmeler verilmektedir. Ek olarak, X yönü ve Y yönündeki ilk üç frekans 2x3 söz konusu düğüm sayısını arttırdığı da hesaba katılırsa, sonuçta bir girdi vektöründeki (*NI*) düğüm sayısı toplamda 186'ya ulaşmaktadır. Daha iyi eğitim verimliliği için özvektörler ve özdeğerler normalleştirilmekte ve girdi vektörleri Bölüm 4.3 ifade edildiği şekliyle oluşturulmaktadır.

Orthogonal array yöntemi, giriş verilerini oluşturmak için önceden gerçekleştirilir. 30 değişken içeren ağ için, Sloane (2020) kütüphanesinde yayınlanan *oa.64.32.2.3.t3* dizisi seçilmiştir. Daha sonra, dizinin her çalışması için, önem aralığı (0,7'den 1'e kadar) Latin hypercube sampling tekniği uygulanarak 1 basamaklı üyeler halinde düzenlenir. Burada daha önceki başlıklarda da ifade edildiği üzere hasar şiddeti aralığı 10 aralığa bölünmüş (11 noktalı bölüm) olduğunu belirtmek uygun olacaktır. Bu iyileştirme şeması, Bölüm 3.3.3'te ifade edildiği gibi etkili şekilde çözüm üretebilmektedir. Daha sonra, bölme şeması kullanılarak, her orijinal çalıştırma için kombinasyon sayısı 11 ve yeni dizide 704 kombinasyon elde edilerek çözüm gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, orijinal dizinin sıfır eleman içeren, başka bir deyişle hasarsız ilk satırı, 1 basamaklı üyeler satırına ayarlanır. Bu, ilk satırın tüm üyelerinin hasar görmesine neden olur. Bu işlemden sonra simülasyon veri tabanından % 75'i eğitim seti, % 15'i doğrulama kısmı ve % 15'i test deseni için rastgele seçilir. Doğrulama setinin performansına bağlı olarak, sürekli altı yineleme göz önüne alındığında, *mse* açısından herhangi bir gelişme sağlanmadığında eğitim süreci otomatik olarak sona erer ve bu aşamada sonuç elde edilmiş olur.

Eğitimli bir ağın doğruluğunu değerlendirmek için bazı kriterler göz önünde bulundurulur. İlk olarak, eğitim süreci, *mse* değerinin küçük olduğu, örneğin 10^{-3} olduğu döngüde durur (Chang ve diğerleri, 2018). Daha sonra, doğrulama ve test alt kümelerinin performansı benzer bir eğilime sahiptir. Bundan sonra, optimal doğrulamanın gerçekleştiği döngüye kadar önemli bir uyum sorunu yaşanmaz. Doğrulama ve test setleri için kötü performanslara tanık olurken, eğitim alt kümesi kullanılarak iyi bir performansın elde edildiği durum için fazla uydurma tanımlanır. Bu çalışmada, *mse* değeri ve eğitim, doğrulama ve testin performansı hesaba katılmakta ve hedeflenen ve tahmin edilen çıktılar arasındaki korelasyon, *R*-değeri de dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada en düşük performans değerine göre uygun sayıda nöron belirlenerek, iki gizli katman için nöron sayısını seçmek maksadıyla söz konusu deneme yanılma yöntemi uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, 2 gizli katmanlı ağ, Bölüm 4.2'deki incelemede de ifade edildiği üzere aynı sayıda düğüm (*NH1 = NH2*) kullanılarak iyi bir şekilde eğitilmektedir (Şekil 4.34).

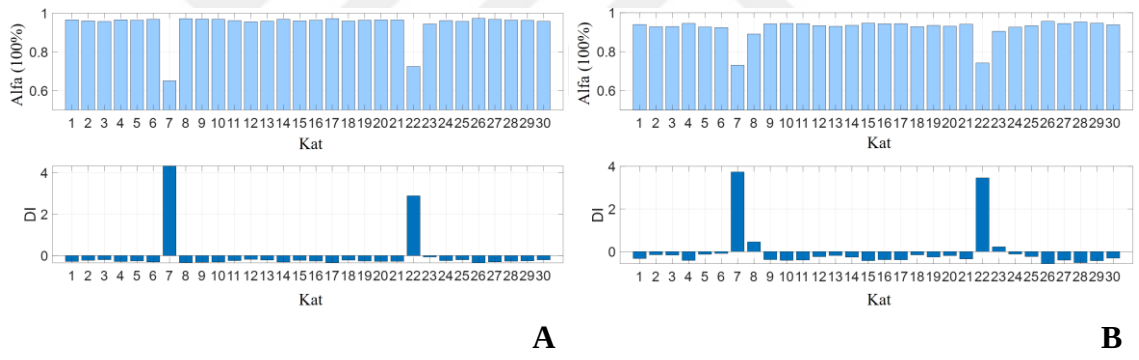


Şekil 4.56. Gürültülü girdi verileri için nöron sayısı (*NH1=NH2*). **A)** 0,01-0,002 **B)** 0,5-0,1 **C)** 1-0,2 **D)** 1,5-0,3.

Bu bölümde, yalnızca giriş verileri gürültü seviyesi açısından düşük seviyelerden (0,01-0,002) yüksek seviyelere (1,5-0,3) kadar olan seviyelerde ağ üzerinde bir deneme yanılma işlemi analiz edilmektedir. Nöron sayısı, 2'lik bir aralıkla 10'dan 50'ye ayarlanmıştır ve Şekil 4.56'da sentezlenen 21 sonuç elde edilmiştir. Gürültü seviyeleri arttıkça eğitim ağlarının mse ve *R*-değerleri açısından değerleri düşse de *NH1* ve *NH2*'nin artması nedeniyle her bir parametrenin performansı, diğer gürültü seviyelerinde elde edilenlere benzer düzeyde elde edilebilmektedir. Tüm durumlar için, eğitim performansının gelişimi, nöron sayısı 32'ye ulaşana ve ardından yaklaşık bir değere ulaşıncaya kadar kademeli olarak azalır. En iyi performans *NH1=NH2*=32'de meydana gelmekte olduğu aşağıdaki verilen sonuçlardan da görülmektedir. Bundan sonra, her bir durum için, doğrulama ve test verilerinin performansları, eğitim olandan biraz sapmaya başlar, bu da

fazla uyumun bir işaretidir. Sonuç olarak her iki gizli katmanın nöron sayısı 32 olarak seçilmiştir.

