



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

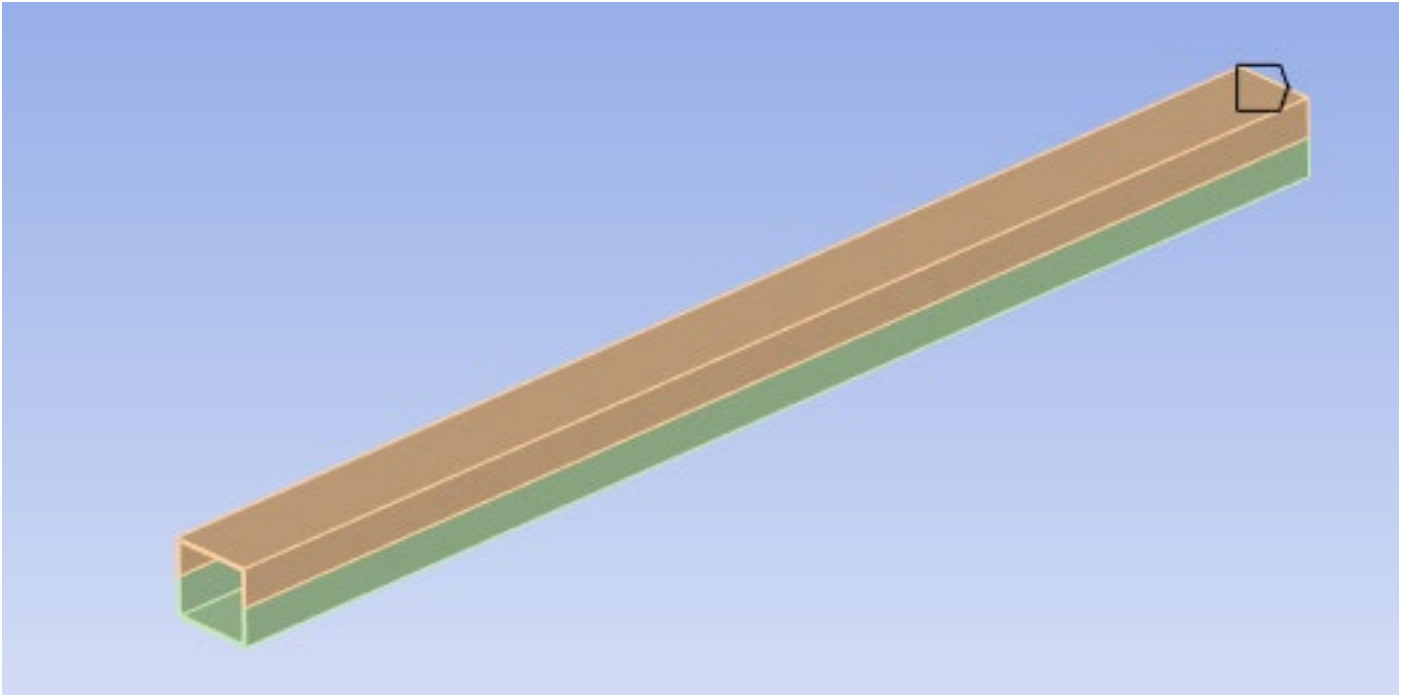
Κατασκευαστικός Τομέας

Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων
& Αυτοματισμού

Διάγνωση βλαβών σε πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά με προηγμένες στοχαστικές μεθόδους

Στεφανόπουλος Απόλλωνας

[1047233]



Διπλωματική Εργασία

υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών
του Πανεπιστημίου Πατρών

Επιβλέπων καθηγητής: Ι. Σακελλαρίου

Πάτρα, 2024

Πανεπιστήμιο Πατρών, [Τμήμα]

[Στεφανόπουλος Απόλλωνας]

© [2024] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**[Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων
& Αυτοματισμού]**

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε
από τον

[Στεφανόπουλος Απόλλων]

[1047233]

την [8η , Μαρτίου, 2024]

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

[Διάγνωση βλαβών σε πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά με προηγμένες στοχαστικές μεθόδους]

[Στεφανόπουλος Απόλλωνας]

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανίχνευση, τον καθορισμό θέσης και μεγέθους βλαβών τύπου ρωγμής σε ένα πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά μέσω προηγμένων στοχαστικών μεθόδων ανάλυσης σημάτων ταλάντωσης. Τα σήματα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση προέρχονται από προσομοίωση στο περιβάλλον του Ansys. Συγκεκριμένα η διάγνωση γίνεται για τρεις τεχνητές βλάβες σε κάθε μια από τις δυο θέσεις που εφαρμόζονται, οι οποίες είναι τύπου ρωγμής. Το σύνολο των δοκών βρίσκονται σε ίδιες περιβαλλοντολογικές συνθήκες, όπως και συνθήκες στήριξης, διαφοροποιούνται όμως στο πάχος τους, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια επιπλέον αβεβαιότητα στον πληθυσμό. Η διάγνωση βλαβών λοιπόν φέρει αυτήν την επιπλέον αλλά και κύρια δυσκολία καθώς και η κατασκευαστική αβεβαιότητα που προκλήθηκε στον πληθυσμό πολλές φορές, μπορεί να προκαλέσουν έως και επικάλυψη της δυναμικής από αυτής των βλαβών. Η κατασκευή διεγείρεται με μία δυναμική τύπου αρμονική, ενώ ταυτόχρονα συνδέονται πάνω στην εκάστοτε σύνθετη δοκό τρία επιταχυνσιόμετρα για την λήψη των σημάτων. Η ανάλυση των ταλαντωτικών σημάτων περιλαμβάνει τόσο την μη-παραμετρική ανάλυση για να δειχθεί η επίδραση της μεταβλητότητας της βλάβης στις συναρτήσεις Transmittance, όσο και την παραμετρική ανάλυση με την χρήση του μοντέλου TF-ARX-OLS και TF-IV. Έπειτα η διάγνωση βλαβών επιτυγχάνεται με την χρήση της μεθόδου των πολλαπλών μοντέλων, η οποία χρησιμοποιεί ως χαρακτηριστική ποσότητα την τιμή της συνάρτησης Transmittance. Τέλος στο κομμάτι της ανίχνευσης των βλαβών εκτιμάται η απόδοση των μεθόδων με την χρήση στατιστικών χαρακτηριστικών καμπυλών (ROC curves) και τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι ικανοποιητικά για 5% ψευδοσυναγεγμένων (100/0). Στον χαρακτηρισμό των βλαβών ως προς την θέση τους και ως προς το μέγεθος τους και τα δυο παραμετρικά μοντέλα έδωσαν πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην διάγνωση βλαβών περιλαμβάνοντας την ανίχνευση, τον καθορισμό θέσης και μεγέθους, σε ένα πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά μέσω προηγμένων στοχαστικών μεθόδων ανάλυσης σημάτων ταλάντωσης. Για τον σκοπό αυτό, τα χαρακτηριστικά κάθε δοκού (γεωμετρία, υλικά) η οποία τυπικά αντιπροσωπεύει τμήμα αεροκατασκευής, προσομοιώνονται με την χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, στο λογισμικό ANSYS. Η κατασκευαστική αβεβαιότητα εξαιτίας της χρήσης σύνθετων υλικών προσομοιώνεται γεωμετρικά, με μεταβολή του πάχους της δοκού (20% εύρος μεταβολής από το ονομαστικό πάχος) ενώ οι συνθήκες λειτουργίας κατά την πτήση προσομοιώνονται με διέγερση τύπου τύρβης περιλαμβάνοντας και την επίδραση της διέγερσης που προκύπτει εξαιτίας περιστρεφόμενων τμημάτων. Οι εξεταζόμενες βλάβες τύπου διαμπερούς ρωγμής πλάτους 1 mm, υλοποιούνται σε δύο διαφορετικές θέσεις γεωμετρικά (αφαίρεση υλικού) ενώ για κάθε θέση εξετάζονται 3 διαφορετικά μεγέθη (0.6%, 2%, 3.3% του μήκους). Τα συγκεκριμένα μεγέθη βλάβης επιφέρουν μικρές μεταβολές στα υγιή δυναμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες επικαλύπτονται σημαντικά, όταν εξετάζονται υπό την κατασκευαστική αβεβαιότητα που προκύπτει στα δυναμικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πληθυσμού, θέτοντας ως πρόκληση την εύρωστη διάγνωση τους στην παρούσα εργασία. Επιπρόσθετα, οι συνθήκες διέγερσης θεωρούνται μη-μετρήσιμες οδηγώντας στην αποκλειστική χρήση σημάτων απόκρισης για την εκτίμηση της Συνάρτησης Μετάδοσης (Transmittance Function), η οποία χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστική ποσότητα κατά την διάγνωση, με σκοπό την εξάλειψη της επίδρασης της διέγερσης. Συγκεκριμένα η εκτίμηση και η δυναμική αναγνώριση πραγματοποιούνται με μη-παραμετρικά (Welch) και παραμετρικά μοντέλα (ARX-OLS, IV). Τα πλήρη ή μειωμένα, μέσω της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA), διανύσματα των παραμετρικών μοντέλων χρησιμοποιούνται κατά την διάγνωση σε πλαίσιο εργασίας τύπου Πολλαπλών Μοντέλων (Multiple Models), το οποίο εξασφαλίζει την ευρωστία στην κατασκευαστική αβεβαιότητα. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο εκτιμητριών ως προς την διάγνωση, πραγματοποιείται μέσω 114 Monte-Carlo προσομοιώσεων και αρκετές περιστροφές (rotations) του σετ εκπαίδευσης για την εξασφάλιση της στατιστικής αξιοπιστίας των ευρημάτων. Τέλος τα αποτελέσματα της ανίχνευσης παρουσιάζονται με την χρήση καμπυλών ROC επιδεικνύοντας εξαιρετική απόδοση και για τις δύο εκτιμήτριες (100% επιτυχής ανίχνευση για όλες τις βλάβες σε 0% ποσοστό ψευδοσυναγεγμένων). Τα αποτελέσματα του καθορισμού της θέσης και του μεγέθους παρουσιάζονται με την χρήση Confusion Matrices τα οποία κρίνονται πολύ καλά, σε επίπεδο ακρίβειας, στον καθορισμό της θέσης (82.9% για την ARX-OLS, 82.5% για την IV) όσο και για τον καθορισμό του μεγέθους (72.6% για την ARX-OLS, 73.8% για την IV) της βλαβών.

Λέξεις κλειδιά

[διάγνωση βλαβών σε πληθυσμό, σύνθετες κατασκευές, σήματα ταλάντωσης, Συνάρτηση Μετάδοσης, Στατιστικές Μέθοδοι Χρονοσειρών ανίχνευση, καθορισμός θέσης και μεγέθους]

Abstract

[Damage detection in a population of identical composite beams using advanced stochastic methods]

[Stephanopoulos Apollonas]

The present work aims at damage diagnosis including the detection, location and size characterization, in a population of nominally identical beams made of composite materials through advanced vibration-based stochastic methods. For this purpose, the characteristics of each beam (geometry, materials), which typically represents a part of an aircraft structure, are simulated using a finite element model in ANSYS software. The manufacturing uncertainty due to the use of composite materials is geometrically simulated by varying the beam thickness ($\pm 20\%$ range of variation from the nominal thickness), while the operating conditions during flight are simulated by turbulence-like excitation, including the effects of excitation arising from rotating components. The examined damages of through-the-thickness cracks with a width of 1 mm are geometrically (material removal) implemented in two different positions, and for each location, three different sizes are considered (0.6%, 2%, 3.3% of length). These specific damage sizes result in small variations in the healthy dynamic characteristics, which are significantly overlapped when examined under the manufacturing uncertainty present in the dynamic characteristics of the examined population, posing a challenge for their robust diagnosis in this work. Additionally, the excitation conditions are considered non-measurable, leading to the exclusive use of response signals for estimating the Transmittance Function, which is used as a characteristic quantity in diagnosis to eliminate the effects of the excitation. Specifically, the estimation and dynamic identification are carried out with non-parametric (Welch) and parametric models (ARX-OLS, IV). The full or reduced, via Principal Component Analysis (PCA), model parameter vectors are used in diagnosis within a Multiple Models framework, which ensures robustness to manufacturing uncertainty. The evaluation and comparison of the two estimators regarding diagnosis are performed through 114 Monte Carlo simulations and several rotations of the training set to ensure the statistical reliability of the findings. Finally, the detection results are presented using ROC curves, demonstrating excellent performance for both estimators (100% correct detection rate for all damages at 0% false alarms rate). The results of location and size classification are presented using Confusion Matrices, which are judged very well in terms of accuracy, for both location (82.9% for ARX-OLS, 82.5% for IV) and size (72.6% for ARX-OLS, 73.8% for IV) classification of the damages.

Keywords

[Population-based damage diagnosis, composite structures, vibration signals, Transmittance Function, Statistical Time Series Methods, detection, location and size classification]

Πίνακας Περιεχομένων

Contents

Περίληψη	viii
Abstract	x
Πίνακας Περιεχομένων	xi
Κατάλογος Συμβάσεων	xiii
Κατάλογος Συμβόλων	xiii
Κατάλογος Συντομεύσεων	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Το πρόβλημα.....	1
1.2 Τεχνική & Επιστημονική σημασία του προβλήματος.....	1
1.3 Το Ειδικό πρόβλημα.....	1
2. Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας.....	2
3. Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας – Πρωτοτυπία	3
4. Περιγραφή των σημάτων από προσομοίωση	4
4.1 Περιγραφή της κατασκευής.....	4
4.2 Περιγραφή των βλαβών	5
4.3 Διαδικασία Προσομοιώσεων.....	8
4.3.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	8
4.3.2 Διέγερση & Αποκρίσεις.....	11
4.3.3 Δυναμικά Χαρακτηριστικά & επιβεβαίωση ορθότητας προσομοιώσεων	12
4.3.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες προσομοιώσεων	14
4.4 Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων.....	14
5. Μεθοδολογία της Δυναμικής αναγνώρισης, Ανίχνευσης βλαβών και Εύρεσης θέσης βλάβης.....	21
5.1 Κεντρική ιδέα της μεθοδολογίας.....	21
5.2 Αναγνώριση του Μοντέλου TF-ARX.....	22
5.2.1 Εκτιμήτρια συνήθων ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least squares)	22
5.2.2 Εκτιμήτρια Instrumental Variables (IV).....	23
5.3 Μεθοδολογία Ανίχνευσης Βλαβών βάση της μεθόδου των πολλαπλών Μοντέλων.....	25
5.3.1 Φάση Εκπαίδευσης- Κατασκευή Υγιούς υποχώρου	25
5.3.2 Φάση ελέγχου της κατασκευής	26
6. Αποτελέσματα & Συζήτηση.....	26
6.1 Δυναμική Αναγνώριση με μοντέλα TF-ARX-OLS.....	26
6.2 Δυναμική Αναγνώριση με μοντέλα TF-ARX-IV.....	30
6.3 Ανίχνευση Βλαβών βάση της μεθόδου πολλαπλών μοντέλων	34

6.3.1 Ανίχνευση βλαβών βάση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS.....	34
6.3.2 Ανίχνευση βλαβών βάση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV.....	36
6.4 Καθορισμός θέσης βλάβης	38
6.4.1 Καθορισμός θέσης βλάβης διαμέσου της μεθόδου PCA-MM-TF-ARX-OLS	39
6.4.2 Καθορισμός θέσης βλάβης διαμέσου της μεθόδου PCA-MM-TF-ARX-IV	39
6.5 Καθορισμός μεγέθους βλαβών	40
6.5.1 Καθορισμός μεγέθους βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS	41
6.5.2 Καθορισμός μεγέθους βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV	41
7. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	42
7.1 Ανίχνευση βλαβών.....	43
7.2 Καθορισμός θέσης βλάβης	43
7.3 Καθορισμός Μεγέθους βλάβης	44
8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	44
Βιβλιογραφικές Αναφορές (Works Cited).....	45
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κατάλογος Πινάκων	47
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κατάλογος Σχημάτων	48
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πρόσθετα Αποτελέσματα	50

Κατάλογος Συμβάσεων

Πίνακες - διανύσματα υποδεικνύονται με παχείς (bold) χαρακτήρες, μικρούς για διανύσματα, κεφαλαίους για πίνακες.

Εκτιμήσεις/-τριες υποδεικνύονται μέσω καπέλου (hat), για παράδειγμα το $\hat{x}$ αποτελεί εκτιμήτρια/-ηση του μεγέθους x .

Ο χρόνος, ως όρισμα συναρτήσεως, παριστάνεται σε παρενθέσεις στην αναλογική περίπτωση, π.χ. $x(t)$, αλλά σε αγκύλες στην διακριτή/ψηφιακή περίπτωση, π.χ. $x[t]$.

Κατάλογος Συμβόλων

Y_1, Y_2, Y_3	Τα σημεία των 3 αισθητηρίων
N	Μήκος σήματος
F_s	Συχνότητα δειγματοληψίας
$y_i[t]$	Σήματά απόκρισης στα σημεία Y_i ($i = 1,2,3$)
α	Επίπεδο εμπιστοσύνης
t	Κανονικοποιημένος διακριτός χρόνος
$\varepsilon(t/\theta)$	Σφάλμα πρόβλεψης ενός βήματος
$e[t]$	Ακολουθία λευκού θορύβου
σ_e^2	Διασπορά λευκού θορύβου
θ	Διάνυσμα αγνώστων παραμέτρων
$\hat{\theta}$	Εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων
$\hat{\theta}_{OLS}$	Εκτίμηση των παραμέτρων με την εκτιμήτρια Ordinary Least Squares
$\hat{\theta}_{IV}$	Εκτίμηση των παραμέτρων με την εκτιμήτρια Instrumental Variables
$J(\theta)$	Κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων
d	Συνολικός αριθμός εκτιμώμενων παραμέτρων
$\hat{\sigma}_e$	Εκτίμηση της διασποράς των υπολοίπων του μοντέλου TF-ARX-OLS
$\mathbf{a}, \mathbf{b}$	Διανύσματα παραμέτρων του μοντέλου TF-ARX
ζ	Χαρακτηριστικό διάνυσμα της εκτιμήτριας instrumental variables
$A(z)$	Μετασχηματισμός Z για το πολυώνυμο A για το μοντέλο TF-ARX-IV
$B(z)$	Μετασχηματισμός Z για το πολυώνυμο B για το μοντέλο TF-ARX-IV
$N(z)$	Μετασχηματισμός Z για την ακολουθία λευκού θορύβου για το μοντέλο TF-ARX-IV
$\mathbf{Z}_o$	Σύνολο δεδομένων
$\{\mathbf{n}_k\}$	Ακολουθία λευκού θορύβου για το μοντέλο TF-ARX-IV
δ, ξ	Διανύσματα παραμέτρων του μοντέλου ARMA
n	Τάξη του εκάστοτε πολυωνύμου για κάθε μοντέλο
Q	Χαρακτηριστική Ποσότητα
$\mathbf{m}_o$	Σύνολο μοντέλων που αποτελούν τον υγιή υποχώρο

$\mathbf{m}_u$	Σύνολο μοντέλων που ανήκουν σε άγνωστες για την μέθοδο καταστάσεις λειτουργίας
D	Απόσταση μεταξύ των μοντέλων της φάσης εκπαίδευσης και των μοντέλων της φάσης ελέγχου
d_{KL}	Απόσταση Kullback-Leibler
argmin	Τελεστής ελαχιστοποίησης
$E[\cdot]$	Τελεστής μέσης τιμής
$\rho[\tau]$	Κανονικοποιημένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης(ACF)
$\gamma^2(\omega)$	Συνάρτηση συνάφειας κατά Welch
$S_{y_2y_2}(\omega)$	Φασματική πυκνότητα ισχύος κατά Welch σήματος ψευδοεισόδου
$S_{y_1y_1}(\omega)$	Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος εξόδου (απόκρισης) κατά Welch
$S_{y_1y_2}(\omega)$	Διασταυρούμενο φάσμα ισχύος μεταξύ εξόδου και ψευδοεισόδου κατά Welch
Σ	Πίνακας συνδιασπορών του διανύσματος α
$\mathbf{S}_0$	Υγιής υποχώρος
$\mathbf{S}_u$	Σύνολο αγνώστων καταστάσεων λειτουργίας
$\hat{\mathbf{Q}}_0$	Εκτίμηση χαρακτηριστικής ποσότητας υγιούς υποχώρου
$\hat{\mathbf{Q}}_u$	Εκτίμηση χαρακτηριστικής ποσότητας των αγνώστων καταστάσεων λειτουργίας
n_a, n_b	Τάξη των μοντέλων για τα πολυώνυμα A,B αντίστοιχα
Σ_o	πίνακας συνδιασποράς των εκτιμώμενων παραμέτρων του κάθε μοντέλου στον υγιή υποχώρο

Κατάλογος Συνοτομεύσεων

IV	Instrumental Variables
OLS	Ordinary Least Squares
TF-ARX	AutoRegressive with eXogenous Input-ARX-transmittance
TF-ARX-OLS	Transmittance Function AutoRegressive with eXogenous excitation estimation using Ordinary Least Squares
TF-ARX-IV	Transmittance Function estimation via Instrumental Variables
BIC	Bayesian Information Criterion
RSS	Residual Sum of Squares
SSS	Series Sum of Squares
OE	Output Error
FRF	Frequency Response Function
PSD	Power Spectral Density
STFT	Short-Time Fourier Transform
PCA	Principal Component Analysis
SPP	Samples Per Parameter

ROC	Receiver Operating Characteristics curve
MM	Multiple Model
KL	Kullback Leibler (divergence)
TPR	True Positive Rate
FPR	False Positive Rate
AUC	The Area Under the Curve
ACF	Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης
Damage 1	Μικρή ζημιά
Damage 2	Μεσαία ζημιά
Damage 3	Μεγάλη ζημιά
$D_{i,j}$	Ζημιά μεγέθους $i=1,2,3$ θέσης $j=1,2$

1. Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανίχνευση, τον καθορισμό θέσης και μεγέθους βλαβών σε ένα πληθυσμό ιδίων σύνθετων δοκών, που μεταβάλλονται ως προς το συνολικό τους ονομαστικό πάχος λόγω κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων, βάσει μετρήσεων χρονοσειρών σημάτων ταλάντωσης που προέρχονται από περιβάλλον προσομοίωσης, χωρίς την χρήση της δύναμης διέγερσης, (Vamvoudakis-Stefanou et al., 2018).

1.2 Τεχνική & Επιστημονική σημασία του προβλήματος

Η δυναμική αναγνώριση και η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών, αποκτούν αυξανόμενη σημασία και ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα, καθώς οι πληροφορίες που λαμβάνονται, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία των σημάτων απόκρισης αναφορικά με την μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, είναι πολυάριθμες. Οι μέθοδοι παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας και διάγνωσης βλαβών, συνδυάζουν ένα μεγάλο εύρος πλεονεκτημάτων όπως το προσιτό κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού (συσκευές καταγραφής, αισθητήρια απόκρισης), ευκολία μέτρησης των σημάτων μέσω των σύγχρονων δυνατοτήτων των υπολογιστικών συστημάτων. Κρίνονται λοιπόν πως μπορούν να καλύψουν τις αυξανόμενες ανάγκες για μεγαλύτερη απόδοση, ασφάλεια μέσω της διάγνωσης βλαβών αλλά και την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης χωρίς να διακόπτεται η φυσική λειτουργία της κατασκευής (Sohn H., 2007).

Η σημασία της επιτυχούς διάγνωσης βλαβών σε ένα πληθυσμό όμοιων κατασκευών με την χρήση χρονοσειρών ταλάντωσης είναι τεράστια καθώς σχετίζεται με την ασφάλεια, με την ανθρώπινη άνεση, με την σωστή λήψη αποφάσεων, με την αποτελεσματική συντήρηση της κατασκευής με στόχο την αύξηση του κύκλου ζωής της και με αυτά να αποτελούν μερικά παραδείγματα των πλεονεκτημάτων που φέρουν. Ωστόσο ενώ τα μέλη του πληθυσμού παραμένουν ονομαστικά όμοια η δυναμική μεταξύ τους εμφανίζει πολύ σημαντικές διαφοροποιήσεις λόγω της αβεβαιότητας που δημιουργείται. Η αβεβαιότητα αυτή προκαλείται για διάφορους λόγους, κυρίως λόγω της κατασκευαστικής αβεβαιότητας που προκαλείται στον πληθυσμό ιδίων δοκών, λόγω της σχετικής μεταβλητότητας των υλικών, λόγω των συνθηκών λειτουργίας που την περιβάλλουν και κατά την διαδικασία συναρμολόγησης, (Saramantas et al., 2022). Η διαφοροποίηση της δυναμικής εντός του πληθυσμού ιδίων κατασκευών λόγω των παραπάνω αβεβαιοτήτων πολλές φορές έως και να επικαλύπτει αυτή λόγω της ύπαρξης βλαβών ανεξαρτήτου θέσεως αυτού, με αποτέλεσμα η δυναμική αναγνώριση και κατ' επέκταση η διάγνωση βλαβών να εμφανίζει μεγάλες δυσκολίες έως να μην είναι δυνατή.

1.3 Το Ειδικό πρόβλημα

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην διάγνωση βλαβών σε ένα πληθυσμό σύνθετων δοκών μέσω της ανάλυσης στοχαστικών ταλαντωτικών σημάτων που λαμβάνονται από προσομοίωση. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία κ.τ.λ.) θεωρούνται σταθερές, ενώ το πάχος της δοκού μεταβάλλεται ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή $\pm 20\%$ μιας πραγματικά μετρημένης συνθέτης δοκού με ονομαστικό πάχος 3.100mm. Οι βλάβες που εξετάζονται ως προς το μέγεθος τους είναι σε πλήθος 3 και αντιστοιχούν σε διαμπερές ρωγμές πλάτους 1mm και μήκους 10,30,50mm αντίστοιχα. Οι βλάβες εξετάζονται σε δυο κάθετες διευθύνσεις μεταξύ τους στον πληθυσμό συνθέτων δοκών, [Εικόνα 3](#), [Εικόνα 4](#), [Εικόνα 5](#), με στόχο την εξέταση της μεταβολής της δυναμικής λόγω των βλαβών σε δυο διαφορετικές διευθύνσεις σε σχέση με τον υγιή πληθυσμό. Η δυσκολία του προβλήματος έγκειται στο γεγονός πως η δυναμική και τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της δοκού μεταβάλλονται τόσο από τις βλάβες όσο και από την μεταβολή του πάχους. Με δεδομένο πως η διάγνωση βλαβών μέσω ταλαντωτικών σημάτων βασίζεται στην μεταβολή της δυναμικής της δοκού, είναι εμφανές ότι είναι πολύ δύσκολη η διάκριση της αιτίας μεταβολής των δυναμικών χαρακτηριστικών, άρα και της αποτελεσματικότητας του προβλήματος. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί πως η διαφοροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών λόγω της διαφοροποίησης των ιδίων κατασκευών του πληθυσμού μπορεί να επισκιάσει αυτές των βλαβών και οι προσπάθειες για επιτυχή διάγνωση βλαβών να είναι έως και αναποτελεσματικές. Παρά ταύτα έχουν γίνει μια πληθώρα προσπαθειών με εξαιρετικά αποτελέσματα στο όσο τον δυνατόν διαχωρισμό της μεταβολής των δομικών χαρακτηριστικών σε ένα πληθυσμό με αυτές των βλαβών με μεγάλα οφέλη για την σύγχρονη κοινωνία.

2. Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Η ανάγκη για αύξηση της αντοχής των κατασκευών, όπως για παράδειγμα των αεροναυπηγικών σε συνδυασμό με την ανάγκη για μείωση του βάρους έχουν ως αποτέλεσμα την αυξανόμενη παραγωγή και ζήτηση σύνθετων υλικών. Επομένως καθίσταται σημαντική η αποτελεσματική παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας σε σύνθετες κατασκευές, για λόγους ασφάλειας αλλά και η ανάπτυξη μεθόδων ικανών να ανιχνεύσουν βλάβες σε πραγματικό χρόνο. Παρά ταύτα για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, οι οποίες εμφανίζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για την εκάστοτε κατασκευή. Τα προβλήματα αυτά λόγω της επίδρασης της εκάστοτε αβεβαιότητας, καθιστά αδύνατον την δημιουργία μίας γενικής μεθόδου ελέγχου της δομικής ακεραιότητας. Η επιλογή της μεθόδου και ρύθμιση των υπερπαραμέτρων της για την εκάστοτε κατασκευή γίνεται από τον χρήστη.

Η επίδραση των αβεβαιοτήτων που προκαλούνται λόγω του πληθυσμού των δοκών που μεταβάλλονται ως προς το πάχος τους καθιστά ακόμα πιο δύσκολη την διαδικασία της ανίχνευσης βλαβών καθώς τις περισσότερες φορές η μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών λόγω των παραπάνω αβεβαιοτήτων επισκιάζει αυτής των βλαβών. Για την επίλυση του ζητήματος αυτού ανάλογα με τον τρόπο μοντελοποίησης της κατασκευής οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε μεθόδους βάσει δεδομένων (data-based) (Fassois & Sakellariou, 2007), (Boller et al., 2009) που διαμορφώνονται απ' ευθείας από δεδομένα που προκύπτουν από πειράματα στην κατασκευή και σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Οι data-based μέθοδοι μπορούν να διαφοροποιηθούν σε 'implicit' και 'explicit'.

Οι 'implicit' μέθοδοι στοχεύουν στην αφαίρεση της επίδρασης της αβεβαιότητας στα δυναμικά χαρακτηριστικά λόγω των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών (Aravanis et al., 2019) είτε κατασκευαστικής αβεβαιότητας (Vamvoudakis-Stefanou K, 2015) μέσω της μείωσης της πληροφορίας στην αρχική χαρακτηριστική ποσότητα. Κατόπιν κατασκευάζεται ένας μειωμένων διαστάσεων 'υγιής' υποχώρος (healthy subspace) σε σχέση με τον αρχικό, και εξετάζεται εάν η νέα χαρακτηριστική ποσότητα είναι πιθανόν πιο ευαίσθητη στην μεταβολή λόγω βλάβης. Χαρακτηριστική μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η Principal Component Analysis (PCA), για την οποία έχει πραγματοποιηθεί πληθώρα εργασιών (Vamvoudakis-Stefanou et al., 2015), όπου σε ένα σύνολο 29 πανομοιότυπων δοκών πραγματοποιήθηκε η διάγνωση βλαβών προερχόμενων από κρούση, με εποπτευόμενες (supervised) μεθόδους όπως η PCA-MM, MM με αποτελέσματα που δείχνουν πως ξεπεράστηκε επιτυχώς η αβεβαιότητα που προκύπτει από τον πληθυσμό των δοκών. Στην εργασία (Vamvoudakis-Stefanou et al., 2016), πραγματοποιήθηκε σύγκριση των εποπτευόμενων και μη-εποπτευόμενων (unsupervised) μεθόδων βασιζόμενων στις παραμέτρους των μοντέλων AR σε ένα πληθυσμό 31 πανομοιότυπων δοκών με εφαρμογή παρόμοιων βλαβών σε 4 σημεία στο μήκος τους και με αποτελέσματα ενθαρρυντικά για την χρήση των unsupervised μεθόδων. Σε πιο πρόσφατη εργασία (K. J. Vamvoudakis-Stefanou et al., 2018), με εφαρμογή σε ένα πληθυσμό 31 πανομοιότυπων δοκών, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των unsupervised μεθόδων MM, PCA, PCA-MM βασιζόμενων στις παραμέτρους των μοντέλων AR, με τα αποτελέσματα να υποδεικνύουν την υψηλότερη απόδοση βάσει της μεθόδου MM για την ανίχνευση βλαβών προερχόμενων από κρούση εξετάζοντας 4 διαφορετικές θέσεις. Μέθοδοι παρόμοιου τύπου είναι η Factor Analysis (FA) (Kullaa, 2014) όπου εφαρμόστηκε σε μια Z24 γέφυρα με αποτελέσματα που απέδειξαν την χρησιμότητα της μεθόδου, η Cointegration (Liang et al., 2018), (Worden et al., 2016), (Wei et al., 2017) όπου εφαρμόστηκε σε δεδομένα προερχόμενα από μια γέφυρα για την εξάλειψη της αβεβαιότητας που προκαλείται από την διαφορά θερμοκρασίας, αποσκοπώντας στην βέλτιστη χρήση των φυσικών συχνοτήτων στο SHM. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου καθώς εξαλείφθηκε επιτυχώς η αβεβαιότητα που πρόκυπτε από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι προαναφερθείσες μέθοδοι αν και επιτυγχάνουν αρκετά μεγάλη ακρίβεια στην ανίχνευση, πολλές φορές παρουσιάζουν μειονεκτήματα λόγω της μερικής μοντελοποίησης του υγιούς υποχώρου και συνεπώς της αφαίρεσης πιθανόν χρήσιμης πληροφορίας. Τέλος, σημαντική επίδραση στην απόδοση των συγκεκριμένων μεθόδων έχει ο αριθμός των σημάτων που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο εκπαίδευσης, όπως επίσης και υποκειμενική επιλογή κρίσιμων παραμέτρων, όπως για την μέθοδο Principal Component Analysis (PCA) είναι η επιλογή και ο αριθμός των κύριων συνιστωσών.

Οι 'explicit' μέθοδοι εν αντιθέσει στοχεύουν στην κατασκευή του υγιούς υποχώρου μοντελοποιώντας πλήρως την αβεβαιότητα που προκαλείται στα δυναμικά χαρακτηριστικά λόγω των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών. Αντιπροσωπευτικές μέθοδοι αποτελούν οι Global Statistical Model based method (Hios & Fassois, 2014), όπου σε μια σύνθετη δοκό με αβεβαιότητα ως προς της μεταβολή της θερμοκρασία μελετήθηκαν βλάβες τύπου επιπρόσθετη μάζα εφαρμόζοντας τις μεθόδους Functionally Pooled VAR (Model) αποδίδοντας πολύ

καλά αποτελέσματα, (Hios & Fassois., 2009) , όπου ξανά στην ίδια σύνθετη δοκό εφαρμόστηκε αυτήν την φορά η μέθοδος Functionally Pooled VARX (Model) με αποτελέσματα που αποδεικνύουν την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου στην κατασκευή για αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (πχ θερμοκρασία), και τα Multiple Model (MM) based methods, (Vamvoudakis-Stefanou et al., 2018). Οι μέθοδοι συχνά είναι αρκετά αποδοτικές , έχοντας όμως τα δικά τους όρια. Τέλος στην εργασία (Aravanis et al., 2019) μελετάται ως προς την ανίχνευση βλαβών, μια σύνθετη εργαστηριακή δοκός με αβεβαιότητες ως προς την θερμοκρασία και την ροπή σύσφιξης για δυο τεχνίτες βλάβες με χρήση του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX στο πλαίσιο εργασίας των πολλαπλών μοντέλων (MM), principal Components Analysis (PCA) και Functional Model (FP) συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

Το πρόβλημα της αβεβαιότητας και μεταβλητότητας σε έναν πληθυσμό από όμοιες κατασκευές πραγματοποιήθηκε προσπάθεια να αντιμετωπιστεί (Papatheou et al., 2015), όπου μελετήθηκε ένας μικρός αριθμός φτερών αεροκατασκευών και αποφασίστηκε κατά πόσο υπάρχουν συχνοτικά εύρη στα οποία τα δυναμικά χαρακτηριστικά θα είναι κοινά στον πληθυσμό των υγείων κατασκευών. Κατά αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να τα χρησιμοποιήσουν σαν χαρακτηριστικές ποσότητες. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μακροχρόνια μελέτη της δυναμικής των κατασκευών και αποτελεί μια χρονοβόρα μέθοδο και δεν λαμβάνει υπόψιν όλες τις πληροφορίες καθώς η ανίχνευση στηρίζεται μόνο σε αμετάβλητα και στα κοινά αυτά χαρακτηριστικά.

Επιπρόσθετα, οι προαναφερθείσες μέθοδοι και η μέθοδος των Υπερφαιρών (HS) έχουν εφαρμοστεί λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους των μοντέλων MISO-TF-ARX (Saramantas et al., 2024), (Spiliotopoulos et al., 2024), (Fera , et al., 2023), (Fera et al., 2023), (Saramantas et al., 2023), (Spiliotopoulos et al., 2023), (Saramantas et al., 2022), (Fassois S.D et al., 2022) ως χαρακτηριστική ποσότητα στην ανίχνευση βλαβών τύπου ρωγμής και την ανίχνευση και χαρακτηρισμό ως προς τον τύπο, την θέση, το μέγεθος βλαβών τύπου κρούσης, διαστρωματικής αποκόλλησης χρησιμοποιώντας σήματα από διαφορετικά αισθητήρια (παραμορφώσεις, επιταχύνσεις). Η αξιολόγηση των μεθόδων έχει γίνει πειραματικά και σε πεπερασμένα μοντέλα προσομοίωσης υπό συνδυασμένη αβεβαιότητα (προφίλ διέγερσης, κατασκευαστική, θερμοκρασία, συντοριακές συνθήκες, θέση αισθητήρων) και υπό συνθήκες πολλαπλής διέγερσης, παρουσιάζοντας εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό (τύπος, θέση, μέγεθος) των βλαβών.

3.Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας – Πρωτοτυπία

Ο κύριος **σκοπός** της εργασίας είναι η διεξοδική και τεκμηριωμένη εξέταση της δυνατότητας αποτελεσματικής ανίχνευσης και καθορισμού θέσεως και μεγέθους τεχνητών βλαβών σε ένα πληθυσμό ιδίων συνθέτων δοκών που διαφοροποιούνται ως προς το πάχος τους, με χρήση μιας στατιστικής μεθόδου (Μέθοδος βάσει των Παραμέτρων του Μοντέλου) βασιζόμενης σε στοχαστικά σήματα χρονοσειρών που προέκυψαν από προσομοίωση.

Οι **στόχοι** της εργασίας είναι οι εξής:

- 1) Ανίχνευση των τεχνητών βλαβών που εφαρμόστηκαν στην κατασκευή βάση στοχαστικών μοντέλων Αυτοπαλινδρόμησης με Εξωγενή είσοδο (AutoRegressive with eXogenous excitation-ARX), χρησιμοποιώντας την εκτιμήτρια Ordinary Least Squares (OLS) και την εκτιμήτρια (instrumental variables), σχηματίζοντας τα μοντέλα TF-ARX-OLS και TF-ARX-IV, (Ljung., 1999), εφαρμόζοντας σε αυτά την μέθοδο των πολλαπλών μοντέλων.
- 2) Χαρακτηρισμός των βλαβών ως προς την θέση που βρίσκονται εφαρμόζοντας την μέθοδο Principal Components Analysis (PCA) στα παραμετρικά μοντέλα τα οποία αφού περάσουν τον απαραίτητο έλεγχο εγκυρότητας τους εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο πρώτο στάδιο που αποτελεί η ανίχνευση των τεχνητών βλαβών.
- 3) Χαρακτηρισμός των βλαβών ως προς το μέγεθος τους εφαρμόζοντας την μέθοδο Principal Components Analysis (PCA) στα παραμετρικά μοντέλα τα οποία εμφάνισαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο δεύτερο στάδιο που αποτελεί ο καθορισμός των βλαβών ως προς την θέση τους.

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες στο εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων και Αυτοματισμού του Πανεπιστημίου Πατρών με πολύ καλά αποτελέσματα ,τόσο στην δυναμική αναγνώριση όσο στην ανίχνευση και καθορισμού θέσης και μεγέθους βλάβης. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείτε η δυναμική αναγνώριση της κατασκευής μέσω των μοντέλων TF-ARX-OLS ,TF-ARX-IV ,ενώ ταυτόχρονα γίνετε η

σύγκριση της αποδοτικότητας τους στον τομέα της ανίχνευσης βλαβών διαμέσου της μεθόδου των πολλαπλών μοντέλων (MM). Τέλος η επιτυχής ανίχνευση αλλά και καθορισμός του σημείου εμφάνισης της βλάβης ανάμεσα σε τρεις βλάβες σε κάθε μια από τις δυο θέσεις αντίστοιχα με την χρήση δυο αισθητηρίων είναι μια αισθητή πρόκληση, όπως επίσης και η σύγκριση των δυο εκτιμητριών παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

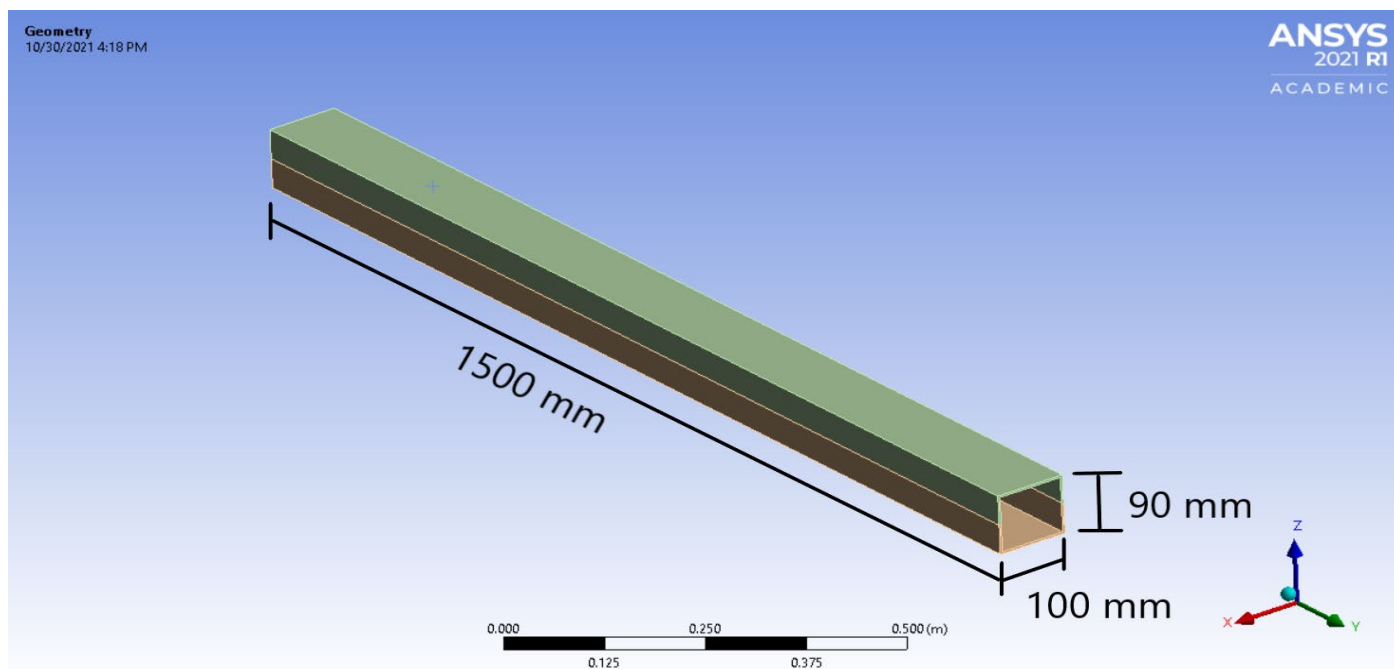
Επομένως η **πρωτοτυπία** της εργασίας ως προς την σημερινή κατάσταση έγκειται στα εξής:

- 1) Η εφαρμογή της εκτιμήτριας instrumental variables (IV) στο μοντέλο TF-ARX, σχηματίζοντας το μοντέλο TF-ARX-IV, για την επιτυχή ανίχνευση βλαβών σε ένα πληθυσμό με ίδια ονομαστικά χαρακτηριστικά.
- 2) Καθορισμός των βλαβών ως προς το μέγεθος και τη θέσης τους με την μέθοδο πολλαπλών μοντέλων (MM)

4. Περιγραφή των σημάτων από προσομοίωση

4.1 Περιγραφή της κατασκευής

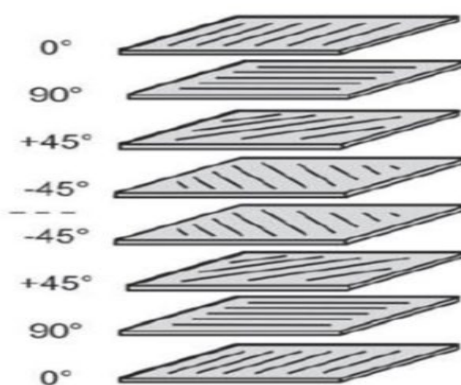
Η κατασκευή αποτελεί μια σύνθετη δοκό με τις ακόλουθες χαρακτηριστικές διαστάσεις: 1500mm x 100mm x 90mm (μήκος x πλάτος x ύψος) [Εικόνα 1](#) και μεταβλητό πάχος. Αποτελείται από δύο τομείς C καναλιών, κατασκευασμένους από σύνθετο υλικό, οι οποίοι συνδέονται μέσω της τεχνικής συνένωσης των κόμβων (Node Merge) του (Ansys® Academic Research Mechanical). Το υλικό αυτό περιλαμβάνει προ εμβαπτισμένες σε ρητίνη ίνες άνθρακα και μήτρα εποξικής ρητίνης. Οι ιδιότητες του υλικού έχουν προκαθοριστεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Ansys και παρουσιάζονται στον [Πίνακα 1](#). Η αρχιτεκτονική των στρώσεων, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 2](#), ορίζεται ως $[0\ 90\ \pm 45]$. Αυτή η διάταξη χαρακτηρίζεται ως ψευδο-ισότροπη, καθώς εκδηλώνει ισोटροπική συμπεριφορά με βασικές διαφοροποιήσεις στο μοτίβο της εσωτερικής δομής. Επιπλέον, αυτή η διάταξη εξαλείφει τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και εφελκυσμού, καθώς και τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και στρέψης. Τέλος, η μία άκρη της δοκού είναι πακτωμένη (πακτώνοντας στην επιφάνεια της άκρης), ενώ η άλλη είναι ελεύθερη. Η στήριξη έχει μοντελοποιηθεί υπό Clamped-Free συνοριακές συνθήκες προσομοιάζοντας έτσι την σύνδεση της δοκού με άλλα εξαρτήματα (π.χ. την σύνδεση με την άτρακτο) περιορίζοντας τους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με την μετατόπιση (U_x, U_y, U_z) στους επιλεγμένους κόμβους.



[Εικόνα 1:](#) Η γεωμετρία της σύνθετης δοκού αναπαριστώμενη στο Ansys ([Saramantas et al., 2022](#)),

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικού του μοντέλου της σύνθετης δοκού (Ansys® Academic Research Mechanical)

Ονομασία υλικού	Epoxy Carbon UD (Prepreg)
Πυκνότητα	1540 (kg/m ³)
Μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση X (E_x)	209 (GPa)
Μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση Y (E_y)	9.45 (GPa)
Μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση Z (E_z)	9.5 (GPa)
Λόγος Poisson XY (ν_{xy})	0.27
Λόγος Poisson YZ (ν_{yz})	0.4
Λόγος Poisson XZ (ν_{xz})	0.27
Μέτρο διάτμησης XY (G_{xy})	5.5 (GPa)
Μέτρο διάτμησης YZ (G_{yz})	3.9 (GPa)
Μέτρο διάτμησης XZ (G_{xz})	5.5 (GPa)



Εικόνα 2: Η αρχιτεκτονική της στρώσης [0/90/+45/-45]_s (Saramantas et al., 2022)

Η δοκός διεγείρεται με μία σημειακή δύναμη στην κάτω επιφάνεια (αρνητική επιφάνεια στον άξονα z) και στην ίδια επιφάνεια μετρούνται οι κατακόρυφες επιταχύνσεις (στον άξονα z) της δοκού.

Το πάχος των δοκών κατά την κατασκευαστική διαδικασία είναι στοχαστικό, με τιμές που βρίσκονται $\pm 20\%$ από την ονομαστική τιμή του πάχους των δικών που είναι 3.1mm. Η αβεβαιότητα που εισάγεται στην κατασκευή επηρεάζει τα δυναμικά της χαρακτηριστικά. Η αβεβαιότητα του πάχους εισάγεται μεταβάλλοντας το πάχος της κάθε στρώσης και καθώς το Ansys υπολογίζει το συνολικό πάχος αθροίζοντας τις επιμέρους στρώσεις αλλάζει τελικά όλο το πάχος. Η μεταβολή είναι ίδια σε κάθε στρώση. Καθώς η σύνθετη δοκός αποτελείται από 8 στρώσεις θα πρέπει το πάχος της δοκού να διαιρείτε με τον αριθμό των στρώσεων προκειμένου να βρεθεί το πάχος της κάθε στρώσης ξεχωριστά, με βασική προϋπόθεση αποτελεί οι στρώσεις της δοκού να έχουν το ίδιο πάχος.

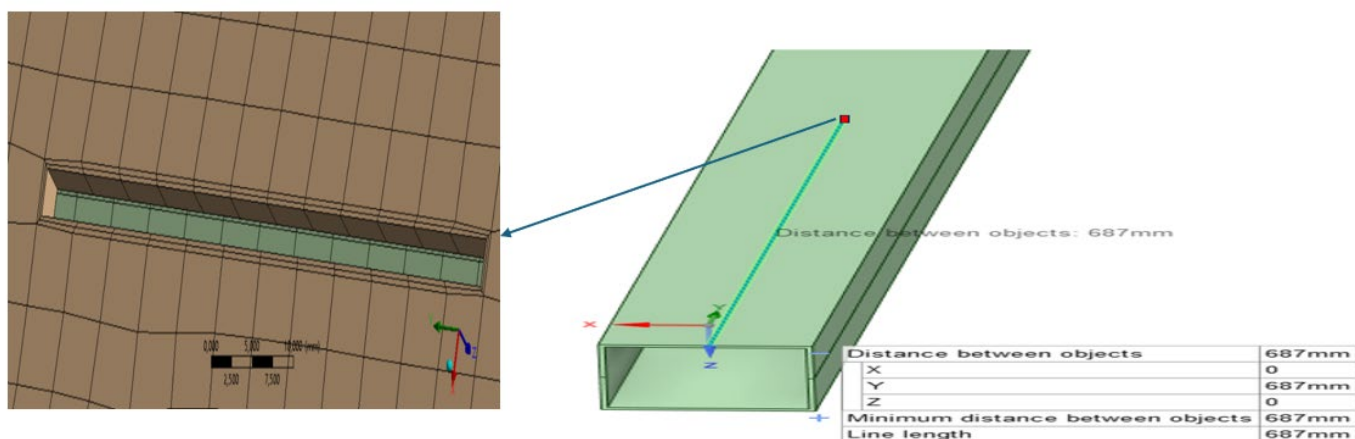
4.2 Περιγραφή των βλαβών

Στην σύνθετη δοκό της Εικόνα 1 σχεδιάζονται τρεις στο σύνολο μεγέθη βλάβης τύπου διαμπερούς ρωγμής σε δυο διαφορετικές θέσεις μεταξύ τους, η κάθε μια, Εικόνα 3, Εικόνα 4, Εικόνα 5. Οι ρωγμές μεταβάλλονται ως προς το μήκος τους διατηρώντας το πλάτος τους σταθερό και ίσο με 1mm, όπως φαίνεται στον Πίνακας 2. Το πλάτος μίας ρωγμής διατηρεί την τιμή μηδέν, όμως επειδή κατά το σχεδιασμό τους στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Ansys δεν υπάρχει εντολή που να επιτρέπει την

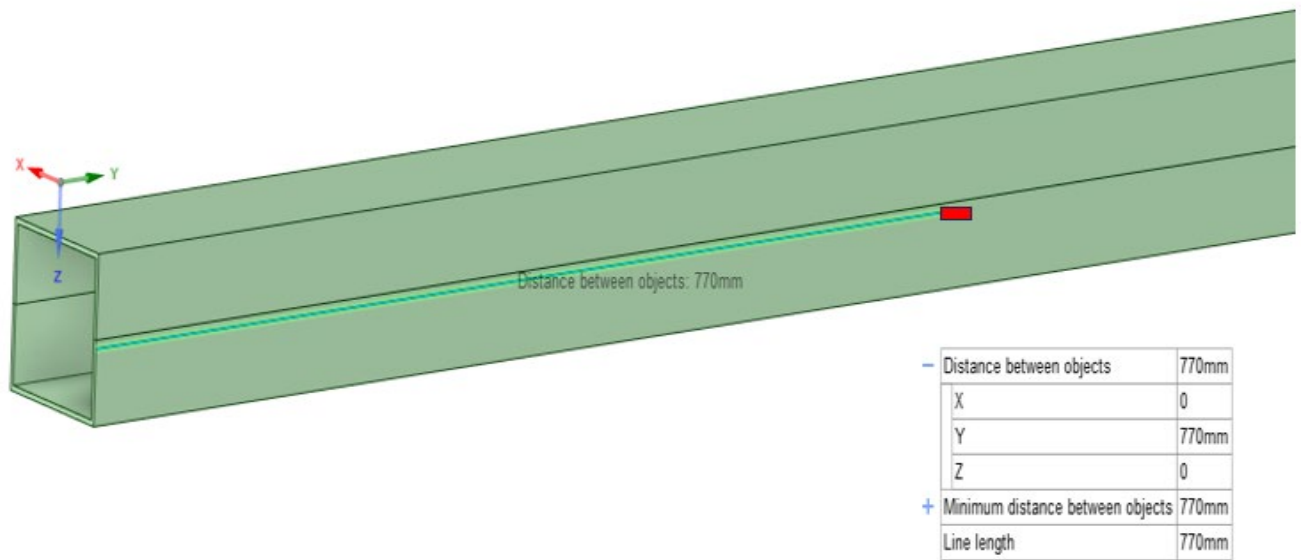
δημιουργία μαθηματικής ρωγμής χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους (shell elements), όπου αφαιρεί υλικό ο χρήστης με πλάτος 1mm. Η πρώτη θέση εφαρμογής των τεχνητών βλαβών τοποθετείται 687 mm από το ελεύθερο άκρο και επεκτείνεται στην μεριά του πακτωμένου άκρου, ενώ η δεύτερη θέση απέχει 770mm στον άξονα Y και 39.5mm στον άξονα Z. Η βλάβη έχει προσομοιωθεί γεωμετρικά ως ασυνέχεια του υλικού και κατόπιν η δοκός υπό βλάβη διακριτοποιείται με την το πλέγμα να είναι πιο πυκνό γύρω από την βλάβη. Στο πλαίσιο της ανάλυσης μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και ιδιαίτερα στη μηχανική της θραύσης, οι "επιστρώσεις φουσκώματος" (inflation layers) ή "επίπεδα μετάβασης" είναι πρόσθετα στοιχεία που προστίθενται γύρω από την άκρη της ρωγμής για να λεπτομεροποιήσουν το δίκτυο των στοιχείων και να αποτυπώσουν ακριβέστερα τις κλίσεις στάσης και παραμόρφωσης κοντά στην άκρη της ρωγμής.