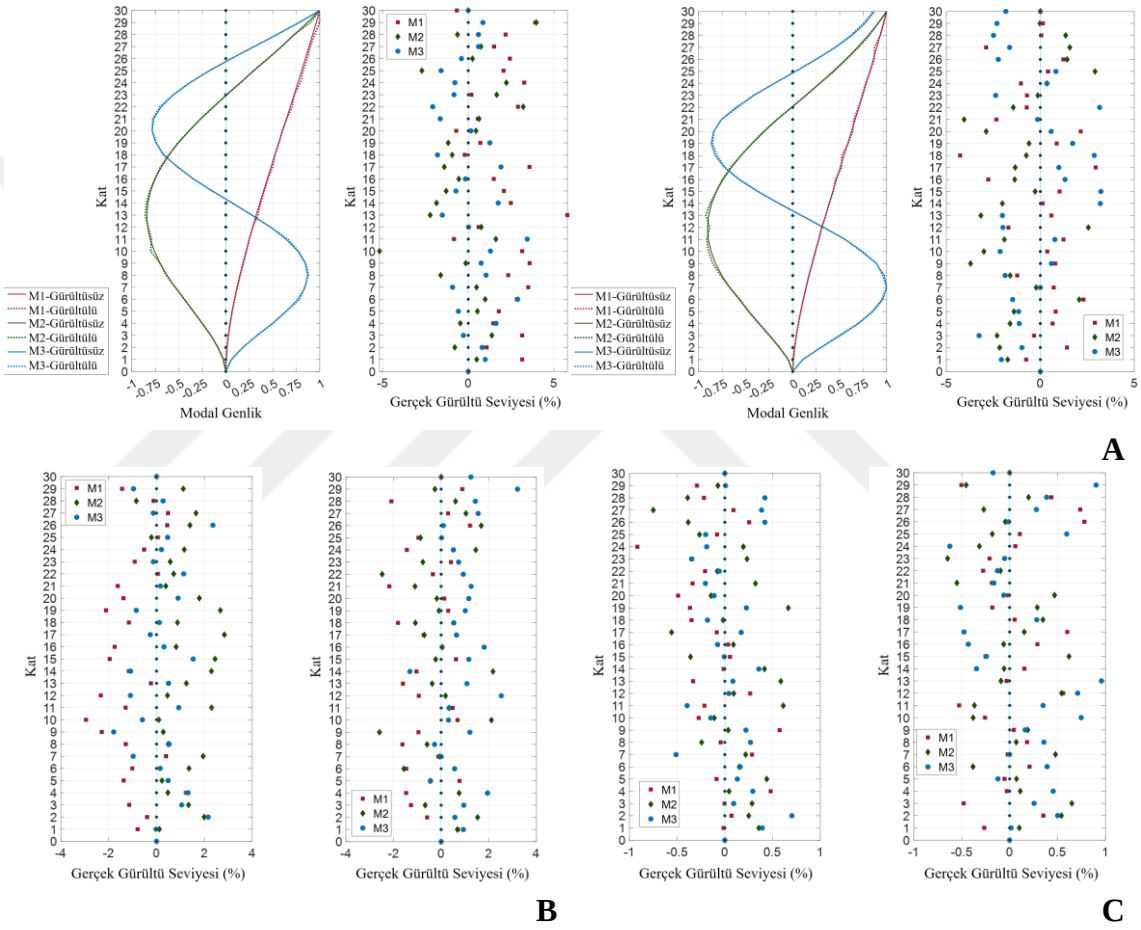
Önerilen kat düzeyinde hasar tespit tekniği, bu bölümde gürültüsüz mod verileri dikkate alınarak doğrulanmıştır. Genel olarak, deterministik bir ağ, gürültüsüz giriş verilerine dayalı olarak eğitilmelidir. Bununla birlikte, böyle bir ağın eğitilmesi zaman alıcıdır ve eğitim problemle başa çıkmadan önce girdi verilerine gürültü ekler. Bölüm 4.3'te kanıtlandığı gibi, 0,01-0,002 (0,01-0,002 ANN) seviyeleri tarafından bozulmuş giriş verileri kullanılarak bir ağın eğitilmesi, sadece eğitim sürecini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda uyum açısında deterministik ağ ile karşılaştırılabilir bir istatistiksel ağ elde edilmesini sağlar. Sonuç olarak, 0,01-0,002 ANN, gürültüsüz ölçülen verileri test etmek için kullanılabilir. B1 ve B2 için kat düzeyinde algılama sonuçları Şekil 4.57'de gösterilmektedir. İstatistiksel teknik kullanılırken, burada hasar kriterinin % 97,7'lik bir güvenle 2 olarak ayarlandığını belirtmek uygun olacaktır.



Şekil 4.57. 0.01-0.002 ANN tabanlı gürültüsüz veri kullanarak hasar tespiti **A)** B1 **B)** B2

0,01-0,002 ANN, Şekil 4.57'de gösterildiği gibi S7 ve S22'de hasarın doğru bir şekilde tespitini mümkün kılmaktadır. Hasarlı bir katın tüm elemanlarının aynı şiddette hasar gördüğü senaryo ile diğer senaryo karşılaştırıldığında, istenen iki hasar senaryosu oldukça farklı olduğu taktir edilecektir. Sonuç olarak, eğitilmiş ağ tarafından test edilmeden önce, modellerden ölçülen mod verileri belirli bir miktarda hata içermektedir. Hasar tespitinin doğruluğu doğrudan bu hatanın seviyelerine ilişkilendirilebilir. Örneğin, B1 ve B2 için sonuçlar karşılaştırıldığında, B2 için daha az doğrulukla hasar tahminin yapıldığı anlaşılmaktadır. Özellikle gerçek hasarların yakınında B2'de bazı DI'ler hasarsız durumdan farklı şekilde sıfırdan biraz daha farklı değerler üretmektedir. Bu soruna "*yakınlık etkisi*" ("*vicinity effect*") ismi verilmektedir. Bu durumun B1 deki hasarın tüm

elemanlarda ve aynı şiddette gerçekleştiği kabulü ile oluşmadığı görülmektedir. B1'deki hasar senaryosunun tüm unsurlar hasar gördüğünde diğer senaryoya göre çok daha şiddetli bir hasar tarif edildiği unutulmamalıdır. Bu, senaryonun hasar varsayımına daha yakın olması anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, hasarlı katlar hala açıkça ayırt edilebilir durumdadır. Ölçülen verilerin gürültüsüz olması durumunda, önerilen tekniğin hasar senaryolarının karmaşıklığının yanı sıra hasar düzeyinden de bağımsız olarak hasarlı katı tespit edebildiği sonucuna varılabilir.



Şekil 4.58. Mod şekillerinde gürültü etkileri **A**) B2 ve B2-1,5-0,3 **B**) B1 ve B1-1-0,2 **C**) B2 ve B2-0,3-0,06.

Önerilen teknik, ölçülen modal veriler ölçüm gürültüsü tarafından bozulduğunda meydana gelen bazı zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadır. Kesin mod şekilleri ile gürültü ile kirletilmiş benzerleri arasındaki karşılaştırma, gürültünün mod şekilleri üzerindeki etkilerinin açıklaması için Şekil 4.58'de gerekli karşılaştırmalar sunulmaktadır. Buna göre Şekil 4.58 a'da, B2 senaryosu için mod şekilleri 1,5-0,3 (B2-1,5-0,3) seviyeleri ile

kirlenmiştir. Şekil 4.58 a'da, soldaki grafik mod bilgilerini X yönünde, sağdaki ise Y yönü için göstermektedirler. Her bir alt grafikte, süperpozisyon çizgi grafikleri, mod şekillerinin her bir düğümündeki mevcut ve gürültülü veriler arasındaki tutarsızlıkları göstermektedir. Ayrıca, her mod için, her bir düğümdeki gerçek hata, alt grafiğin sağ tarafında verilmektedir. Diğer alt grafiklerin (Şekil 4.58 b, c) yalnızca farklı durumlar için toplam hata bilgilerini göstermektedir. Her bir düğümdeki gerçek toplamsal hatanın muhtemelen daha önce bahsedildiği gibi belirli rastgele gürültü seviyesinin dört katına ulaştığı açıktır. Örneğin, maksimum mutlak hata, sırasıyla % 1 ve % 1,5 gürültü seviyeleri için yaklaşık % 3 ve % 5'ten fazladır.

Şekil 4.59, ölçülen veriler 0,01-0,002, 0,5-0,1, 1-0,2 ve 1,5-0,3 seviyelerinde rastgele gürültü ile kirletilen B1 ve B2 senaryolarına ait hasar tespit sonuçlarını göstermektedirler. Hjelmstad ve Shin (1997) tarafından tavsiye edildiği gibi, girdi verilerini kirletmek için kullanılan gürültü düzeylerinin, yerinde tanımlanan verilerin gürültü düzeyleriyle aynı olması gerektiği hatırlatılmalıdır. Bu çalışma, ölçüm gürültüsü seviyelerinin bilindiği durumlara odaklanmaktadır. Gürültülü veriler istatistiksel bir ağa beslendiğinde, Bakhary (2008) tarafından tespit edildiği gibi güvenilir hasar tespiti sağlanabilir. Bu durum Bölüm 4.3'te irdelenmektedir. Ancak bu, tüm gürültü seviyelerinde işe yaradığı anlamına gelmez. Her durum için bir sınırlama vardır. Bu bölüm, kabul edilebilir tahminlerde bulunmak için önerilen teknikle ele alınabilecek maksimum gürültü seviyelerini belirlemektir.

Şekil 4.59'da görüldüğü gibi, hafif oranda kirletilmiş kayıtlar için daha yüksek doğrulukla hasar tespiti yapılabildiği görülmektedir. 0,01-0,002 gibi düşük seviyelerde, gürültüsüz veri durumlarında görüldüğü gibi doğru sonuçlara ulaşılmaktadır. Gürültü seviyeleri yükseldikçe, S7 ve S22'nin DI'leri azalmakta ve "*Yakınlık etkisi*" aynı anda daha önemli hale gelmektedir. Bu durum, tahminlerin doğruluğunu azaltır. Diğer taraftan, hasarsız seviyelerin DI'leri yüksek olabilir, ancak 2 kriterini geçmezler. Sonuç olarak, S7 ve S22, 1.5-0.3 gürültü seviyelerine kadar yeterli hassasiyette hasar tespiti yapılması mümkün olabilmektedir.

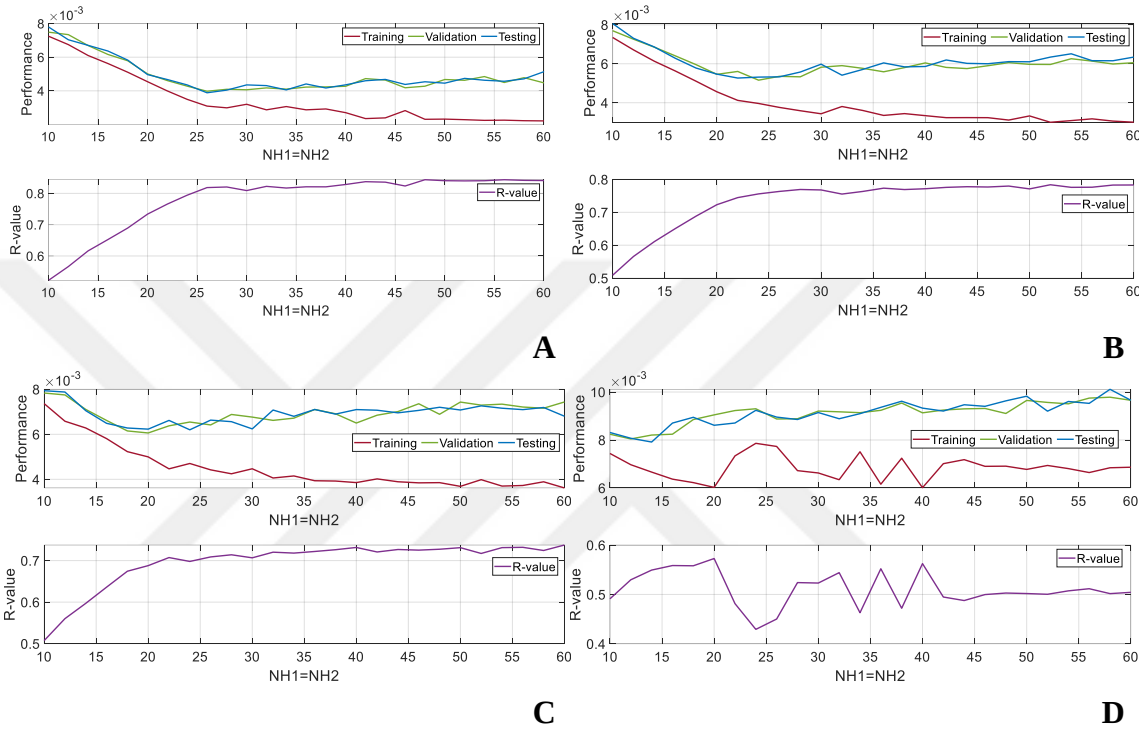


Şekil 4.59. Farklı gürültü seviyeleri için hasar tespiti **A**) B1 **B**) B2

4.4.2. Eleman düzeyinde hasar tespiti

Bölüm 4.3'te oluşturulan prosedürün tamamı, burada eleman düzeyinde algılama için yeniden kullanılmış, ancak daha yüksek gürültü seviyeleri göz önünde bulundurulmuştur. Gürültüsüz durumdan başlayarak önerilen yöntemin sınırlarını bulmak için gürültü seviyeleri kademeli olarak artırılır. Bu bölümde hem hasarlı perde duvarların hem de kolonların kabul edilebilir bir şekilde tespit edildiği gürültü seviyeleri belirlenir. Bundan sonra, yalnızca perde duvarlar için kabul edilebilir tahminler için bir sınırlama hedeflenir.

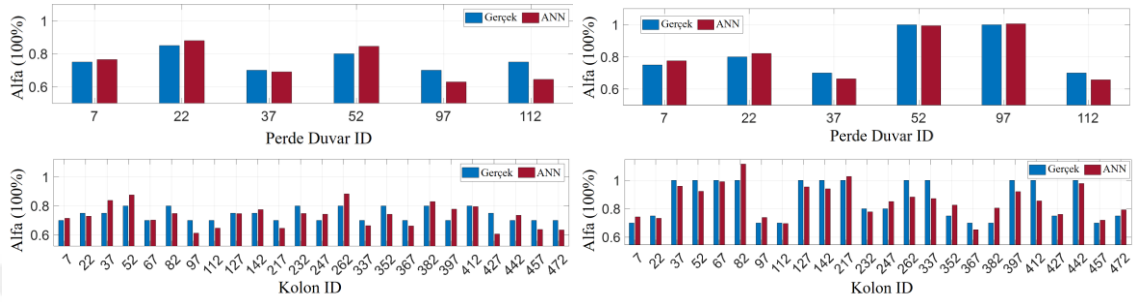
Çünkü binaların eğilme rijitliğine perde duvarların katkısı, her kattaki kolonların katkısından oldukça fazladır. Sonuç olarak, duvarların hasar tespiti için daha yüksek doğruluk beklenmektedir. Bu bölümdeki ağlar, gürültü seviyeleri dışında, Bölüm 4.3'tekilerle tamamen aynıdır. S7 ve S22 üzerindeki her bir kolonun ID numarası Şekil 4.48'den takip edilebilir.



Şekil 4.60. Gürültülü giriş verileriyle nöron sayısı (*NH1=NH2*) hesabı. **A**) 0,01-0,002 **B**) 0,025-0,05 **C**) 0,05-0,01 **D**) 0,3-0,06

Şekil 4.60, *NH1=NH2*'nin belirlenmesini gösterir. Girdi verilerinin 0,01-0,002 seviyeleri ile biraz kirlenmesi durumunda parametrelerin 28 olarak seçilebileceği açıktır. *NH1=NH2*=28'de doğrulama ve test performansı, eğitim performansından sapmaya başlar. Bundan sonra, *R*-değeri yaklaşık olarak sabit kalır. Gürültü seviyeleri, örneğin 0,05-0,01'e kadar oldukça düşük olduğu için eğilim açıkça görülebilir (Şekil 4.60 a, b, c). Ancak gürültü seviyeleri arttıkça eğilimin net olmadığı, örneğin 0,3-0,06 seviyelerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.60 d). Bu nedenle, düğüm sayısını belirlemek zordur. Binanın eğilme rijitliğine perde duvarların katkısının kolonların katkısından daha fazla olması nedeniyle, perde duvarların rijitliklerindeki azalmanın neden olduğu modal verilerdeki değişiklikler daha açık bir şekilde yakalanır. Öte yandan, hasarlı kolonların neden olduğu azalma, gürültüden kaynaklanan ek hatayı aşabilecek küçük değişikliklere

yol açar. Bununla birlikte, perde duvarların ve kolonların her biri, ağlarda eşit olarak bir değişken olarak ele alınır. Sonuç olarak, performanslar genel manada Adım 1'de görüldüğü gibi iyi değildir. Bu çalışmada, her bir durum için, gizli katmanlardaki düğüm sayısı, eğitim performansının ilgili *R*- değer ilk tepe noktasıdır. Örneğin 0,3-0,06 için parametre 20 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.61. Gürültüsüz veriler kullanılarak 0,01-0,002-ANN tabanlı hasar tespiti **A)** B1 **B)** B2