Παρακάτω αναφέρονται οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται:

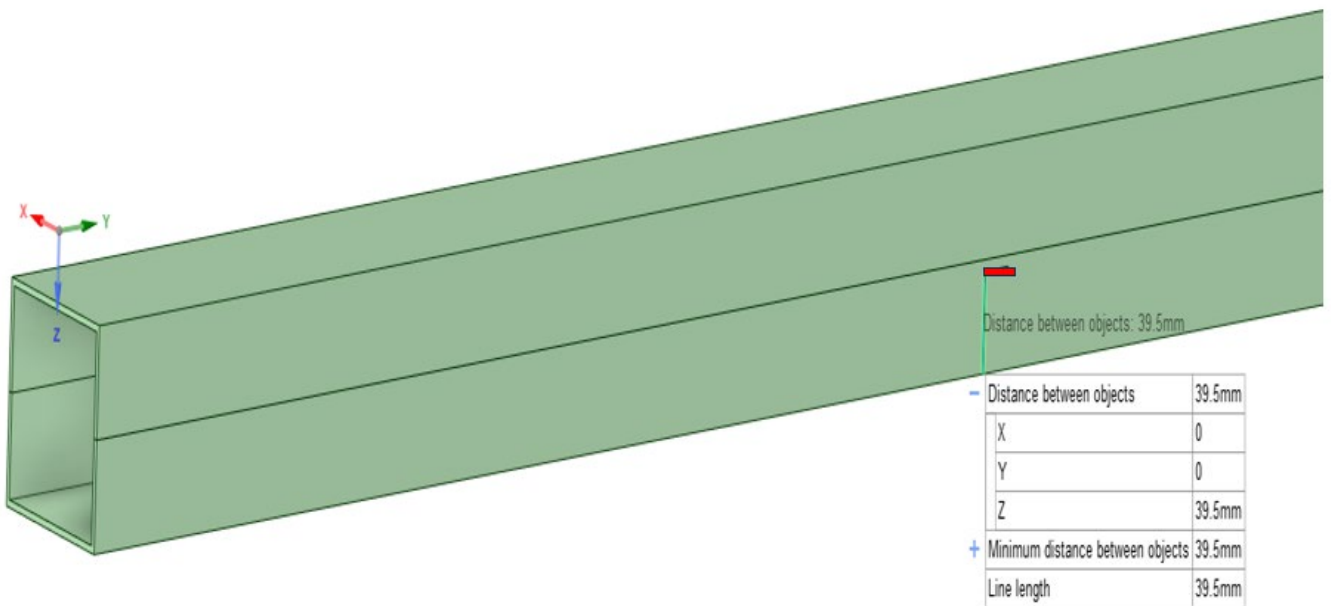
1. **Βελτίωση της ακρίβειας κοντά στην άκρη της ρωγμής:** Οι ρωγμές εισάγουν ασυνέχειες στα πεδία έντασης και παραμόρφωσης κοντά στις άκρες τους. Τα επίπεδα μετάβασης χρησιμεύουν για την λεπτομερή αναπαράσταση των πεδίων έντασης και παραμόρφωσης σε αυτήν την κρίσιμη περιοχή.
2. **Βελτίωση της σύγκλισης:** Η προσθήκη επιπέδων μετάβασης βοηθά στη βελτίωση της σύγκλισης της αριθμητικής λύσης. Με τη λεπτομερή καταγραφή των πεδίων έντασης και παραμόρφωσης κοντά στην άκρη της ρωγμής, με την λύση των ΜΠΣ να γίνεται πιο ακριβής και η σύγκλιση της λύσης βελτιώνεται.
3. **Καλύτερη ανίχνευση της εξέλιξης της ρωγμής:** Στις αναλύσεις μηχανικής θραύσης, η ακριβής καταγραφή της εξέλιξης της ρωγμής είναι ζωτικής σημασίας. Τα επίπεδα μετάβασης βοηθούν στην ακριβή πρόβλεψη των διαδρομών εξέλιξης της ρωγμής παρέχοντας μια λεπτή ανάλυση του δικτύου στην περιοχή της άκρης της ρωγμής.
4. **Μείωση της εξάρτησης από τη μάζα:** Η χρήση επιπέδων μετάβασης βοηθά στη μείωση της εξάρτησης των αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του δικτύου. Με μια κατάλληλα λεπτομερή μάζα γύρω από την άκρη της ρωγμής, η λύση γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της πυκνότητας του δικτύου, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστα και ανθεκτικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3: Θέση βλάβης Νο1, απόσταση στον άξονα Y από το ελεύθερο άκρο.



Εικόνα 4: Θέση βλάβης Νο2, απόσταση στον άξονα Y από το ελεύθερο άκρο.



Εικόνα 5: Θέση βλάβης Νο2, απόσταση στον άξονα Z από το ελεύθερο άκρο.

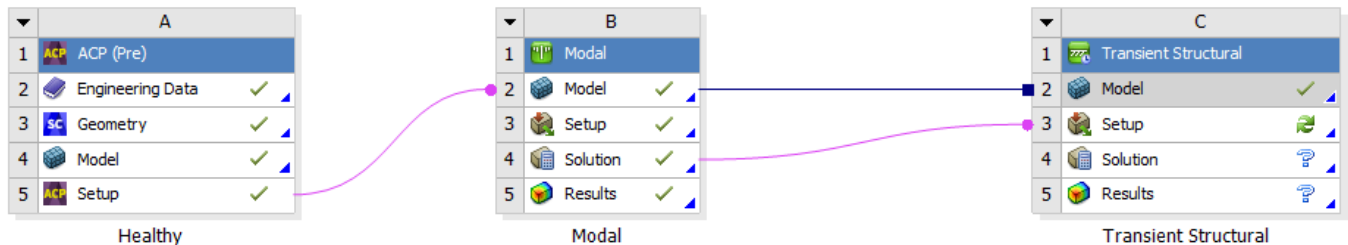
Πίνακας 2: Μέγεθος Τεχνητών βλαβών

Όνομα βλάβης	Μήκος Ρωγμής	Αναλογία με το μήκος δοκού
Damage 1	10 mm	0.67 %
Damage 2	30 mm	2.00 %
Damage 3	50 mm	3.33 %

4.3 Διαδικασία Προσομοιώσεων

4.3.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργήθηκε από τον (Saramantas et al., 2022) στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής. Η δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με σύνθετα υλικά γίνεται στο Ansys και συγκεκριμένα στο δομικό μπλοκ ACP (ANSYS COMPOSITE PREP/POST) Εικόνα 6, (Ansys® Academic Research Mechanical).

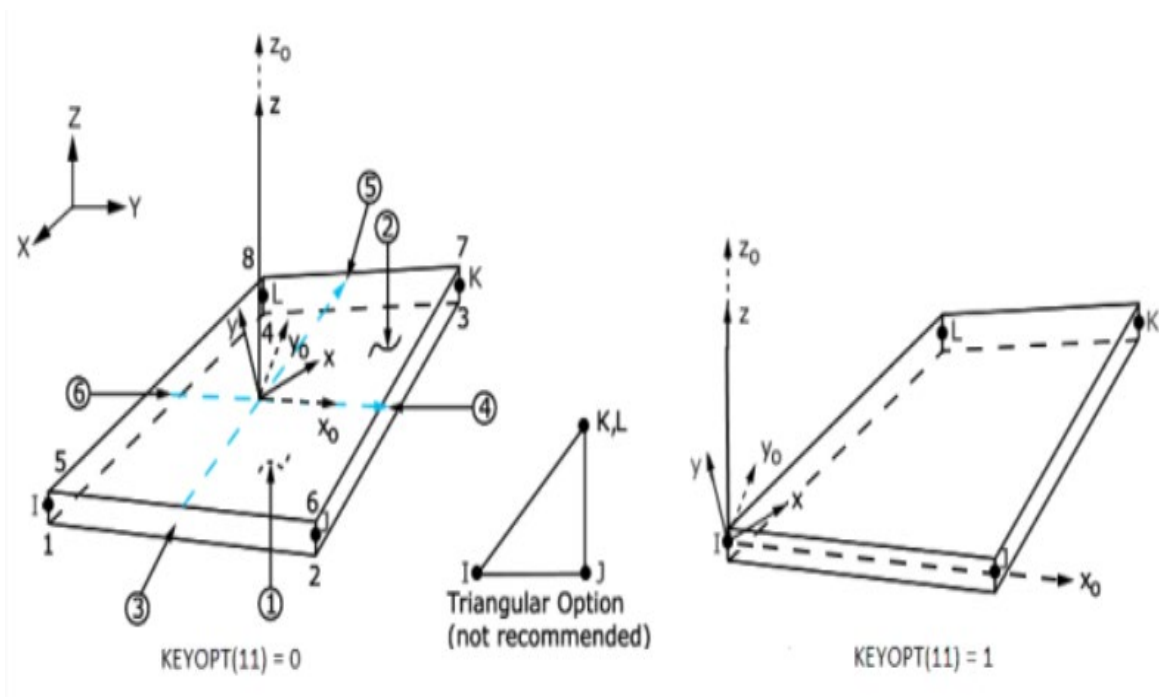


Εικόνα 6: Το μπλοκ του ACP στο Ansys, της μορφικής ανάλυσης και της δυναμικής ανάλυσης.

Η λειτουργία του ACP ακολουθεί την συμπλήρωση των μπλοκ A, με την ακόλουθη σειρά:

- 1) Ορισμός των υλικών προς χρήση στον τομέα Engineering Data
- 2) Δημιουργία της γεωμετρίας της κατασκευής στον τομέα Geometry
- 3) Ορισμός των αρχικών τιμών του μοντέλου και δημιουργία πλέγματος με χρήση στοιχείων πεπερασμένων στοιχείων τύπου κελύφους στον τομέα Model
- 4) Δημιουργία των στρώσεων με τα κατάλληλα υλικά και προσανατολισμούς, κατάλληλα πάχη και η αρχιτεκτονική της δοκού [Setup]
- 5) Σύνδεση του μοντέλου με κατάλληλο δομικό block για την στατική ή δυναμική ανάλυση.

Ένα απαραίτητο βήμα κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου, η οποία γίνεται από τον χρήστη. Η επιλογή που έγινε εδώ είναι το στοιχείο SHELL181, το οποίο είναι κατάλληλο για την ανάλυση λεπτών έως μέτριου πάχους κατασκευών κελύφους, Εικόνα 7 .



Εικόνα 7: Πεπερασμένο στοιχείο.

Το πεπερασμένο στοιχείο SHELL181 διαθέτει 4 κόμβους με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε έναν από αυτούς (μετατόπιση στην διεύθυνση x, y, z και περιστροφή γύρω από τον καθένα άξονα). Το στοιχείο αυτό είναι κατάλληλο για γραμμική ανάλυση, ανάλυση μεγάλων περιστροφών, μεγάλων παραμορφώσεων και σε μη-γραμμικές εφαρμογές. Διαθέσιμες είναι και η πλήρης και η μειωμένη ολοκλήρωση των εξισώσεων του στοιχείου. Το μοντέλο εμφανίζεται στην [Εικόνα 8](#), ενώ ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται τόσο για την υγιή δοκό όσο και για τις υπό-βλάβη σε κάθε θέση φαίνεται [Πίνακας 3](#). Η απόκριση στον χρόνο υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση η οποία ανήκει στην κατηγορία μεθόδων implicit γιατί περιλαμβάνει τον γραμμικό συνδυασμό των modes της κατασκευής για την προσέγγιση της συνολικής απόκρισης. Παρακάτω εμφανίζεται η διαδικασία αριθμητικής ολοκλήρωσης και επεξεργασίας σημάτων.

1. Εισαγωγή του Σήματος:

- Δημιουργία Σήματος Διέγερσης στο MATLAB ([randn.m](#)) με περίοδο δειγματοληψίας $1/10 * f_s$ (όπου $f_s = 2\,500$ Hz)
- Φιλτράρισμα διέγερσης με χρήση βαθυπερατού φίλτρου Chebyshev II [Πίνακας 5](#) και συχνότητα αποκοπής $f = 1\,250$ Hz.
- Εισαγωγή σήματος και διανύσματος χρόνου ως δύναμη στο σημείο διέγερσης στο ANSYS Workbench (Transient Structural).

2. Αριθμητική Ολοκλήρωση:

- Ορισμός βήματος ολοκλήρωσης ως $1/(20 * f)$ και Αριθμού Modes στην μέθοδο Mode Superposition ίσο με τα Modes στο εύρος $0 - 2.5 * f$.
- Λήψη δυναμικής απόκρισης της επιτάχυνσης στα ορισμένα σημεία της κατασκευής.

3. Υποδειγματοληψία και Φιλτράρισμα στο MATLAB:

- Φιλτράρισμα Αποκρίσεων μέσω βαθυπερατού φίλτρου Chebyshev II [Πίνακας 5](#).
- Υποδειγματοληψία στο $1/10$ (τελική συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 2\,500$ Hz και εύρος συχνοτήτων $0 - 1\,250$ Hz).

Η μέθοδος της Superposition Mode (Mode Superposition) χρησιμοποιείται στη δυναμική ανάλυση κατασκευών και συστημάτων. Ακολουθεί μια συνοπτική εξήγηση των χαρακτηριστικών της, των παραδοχών της, των περιορισμών και εάν είναι γραμμική μέθοδος επίλυσης:

Χαρακτηριστικά:

1. Μέθοδος Ανάλυσης: Χρησιμοποιείται για την επίλυση δυναμικών προβλημάτων σε κατασκευές και συστήματα, εστιάζοντας στις ταλαντώσεις και τις κινήσεις τους.
2. Εφαρμογή Συχνοτήτων Ταλάντωσης: Συχνά χρησιμοποιείται για να αναλύσει τις ταλαντώσεις ενός συστήματος σε διαφορετικές συχνότητες.
3. Μετατόπιση Κόμβων: Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, οι κόμβοι του συστήματος μετατοπίζονται σύμφωνα με τις ταλαντώσεις τους.

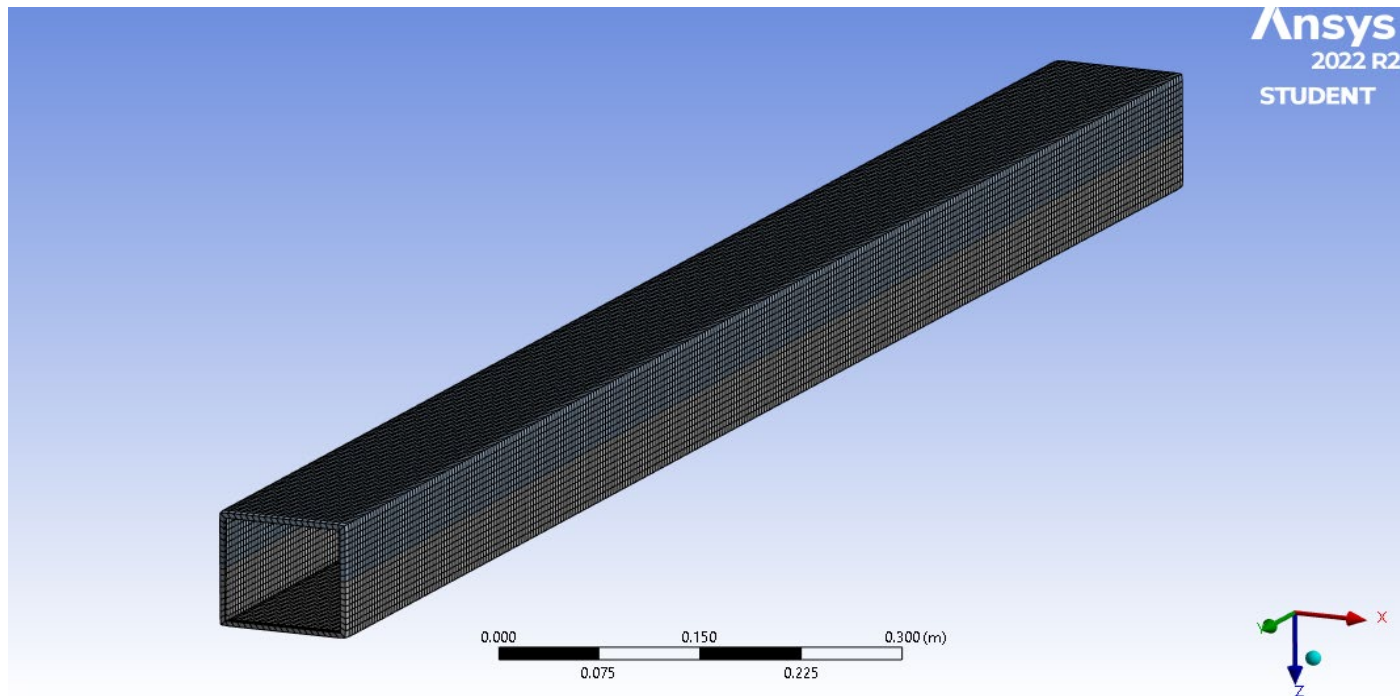
Παραδοχές:

1. Γραμμικότητα: Συνήθως υποθέτει γραμμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων, που επιτρέπει την εφαρμογή της αρχής της υπερθέσεως.
2. Ανεξαρτησία των Ταλαντώσεων: Υποθέτει ότι οι διάφορες ταλαντώσεις του συστήματος είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Γραμμικός Τρόπος Επίλυσης: η μέθοδος της Superposition Mode είναι γραμμική μέθοδος επίλυσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί η αρχή της υπερθέσεως, δηλαδή η λύση μπορεί να εκφραστεί ως ένας γραμμικός συνδυασμός των λύσεων των ανεξάρτητων δομικών συστημάτων στις διάφορες ταλαντώσεις.

Πίνακας 3: Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων ανά κατασκευή.

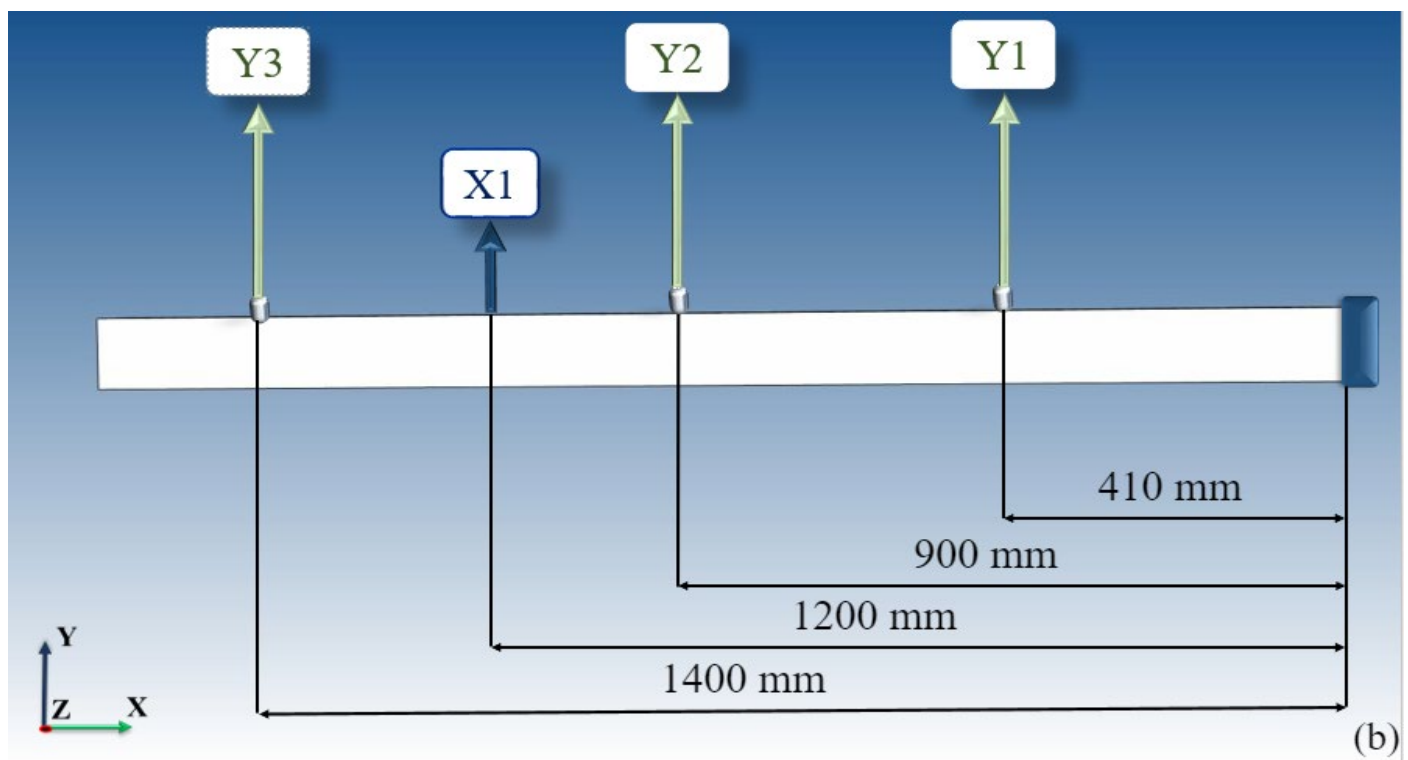
Κατάσταση Κατασκευής	Αριθμός Πεπερασμένων Στοιχείων
Υγιής	22952
D11	24274
D21	24304
D31	24321
D12	24309
D22	24307
D32	24296



Εικόνα 8: Η διακριτοποιημένη δοκός στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Ansys.

4.3.2 Διέγερση & Αποκρίσεις

Αρχικά, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα διάνυσμα που αντιπροσωπεύει το χρόνο, το οποίο θα περιλαμβάνει τα σημεία από την έναρξη έως το τέλος, μαζί με τα ενδιαμέσα χρονικά βήματα. Ταυτόχρονα, πρέπει να καθοριστεί το μέγεθος του διανύσματος της εισόδου (διέγερσης), καθώς και το σημείο εφαρμογής του στην κατασκευή. Τέλος, ορίζονται οι θέσεις καταγραφής και η ποσότητα που θα καταγραφεί, επιλέγοντας να είναι η επιτάχυνση. Και οι θέσεις της διέγερσης και των θέσεων καταγραφής φαίνονται στην [Εικόνα 9](#). Η συχνότητα καταγραφής των εξόδων θα είναι ίδια με τη συχνότητα εφαρμογής των εισόδων-διεγέρσεων. Δεδομένου ότι το σύστημα μελετάται μέχρι τα 1250Hz, αυτή η συχνότητα μπορεί να θεωρηθεί και ως μέγιστη. Προκειμένου να πληρείται το θεώρημα Shannon ([Shannon., 1949](#)), η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της μέγιστης συχνότητας. Το Ansys προτείνει στον χρήστη την τιμή $20 \cdot F_{max}$, η οποία αποτελεί και την τιμή που θα χρησιμοποιηθεί για το προσομοίωση.



Εικόνα 9: Θέσεις διέγερσης και σημείων απόκρισης ([Saramantas et al., 2022](#)).

Όπου Y1,Y2,Y3 αποτελούν τα σημεία απόκρισης, και X1 το σημείο εφαρμογής της διέγερσης, ενώ φαίνονται και οι αντίστοιχες αποστάσεις τους από την πάκτωση.

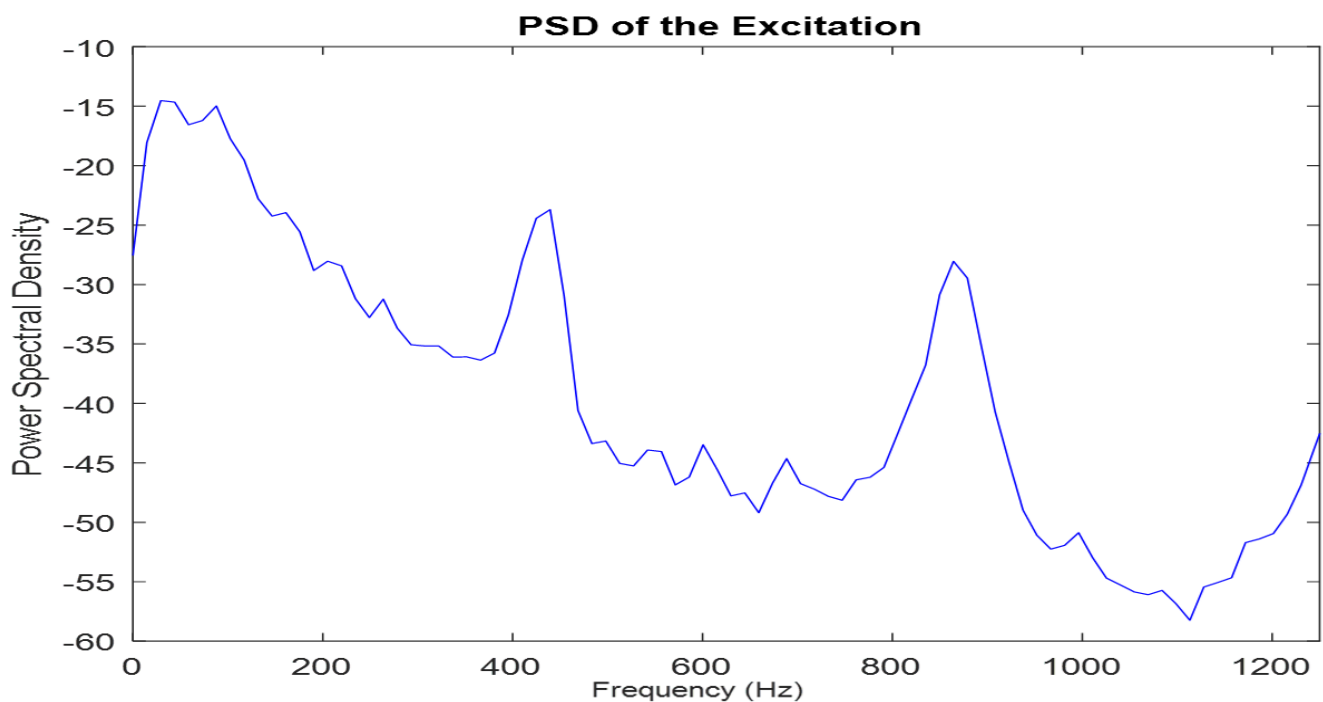
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των χρόνων της προσομοίωσης.

Fs	Ts	Χρόνος έναρξης	Χρόνος λήξης
30000Hz	3.33E-05 s	0 s	2.000667 s

Η διέγερση προσομοιώνεται με ένα σύστημα δεύτερης τάξης με απόσβεση $\zeta=0.02$ και φυσική συχνότητα 434Hz στο οποίο γίνεται υπέρθεση 2 αρμονικών με συχνότητες 868,1302Hz, όπου εισάγεται ένα φίλτρο τύπου Chebyshev 2 χαρακτηριστικών όπως φαίνεται στον [Πίνακας 5](#).

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Φίλτρου Διέγερσης.

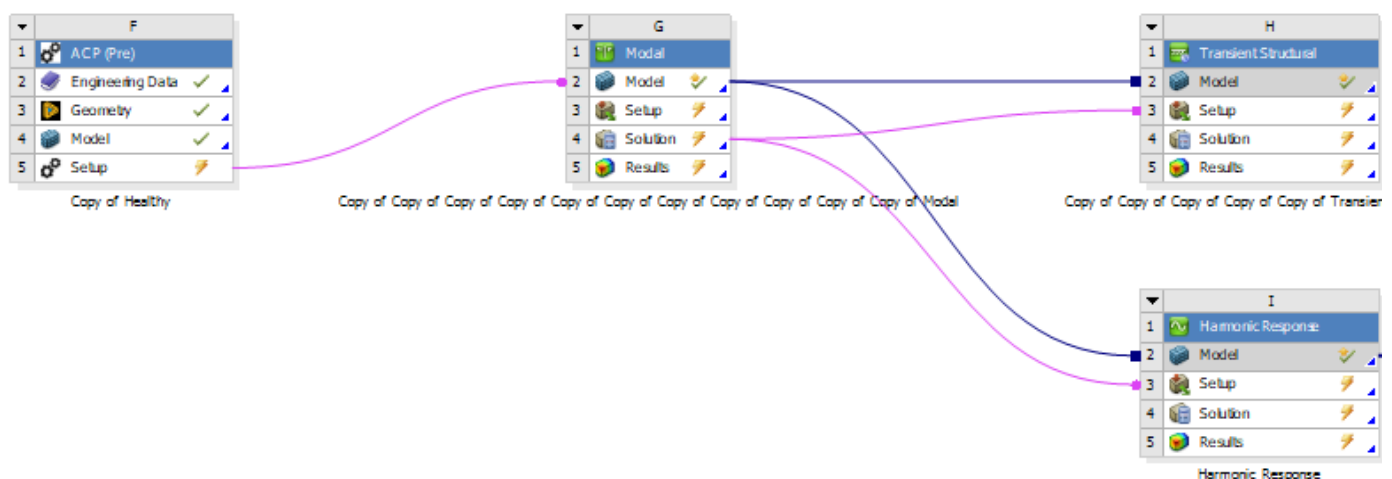
Τύπος Φίλτρου	Order	Fs	F _{stop1}	Astop
Bandpass Chebyshev Type II	20	30000 Hz	1250 Hz	60 dB



Εικόνα 10: Διάγραμμα PSD της διέγερσης.

4.3.3 Δυναμικά Χαρακτηριστικά & επιβεβαίωση ορθότητας προσομοιώσεων

Για τον καθορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται η δοκός με το ονομαστικό πάχος (3.1 mm), όπου η αρμονική ανάλυση του Ansys εφαρμόζεται στην δύναμη και βρίσκει την Βαρυτική Συνάρτηση της εισόδου στο σημείο X1 με την εκάστοτε έξοδο στα σημεία (Y1,Y2,Y3), Εικόνα 9. Η συνδεσμολογία στο Ansys φαίνεται στην Εικόνα 11.



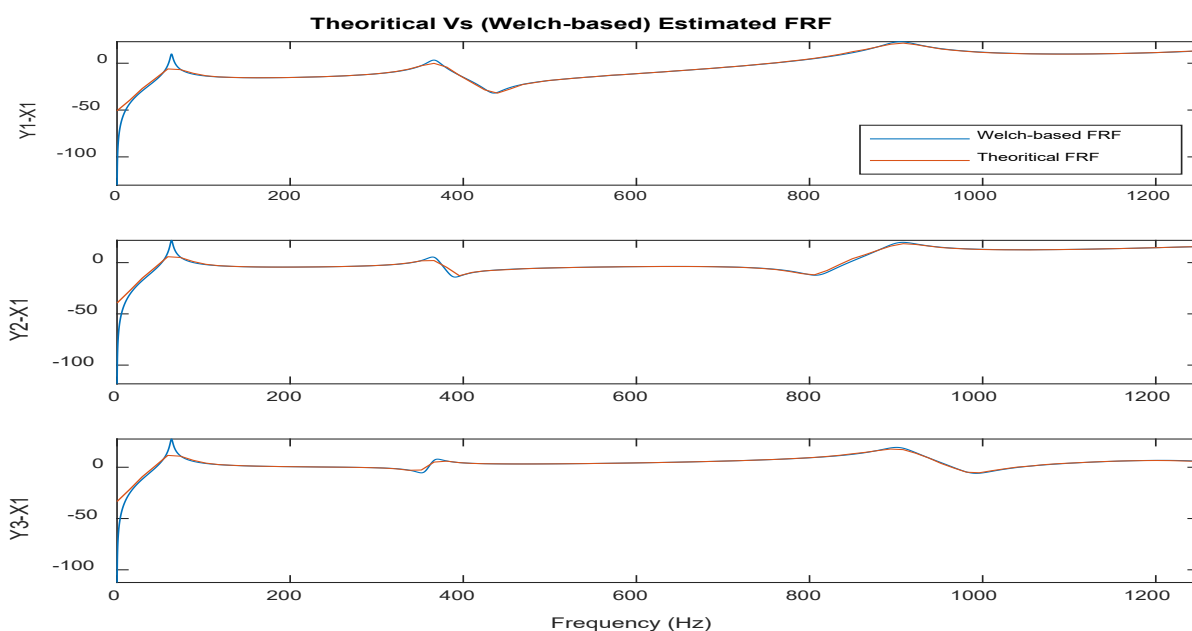
Εικόνα 11: Συνδεσμολογία των block της αρμονικής ανάλυσης.

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα βρίσκονται στον συχνотικό χώρο, η Βαρυτική συνάρτηση μπορεί να αναφερθεί ως συνάρτηση απόκρισης συχνότητας (FRF) (Ljung, 1999; Welch, 1967). Η δύναμη διέγερσης δρα στον άξονα z και η κατεύθυνσή της είναι αντίθετη προς αυτήν της δυναμικής ανάλυσης. Η δοκός είναι πακτωμένη στη μία πλευρά της και ελεύθερη στην άλλη. Οι αποκρίσεις που καταγράφονται από το Ansys είναι επιταχύνσεις κατά μήκος του άξονα z. Η FRF της εξόδου παράγεται από το Ansys, με τη φυσική μέτρηση της επιτάχυνσης. Το εύρος της ανάλυσης αρμονικών κυμάτων είναι από [0,1250] Hz. Εκτός από το ACP και τα μπλοκ των αρμονικών αναλύσεων, υπάρχει ένα τρίτο μπλοκ για τη μορφική ανάλυση, όπου υπολογίζονται οι ιδιοτιμές και τα διανύσματα ιδιομορφών. Τέλος, ο

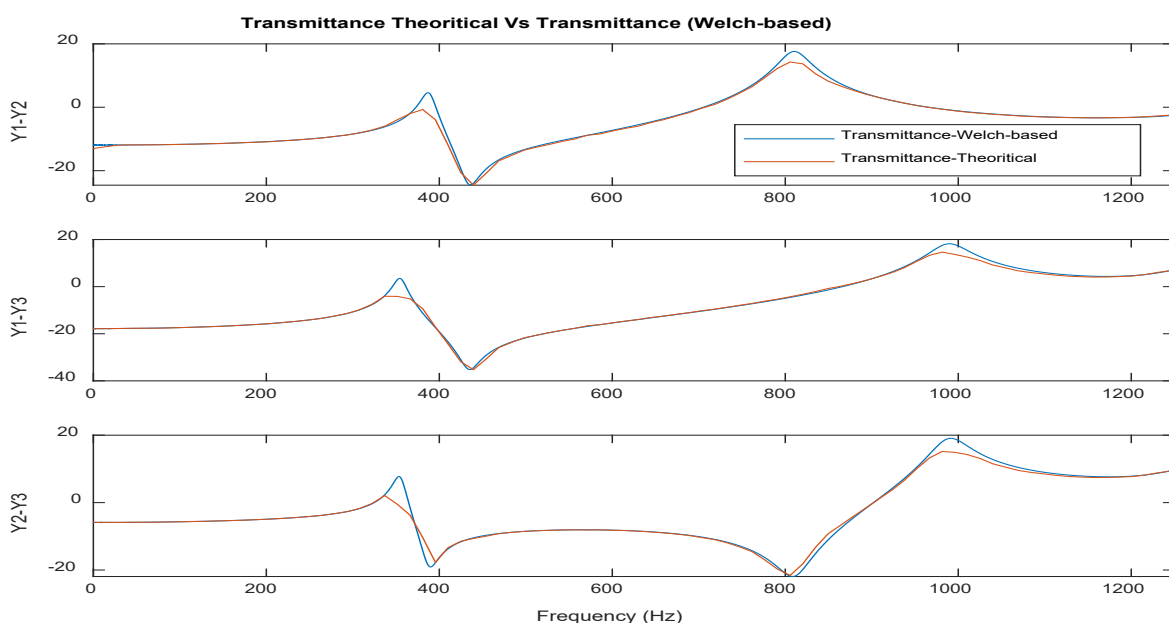
αλγόριθμος της αρμονικής ανάλυσης χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της μορφικής ανάλυσης για την παραγωγή των FRF.

Βασικό στάδιο της διαδικασίας προσομοίωσης αποτελεί και η επικύρωση της ορθότητας. Βασικό κριτήριο αποτελεί η σύγκριση των FRF από τον υπολογισμό τους στο προγραμματιστικό περιβάλλον με αυτές που προκύπτουν από τις αποκρίσεις στις θέσεις Y1,Y2,Y3 με την διέγερση (είσοδο) στην θέση X1 με την εντολή [tfestimate.m](#). Ένα ακόμα κριτήριο αποτελεί και η σύγκριση των συναρτήσεων Transmittance μεταξύ των θεωρητικών ποσοτήτων και αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση. Οι συναρτήσεις FRFs του Ansys και οι θεωρητικές τιμές του Transmittance που συγκρίνονται έχουν προκύψει από την ανάλυση και προσομοίωση της ονομαστικής δοκού πάχους 3.1 mm.

Όπως φαίνεται στις [Εικόνα 11](#),[Εικόνα 12](#) υπάρχει επαρκής ταύτιση και στα δυο κριτήρια, κάτι που αποτελεί ισχυρό χαρακτηριστικό της εγκυρότητας των προσομοιώσεων.



Εικόνα 11: Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικής FRF με αυτή που προκύπτει από την Transient.



Εικόνα 12: Σύγκριση θεωρητικής Transmittance με αυτήν που προκύπτει από την Transmittance Welch-based.

4.3.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες προσομοιώσεων

Τέλος παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα, Πίνακας 6 οι προσομοιώσεις που παρήχθησαν στην κατασκευή μεταβάλλοντας το συνολικό πάχος της από την ονομαστική τιμή 3,1mm σε ένα εύρος 20%, δημιουργώντας έτσι τον πληθυσμό τόσο υγιών δοκών όσο και υπό βλάβη για την εκάστοτε θέση.

Πίνακας 6: Στοιχεία Προσομοιώσεων.

Structural Health State	Damage Position	Number Of Structures	Number Of Experiments Per Structure	Total Number Of Experiments
Healthy (H)	----	42	1	42
Damage 1 (D11)	Position 1	12	1	12
Damage 1 (D12)	Position 2	12	1	12
Damage 2 (D21)	Position 1	12	1	12
Damage 2 (D22)	Position 2	12	1	12
Damage 3 (D31)	Position 1	12	1	12
Damage 3 (D32)	Position 2	12	1	12

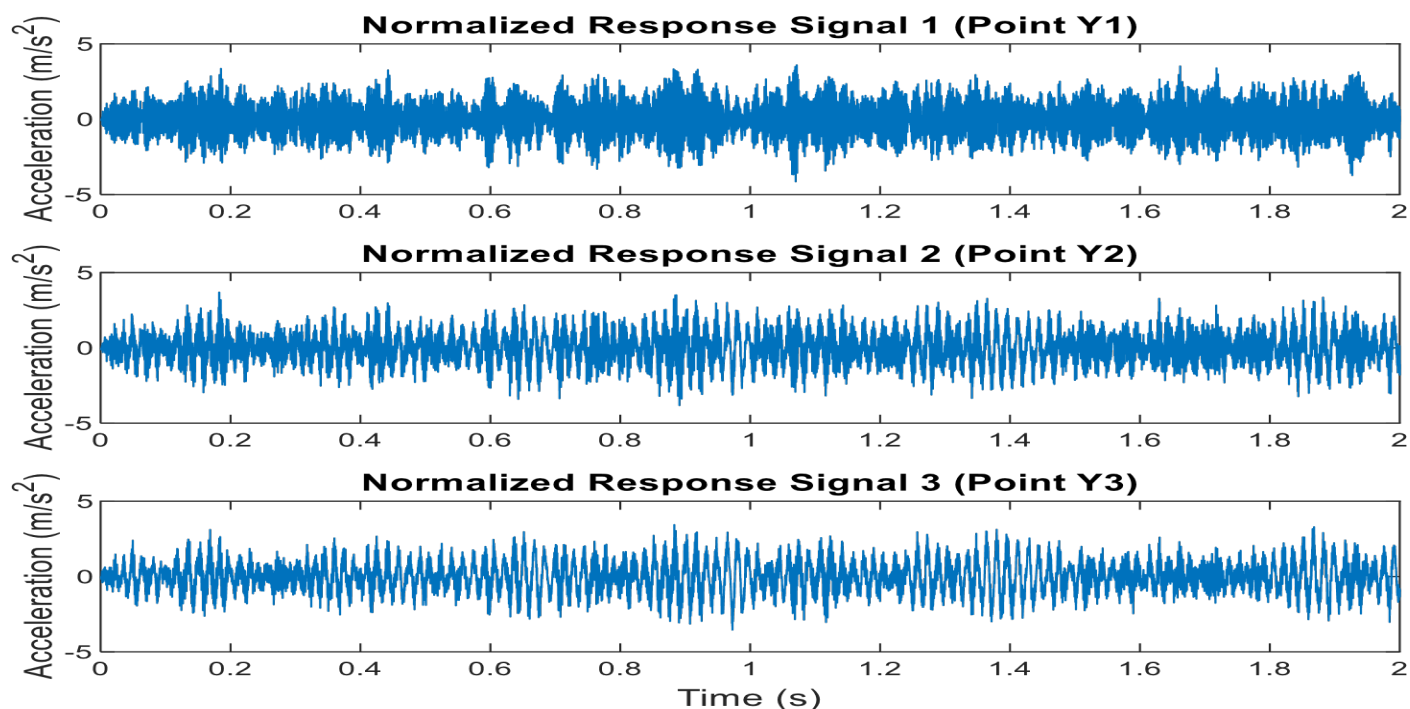
Mode Superposition: All modes in the range [0-3 125 Hz], $f_{int}=25$ kHz; Time step (constant) $\Delta t = 1/25\ 000$ (s); No. of integration points: 50020; Signal Pre-processing: Least Squares linear- phase FIR filter of order 24 and cut off-frequency 1 250 Hz. Re-sampling at $f_s = 2\ 500$ Hz; final signal length $N=5\ 002$ samples (2 s).

4.4 Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων

Για την διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και κατά επέκταση της ανίχνευσης βλαβών, αρχικά τα σήματα ελέγχονται και ως προς την στασιμότητα και ύστερα πραγματοποιείται κανονικοποίηση και έλεγχος της υπακοής αυτών στην κανονική κατανομή. Επειδή η συχνότητα δειγματοληψίας είναι αρκετά μεγάλη ακολουθεί υποδειγματοληψία με λόγο 1/24 με αποτέλεσμα η τελική συχνότητα δειγματοληψίας να είναι $f_s=1250$ Hz όπου τηρείται το θεώρημα Shannon προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα αλλοίωσης φάσματος (aliasing). Έπειτα πραγματοποιείται επιλογή των σημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και γίνεται έλεγχος της επίδρασης των βλαβών στα δυναμικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού.

• Κανονικοποίηση και έλεγχος ως προς την κανονική κατανομή και την στασιμότητα των σημάτων

Τα σήματα των εξόδων είναι απαραίτητο να εμφανίζουν μηδενική μέση τιμή, κάτι που υλοποιείται χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Μέσω της εντολής ([detrend.m](#)) εκτιμάται η μέση τιμή και αφαιρείται από τις τιμές του εκάστοτε σήματος. Απαραίτητο κρίνεται επίσης η κανονικοποίηση των σημάτων ως προς την τυπική τους απόκλιση, έτσι ώστε τα σήματα να βρίσκονται σε κοινό εύρος τιμών, [Εικόνα 13](#).

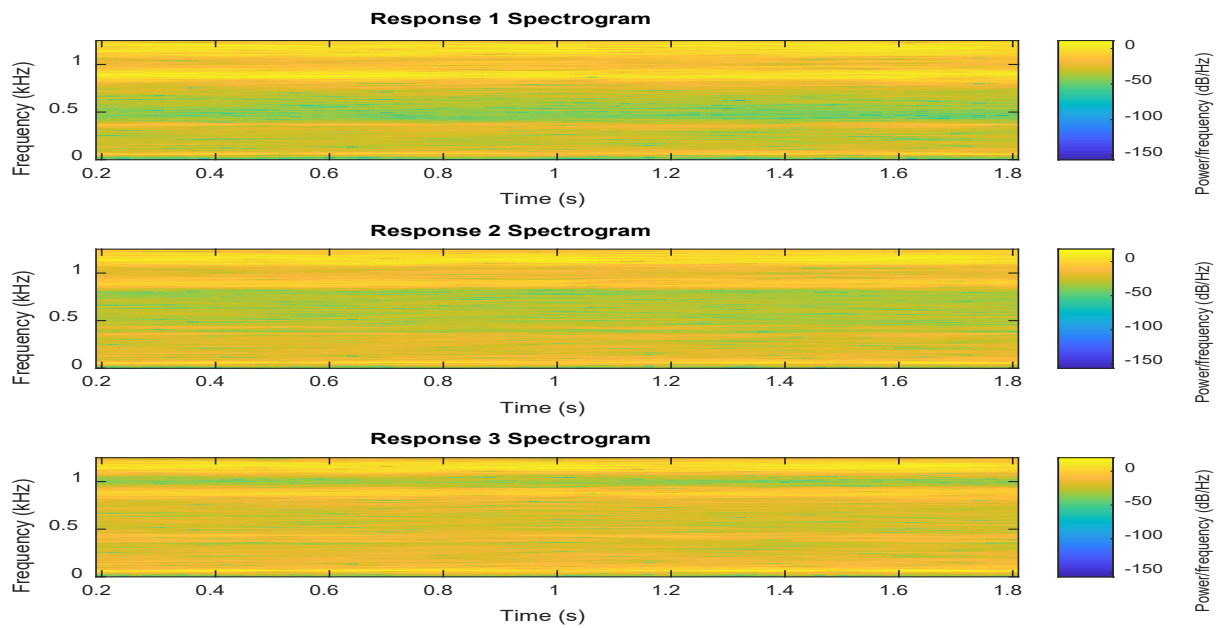


Εικόνα 13: Προ-επεξεργασμένα σήματα των επιταχυνσιόμετρων στις θέσεις Y1,Y2,Y3 της υγειούς κατασκευής για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.

Στην συνέχεια γίνεται έλεγχος της στασιμότητας των αρχικών μη κανονικοποιημένων σημάτων με το φασματογραφήματα, το οποίο στην πραγματικότητα είναι ένας Short-Time Fourier Transform ([Spectrogram Using Short-Time Fourier Transform - MATLAB Spectrogram, n.d.](#)). Φαίνεται στην, [Εικόνα 14](#) πως τα σήματα των αποκρίσεων δεν εμφανίζουν μεταβολές στην συχνότητα σε συνάρτηση με τον χρόνο, οπότε μπορούν να θεωρηθούν στάσιμα.

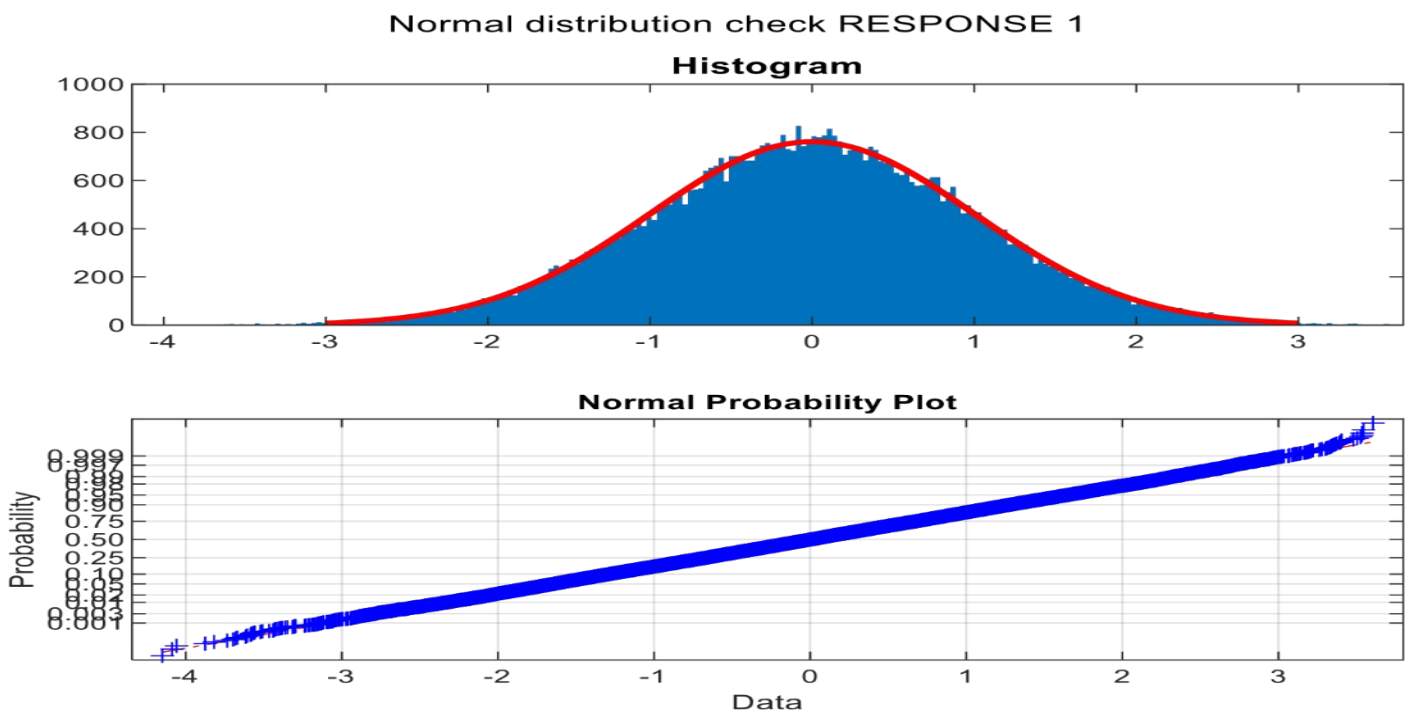
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά για την δημιουργία φασματογραφήματος

NFFT	Μήκος τμήματος	Overlap	Συχνότητα δειγματοληψίας
2048	2048 σημεία	95%	Fs = 2500 Hz
Εύρος συχνοτήτων σήματος→0 – 1250 Hz;			

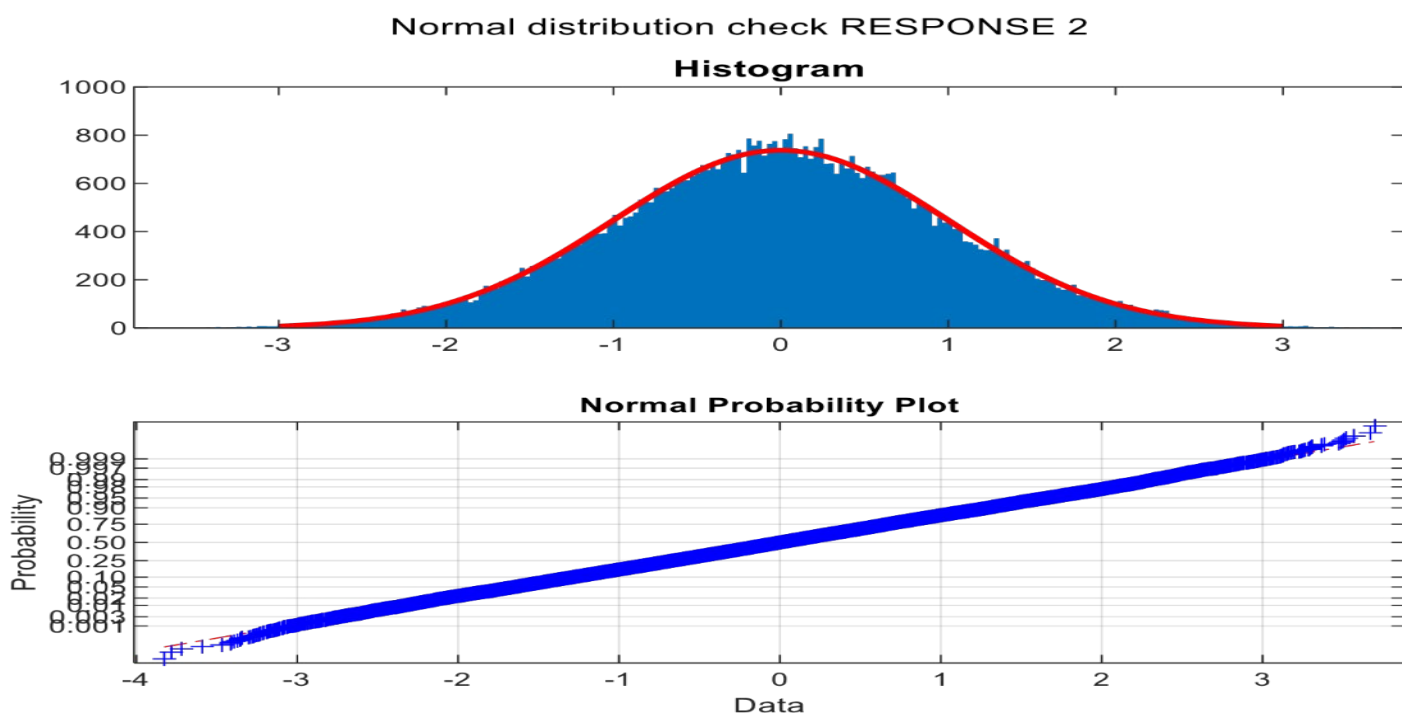


Εικόνα 14: Φασματογράφημα των εξόδων στις θέσεις Y1,Y2,Y3 της υγειούς κατασκευής για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.