Önerilen kat düzeyinde algılama tekniği, burada gürültüsüz mod verileri dikkate alınarak doğrulanmıştır. 0,01-0,002 ANN, gürültüsüz ölçülen verileri test etmek için kullanılır. B1 ve B2 için eleman düzeyinde algılama sonuçları Şekil 4.61'de gösterilmektedir. B1 ve B2 hasar senaryoları için gürültüsüz durumda ölçülen verilere göre eleman bazında hasar düzeylerinin tespiti Şekil 4.61'deki çubuk grafiklerde değerlendirilmek üzere sunulmuştur. Bu grafiklerden yapılabilecek daha belirgin çıkarımlarından biri, istatistiksel ağın her iki senaryo için de güvenilir tahminler üretebilmesidir. Tahmin edilen α-değerleri, gerçek değerlere yakın olup, hasarlı üyelerin doğrudan α-değerlerine göre ayırt edilmesini rahatlıkla sağlamaktadır. Örneğin B1 gibi tüm üyeler hasar gördüğünde Adım 2'de istatistiksel tekniğin faydalı olmadığına veya hasarlı üyelerin sayısının hasar görmemiş olanların sayısından fazla olabileceği dikkat çekmektedir. Tüm perde ve kolonların hasar gördüğü B1 tahminlerine göre perde ve kolonlar için α değerine dayalı hasar kriterinin bu çalışmada 0,9 olarak seçilmiştir. Bu kritere göre perde duvarlar için tahmin edilen parametreler gerçek değerlere yakın olduğu için çekirdek sistemde meydana gelen hasarlar doğru bir şekilde tespit edilebilir. Bu arada, her gerçek katsayı ile tahmin edilen değeri arasındaki fark, sütunlar için daha büyük görünmektedir. Örneğin, B1'deki sütun 262'nin tahmini α değeri yüksektir, ancak açık farkla saptanabilir. B2'nin

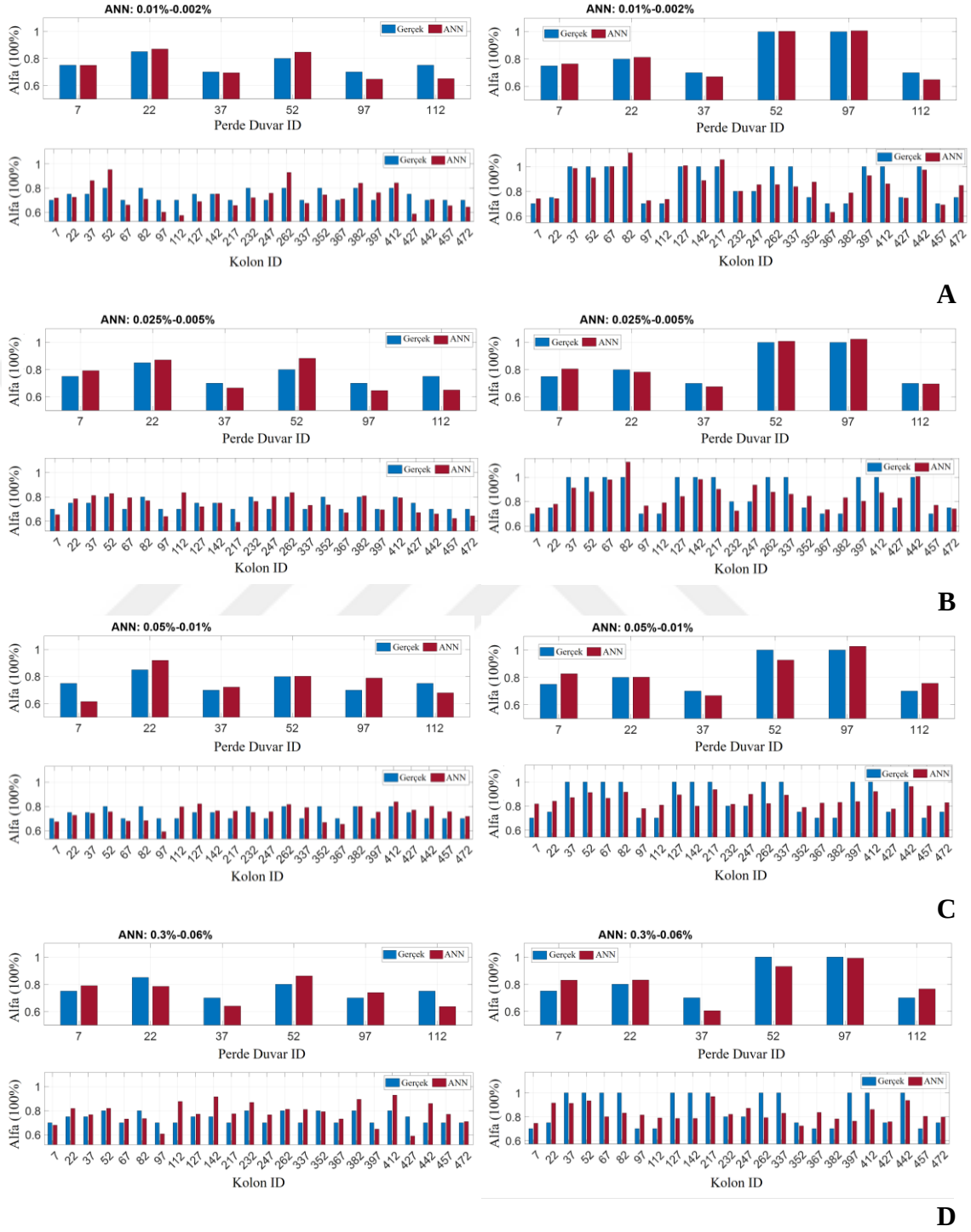
hasarlı sütunları da pozitif bir yanlış tahmin olan 412 kolonu dışında genel olarak lokal bir durumdur. Tüm bu sonuçlar ışığında sonuçlar, gürültüsüz ölçülen verilerin istatistiksel ağlarla beslenmesinin iyi tahminler üretebildiği burada görülmektedir.

Şekil 4.62'de ölçümdeki 0,01-0,002 ila 0,025-0,005 arasındaki düşük seviyelerinde gürültünün perde duvar ve kolonların hasar tespit doğruluğu üzerindeki etkileri, dikkate alınan her iki hasar senaryosu içinde sunulmaktadır. Örneğin B2'deki 52 ve 112 numaralı duvarlarda, seviyeler 0,05-0,01'e yükseldiğinde aralarındaki uyumsuzluklar arttığı görülmektedir. Tutarsızlıklara rağmen, gürültü seviyeleri 0,3-0,06 düzeylerinde yüksek olduğunda dahi hasarlı perde duvarlar hala doğru şekilde tespit edilebilir durumdadır. Öte yandan, gürültü seviyeleri düşük olduğu sürece sütunlar için tahminler kabul edilebilir düzeyde gerçekle ilişkili olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu bağlamda doğrulanabilir tahminler 0,01-0,002 (Şekil 4.62 a) ve 0,025-0,005 (Şekil 4.62 b) seviyelerinde elde edilmektedir.

Gürültü seviyeleri sonraki seviyelere yükseldikçe, tahmin edilen α-değerleri gerçek değerlerden çok uzaklaşma eğiliminde olduğundan doğruluk azalmaktadır. Özellikle hasarsız ve hasarlı kolonlar arasında tahmin edilen α değeri açısından farklılıklar kısalmakta ve kararsız durumlara neden olmaktadır. Gürültü seviyeleri 0,05-0,01'e yükseldiğinde (Şekil 4.62 c) sorun daha da önemli hale gelir ve hasar görmemiş olanların çoğunun α değerleri 0,9'un altına düştüğü için olumlu yanlış tahminler halinde yöntemin sonuç ürettiği görülmektedir. Bu nedenle, B2 gibi hafif senaryo için, 0,025-0,005 arasındaki gürültü seviyeleri, hasar tespiti için tekniğin sınırlaması olarak kabul edilebilir.

B1'deki şiddetli senaryo için, modal verilerdeki değişiklikler B2'de görülenlerden daha dikkat çekicidir, sütunların hasar tespiti gürültüye daha az duyarlı görünmektedir. Gürültü seviyeleri 0,05-0,01'e ayarlandığında, sütunlar için öngörülen ve gerçek α değerleri arasındaki uyumsuzluk oldukça küçüktür. Gürültü seviyeleri 0,3-0,06'ya yükseldikçe bazı dikkate değer tutarsızlıklara tanık olunmaktadır. Sonuç olarak, bazı tahmini α değerleri 0,9'u aşarak olumlu tahminlere neden olduğu tespit edilebilmekle birlikte, tahmin edilen parametrelerin çoğu kabul edilebilir düzeydedir. Duvarların tespiti için, B2 örneğine benzer şekilde, gürültü seviyeleri 0,3-0,06'ya kadar makul derecede yüksek

olduğunda perde duvarlar için hasar tespitinin güvenilir düzeyde elde edilebildiği görülmektedir.