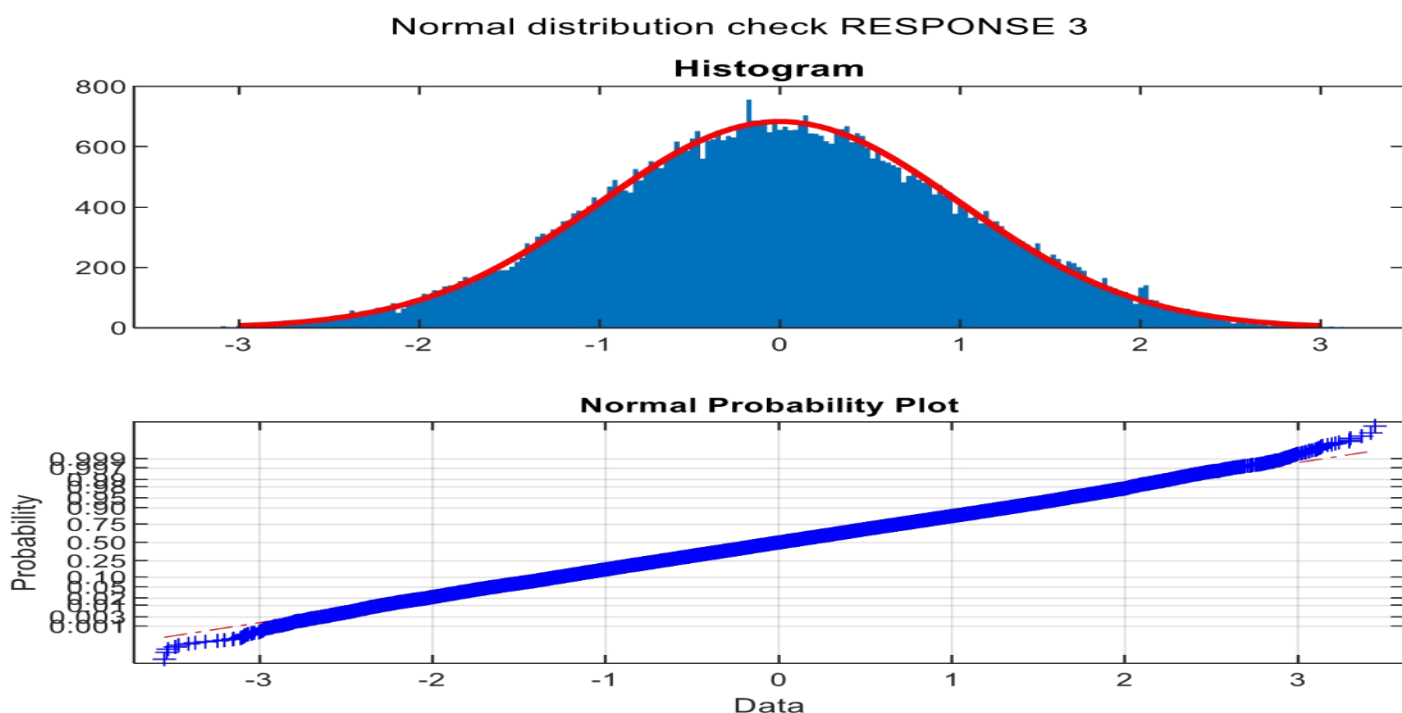
Ύστερα γίνεται έλεγχος της κανονικότητας των σημάτων του υγιούς πληθυσμού, δηλαδή κατά πόσο τα σήματα είναι κοντά στην κανονική κατανομή. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με το ιστόγραμμα και το διάγραμμα normal probability plot και για τις τρεις αποκρίσεις, Εικόνα 15, Εικόνα 16, Εικόνα 17.



Εικόνα 15: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y1 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.



Εικόνα 16: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y2 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.



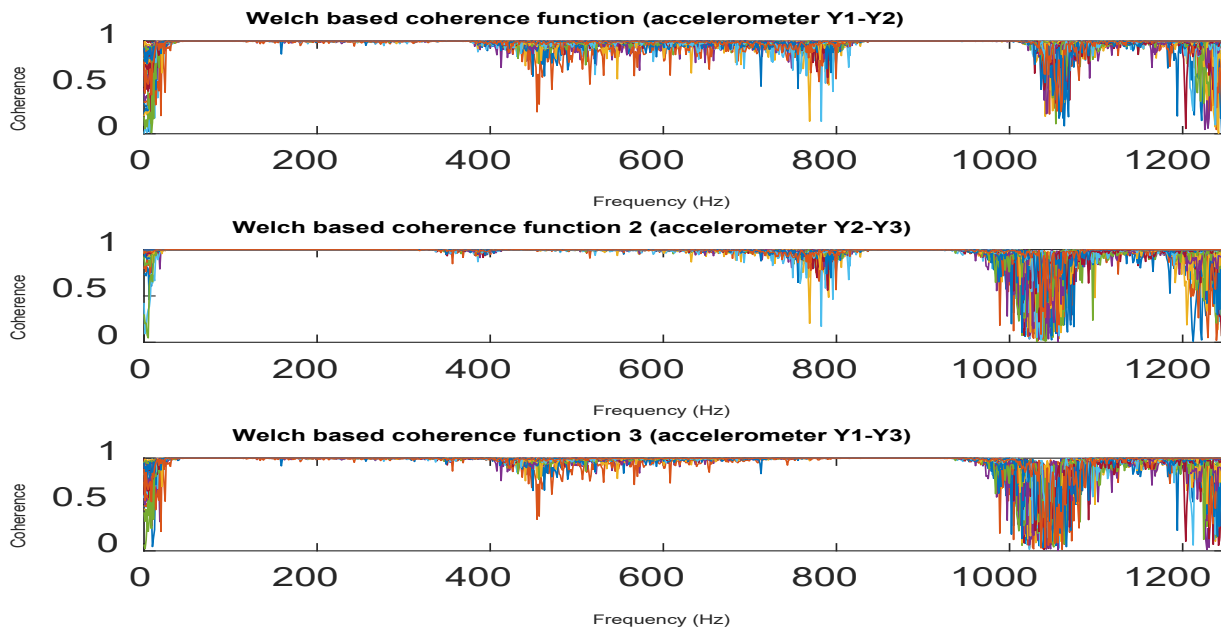
Εικόνα 17: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y3 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.

• Επιλογή των σημάτων για την δυναμική Αναγνώριση

Η συνάρτηση συνάφειας γ , όπως φαίνεται στην [εξίσωση \(1\)](#) αποτελεί μια βασική πηγή αξιολόγησης της ποιότητας των δεδομένων που έχουν ληφθεί από τις μετρήσεις κάτω από τυχαία διέγερση:

$$\bar{\gamma}^2(\omega) = \frac{|\bar{S}_{y_1 y_2}(\omega)|^2}{\bar{S}_{y_2 y_2}(\omega) \bar{S}_{y_1 y_1}(\omega)} \quad (1)$$

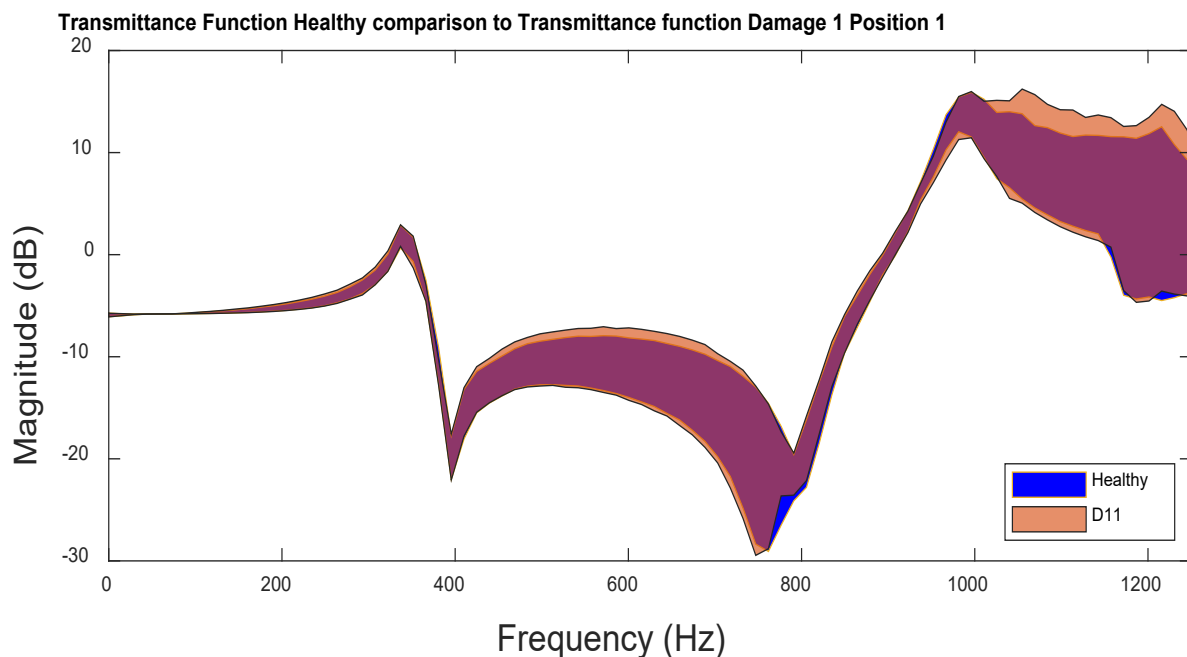
Όπου $\hat{S}_{y_1y_1}(\omega)$, $\hat{S}_{y_2y_2}(\omega)$, $\hat{S}_{y_1y_2}(\omega)$ περιέχουν την εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD) της μετρούμενης απόκρισης 1 (επιτάχυνσης) και της απόκρισης 2 αντίστοιχα και το διασταυρούμενο φάσμα μεταξύ των δυο αισθητηρίων. Η συνάρτηση συνάφειας θα πρέπει να είναι ίση με την μονάδα για όλα τα ω μόνο και μόνο αν το σύστημα είναι γραμμικό και δεν εμπεριέχεται θόρυβος στις μετρήσεις. Παρατηρούμε στην [Εικόνα 18](#) πως η καλύτερη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ των αισθητηρίων είναι των επιταχυνσιόμετρων στην θέση Y_1 , Y_2 . Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από τα αισθητήρια αυτά είναι που θα χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βλαβών με τις παραμετρικές μεθόδους.



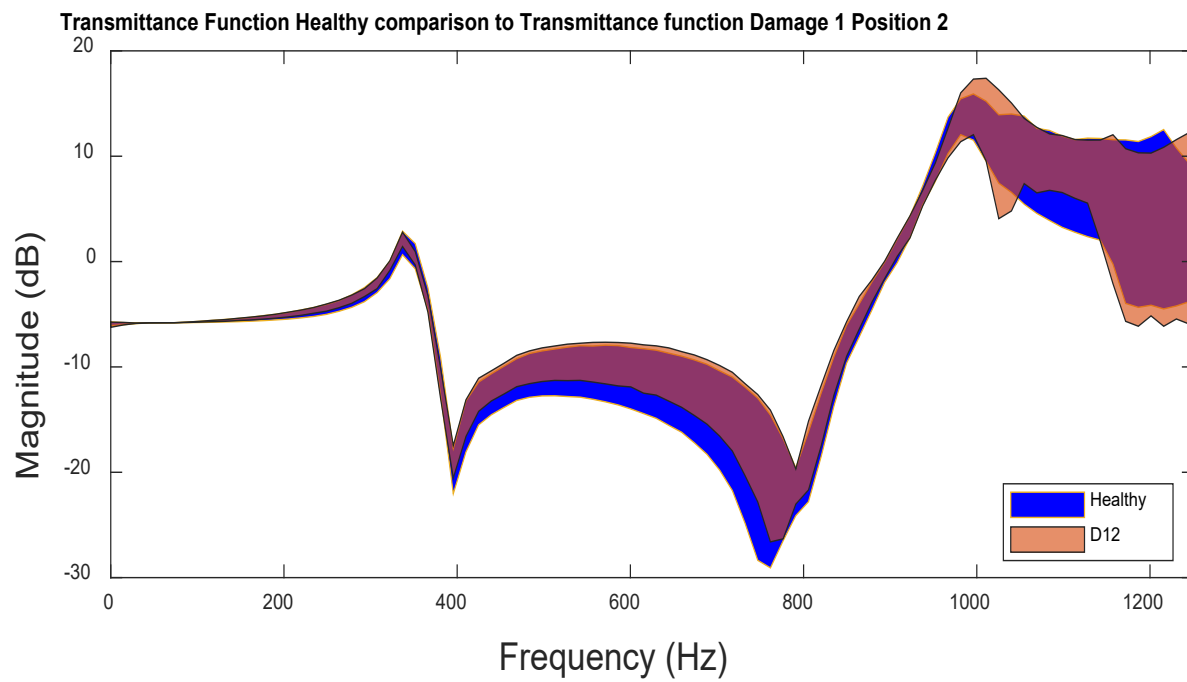
[Εικόνα 18](#): Διάγραμμα Συνάφειας των αισθητηρίων μεταξύ τους για όλο τον υγιή πληθυσμό, με ποσοστό επικάλυψης 95% και παράθυρο μήκους 2048 δειγμάτων

• Επίδραση βλαβών στα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής

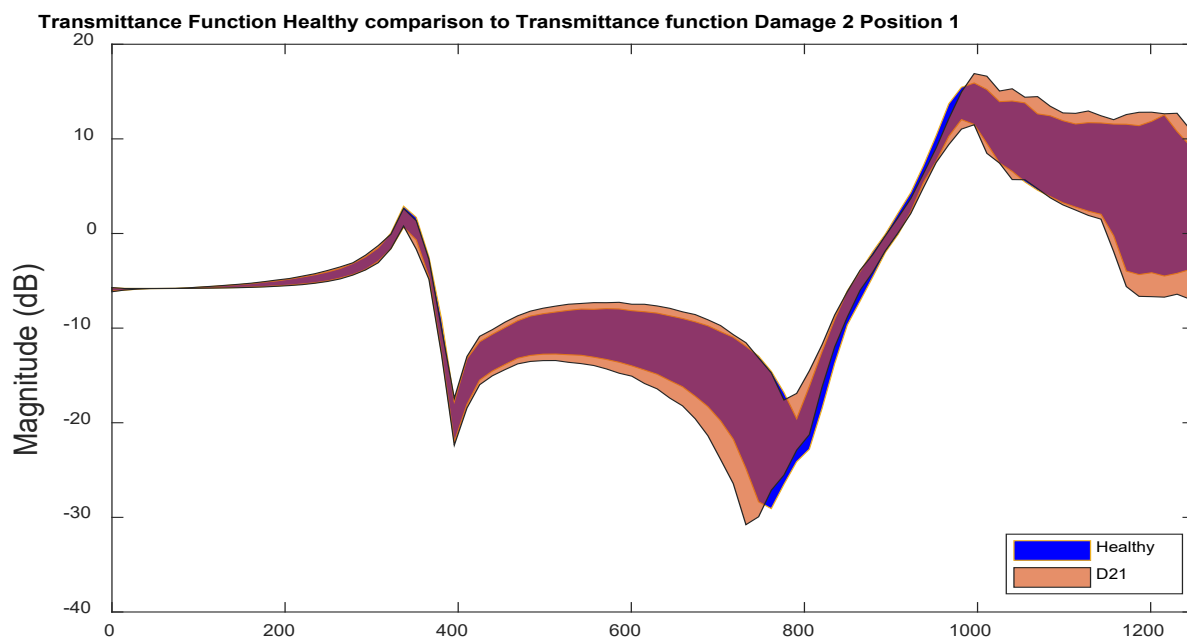
Στις [Εικόνα 19](#), [Εικόνα 20](#), [Εικόνα 21](#), [Εικόνα 22](#), [Εικόνα 23](#), [Εικόνα 24](#) φαίνεται η δυναμική του συνόλου των υγιών δοκών σε σύγκριση με αυτές των βλαβών στην εκάστοτε θέση. Φαίνεται πως στο διάστημα 1000-1250Hz σταματά η επικάλυψη της δυναμικής των βλαβών με το υγιές σύνολο.



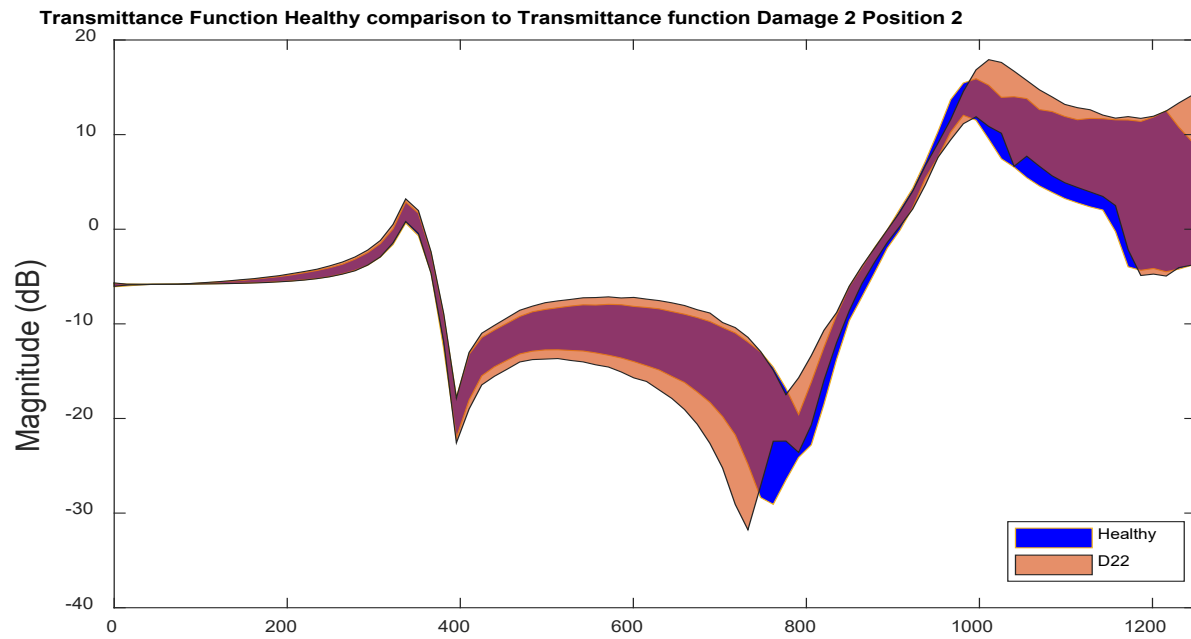
[Εικόνα 19](#): Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D1 στην θέση 1 (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).



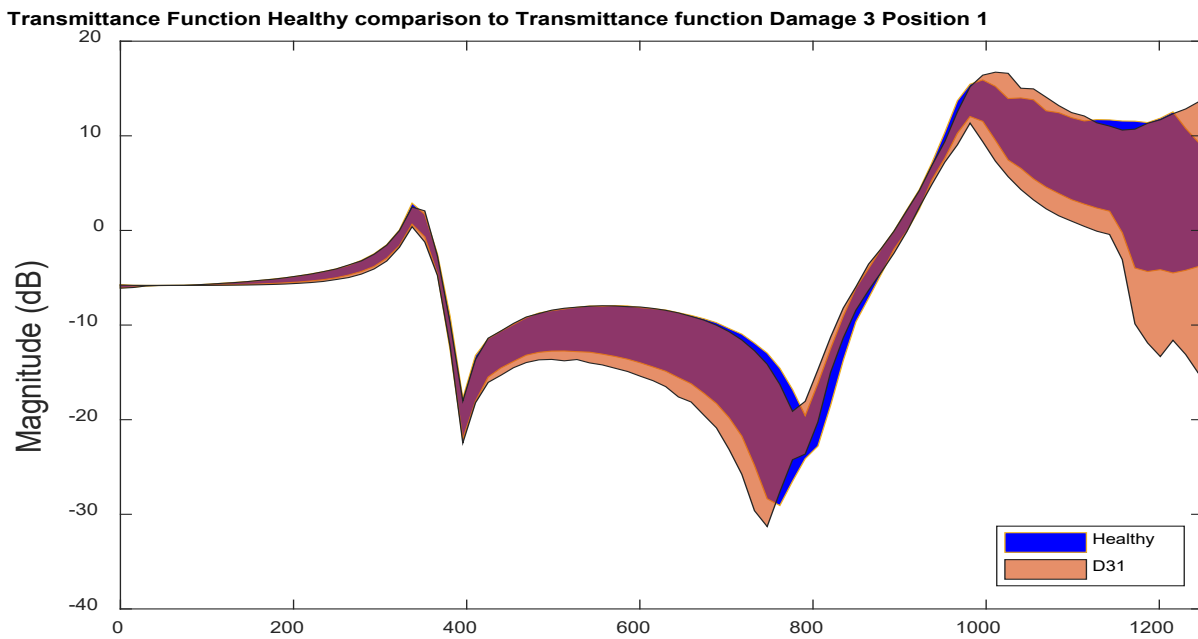
Εικόνα 20: Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D1 στην θέση 2, εκτίμηση (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).



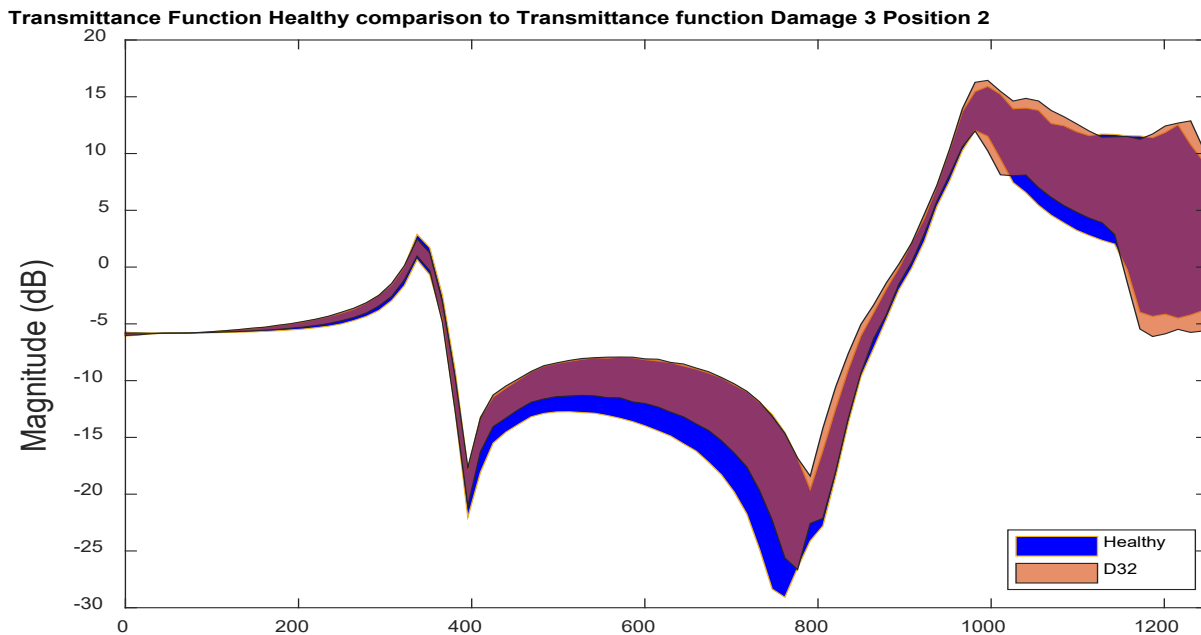
Εικόνα 21: Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D2 στην θέση 1 (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).



Εικόνα 22: Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D2 στην θέση 2 (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).



Εικόνα 23: Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D3 στην θέση 1 (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).



Εικόνα 24: Σύγκριση της δυναμικής του υγιούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D3 στην θέση 2 (εκτίμηση [tfestimate.m](#)).

5. Μεθοδολογία της Δυναμικής αναγνώρισης, Ανίχνευσης βλαβών και Εύρεσης θέσης βλάβης

5.1 Κεντρική ιδέα της μεθοδολογίας

Η βασική αρχή που διέπει την δυναμική αναγνώριση κατασκευών και κατά επέκταση την ανίχνευση βλαβών βασίζεται στο γεγονός ότι με την εμφάνιση βλάβης προκαλούνται μικρές αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες όμως με χρήση της επιστημονικά ορθής ανάλυσης των μετρούμενων σημάτων ταλάντωσης μπορούν να διαφοροποιηθούν. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά μπορούν να αναπαρασταθούν παραμετρικά με την χρήση στοχαστικών μοντέλων βάσει δεδομένων, άρα είναι δυνατή η κατάλληλη επιλογή “χαρακτηριστικών” που είναι ευάλωτα ως προς τις βλάβες. Στην περίπτωση των Παραμετρικών Στατιστικών Μεθόδων ([Boller et al., 2009](#)) βάσει χρονοσειρών τα “χαρακτηριστικά” αυτά ή η χαρακτηριστική ποσότητα μπορεί να είναι οι παράμετροι και τα υπόλοιπα των μοντέλων με χρήση είτε σημάτων απόκρισης-μόνο (response-only) ή με σήματα απόκρισης-διέγερσης (excitation-Response).

Τα κύρια εμπόδια στην επιτυχή διάγνωση βλαβών βασίζονται στο γεγονός πως η μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών δεν είναι αποκλειστικά αποτέλεσμα της ύπαρξης βλάβης. Εν αντιθέσει η ύπαρξη θορύβου κατά την διεξαγωγή του πειράματος, οι μη γραμμικότητες της κατασκευής αλλά και κατά κύρια αιτία η μεταβολή του πάχους στο στόλο των δοκών, οδηγούν στο να επηρεάζονται τα δομικά χαρακτηριστικά είτε περισσότερο είτε ακόμα και να σκεπάζουν την μεταβολή που προκαλούν οι βλάβες, με αποτέλεσμα οι προσπάθειες για διάγνωση των βλαβών να καθιστάτε αρκετές φορές έως και αναποτελεσματική.

Η μεθοδολογία για την διάγνωση βλαβών μέσω Παραμετρικών Στατιστικών Μεθόδων βάσει στοχαστικών σημάτων ταλάντωσης βασίζεται στην διαφοροποίηση της υγιούς κατάστασης λειτουργίας με αυτή των βλαβών. Έστω η υγιής κατάσταση λειτουργίας $S_0 = [y_{1_0}, y_{2_0}]$ από την οποία τροφοδοτούνται τα ζεύγη σημάτων απόκρισης-απόκρισης. Μέσω των σημάτων αυτών καθορίζεται το στοχαστικό εκάστοτε μοντέλο, με M_0 η ακρίβεια με την οποία αναπαριστά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής κατά την υγιή κατάσταση και γίνεται εκτίμηση μιας χαρακτηριστικής ποσότητας $\hat{Q}_0$ η οποία αντιστοιχεί στην υγιή κατάσταση λειτουργίας και προκύπτει με την βοήθεια του διανύσματος των παραμέτρων είτε της ακολουθίας των υπολοίπων, δημιουργώντας έτσι το σύνολο του υγιή υποχώρου της κατασκευής. Ύστερα ένα νέο ζεύγος σημάτων καταγράφεται, το οποίο θεωρείται ότι ανήκει σε μια άγνωστη

κατάσταση της κατασκευής $S_u = [y_{1u}, y_{2u}]$, και διαμέσου του μοντέλου M_o υπολογίζεται μια νέα χαρακτηριστική ποσότητα $\hat{Q}_u$ από τις παραμέτρους ή από τα υπόλοιπα αντίστοιχα (φάση εκπαίδευσης). Στην φάση ελέγχου αν αυτή η ποσότητα ανήκει με βάση στατιστικών ορίων εντός του υγιή υποχώρου ($\hat{Q}_u \sim \hat{Q}_0$) που δημιουργήθηκε στην φάση εκπαίδευσης τότε η άγνωστη κατάσταση λειτουργίας S_u ανήκει στην υγιή κατάσταση της κατασκευής. Στην αντίθετη περίπτωση η κατάσταση S_u χαρακτηρίζεται ως επιβλαβής. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για διάφορα άγνωστα σήματα πραγματοποιείται η μέθοδος ανίχνευσης βλαβών (fault/damage detection).

5.2 Αναγνώριση του Μοντέλου TF-ARX

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της σύνθετης δοκού μπορούν να εκφραστούν από ένα μοντέλο TF-ARX, όπως αυτό που φαίνεται στην εξίσωση (2).

$$y_1[t] + \sum_{i=1}^{n_a} a_i \cdot y_1[t-i] = \sum_{i=0}^{n_b} b_i \cdot y_2[t-i] + e[t] \quad e[t] \sim NID(0, \sigma_e^2[t]) \quad (2)$$

Όπου

$y_1[t]$: χρονοσειρά απόκρισης (έξοδος)

$y_2[t]$: χρονοσειρά απόκρισης (ψευδοείσοδος)

$e[t]$ μία λευκή ακολουθία με μηδενική μέση τιμή ($E\{e[t]\} = 0$) και σ_e^2 διασπορά όπου ($E\{e^2[t]\} = \sigma_e^2$)

t : ο διακριτός χρόνος και τέλος

a_i, b_i οι παράμετροι του μοντέλου προς εκτίμηση.

Η εξίσωση (2) μπορεί να γραφεί ως:

$$y_1[t] = \boldsymbol{\varphi}^T[t] \cdot \boldsymbol{\theta} + e[t] \quad (3)$$

Όπου :

$$\boldsymbol{\varphi} = [-y_1[t-1] \cdots -y_1[t-n_a] : -y_2[t-1] \cdots -y_2[t-n_b]]^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a} : b_0 \cdots b_{n_b}]^T, \text{ διάνυσμα αγνώστων παραμέτρων} \quad (5)$$

Με $e[t]$: σφάλμα πρόβλεψης ενός βήματος.

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του διανύσματος των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου TF-ARX θα αναλυθούν δυο ειδών εκτιμήτριες, η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων (OLS) και η instrumental variables (IV), οι οποίες θα συγκριθούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους για την επιτυχή δυναμική αναγνώριση και την διάγνωση βλαβών.

5.2.1 Εκτιμήτρια συνήθων ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least squares)

Εκτιμήτρια Ελαχίστων τετραγώνων

Η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει ελαχιστοποιώντας το κριτήριο εξίσωση (6), λαμβάνοντας την στην εξίσωση (7) (Fassois, 2001)(Petsounis & Fassois, 2001) (Ljung., 1999).

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e^2[t] \quad (6)$$

$$\Rightarrow \hat{\theta}_{OLS} = \arg \min_{\theta} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e(t/\theta) \quad (7)$$

$$\Rightarrow \hat{\theta}_{OLS} = \left(\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \varphi[t] \cdot \varphi^T[t] \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \varphi[t] \cdot y_1[t] \right) \quad (8)$$

Η επιλογή τάξης μοντέλου η οποία θεωρητικά σχετίζεται με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας μιας κατασκευής είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχή ανίχνευση και βασίζεται σε ένα συνδυασμό από κατάλληλα κριτήρια. Για το αρχικό μοντέλο χρησιμοποιούνται τα κάτωθι κριτήρια:

- 1) Ελαχιστοποίηση του κριτηρίου BIC το οποίο εξετάζει την καταλληλότητα κάθε τάξης συνδυαστικά με την αύξηση της πολυπλοκότητας κατά την αύξηση της τάξης του μοντέλου.

Για τα μοντέλα ARX-transmittance το BIC ορίζεται ως εξής:

$$BIC = \ln(\hat{\sigma}_e) + d \frac{\ln(N)}{N} \quad (9)$$

Όπου, d ο αριθμός των εκτιμώμενων παραμέτρων, $\hat{\sigma}_e$ η διασπορά των υπολοίπων και N το πλήθος των δεδομένων.

- 2) Ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των υπολοίπων (Residual Sum of Squares) που ορίζεται ως εξής:

$$RSS/SSS \triangleq \frac{\sum_{t=0}^{N-1} e^2[t]}{\sum_{t=1}^N y_1^2[t]} \quad (10)$$

- 3) Ένα ακόμα κριτήριο για την επιλογή τάξης είναι το SPP (Samples Per Parameter) , που είναι αριθμός δειγμάτων προς τις εκτιμημένες παραμέτρους και πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 20.

Υπολογίζοντας λοιπόν τις εξισώσεις (4),(5) και υπολογίζοντας τις τάξεις n_a , n_b μπορεί να ορισθεί πλήρως ένα μοντέλο TF-ARX-OLS . Συνοψίζοντας η κατηγορία μοντέλων αυτή ανήκει στα μοντέλα ARX και χρησιμοποιεί μόνο αισθητήρια αποκρίσεων (επιταχυνσιόμετρα) και εκτιμά της παραμέτρους με την εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων.

Για τον έλεγχο εγκυρότητας του μοντέλου χρησιμοποιούνται τα τεστ ελέγχου κανονικότητας και λευκότητας των υπολοίπων, τα οποία αποτελούν και το κλειδί για την διερεύνηση σε διαφορετικού τύπου εκτίμησης των παραμέτρων.

5.2.2 Εκτιμήτρια Instrumental Variables (IV)

Correlation Method

Η εκτιμήτρια instrumental variables (iv) ανήκει στην κατηγορία correlation methods (Fassois, 2001)(Petsounis & Fassois, 2001) (Ljung.,1999), και επιλέγεται σε περιπτώσεις όπου τα υπόλοιπα ($e(t/\theta)$) του μοντέλου TF-ARX δεν είναι ασυσχέτιστα (λευκά). Για την εκτίμηση του $\hat{\theta}$ πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο διάνυσμα ζ προερχόμενο από το $Z_0^{k-1} = \{y_{1t-1}, y_{2t-1}, y_{1t-2}, y_{2t-2} \dots\}$ με την απαίτηση όμως το ζ να παραμένει ασυσχέτιστο με το $e[t]$.

Δηλαδή

$$E\{\zeta \cdot e[t]\} = 0 \quad (11)$$

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση (11) στην Εξίσωση (12) λαμβάνουμε :

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \zeta \cdot (y_1[t] - \Phi^T \cdot \theta) = 0 \quad (12)$$

$$\Rightarrow \hat{\theta}_{IV} = \left(\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \zeta \cdot \Phi^T \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \zeta \cdot y_1[t] \right) \quad (13)$$

Η επιλογή του instrumental variable διανύσματος, πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να είναι επαρκώς συσχετιζόμενο με το Φ , αλλά να μην επηρεάζεται από την λευκή ακολουθία $e[t]$. Δοθέντος λοιπόν της εκτίμησης του θ του μοντέλου της Εξίσωσης (13) τα στοιχεία του ζ βρίσκονται ως εξής:

$$\zeta = K(q)[-y_1^m[t-1] - \dots - y_1^m[t-n_a] : y_2[t] \dots y_2[t-n_b]]^T \quad (14)$$

Με K να δείχνει ένα γραμμικό φίλτρο το οποίο συχνά επιλέγεται ως $K(q)=1$ (Ljung, 1999) και y_1^m να προέρχεται από την

$$\begin{cases} N(q) \cdot y_1^m(t) = M(q) \cdot y_2(t) \\ N(q) = 1 + n_1 q^{-1} + \dots + n_{n_n} q^{-n_n} \\ M(q) = 1 + m_1 q^{-1} + \dots + m_{n_m} q^{-n_m} \end{cases} \quad (15)$$

Έτσι δημιουργείται μια επαναληπτική μέθοδος στην οποία :

- 1) Υπολογίζεται μια αρχική πρώτη εκτίμηση του διανύσματος των παραμέτρων θ μέσω της εκτιμήτριας ελαχίστων τετραγώνων από την Εξίσωση (8), υπολογίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο το $\hat{\theta}_0 = \hat{\theta}_{OLS}$ και $N(q)$, $M(q)$ αντιστοιχούν στα πολυώνυμα $A(q), B(q)$ του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS.
- 2) Υπολογίζεται το διάνυσμα που περιέχει τα στοιχεία του instrumental variable από την Εξίσωση (14).
- 3) Εκτίμηση του διανύσματος των παραμέτρων από την εκτιμήτρια instrumental variables Εξίσωση (13).
- 4) Επιστροφή στον υπολογισμό ξανά του διανύσματος ζ και ξανά εκτίμηση των παραμέτρων θ έως ότου παρατηρηθεί πως προηγούμενο βήμα της επαναληπτικής μεθόδου με το επόμενο δεν εμφανίζουν σημαντική διαφορά δηλαδή η επαναληπτική μέθοδος να συγκλίνει.

Πιθανό πρόβλημα της μεθόδου αποτελεί πως η αρχική εκτίμηση $\hat{\theta}_0$ βασίζεται στην αυτοσυσχέτιση με την ακολουθία λευκού θορύβου $e[t]$ κάτι που είναι ως ένα βαθμό ασυνεπές. Άρα η επαναληπτική μέθοδος χρειάζεται πολλές σε πλήθος επαναλήψεις ώστε να επέλθει σύγκλιση.

Ωστόσο για την επιλογή τάξης με την χρήση της εκτιμήτριας instrumental variables (iv), τα κριτήρια που ελέγχονται διαφοροποιούνται στα κάτωθι:

- 1) Έλεγχος για ελαχιστοποίηση του κριτηρίου Output Error.

$$OE \triangleq \sum_{t=0}^{N-1} (y[t] - y^m[t])^2 \quad (16)$$

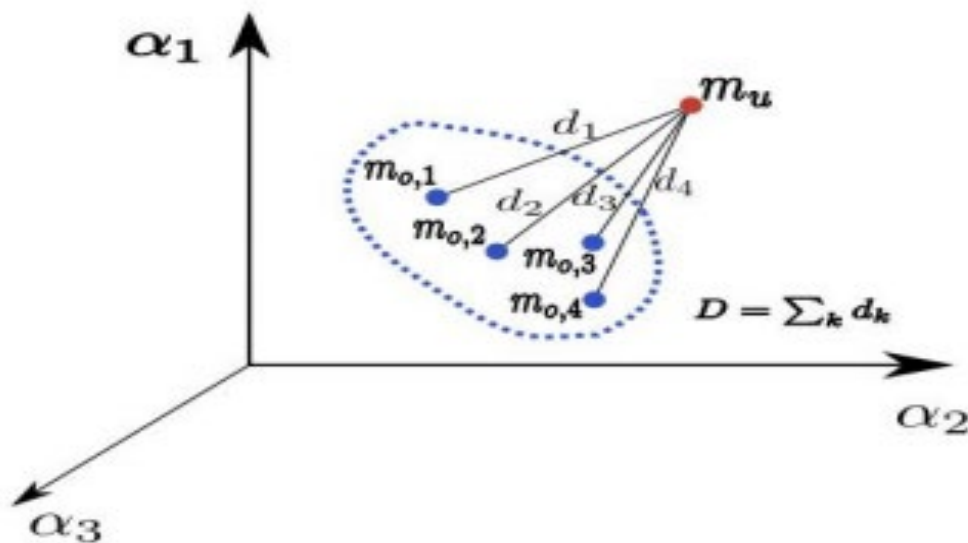
Με το $y^m[t]$ να αποτελεί την προσομοιωμένη έξοδο από το TF-ARX Εξίσωση (2)

- 2) Το condition number του αντιστρεφόμενου πολυωνύμου $A(B, \hat{\theta}_0)$. Το κριτήριο αυτό αποτελεί αποδεικτικό στοιχείο της ευστάθειας του πολυωνύμου $A(B, \hat{\theta}_0)$.

Ύστερα από την εκτίμηση των παραμέτρων και την επιλογή των τελικών τάξεων n_a, n_b μπορεί να ορισθεί πλήρως ένα μοντέλο TF-IV. Συνοψίζοντας και για την κατηγορία μοντέλων αυτή ανήκει στα μοντέλα ARX και χρησιμοποιεί μόνο αισθητήρια αποκρίσεων (επιταχυνσιόμετρα) και εκτιμά της παραμέτρους με την εκτιμήτρια instrumental variables (IV).

5.3 Μεθοδολογία Ανίχνευσης Βλαβών βάση της μεθόδου των πολλαπλών Μοντέλων

Σε αντίθεση με τις συμβατικές στατιστικές μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν ένα μοντέλο για την αναπαράσταση των δυναμικών χαρακτηριστικών της υγιούς κατάστασης, η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη χρήση περισσότερων του ενός μοντέλου, οι παράμετροι των οποίων ακολουθούν κανονική κατανομή. Για την ανίχνευση βλαβών η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει δυο στάδια, την φάση εκπαίδευσης (baseline phase), φάση ελέγχου (inspection phase). Στην φάση εκπαίδευσης με την χρήση σημάτων υγείας δημιουργείται ο “υγιής υποχώρος”, ο οποίος βασίζεται στη δημιουργία πολλών παραμετρικών μοντέλων που αναπαριστούν την υγιή κατασκευή. Αυτό γίνεται πράξη με την βοήθεια των μοντέλων TF-ARX με χρήση της εκτιμήτριας instrumental variables (IV) και της εκτιμήτριας γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (OLS), που αντιπροσωπεύουν την υγιή κατασκευή υπό οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας (m_0). Στην φάση ελέγχου η μέθοδος δέχεται δεδομένα από άγνωστες καταστάσεις λειτουργίας, μοντέλα (m_u), υπολογίζει την απόσταση D μεταξύ των μοντέλων της φάσης εκπαίδευσης και των μοντέλων της φάσης ελέγχου, βάσει της οποίας επιτυγχάνεται η ανίχνευση βλαβών. Τέλος ορίζεται στην φάση εκπαίδευσης μία απόσταση l_{lim} , όπου εάν η απόσταση D είναι μικρότερη τότε η άγνωστη κατάσταση λειτουργίας της φάσης ελέγχου ανήκει στην κατάσταση υγείας, διαφορετικά είναι σήμα βλάβης.



Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου MM. Το σετ των μοντέλων $m_o = \{m_{o,1}, \dots, m_{o,n}\}$ αναπαριστούν τον υγιή υποχώρο, ενώ το μοντέλο m_u την άγνωστη κατάσταση λειτουργίας (Aravanis et al., 2019).

5.3.1 Φάση Εκπαίδευσης- Κατασκευή Υγιούς υποχώρου

Στην φάση εκπαίδευσης λαμβάνονται υπόψιν κάποια σήματα που ανήκουν στην υγιή κατασκευή και βρίσκονται σε διαφορετικό συνδυασμό ροπής και θερμοκρασίας. Έστω $y_{o,i}$ οι χρονοσειρές των σημάτων με $i=1,2,3,\dots,k$, με το k να αποτελεί τον αριθμό των σημάτων και με τον δείκτη “ο” να υποδηλώνετε η υγιή κατάσταση. Από την κατάλληλη επεξεργασία των σημάτων αυτών λαμβάνεται μια χαρακτηριστική ποσότητα Q , η οποία αποτελεί ένα μοντέλο $m_{o,i}$ κάθε σήματος και το σύνολο τους αποτελεί το σετ του υγιή υποχώρου $m_o = \{m_{o,1}, \dots, m_{o,n}\}$.

Εφόσον η ποσότητα που μελετάτε είναι το Transmittance και ταυτοχρόνως η μέθοδος με την οποία μελετάτε είναι παραμετρική, η χαρακτηριστική ποσότητα Q είναι οι εκτιμώμενες παράμετροι $\hat{\theta}$ του μοντέλου, $Q = \hat{\theta}$.

5.3.2 Φάση ελέγχου της κατασκευής

Στην φάση ελέγχου διερευνώνται σήματα που ανήκουν σε άγνωστη κατάσταση ως προς την δομική ακεραιότητα. Η μέθοδος υπολογίζει την χαρακτηριστική ποσότητα και αναλόγως την κρίσιμη απόσταση που έχει δοθεί από τον χρήστη, χαρακτηρίζεται το σήμα και άρα και η ίδια η κατασκευή ως υγιής ή επιβλαβή.

Έστω $Y_{u,i}$ η χρονοσειρά του αγνώστου σήματος, όπου ο δείκτης "u" υποδηλώνει το άγνωστο, υπολογίζεται η χαρακτηριστική του ποσότητα και δημιουργείται το μοντέλο m_u . Τέλος υπολογίζεται η απόσταση της χαρακτηριστικής ποσότητας $d(m_u, m_{o,i})$ του αγνώστου μοντέλου m_u από κάθε υγιές μοντέλο $M_o = \{m_{o,1}, \dots, m_{o,v}\}$.

Ύστερα από τον υπολογισμό των αποστάσεων, ο χαρακτηρισμός γίνεται βάση των παρακάτω:

$$D = f(d(m_u, m_{o,i})) \leq l_{lim} \rightarrow \text{Υγιής Κατασκευή} \quad (17)$$

$$D > l_{lim} \rightarrow \text{Κατασκευή υπό βλάβη} \quad (18)$$

Οπού η συνάρτηση $f(\cdot)$ μπορεί να είναι το άθροισμα των αποστάσεων, το γινόμενο τους, η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή τους. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται ως $f(\cdot)$ η συνάρτηση ελαχίστου και η απόσταση $d(m_u, m_{o,i})$ είναι η απόσταση η Kullback-Leibler, (Joyce, 2011) εξίσωση (19), (20).

$$f(\cdot) = \min(\cdot) \quad (19)$$

$$d_{KL}(m_u, m_{o,i}) = \frac{1}{2} \left[\text{tr}(\Sigma_{o,i}^{-1} \Sigma_u) + (\hat{\theta}_{o,i} - \hat{\theta}_u)^T \Sigma_{o,i}^{-1} (\hat{\theta}_{o,i} - \hat{\theta}_u) - 1 - \ln \left(\frac{\det \Sigma_u}{\det \Sigma_{o,i}} \right) \right] \quad (20)$$

Με Σ είναι ο πίνακας συνδιασποράς των εκτιμημένων παραμέτρων του κάθε μοντέλου, tr είναι το ίχνος του πίνακα και $\det$ η ορίζουσα του πίνακα.

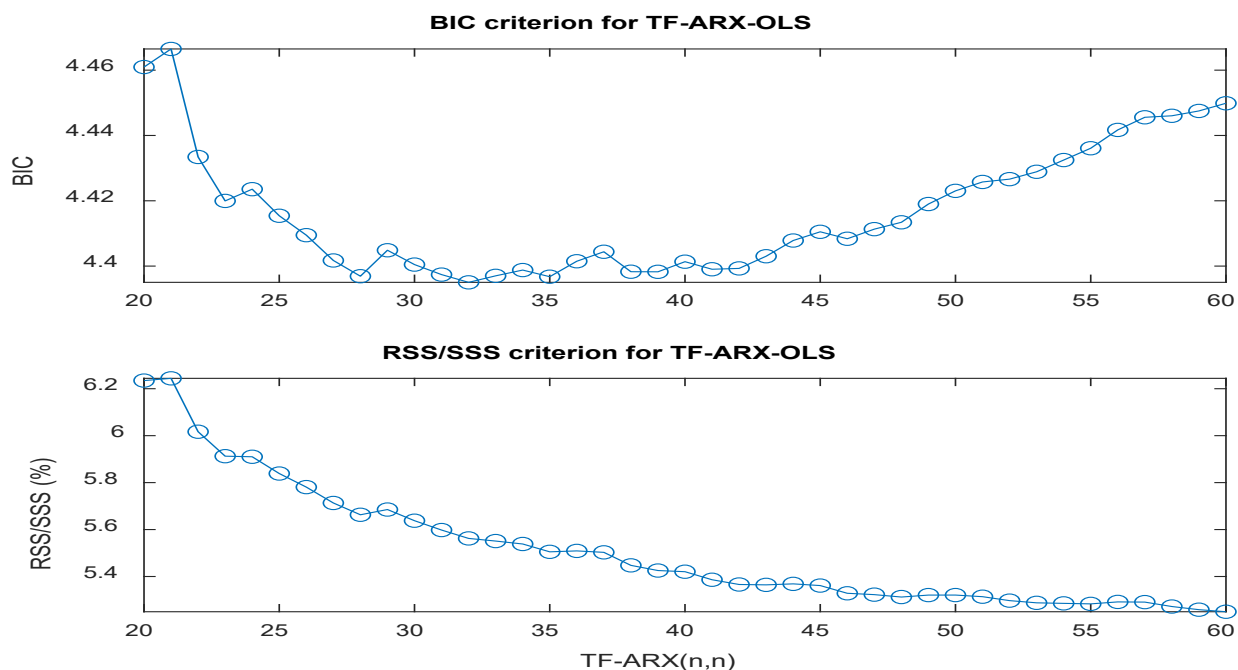
6. Αποτελέσματα & Συζήτηση

6.1 Δυναμική Αναγνώριση με μοντέλα TF-ARX-OLS

Στην συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται η εκτίμηση του μοντέλου TF-ARX-OLS(n_a, n_b) που αντιπροσωπεύει την παραμετρική μοντελοποίηση της υγιούς κατάστασης της σύνθετης δοκού και των δυναμικών χαρακτηριστικών της. Η εκτίμηση του μοντέλου γίνεται με την εκτιμήτρια γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (matlab function : arx.m). Το μοντέλο δέχεται μια είσοδο(αισθητήριο στην θέση Y_3) και μια έξοδο(αισθητήριο στην θέση Y_1) (Single Input-Single Output (SISO)), χρησιμοποιώντας σήματα από την υγιή κατάσταση λειτουργίας στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm σε μήκος 5002 samples.

Για την δημιουργία του μοντέλου TF-ARX-OLS(n_a, n_b) θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- 1) Επιλογή υποψηφίων Τάξεων Μοντέλου: Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα BIC, RSS/SSS, Εικόνα 26, και υπολογίζεται και η ποσότητα SPP.
- 2) Δημιουργία των μοντέλων με τις υποψήφιες προς εξέταση τάξεις σύγκριση μεταξύ τους, αλλά και με την μη-παραμετρική μέθοδο Welch για την συνάρτηση απόκρισης συχνότητας, για την τελική επιλογή.
- 3) Δημιουργία του μοντέλου TF-ARX-OLS(n_a, n_b) και έλεγχος εγκυρότητας του τελικού μοντέλου. Για τον έλεγχο εγκυρότητας γίνεται έλεγχος Λευκότητας και κανονικότητας υπολοίπων.
- 4) Τέλος εμφανίζονται το διάγραμμα πόλων μηδενιστών και η πρόβλεψη ενός βήματος.

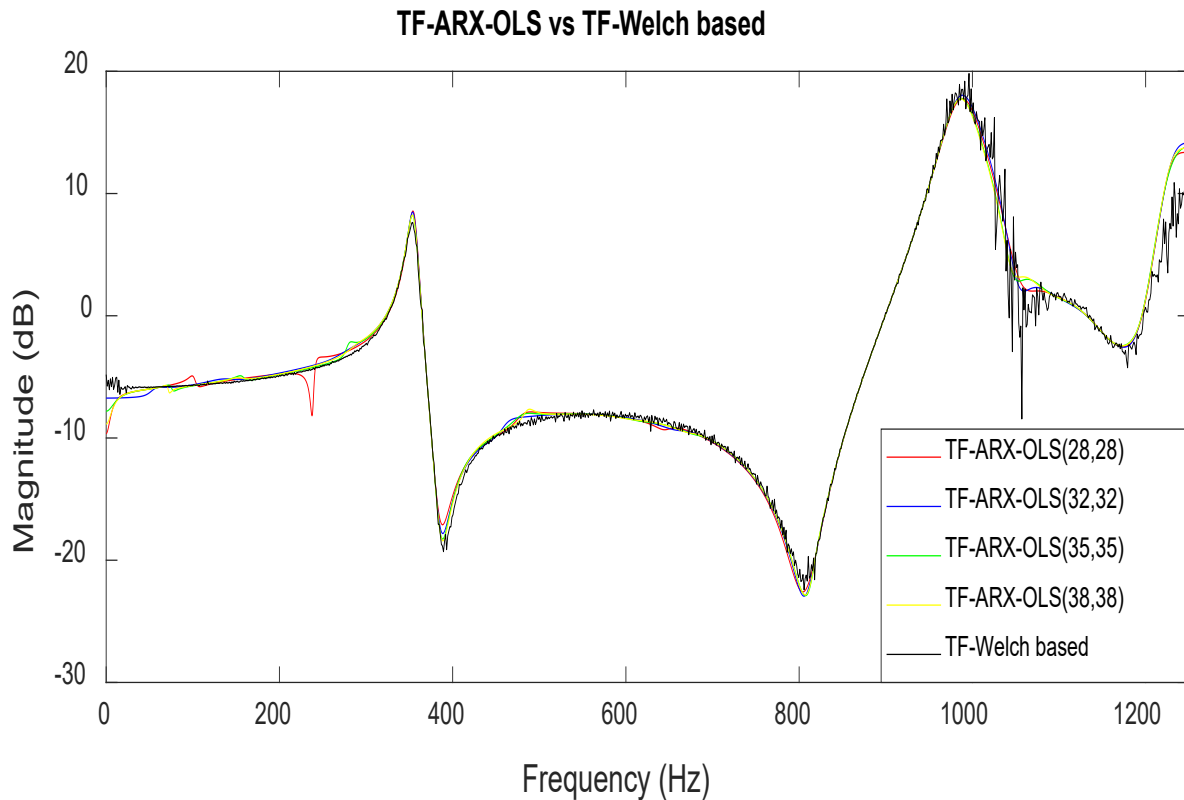


Εικόνα 26: Διάγραμμα BIC και RSS/SSS για τάξεις από 20 έως 60 για την δοκό υπό ονομαστικό πάχος 3.1mm.

Πίνακας 8: Τιμές των κριτηρίων BIC, RSS/SSS και SPP των τάξεων προς εξέταση.

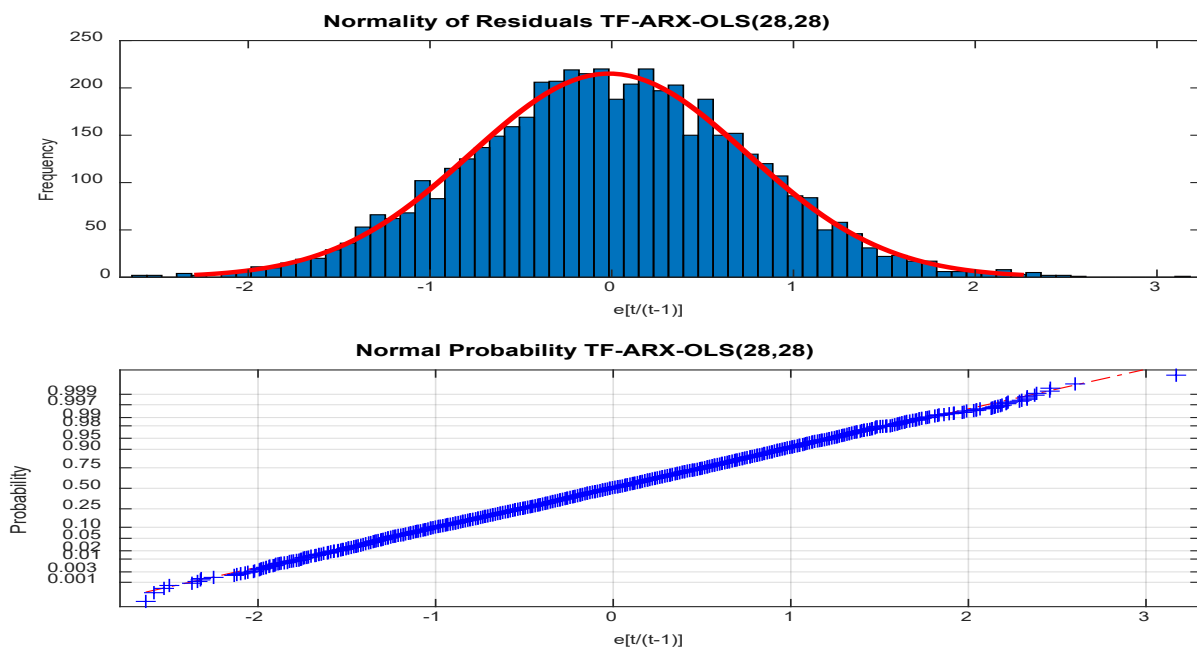
MODELS	BIC	RSS/SSS	SPP
TF-ARX-OLS (28,28)	4.39690	5.66296	89.285
TF-ARX-OLS (32,32)	4.39502	5.56225	78.125
TF-ARX-OLS (35,35)	4.39675	5.50511	71.428
TF-ARX-OLS (38,38)	4.39828	5.44746	65.789

Οι τάξεις που επιλέγονται προς εξέταση είναι τα ζευγαράκια (28,28),(32,32),(35,35),(38,38). Οι τιμές των κριτηρίων φαίνονται στον Πίνακα 8, ενώ στην Εικόνα 27 φαίνεται η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας συγκρίνοντας αυτές μεταξύ τους και με την μη παραμετρική μέθοδο κατά Welch(MATLAB function [pwelch](#)).