Şekil 4.62. Farklı gürültü seviyelerinde B1 (Sol) ve B2 (Sağ) senaryoları eleman düzeyinde hasar tespiti sonuçları. **A**) 0,01-0,002 **B**) 0,025-0,005 **C**) 0,05-0,01, **D**) 0,3-0,06

5. SONUÇ

Yapı sistemlerinin sağlık ya da sismik takiplerine ilişkin olarak son yıllarda önemli ölçüde bilimsel araştırma yapılmakta ve bunların uygulanabilirliği birçok örnekte test edilmeye çalışılmaktadır. Diğer alanlardan bağımsız olarak inşaat mühendisliği alanında nisbeten yeni sayılabilecek bu çalışmalara ilgi 90'lardan bugüne artarak devam etmektedir. Bununla birlikte özellikle deprem kuşaklarında bulunan ülkelerde kritik yapılar için izleme zorunlu ya da tavsiye edilir hale getirilmek kaydı ile birçok veri toplanmaktadır. Birçok farklı yöntem literatürde sunulmakla birlikte, söz konusu bu takip yöntemlerinde genel olarak yapının dinamik davranışınındaki değişikliklerin gerekli enstrümantasyon yardımıyla gerekli hassasiyette anlık olarak ya da dönemsel olarak tespit edilip söz konusu verilerden hareketle yapının mevcut durumuna ilişkin sonuçlar çıkartmak hedeflenmektedir. Ancak gerek mevcut yapının başlangıçtaki durumunu net olarak ortaya koyabilmek gerekse hizmet dönemi süresince birçok farklı parametre nedeniyle doğabilecek etkileşimlerin dinamik karakteristiklerde değişimlere neden olması ve enstrümantasyonlarındaki hassasiyet be kabiliyet kaynaklı değişimler, başlangıçtaki tespit kadar izleme sırasında da birçok olumsuzluğa neden olabilmekte ve izlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu kapsamda gerek izlemedeki olumsuzlukları ortandan kaldırabilmek gerekse nispeten basit bir şekilde hasarların tespit edilebilmesine olanak sağlayacak yöntemler geliştirmek bu çalışmanın motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu tez kapsamında, yüksek katlı yapıların kat seviyelerinde ve eleman seviyelerinde hasar tespitine yönelik yöntemler tanıtılmaktadır. Buna ek olarak yüksek yapılarda kat seviyelerinde hasar tespiti için üç farklı yöntem ile, kat seviyeleri ile birlikte elemanlarda da hasar tespitini yapabilecek iki tam çözüm "Ters Çözüm-ANN" ve "ANN-ANN" önerilmektedir. Tam çözüm olarak ifade edilen her prosedür iki adımdan oluşur. İlki hasarlı katları tespit ederken ikincisi, hasarlı elemanları tespit etmektedir. Kat düzeyinde algılama için önceki prosedür, özdeğer problemine dayalı ters çözüm uygulamasını temel almaktadır. İkinci yaklaşımda ise ANN yöntemi kullanılmaktadır. Her iki yaklaşımda da ANN tekniği ikinci adımda eleman düzeyinde algılama için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, bu tezde mevcut bir MSE tabanlı yaklaşım geliştirilmiş (NL güncelleme prosedür) ve literatür sunulmaktadır.

5.1. MSE tabanlı DIs ve NL güncelleme prosedürü (NL_MSE)

Yapı sağlığı izleme yaklaşımında daha önce de ifade edildiği üzere literatürde birçok farklı yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan biri de üst başlık olarak modal şekildeğiştirme enerjisi (MSE) tabanlı yaklaşımlardır. Bu çalışmada ilk olarak Kim ve Stubbs tarafından geliştirilen yaklaşımlar (1995, 1996, 2002) denetlenerek bu yaklaşımın avantaj ve dezavantajları geniş bir şekilde çalışılmış ve hasar indeksleri (DI)'lerin gerçek hasarlı ne oranda tespit edebildikleri ortaya koyulmuştur. Kat seviyesinde hasar tespitine yönelik olarak yapının davranışının konsol bir kiriş modeline indirgenmesinin mümkün olabileceğinden hareketle hasar indeksi yaklaşımı bu çalışmada geliştirilerek yeni bir yaklaşım, bir güncelleme işlemi, yani NL prosedürü bu çalışmada önerilmektedir. Geliştirilmiş yöntem yapıları etkin bir şekilde izleme şansı vermektedir. Ayrıca, NL prosedürü kullanılarak güncellenen önem derecelerine dayanan yeni bir DI, hasarlı yerleri tam güvenle gösterebilmektedir. Bu bağlamda ilgili başlıkta gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- DI A ve DI B hasar tespit yöntemleri hasarın yerinin tespiti konusunda yeterli düzeyde başarılı sonuçlar üretmektedir. Genel olarak kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar üretmekle birlikte, bu yöntemlerden DI A bazı durumlarda gerekli hassasiyette sonuçlar üretememektedir. Hasar tespitinde yalnızca temel mod şeklinin kullanılması, hasar yerelleştirilmesinde daha doğru sonuçlar vermektedir. Daha yüksek mod şekillerini eklemenin bu yöntemlerin kullanımında bazı hatalara neden olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, sadece hakim moddaki değişikliklerden faydalanılarak kesin hasar tespitinin bu yöntemle yapılabildiği anlaşılmaktadır.
- DI A ve DI B ile karşılaştırıldığında, DI C'nin hasarın tek bir lokasyonda gerçekleşmesi durumlarında hasar şiddeti tahmininde daha gerçekçi sonuç verdiği, adı geçen diğer yaklaşımları ise aynı oranda hasar şiddetinin tahmininde başarılı olamadıkları anlaşılmaktadır. Ancak hasar kategorileri ve lokasyonları daha karmaşık bir hal aldığında DI C'nin söz konusu üstünlüğünü kaybettiği görülmüştür.
- Bu çalışmada "*Birinci için bir mücadele*" (*the struggle for the first*) terimi, DI A yaklaşımı kullanıldığında konumun tahmin edilmesinde ve ilk elemanın, taban

eleman yakınında hasar şiddetini meydana gelebilecek olası hatalar için uyarı maksadıyla kullanılmaktadır.

- DI B kullanımı hasar şiddeti tahmininde gerçeğe nazaran düşük sonuçlar vermesine karşın, en kararlı performansı göstermektedir. Bu nedenle, şiddet tahmininde daha fazla doğruluk için güncellemek üzere kullanılmak için seçilmiştir.
- Bu çalışmanın sonucu olarak hasar tespitinde önerilen NL prosedürü gerek hasar yerinin gerekse hasar şiddetinin tahmininden diğer tüm yaklaşımlara göre daha yüksek hassasiyetle sonuç üretmektedir.
- NL prosedürü genellikle sadece birinci modu kullanarak tek hasarın şiddetini gerçek değerin % 95'ine kadar tahmin edebilmektedir. Bununla birlikte, tabanın yakınındaki elemanda hasar tespit edildiğinde ise hata % 10'a çıkabilmektedir. Söz konusu oranlar düşünüldüğünde tek hasar senaryosu durumunda hasar tespitinin bu yaklaşımla yüksek doğrulukla elde edilebileceğini göstermektedir.
- Çoklu hasar senaryoları için, NL'nin çoğu durumda % 10'dan daha az bir hata ile hasar şiddetlerini tahmin ettiği doğrulanmıştır.
- Farklı şiddetlerde çoklu hasar senaryoları için, üst seviyelerdeki eleman daha az ciddiyetle hasar görmesi durumunda, % -28'e varan oranlarda hasar yüzdesinin tahmininde sapmalar ile karşılaşılmıştır. Ayrıca benzer senaryo durumunda, en alt seviyedeki eleman daha yüksek şiddette hasar görmesi durumunda -% 45'e kadar bir hata ile hasar yüzdesi tahmininde sapmalar olabilmektedir. Diğer taraftan, daha yüksek hasar şiddetini üst elemanlarda olması durumunda ise, hasar tahmini % 10'luk bir hata tahmin edilmektedir.
- "*Birinci için bir mücadele*"'nin temel nedeni, temel yakın elemanı hasar uzunluğu arttıkça tespitte % 55'e kadar hatalara neden olabilmesidir. NL prosedürü, uzunluğu sabit kalan hasarın şiddetini arttırmaktan veya sabit hasarın uzunluğunun artmasından etkilenmemektedir.
- Gerçekleştirilen araştırmalarda sonlu eleman boyutunun hasar tespit sonuçlarını etkilemediği görülmektedir. Daha küçük veya daha büyük ağ boyutları kullanıldığında her iki durumda da yaklaşık % 5'e varan oranda bir hata kaydedilmiştir. Daha büyük bir sonlu eleman boyutu kullanmanın daha hızlı bir güncelleme sürecine neden olacağı unutulmamalıdır.