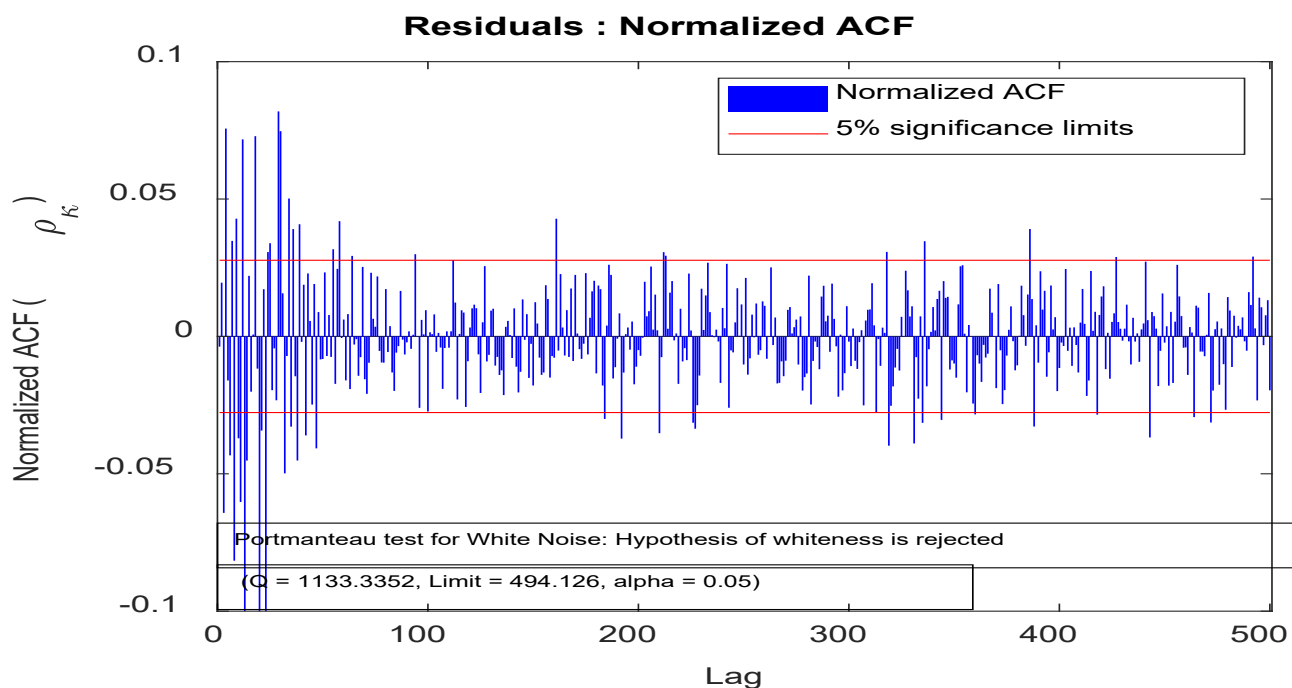


Εικόνα 27: Σύγκριση της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας των μοντέλων προς εξέταση με την μη παραμετρική μέθοδο Welch για την δοκό υπό ονομαστικό πάχος 3.1mm.

Για τον έλεγχο εγκυρότητας θα επιλεγεί το μοντέλο TF-ARX-OLS(28,28) καθώς για τάξεις μεγαλύτερες φαίνεται πως τα κριτήρια δεν ελαχιστοποιούνται σημαντικά περισσότερο και προσεγγίζει στο συγκριτικό διάγραμμα της απόκρισης συχνότητας την μη παραμετρική Welch ικανοποιητικά. Εξετάζεται και η λευκότητα των υπολοίπων (εντολή Matlab: `acf_wn.m`), Εικόνα 29, όσο και η υπακοή αυτών στην κανονική κατανομή (εντολή Matlab: `norm plot.m`), Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Έλεγχος κανονικότητας των υπολοίπων του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).

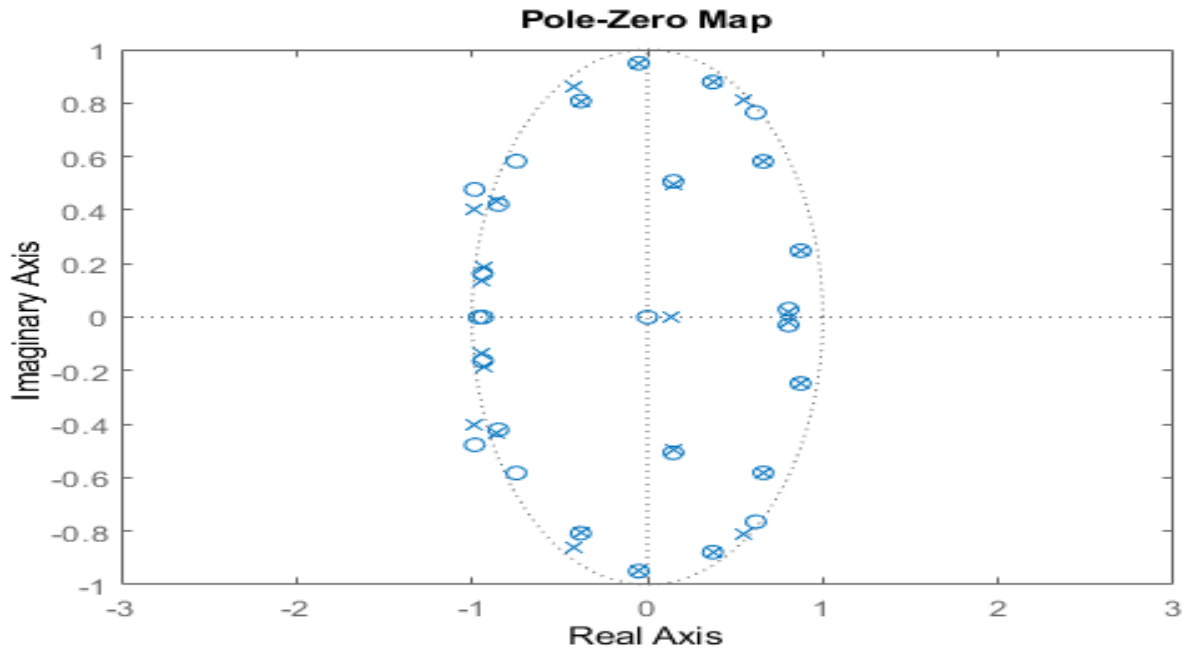


Εικόνα 29: Γράφημα ελέγχου λευκότητας υπολοίπων συναρτήσει της αυτοσυμμεταβλητότητας του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).

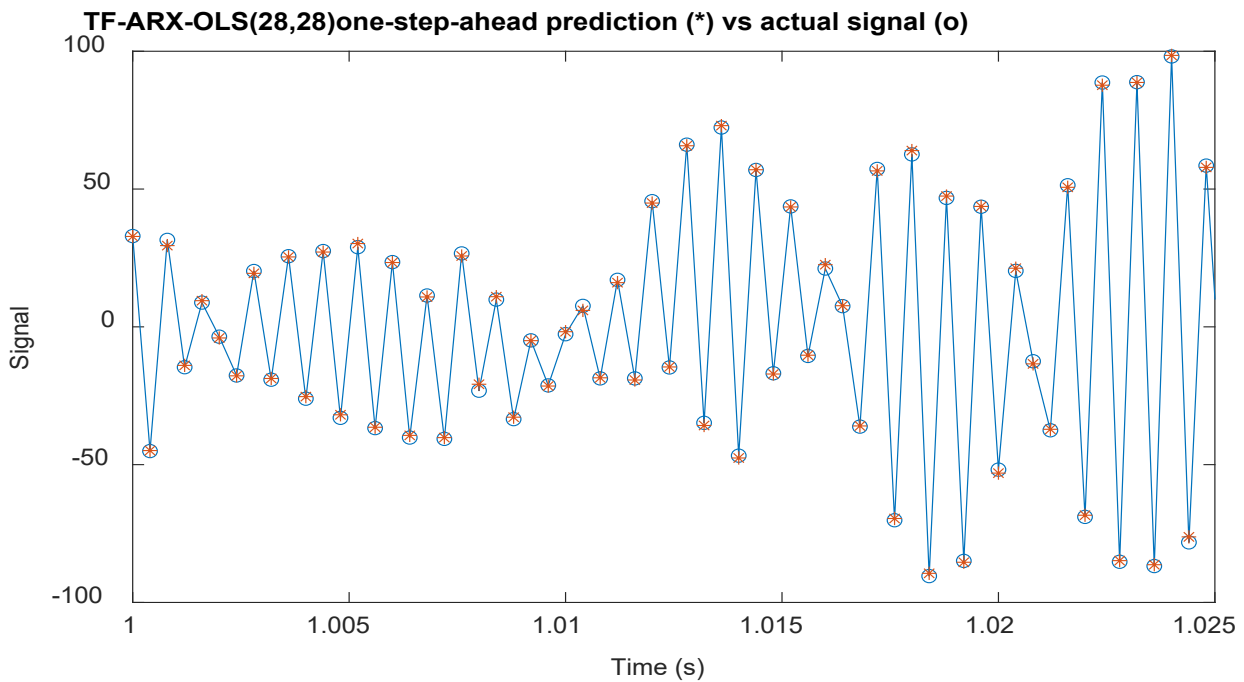
Από τον έλεγχο εγκυρότητας του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28) βγάζουμε τα κάτωθι συμπεράσματα:

- 1) Τα υπόλοιπα του μοντέλου ακολουθούν την κανονική κατανομή σε σημαντικό βαθμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28.
- 2) Ο έλεγχος της λευκότητας των υπολοίπων συναρτήσει της αυτοσυμμεταβλητότητας, δεν κρίνεται αποδεκτός, όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 29. Η απόρριψη του ελέγχου λευκότητας των υπολοίπων αποτελεί ένα ξεκάθαρο σημάδι για την σπουδαιότητα της εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου με την εκτιμήτρια instrumental variables (iv), καθώς η τελευταία απαιτεί τα instruments να παραμένουν ασυσχέτιστα με τα υπόλοιπα του παραμετρικού μοντέλου.

Για τον έλεγχο της ευστάθειας του παραμετρικού μοντέλου εμφανίζεται στην Εικόνα 30 το διάγραμμα των πόλων και των μηδενιστών στο μιγαδικό επίπεδο, ενώ στην Εικόνα 31 εμφανίζεται η ικανότητα του μοντέλου για την πρόβλεψη ενός βήματος, η οποία αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αποδεικτικό στοιχείο στην αποτελεσματική δυναμική αναγνώριση της κατασκευής και κατά επέκταση διάγνωσης βλαβών, η οποία φαίνεται να είναι επιτυχής.



Εικόνα 30: Έλεγχος ευστάθειας του μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).



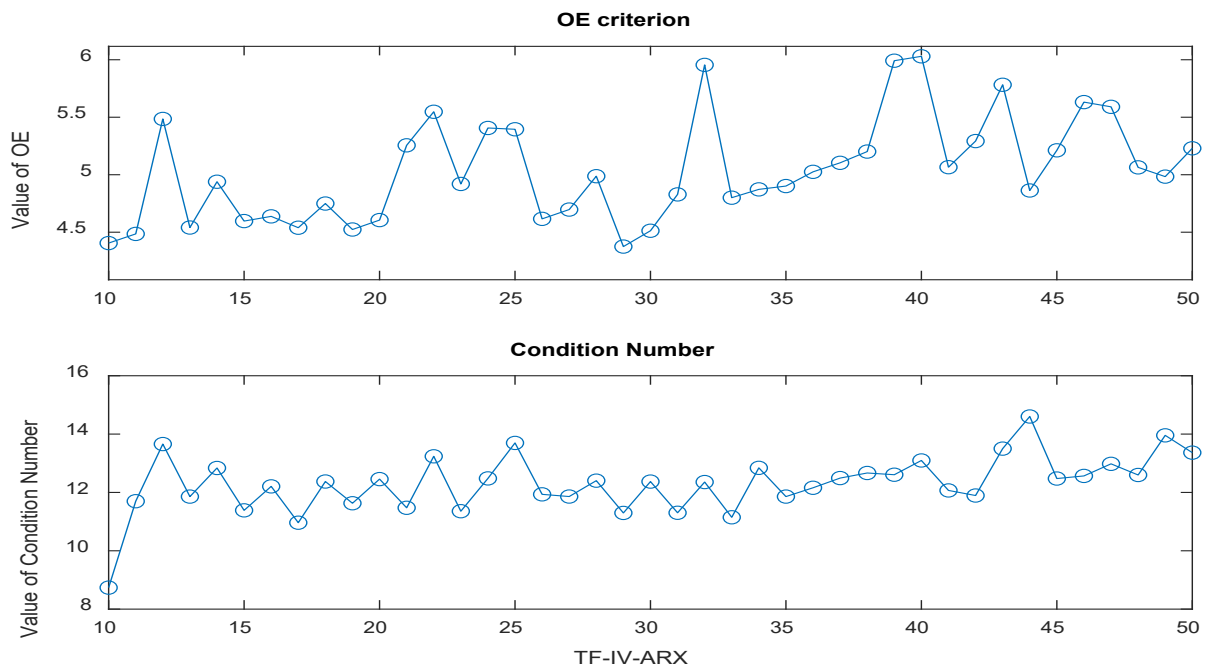
Εικόνα 31: Ικανότητα πρόβλεψης ενός βήματος του μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28) για ένα τυχαίο στιγμιότυπο.

6.2 Δυναμική Αναγνώριση με μοντέλα TF-ARX-IV

Όπως φάνηκε στην Εικόνα 29 η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων απέτυχε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της ως προς τον έλεγχο εγκυρότητας και συγκεκριμένα στον έλεγχο της λευκότητας των υπολοίπων. Η εκτιμήτρια instrumental variables (IV) ανήκει στην κατηγορία correlation methods όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2.2 και επιλέγεται σε περιπτώσεις όπου οι όροι παλινδρόμησης έχουν συσχέτιση με το σφάλμα του μοντέλου, με τα instruments να επιλέγονται ως οι παρελθοντικές τιμές των μετρήσεων.

Για την δημιουργία του μοντέλου TF-ARX-IV(n_a, n_b) θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- 1) Έλεγχος κριτηρίων επιλογής τάξης: Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το Output Error criterion (OE), το SPP και το condition number του πίνακα $A(B, \theta_0)$ που αντιστρέφεται, με στόχο τον έλεγχο της ευστάθειας του.
- 2) Δημιουργία των μοντέλων με τις υποψήφιες προς εξέταση τάξεις, σύγκριση μεταξύ τους, αλλά και με την μη-παραμετρική μέθοδο Welch για την συνάρτηση απόκρισης συχνότητας, για την τελική επιλογή.
- 3) Ύστερα για τον έλεγχο εγκυρότητας του επιλεχθέντος μοντέλου TF-ARX-IV(n_a, n_b) παρατηρείτε το διάγραμμα πόλων-μηδενιστών στο μιγαδικό επίπεδο, ενώ τέλος σαν ένδειξη ως προς την ικανότητα του μοντέλου στην επιτυχή μοντελοποίηση και στην ανίχνευση βλαβών μελετάτε η πρόβλεψη ενός βήματος του μοντέλου.



Εικόνα 32: Κριτήριο Output Error (OE) και Condition Number του πίνακα A για τάξεις από 10 έως 50 για σήμα που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.

Οι τάξεις που θα εξεταστούν είναι η τάξη $n_a = n_b = 17$, $n_a = n_b = 19$, $n_a = n_b = 26$, $n_a = n_b = 29$.

Αρχικά όλα τα ζεύγη των τάξεων επαληθεύουν το κριτήριο $SPP \geq 20$, Πίνακας 9, καθώς τα samples που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 5002 με αποτέλεσμα τα SPP να λαμβάνουν τις κάτωθι τιμές.

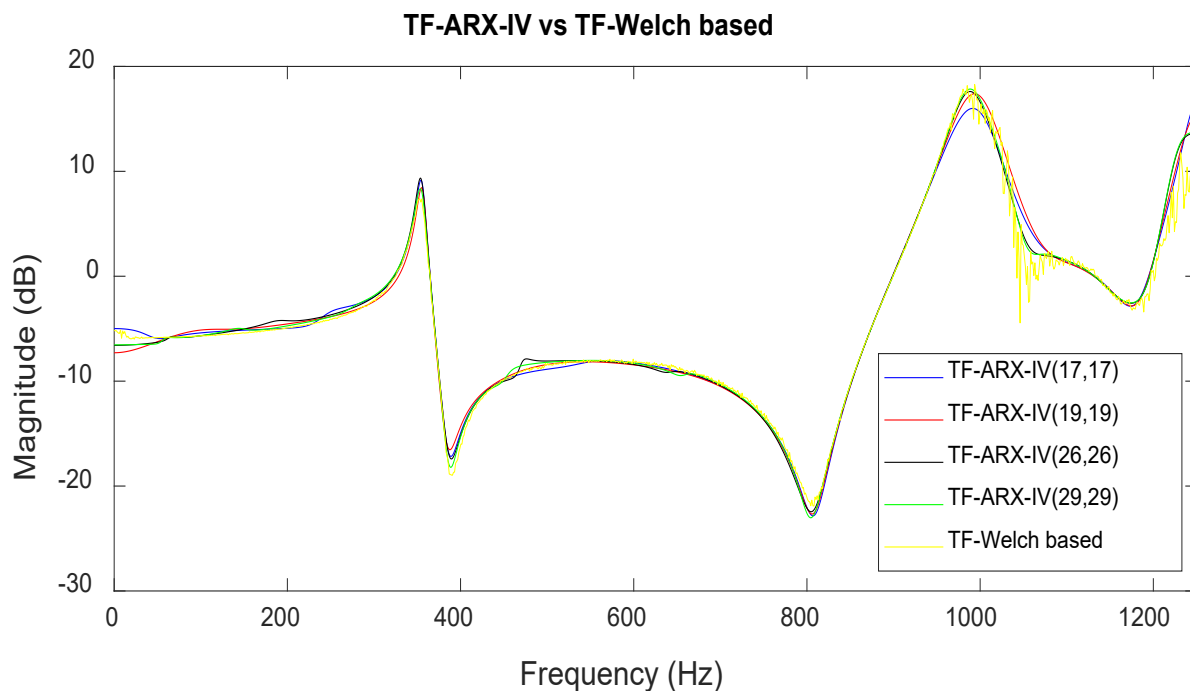
Δημιουργώντας τα μοντέλα προς εξέταση λαμβάνονται οι κάτωθι πληροφορίες, όπως φαίνονται στον Πίνακα 10, ενώ στην Εικόνα 33 φαίνεται η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας σε σύγκριση μεταξύ τους και ταυτόχρονα και με την μη-παραμετρική Welch (MATLAB function `pwelch`).

Πίνακας 9: Τιμές κριτηρίων Output Error (OE) και Condition Number των μοντέλων TF-ARX-IV των εξεταζόμενων μοντέλων.

SPP	TF-ARX-IV (17,17)	TF-ARX-IV (19,19)	TF-ARX-IV (26,26)	TF-ARX-IV (29,29)
Value	147.058	131.578	96.153	86.206

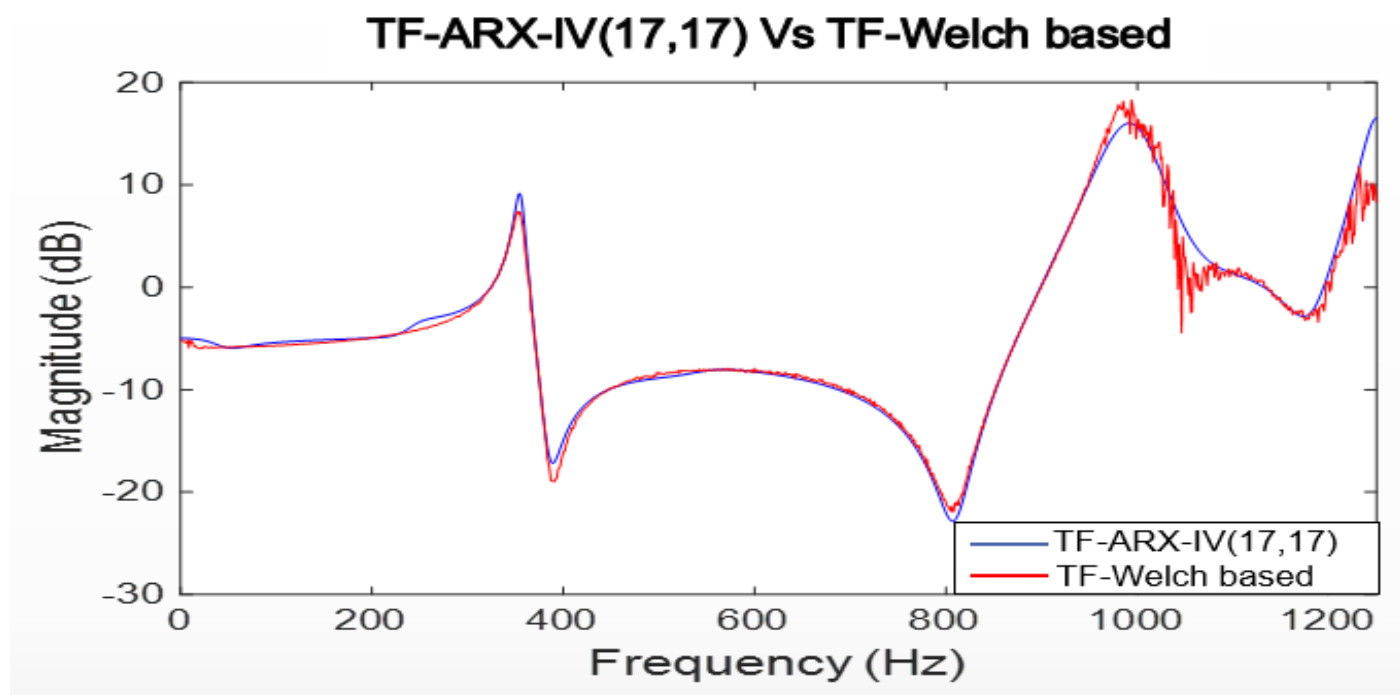
Πίνακας 10: Τιμές κριτηρίων Output Error (OE) και Condition Number των μοντέλων TF-ARX-IV των εξεταζόμενων μοντέλων.

Criterion	TF-ARX-IV (17,17)	TF-ARX-IV (19,19)	TF-ARX-IV (26,26)	TF-ARX-IV (29,29)
OE	4.53916	4.52357	4.61615	4.37503
Condition Number	10.9627	11.6293	11.9346	11.2972

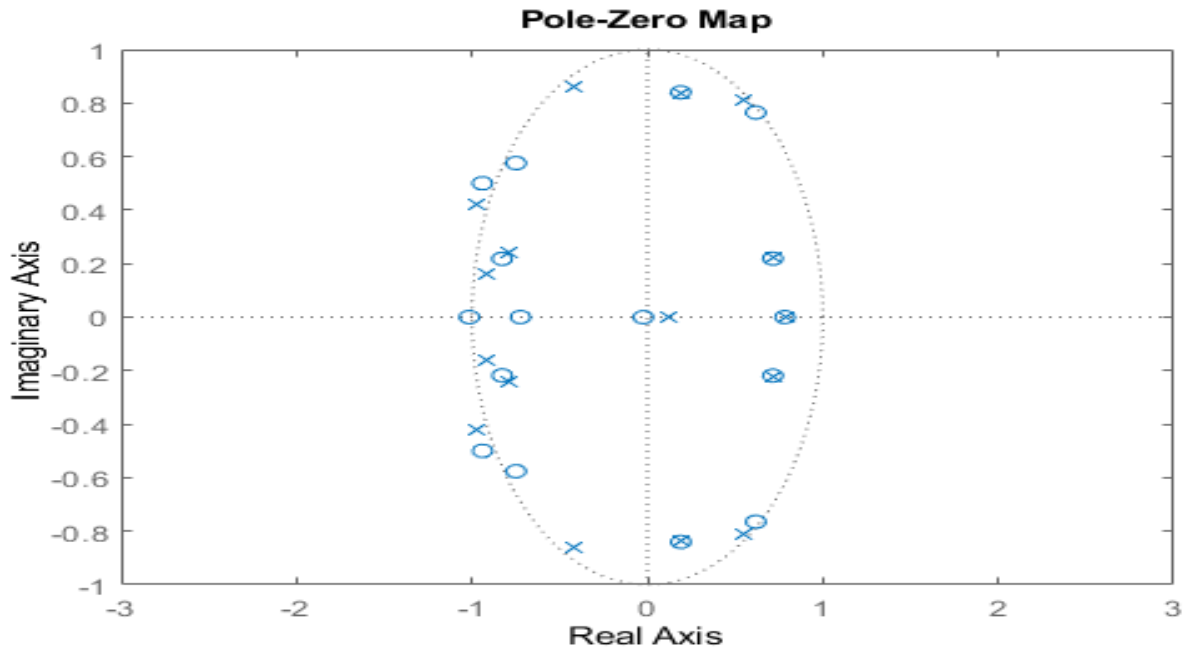


Εικόνα 33: Σύγκριση των μοντέλων TF-ARX-IV προς εξέταση με την μη-παραμετρική μέθοδο Welch για το γράφημα απόκρισης συχνότητας του σήματος που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.