- Üst seviyelerde elemanların yüksek hassasiyetle hasar şiddetlerinin tespit edilebilmesi için güncelleme prosedüründe daha fazla işlem zaman gerekmektedir. Bu da hasarın şiddetinin yüksek doğrulukla tespitinin alt seviyelerdeki hasar tespitine nazaran daha zaman alıcı bir işlem olduğu manasına gelmektedir.

5.2. 2D Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL2D_INVSOL_ANN)

Bu çalışma kapsamında, özdeğer problem çözümünü temel alan güçlü bir hasar tespit yöntem önerilmektedir. Yaklaşım, yüksek binalarda güvenilir hasar tespiti için yeterli düzeyde sonuç üretebilmektedir. Yöntem, karşılaştırma için hasarsız ve hasarlı durumdan bilgi toplanmasını gerektirmektedir. Yapının rijitliği ve kütle matrisi önceden belirlenir ve ilk iki moda ait verilere kullanılarak deneysel olarak doğrulanır. Girdi verileri elde edildiğinde, izlenen yapıların hasar durumlarına hızla karar vermek mümkün olabilmektedir. Önerilen yöntemin gücü (Prosedür A ve Prosedür B), basit ve karmaşık çerçeve durumları için bu çalışmada sayısal olarak doğrulanmaktadır. Bunun yanı sıra, deneysel doğrulama, hasar tespiti için önerilen yaklaşımla karşılaştırılabilir şekilde geliştirilen bir yaklaşım kullanılarak da gerçekleştirilmektedir. Deneysel doğrulama, hasar tespiti için öz değer problemine dayalı olarak önerilen yaklaşımın geçerliliği gösterilmektedir. Sayısal ve deneysel doğrulamadan, yöntemle ilgili elde edilen bazı sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

- Özdeğer problemine dayalı yaklaşımlar, incelemeye konu iki yapı durumu arasındaki rijitlik veya varsa kütle nedeniyle değişiklikleri tanımlamakta etkili yaklaşımlardır. Bu güçlü aracı kullanarak, bu çalışmada önerilen yöntemler yeterli güvenilirlikte değişimleri ve buna bağlı varsa hasarı Kabul edebilir bir hata ile tespit etmektedirler.
- Yapıların karmaşıklığı ya da hasar senaryolarının ciddiyeti, önerilen iki prosedürün tahmin düzeyinde de önemli bir değişime neden olmamaktadır.
- Guyan yoğunlaştırma prosedürü uygulandığında, daha büyük yapıların çok sayıdaki serbestlik derecesi sayısına bağlı dezavantajları bertaraf etmektedir. Bu, sensörlerin sayısının kat sayısı ile aynı olduğu basit bir ivmeölçer sistemi

ile yüksek binaları kat seviyesinde yeterli hassasiyette izleme şansı yaratmaktadır.

- Hasar tanımlamasını yapabilme için yalnızca ilk iki mod yeterlidir. Kütle tanıma prosedürü için ise yalnızca temel mod yeterli olabilmektedir.
- Prosedür B, önerilen güncelleme prosedürünün etkinliği nedeniyle daha doğru tahminler üretebilmektedir. Ancak Prosedür A aynı zamanda hasar yerlerinin tespiti açısından güvenilir sonuçlar üretebilmektedir.
- Kütle tanıma prosedürü için deneysel doğrulama, gürültünün ölçülen veriler üzerindeki etkilerine işaret etmektedir. Bu, model güncelleme prosedürünün doğruluğuna etkileyen önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Önerilen güncelleme prosedürü, ölçülen modal değerlere önemli ölçüde bağlıdır.
- Hasar yalnızca bir katın kirişlerinde meydana geldiğinde, komşu katlar için pozitif bir yanlış tahmin elde edilebilmektedir.

Belirli sayıda hasarlı katın olduğu durumlar baz alınarak hasar senaryolarını tespit edebilmek için bu çalışmada bir ANN modeli uygulanmaktadır. Bu model tüm yapının elemanlarını dikkate alan bir yaklaşımla karşılaştırıldığında gerekli eleman sayısını önemli ölçüde azalmaktadır. İlk üç yanal yer değiştirme modu ve katlardaki dönmeyle ilgili bilgiler kullanılarak tasarlanan ağ, hasarı yerelleştirebilir ve hasar şiddetini tahmin edebilmek için yeterli doğrulukta sonuçlar üretmektedir. 20 katlı bir yapı için gerçekleştirilen sayısal araştırmadan, bu model kullanılarak elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Yer değiştirme modları kullanılarak eğitilen ANN modeli ve katların dönmesi ile ilgili bilgiler, hasarların karmaşıklığına ve ciddiyetine bakılmaksızın kesin bir hasar senaryosu tahmini ile sonuç üretebilmektedir. Her bir elemanın hasar şiddeti de yüksek doğrulukla tahmin edilmektedir. Bu yaklaşımın söz konusu sonuçlara ulaşabilmesi için ilk üç moda ait verilerin tespit edilmesi gerekmektedir.
- Yalnızca yanal yer değiştirme modu şekli kullanılarak eğitilen ANN modeli, asimetrik senaryoları tahmin edememektedir. Bu bağlamda yanlış tahminler elde edilmekte ve hasar şiddetleri düşük doğrulukla tahmin edilmektedir.

- Girdiler verileri düşünüldüğünde, daha iyi hasar tahminleri elde edebilmek için bu çalışmada 10 hasar aralığı kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada tanıtılan ve bu bağlamda önerilen prosedür, yüksek binalar için SHM alanında umut vericidir. Yöntem, modal verilerin kesin olduğu sayısal modellerde başarıyla doğrulanmıştır. Ancak modal veriler üzerinde gürültü kirliliğinin etkisinin yöntemin kullanılabilirliği üzerindeki etkisi uygulamada test edilmelidir.

5.3. Ters Çözüm-ANN prosedürü (NL3D_INVSOL_ANN)

Bu yaklaşım yüksek katlı yapıları hasar tespitinin üç boyutlu bir model ile yapılabilmesi için önerilen hibrit prosedürdür. Özdeğer problemi ve ANN tabanlı yaklaşım kullanılarak ters bir çözüme dayalı olarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşımla, hasarlı katları tespit edilebilmekte ve ardından hasarlı perde duvarları ile kolonları lokalize edebilmektedir. Önerilen yöntem tüm bu sonuçlara yalnızca birkaç en düşük eğilme modunun tespit edilebilmesi ile ulaşabilmektedir. Bu bağlamda basit bir sensör ağı (kat başına sadece bir çift eksenli ivmeölçer) kullanılarak bu amaca ulaşılabilir.

Bu yaklaşımda Guyan yoğunlaştırma prosedürü kullanılarak 3D bir yapının idealleştirilmiş bir modeli oluşturulmaktadır. Özdeğer problemine dayalı ters çözüm, yalnızca ilk iki modu kullanarak hasarlı katları tespit etmek için doğrudan basitleştirilmiş modele uygulanarak kat tespiti yapılır. Sonrasında en düşük üç eğilme modunun modal verileri kullanılarak bir ANN modeli oluşturulur ve eğitilmektedir. Eğitimli ağ, hasarlı perdeleri ve kolonları lokalize ederek tespit edilen katlardaki hasarı teşhis eder. 3D 30 katlı bina üzerinde yapılan araştırmaya göre, önerilen teknik genel olarak hasarlı katları etkili bir şekilde tespit eder ve ardından hasarlı perde duvarları ve kolonları göstermektedir. Ölçülen modal veriler gürültü içermediği veya düşük seviyelerde kirletilmiş durumda oldukça iyi düzeyde doğru sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Bu yaklaşımda ilk adım gürültüye duyarlı olduğu gürültülü veriler kullanılarak gerçekleştirilen çözümlemelerden anlaşılmaktadır. Gürültü seviyeleri arttıkça olumlu yanlış tahminler ortaya çıkabilir. Binanın üst kısmındaki katlar tespit edilirken ve hafif hasar senaryoları tespit edilirken gürültünün etkilerinin daha belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

İkinci adımda, gürültü ile kirletilmiş girdiler kullanılarak eğitilen ANN modelinin bundan etkilenmediği görülmektedir. Sadece gürültüsüz değil, aynı zamanda gürültülü modal özelliklerle test edilen çözümlemelerde hasarlı perde duvarları ve kolonları lokalize edilebildiği birçok çözümde görülmektedir. Bununla birlikte, ilk adımda elde edilen bazı pozitif yanlış tahminler, ikinci adımda ANN modelleri ile doğrulanabilir ya da kontrol edilebilir olması yönteme önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada iki yapı üzerinde ve farklı senaryolar için yapılan sayısal testlerden elde edilen sonuçlara dayanılarak, düzensizlik veya asimetrik hasar durumunda hasar tahminlerini etkilemediği görülmektedir.

5.4. NL3D-ANN-ANN prosedürü (NL3D_ANN_ANN)

Çalışmada bu yöntem kullanılarak hasarlı katları teşhis etmek ve daha sonra da hasarlı perde duvarları ve kolonları tespit edebilmek için ANN tabanlı önerilen bir hibrit strateji ile diğer yöntemlere benzer hasar senaryoları test edilmiştir. Kat seviyesi tespiti için, bir katın tüm elemanlarının (perde duvarlar, kolonlar, kirişler, döşemeler) aynı şiddette hasar gördüğü varsayımı kullanılarak bir ağ kurulmaktadır. Diğer bir ifade ile ilk aşamada değişken sayısı kat sayısına eşit olmaktadır. Eleman düzeyinde algılama için ise, yalnızca ilk aşamada tespit edilen katlara odaklanan başka bir ANN modeli oluşturulmaktadır. Her iki ağın giriş katmanları için, her yönde sadece en düşük üç eğilme modunun hesaba katılması gerekmektedir. Modal veriler, kat başına sadece bir çift eksenli ivmeölçerin gerekli olduğu basit bir sensör ağı kullanılarak üretilebilir. 3D 30 katlı bir bina üzerinde yapılan sayısal inceleme ile, sunulan prosedürün sadece kat seviyelerinde değil, aynı zamanda eleman seviyelerinde de (perde duvarlar ve kolonlar) ölçülen veriler gürültüsüz ya da düşük seviyeli olduğu durumda hasarı rahatlıkla tespit edebildiğini göstermektedir. Daha önceki değerlendirmelere nazaran, % 1,5'lik rastgele gürültü seviyesi gibi yüksek gürültü seviyeleri için de kat seviyesinde hasarın tahmin edilebildiği bu çözümlerde görülmektedir.

Eleman düzeyinde hasar algılamada özellikle kolonlar için gürültüye karşı bu yöntemin daha hassas olduğu görülmüştür. Perde duvarların hasarlarının güvenilir şekilde tespit edilmesi için yaklaşık % 0,3 gibi daha düşük seviyelerde bir gürültü kirliliği sınır teşkil etmektedir. Öte yandan, benzer durum kolonlar için düşünüldüğünde gürültü seviyesi

yaklaşık % 0,025 gibi bir sınır değeri işaret etmektedir.

Genel olarak, yüksek yapıların hasar tespiti için önerilen prosedür pratik uygulama için oldukça pratik bir yaklaşımdır. Ancak, işletme ve çevre koşullarından kaynaklanan kaçınılmaz etkilerin tam olarak dikkate alınması için gerçek yapıların üzerinde daha test edilmesi yöntemin geliştirilmesi açısından oldukça faydalı olacaktır.

Burada önerilen tüm yaklaşımların kullanılabilirliği sayısal ve kısıtlı sayıda deneysel çalışmalar ile test edilerek doğrulanmaya çalışılmış ve tüm bu çalışmaların SHM için hasar tespitinde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Ancak, gerçek koşullar altında, modal verileri etkileyen birçok faktör ve izleme sırasında enstrümantasyondan kaynaklanabilecek birçok olumsuzluk nedeniyle hem gerçekçi bir izleme için gerekli sayısal modelin elde edilmesi gerekse izleme verilerinin etkileneceği birçok gürültü kaynağı nedeniyle kayıt kirliliği araştırmacıların ve uygulayıcılar için önemli bir sorun olarak değerlendirilmelidir. Model kalibrasyonu açısından burada ihtiyaç duyulan kalibre edilmiş sayısal modele ulaşmak konusunda izleme öncesi yapılacak modal analiz testleri ve buna bağlı elde edilecek sonuç modellere ulaşmanın oldukça zahmetli fakat mümkün olduğu söylenebilir. Diğer taraftan uygulamada kullanılan ivme ölçerler düşünüldüğünde gürültü değerleri açısından buradaki verilen sınırların oldukça altında kalmaktadır. Ancak yine de farklı gürültü kaynakları nedeniyle gelecek çalışmalarda özellikle gürültünün kayıt üzerindeki etkilerinin, bu yöntemler üzerindeki olumsuzluklarını bertaraf etmek daha yüksek gürültü oranları için yöntemlerin etkinliğini arttırmak hedeflenmelidir.

KAYNAKLAR

Abdo, M. A. -B., & Hori, M. (2002). A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, *251*(2), 227–239. https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3989

Alvandi, A., & Cremona, C. (2006). Assessment of vibration-based damage identification techniques. *Journal of Sound and Vibration*, *292*(1-2), 179–202. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.07.036

An, G. (1996). The Effects of Adding Noise During Backpropagation Training on a Generalization Performance. *Neural Computation*, *8*(3), 643–674. https://doi.org/10.1162/neco.1996.8.3.643

Bakhary, N. (2008). *Structural condition monitoring and damage identification with artificial neural network* [Doctoral dissertation, The University of Western Australia]. UWA Profiles and Research Repository. https://research-repository.uwa.edu.au/en/publications/structural-condition-monitoring-and-damage-identification-with-ar

Beale, M. H., Hagan, M. T., & Demuth, H. B. (2018). *Neural Network Toolbox™ Getting Started Guide*. The MathWorks Inc.

Behmanesh, I., & Moaveni, B. (2016). Accounting for environmental variability, modeling errors, and parameter estimation uncertainties in structural identification. *Journal of Sound and Vibration*, *374*, 92–110. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.022

Casas, J. R., & Aparicio, A. C. (1994). Structural damage identification from dynamic-test data. *Journal of Structural Engineering*, *120*(8), 2437–2450. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2437)

Cerri, M. N., & Vestroni, F. (2000). Detection of damage in beams subjected to diffused cracking. *Journal of Sound and Vibration*, *234*(2), 259–276. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2887

Cerri, M. N., & Vestroni, F. (2003). Use of frequency change for damage identification in reinforced concrete beams. *Journal Vibration and Control*, *9*(3-4), 475–491. https://doi.org/10.1177/107754603030787

Chance, J., Tomlinson, G. R., & Worden, K. (1994). Simplified approach to the numerical and experimental modelling of the dynamics of a cracked beam. *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, USA, 778–785. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.465.8862

Chang, C. M., Lin, T. K., & Chang, C. W. (2018). Applications of neural network models for structural health monitoring based on derived modal properties. *Measurement*, *129*, 457–470. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.051

Chen, H. L., Spyrakos, C. C., & Venkatesh, G. (1995). Evaluating structural deterioration by dynamic response. *Journal of Structural Engineering*, *121*(8), 1197–1204. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:8(1197)

Clinton, J. F., Bradford, S. C., Heaton, T. H., Favela, J. (2006). The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*(1), 237–257. https://doi.org/10.1785/0120050052

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, *19*, 297–301. https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1

Corwell, P., Doebling, S. W., & Farrar, K. (1999). Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, *224*(2), 359–374. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2163

Fukunaga, K. (1990). *Introduction to statistical pattern recognition* (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-27872-X

Fujita, K., & Takewaki, I. (2016). Advanced system identification for high-rise building using shear-bending model. *Frontiers in Built Environment, 2,* Article 29 https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00029

Fujita, K., & Takewaki, I. (2018). Stiffness identification of high-rise buildings based on statistical model-updating approach. *Frontiers in Built Environment, 4,* Article 9. https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00009

Gately, E. (1996). *Neural Networks for Financial Forecasting*, John Wiley and Sons.

Gibson, J. D., & Melsa, J. L. (1975). *Introduction to nonparametric detection with applications* (1st ed.). Academic press.

Guyan, R. J. (1965). Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA Journal*, *3*(2), 380–380. https://doi.org/10.2514/3.2874

Hagan, M.T., Demuth H.B., & Beale M. 1995. *Neural network design* (2nd ed.). PWS Publishing Company.

Hagan, M. T., & Menhaj, M. (1994). Training feedforward networks with the Maquardt algorithm. *IEEE Transaction on Neural Networks*, *5*(6), 989–993. https://doi.org/10.1109/72.329697

Hedayat, A. S., Sloane, N. J. A., & Stufken, J. (1999). *Orthogonal arrays – Theory and Applications*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1478-6

Helton, J. C., & Davis, F. J. (2003). Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex system. *Reliability Engineering and System Safety*, *81*(1), 23–69. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9

Hjelmstad, K. D., & Shin, S. (1997). Damage detection and assessment of structures from static response. *Journal of Engineering Mechanics*, *123*(6), 568–576. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:6(568)

Kim, J. T., & Stubbs, N. (1995a). Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, *5*(1), 58–66. Erişim adresi: onepetro.org/IJOPE/article-abstract/26815/Damage-Detection-In-Offshore-Jacket-Structures?redirectedFrom=PDF

Kim, J. T., & Stubbs, N. (1995b). Model-uncertainty impact and damage-detection accuracy in plate girder. *Journal of Structural Engineering*, *121*(10): 1409–1417. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:10(1409)

Kim, J. T., & Stubbs, N. (1996). Damage localization in structures without baseline modal parameters. *AIAA Journal*, *34*(8), 1644-1649. https://doi.org/10.2514/3.13284

Kim, J. T., & Stubbs, N. (2002). Improved damage identification method based on modal information. *Journal of Sound and Vibration*, *252*(2), 223–238. https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3749

Ndambi, J. M., Vantomme, J., & Harri, K. (2002). Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives. *Engineering Structures*, *24*(4), 501–515. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00117-1

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2019). *Modal strain energy-based updating procedure for damage detection of beam-like structures* (NL_MSE.mat) [Data set]. Bursa Uludağ University.

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2020). *Combination of an inverse solution and ANN for damage detection of 2D multiple storey frames* (NL2D_INVSOL_ANN.mat) [Data set]. Bursa Uludağ University.

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2020). *Fast Fourier Transformation - KT* (FFT_KT.mat) [Data set]. Bursa Uludağ University

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2021). *Combination of an inverse solution and ANN for damage detection of 3D high-rise buildings* (NL3D_INVSOL_ANN.mat) [Data set]. Bursa Uludağ University.

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2021). *An ANN based hybrid procedure for damage detection of 3D high-rise buildings* (NL3D_ANN_ANN.mat) [Data set]. Bursa Uludağ University.

Noh, H. Y., Nair, K. K., Lignos, D. G., & Kiremidjian, A. S. (2011). Use of Wavelet-Based Damage-Sensitive Features for Structural Damage Diagnosis Using Strong Motion Data. *Journal of Structural Engineering*, *137*(10), 215–1228. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000385

Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, *145*(2), 321–332. https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B

Paral, A., Roy, D. K. S., & Samanta, A. K. (2019). Application of a mode shape derivative-based damage index in artificial neural network for structural damage identification in shear frame building. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *9*, 411–423. https://doi.org/10.1007/s13349-019-00342-x

Radeş, M. (2001). Displays of vibration properties. *Encyclopedia of Vibration*, 413–431. https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0168

Quqa, S., Landi, L., & Diotallevi, P. P. (2021). Seismic structural health monitoring using the modal assurance distribution. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *50*(9), 2379–2397. https://doi.org/10.1002/eqe.3451

Ratcliffe, C. P. (1997). Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data. *Journal of Sound and Vibration*, *204*(3), 505–517. https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0961

Rytter, A. (1993). *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures [Doctoral dissertation,* Aalborg University*]*. Aalborg University's Research Portal. vbn.aau.dk/en/publications/vibrational-based-inspection-of-civil-engineering-structures

Rizos, F., Aspragathos, N., & Dimarogonas, A. D. (1990). Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, *138*(3), 381–388. https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90593-O

Sahin, M., & Shenoi, R. A. (2003). Quantification and localisation of damage in beam-like structures by using artificial neural networks with experimental validation. *Engineering Structures*, *25*, 1785–1802. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.001

Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, *19*(9), 718–723. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00149-6

Samami, H., Oyadiji, S. O. (2016). Simulation and detection of small crack-like surface flaws and slots in simply-supported beams using curvature analysis of analytical and numerical modal displacement data. *Engineering Computations: International*

Journal for Computer-Aided Engineering and Software, *33*(7), 1969–2006. https://doi.org/10. 1108/EC-02-2015-0032

Sheldon, R., & Coppolino, R. N. (1983). Flexibility Monitoring of offshore jacket platforms. *Offshore Technology Conference*, *USA*. Article OTC-4535-MS, 201–205. https://doi.org/10.4043/4535-MS

Shi, Z. Y., Law, S. S., & Zhang, L. M. (1998). Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of Sound and Vibration*, *218*(5), 825–844. https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1878

Shi, Z. Y., Law, S. S., & Zhang, L. M. (2000). Structural damage detection from modal strain energy change. *Journal of Engineering Mechanics*, *126*(12), 1216–1223. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1216)

Shih, Y. (1994). *Neuralyst user's guide*. Cheshire Engineering Corporation.

Shin, S. (1994). *Damage detection and assessment of structural systems from measured response* (Publication No. 9512549) [Doctoral dissertation, University of Illinois]. ProQuest Dissertations & Theses Global.

Sloane, N. J. A. (2020). A Library of Orthogonal Arrays. *UpToDate*. 10 Kasım 2020 tarihinde http://neilsloane.com/oadir/ erişildi.

Sun, Z., Nagayama, T., & Fujino, Y. (2016), Minimizing noise effect in curvature-based damage detection. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, *6*, 255–264. https://doi.org/10.1007/s13349-016-0163-x

Takabatake, H., Kitada, Y., Takewaki, I., & Kishida, A. (2019). *Simplified dynamic analysis of high-rise buildings*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7185-1

Tributsch, A., Adam, C. (2018). An enhanced energy vibration-based approach for damage detection and localization. *Structural Control & Health Monitoring*, *25*(1), Article e2047. https://doi.org/10.1002/stc.2047

Wahalathantri, B. L. (2012). *Damage assessment in reinforced concrete flexural members using modal strain energy based method* [Doctoral dissertation, Queensland University of Technology]. QUT ePrints. https://eprints.qut.edu.au/59509/

Wahalthantri, B. L., Thambiratnam, D. P., Chan. T. H. T., & Fawzia, S. (2012). An Improved Method to Detect Damage Using Modal Strain Energy Based Damage Index. *Advances in Structural Engineering*, *15*(5), 727–742. https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.5.727

Xiang, J., Liang, M., & He, Y.(2014). Experimental investigation of frequency-based multi-damage detection for beams using support vector regression. *Engineering Fracture Mechanics*, *131*, 257–268. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.08.001

Yan, Y. J., Cheng, L., Wu, Z. Y., & Yam, L. H. (2007). Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *21*(5), 2198–2211. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.10.002

Yan, W. J., & Ren, W. X. (2011). A direct algebraic method to calculate the sensitivity of element modal strain energy. *International Journal for Numerrical Method in Biomedical Engineering*, *27*(5), 694–710. https://doi.org/10.1002/cnm.1322

Yan, W.J., Huang, T.L., & Ren, W.X. (2010). Damage detection method based on element modal strain energy sensitivity. *Advances in Structural Engineering*, *13*(6): 1075–1088. https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.6.1075

Yang, Z., & Wang, L. (2010). Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *21*(3), 309–319. https://doi.org/10.1177/1045389X09350332

Yao, G. C., Chang, K. C., & Lee, G. C. (1992). Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, *118*(9): 1949–1961. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:9(1949)