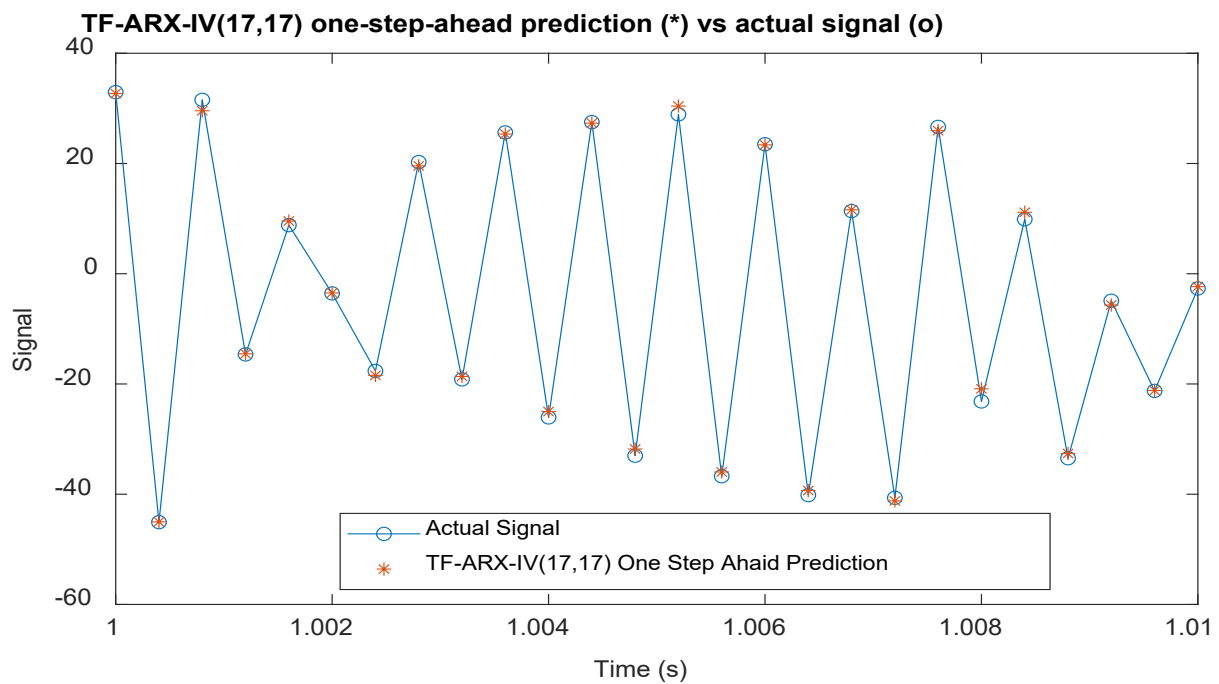
Φαίνεται πως και για τα 4 παραμετρικά μοντέλα υπάρχει επαρκής σύγκληση με την μη-παραμετρική Welch για το διάγραμμα του φάσματος. Το μοντέλο που επιλέγεται να ελεγχθεί ως προς την ευστάθεια του είναι το TF-ARX-IV(17,17), Εικόνα 35. Τέλος στην Εικόνα 36 φαίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17).



Εικόνα 34: Σύγκριση του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-IV (17,17) με την μη-παραμετρική εκτίμηση κατά Welch για το σήμα που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.



Εικόνα 35: Διάγραμμα πόλων μηδενιστών του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17).



Εικόνα 36: Πρόβλεψη ενός βήματος για την παραμετρική μέθοδο TF-ARX-IV(17,17) για ένα στιγμιότυπο ενός τυχαίου στιγμιότυπου.

Από τον έλεγχο εγκυρότητας του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17) βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Η σύγκλιση του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-IV(17,17) με την μη παραμετρική Welch στο διάγραμμα απόκρισης συχνότητας μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική [Εικόνα 34](#).
- 2) Η ευστάθεια του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17) δεν γίνεται αποδεκτή, όπως μπορεί να φανεί στην [Εικόνα 35](#).
- 3) Η πρόβλεψη ενός βήματος φαίνεται να είναι η ικανοποιητική κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα της εκτιμήτριας instrumental variables (IV) για την συγκεκριμένη κατασκευή, [Εικόνα 36](#).

6.3 Ανίχνευση Βλαβών βάση της μεθόδου πολλαπλών μοντέλων

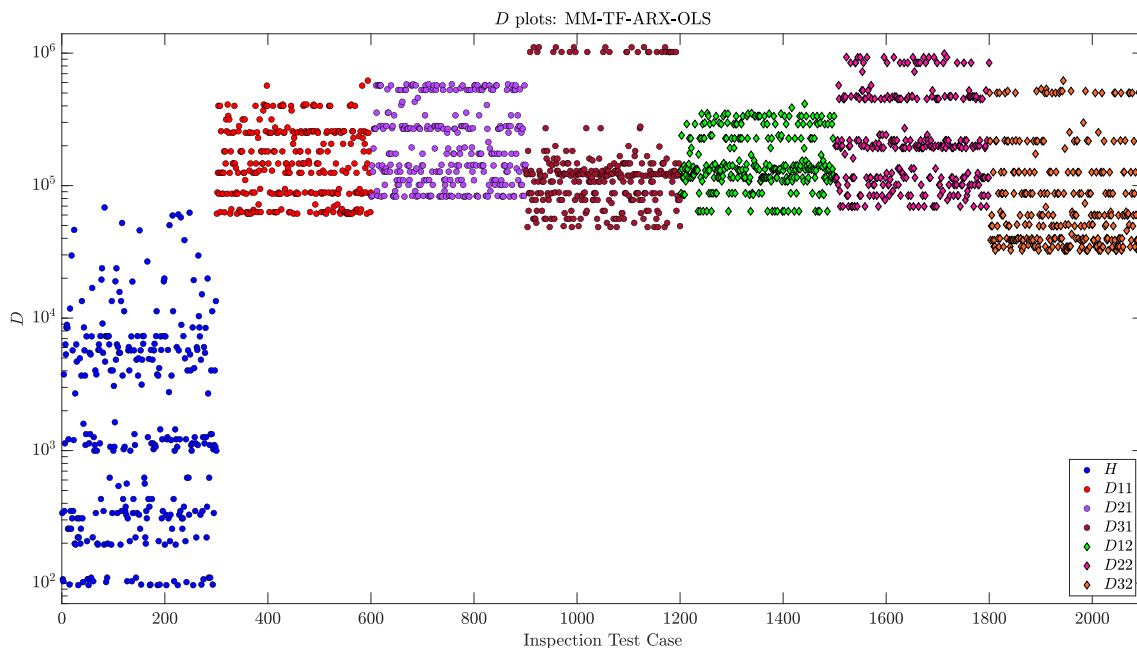
Το πλαίσιο εργασίας που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των τριών τεχνητών βλαβών σε κάθε θέση είναι η μέθοδος των πολλαπλών μοντέλων, με χρήση της απόστασης Kullback-Leibler για το Min Of Distances, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 5.3. Στην φάση εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν τυχαία σήματα σύμφωνα με τον Πίνακα 6, Πίνακα 11. Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε μία κατασκευή ανά κατάσταση λειτουργίας δεν χρησιμοποιείται στην φάση ελέγχου. Σχηματίστηκαν 30 διαφορετικές εκπαιδεύσεις τυχαία, ενώ για την φάση ελέγχου πραγματοποιήθηκαν test για την μέθοδο από κατασκευές που ανήκουν σε άγνωστες καταστάσεις σύμφωνα με τον Πίνακα 11. Τέλος τα σημεία εφαρμογής των βλαβών φαίνονται στις Εικόνα 3, Εικόνα 4, Εικόνα 5.

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά στοιχεία για την ανίχνευση βλαβών.

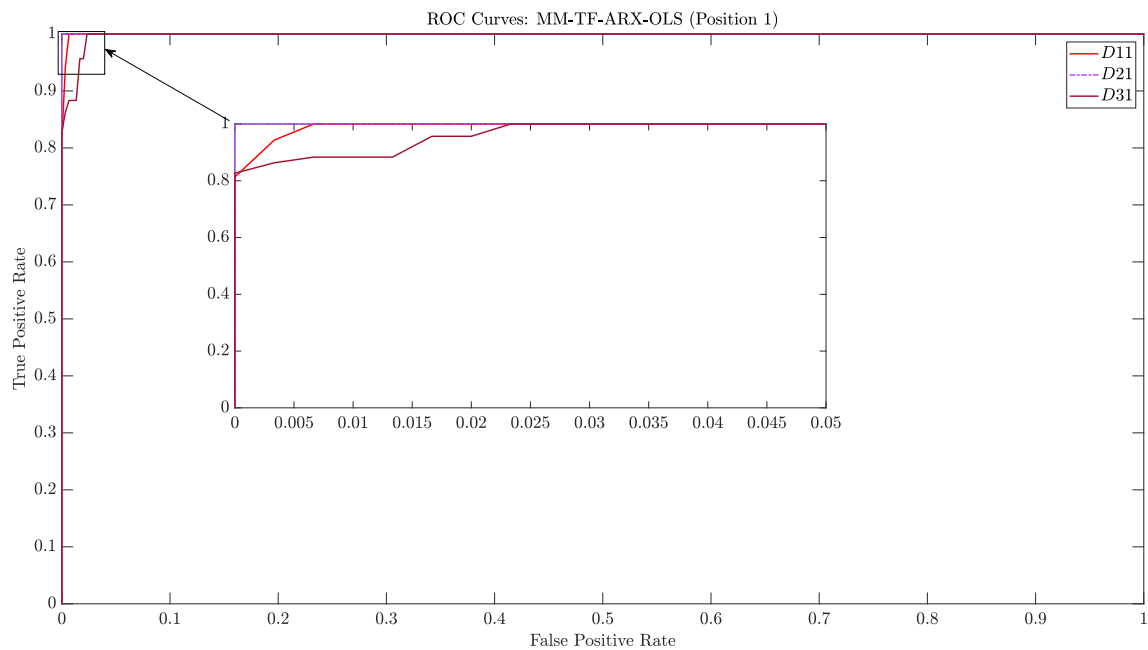
Number Of Baseline Structures	Number Of Inspection Phase Structures	Number Of Experiments in each Damage Location in Inspection Phase (Position1/Position 2)	Number Of Employed Sets Of bs.	Number Of Aggregate Test Cases
(bs)	(is)	(p)	(q)	(q*is)
30	84	36/36	30	2520

6.3.1 Ανίχνευση Βλαβών βάση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS

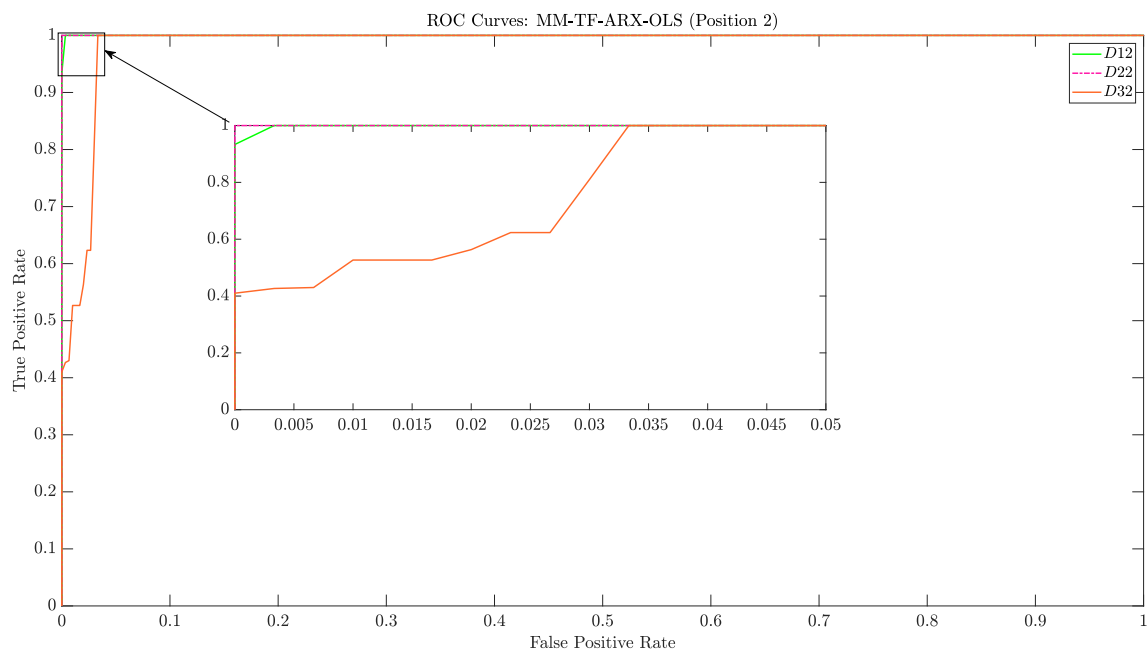
Τα αποτελέσματα της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) φαίνονται στις, όπου φαίνονται τα διαγράμματα ROC και Scatter για μία τυχαία εκπαίδευση από το σύνολο των 30, ενώ τα αποτελέσματα ποσοτικοποιημένα φαίνονται στον Πίνακα 12.



Εικόνα 37: Αξιολόγηση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών μέσω απεικόνισης των αποστάσεων D (χρήση ελάχιστης απόστασης Kullback-Leibler) .



Εικόνα 38: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 1 (διεύθυνση απόκρισης αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.



Εικόνα 39: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 2 (κάθετη διεύθυνση στην απόκριση αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.

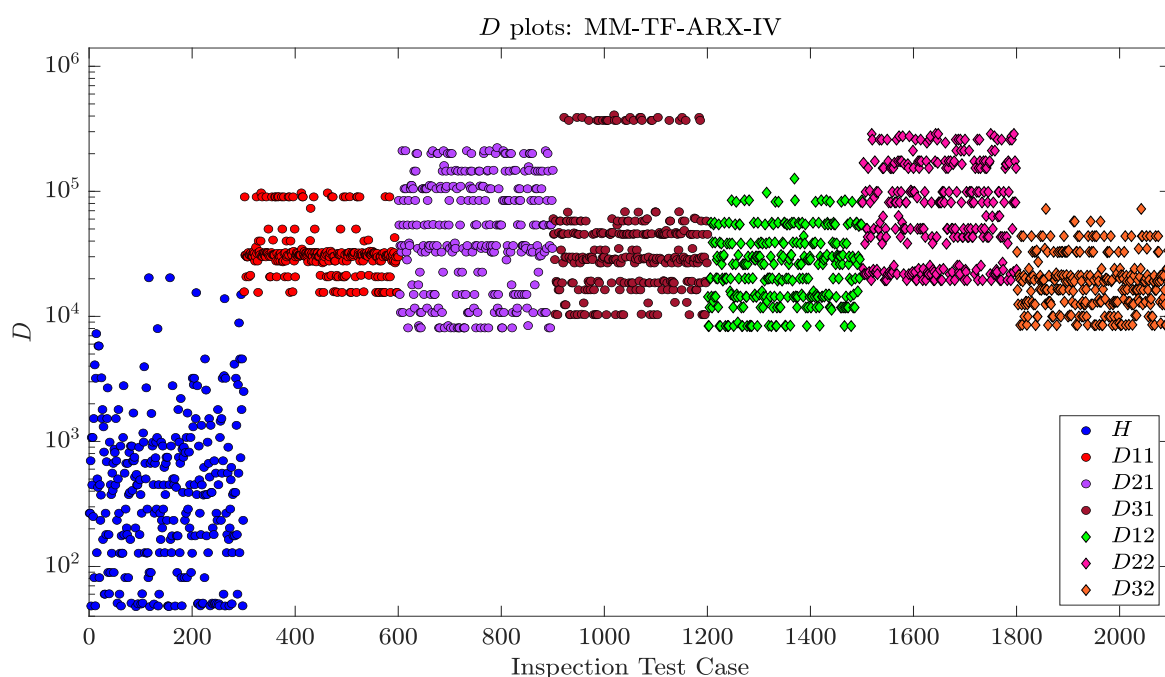
Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και για τις 30 διαφορετικές εκπαιδεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν ο μέσος όρος των AUC για το εκάστοτε Damage στην εκάστοτε θέση παρουσιάζεται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα (AUC) της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28).

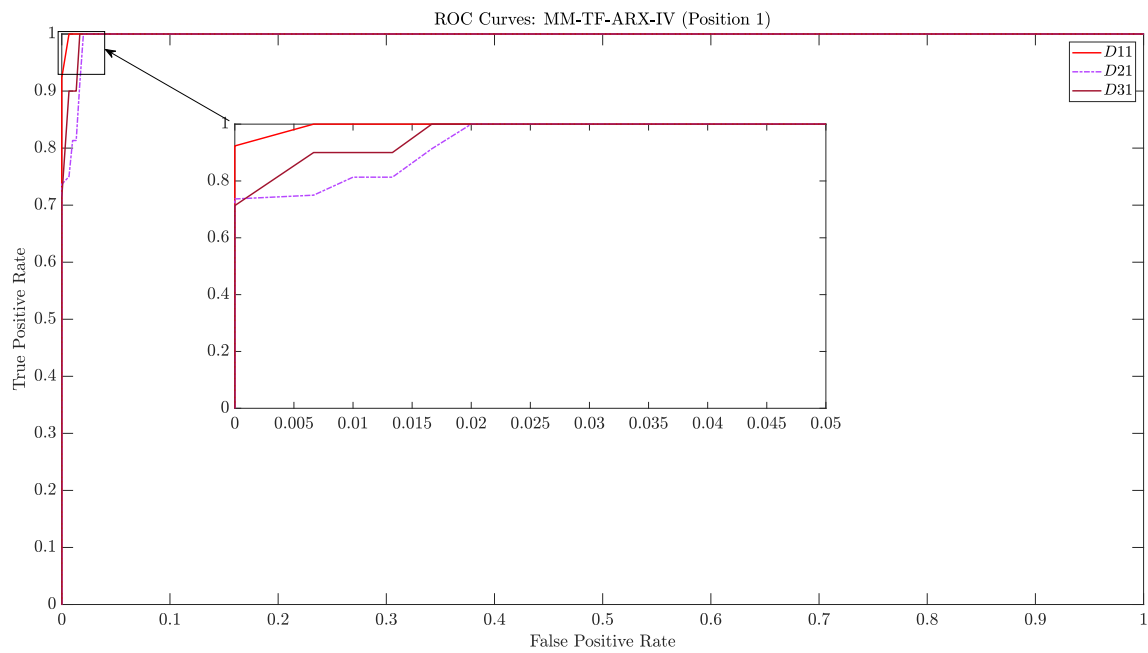
Type Of Damage	AUC
(D11)	0.9995
(D21)	1.0000
(D31)	0.9980
(D12)	0.9999
(D22)	1.0000
(D32)	0.9850

6.3.2 Ανίχνευση Βλαβών βάση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV

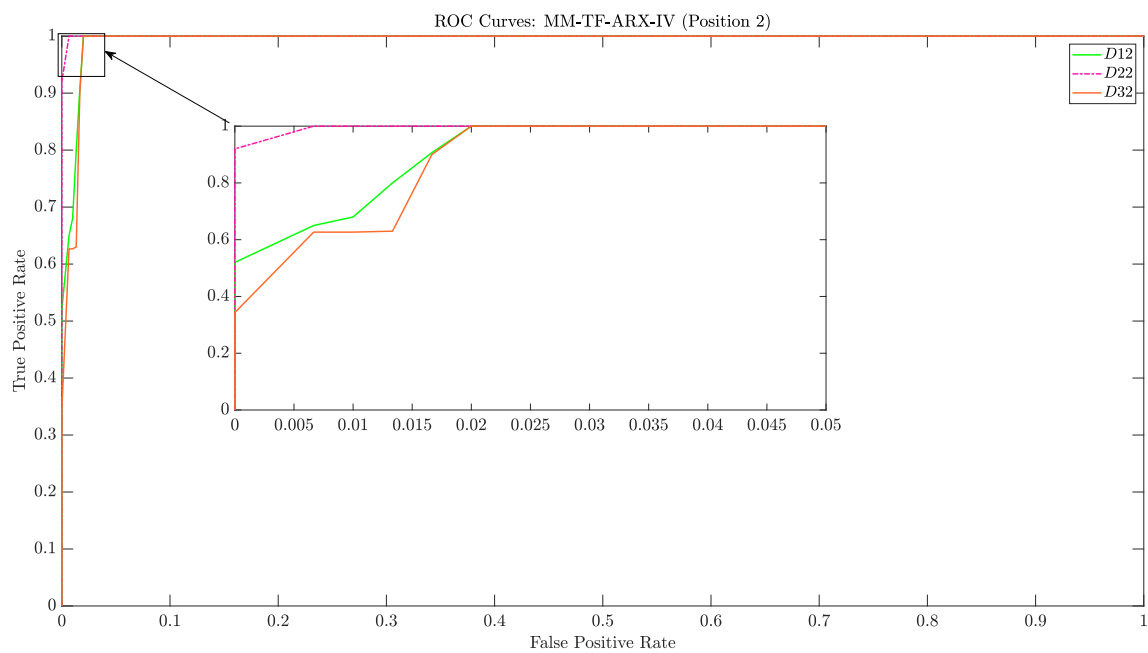
Τα αποτελέσματα της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) φαίνονται στις, όπου φαίνονται τα διαγράμματα ROC και Scatter για μία τυχαία εκπαίδευση από το σύνολο των 30, ενώ τα αποτελέσματα ποσοτικοποιημένα φαίνονται στον Πίνακα 13.



Εικόνα 40: Αξιολόγηση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών μέσω απεικόνισης των αποστάσεων D (χρήση ελάχιστης απόστασης Kullback-Leibler) για τις τυχαίες εκπαιδεύσεις που μελετήθηκαν.



Εικόνα 41: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 1 (διεύθυνση απόκρισης αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.



Εικόνα 42: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 2 (κάθετη διεύθυνση στην μέτρηση αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.

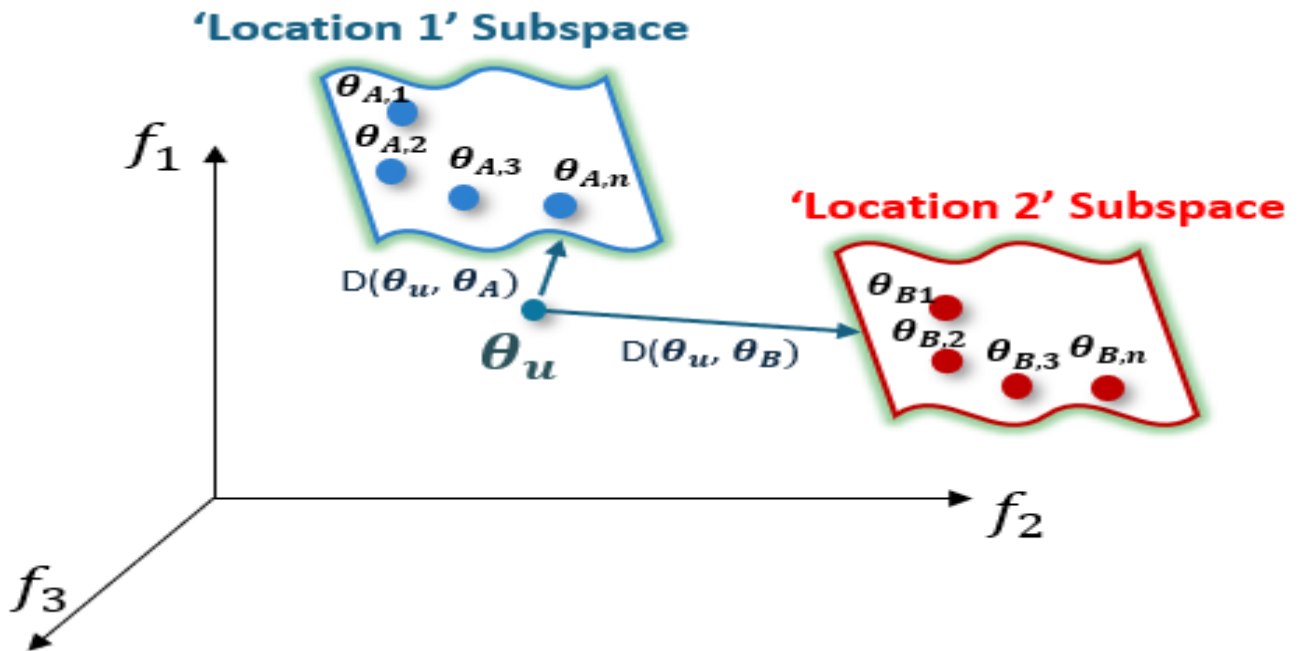
Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και για τις 30 διαφορετικές εκπαιδεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν ο μέσος όρος των AUC για το εκάστοτε Damage στην εκάστοτε θέση παρουσιάζεται στον Πίνακας 13.

Πίνακας 13: Ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα (AUC) της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17)

Type Of Damage	AUC
(D11)	0.9990
(D21)	0.9960
(D31)	0.9970
(D12)	0.9967
(D22)	0.9987
(D32)	0.9941

6.4 Καθορισμός θέσης βλάβης

Για τον καθορισμό της θέσης βλάβης θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Principal Components Analysis (PCA), πραγματοποιώντας στο σύνολο δυο εκπαιδεύσεις οι οποίες έχουν τα χαρακτηριστικά του Πίνακας 14, όπου στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται 24 επιβλαβής κατασκευές με τυχαίο μέγεθος από το σύνολο των 36 για την εκάστοτε εκπαίδευση με κοινό χαρακτηριστικό την θέση που περιέχουν την βλάβη. Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε μία κατασκευή ανά κατάσταση λειτουργίας δεν χρησιμοποιείται στην φάση ελέγχου. Στο inspection phase χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του Πίνακας 14. Για τον καθορισμό της θέσης βλάβης ουσιαστικά ελέγχονται οι αποστάσεις των αγνώστων σημάτων από τον εκάστοτε χώρο εκπαίδευσης και συγκρίνοντας αυτές μεταξύ τους. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται οι κατασκευές ως επιβλαβής στην θέση 1, το σύνολο των κατασκευών που προκύπτει μικρότερη απόσταση στην εκπαίδευση της μεθόδου με δεδομένα από την πρώτη θέση βλάβης, ενώ οι κατασκευές που καθορίζονται ως επιβλαβής στην θέση 2, αποτελούν το σύνολο των κατασκευών με μικρότερη απόσταση στην εκπαίδευση της μεθόδου με δεδομένα από την δεύτερη θέση βλάβης, Εικόνα 43. Δημιουργήθηκαν στο σύνολο 100 rotations, τα οποία μεταβάλλονται κατά μέσον όρο 34.25% μεταξύ τους. Τέλος στις εκπαιδεύσεις χρησιμοποιήθηκαν 66,67% των συνολικών δεδομένων προς χρήση.



Εικόνα 43: Γεωμετρική αναπαράσταση του καθορισμού θέσης βλάβης.

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά στοιχεία για την καθορισμό θέσης βλάβης για μια τυχαία βλάβη σε μια από τις δύο θέσεις.

Number Of Baseline Structures (bs)	Number Of Inspection Phase Structures (is)	Number Of Experiments in each Damage Location in The Inspection Phase (Position1/Position 2) (p)	Number Of Employed Sets Of bs (q)	Number Of Aggregate Test Cases (q*is)
24	12	12/36	100	1200

6.4.1 Καθορισμός θέσης βλάβης διαμέσου της μεθόδου PCA-MM-TF-ARX-OLS

Στην μέθοδο PCA στο μοντέλο MM-TF-ARX-OLS χρησιμοποιήθηκαν 11 παράμετροι, δίνοντας τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σύνολο των 100 rotations. Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται παρακάτω στον Εικόνα 44.

Damage Position Characterization: PCA-MM-TF-ARX-OLS

Predicted Damage Position	Position 1	1016 42.3% 227 9.5% 81.7% 18.3%
	Position 2	184 7.7% 973 40.5% 84.1% 15.9%
		84.7% 15.3% 81.1% 18.9% 82.9% 17.1%
	Position 1 Position 2	
	True Damage Position	

Εικόνα 44: Το confusion Matrix για τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS

Παρατηρείται πως οι τεχνητές βλάβες της θέσης 1 χαρακτηρίζονται ελαφρώς ανώτερα από αυτές της θέσης 2 για την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28).

6.4.2 Καθορισμός θέσης βλάβης διαμέσου της μεθόδου PCA-MM-TF-ARX-IV

Στην μέθοδο PCA στο μοντέλο MM-TF-ARX-IV χρησιμοποιήθηκαν 11 παράμετροι, δίνοντας τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σύνολο των 100 rotations. Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται παρακάτω στον Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται παρακάτω στον Εικόνα 45.

Damage Position Characterization: PCA-MM-TF-ARX-IV

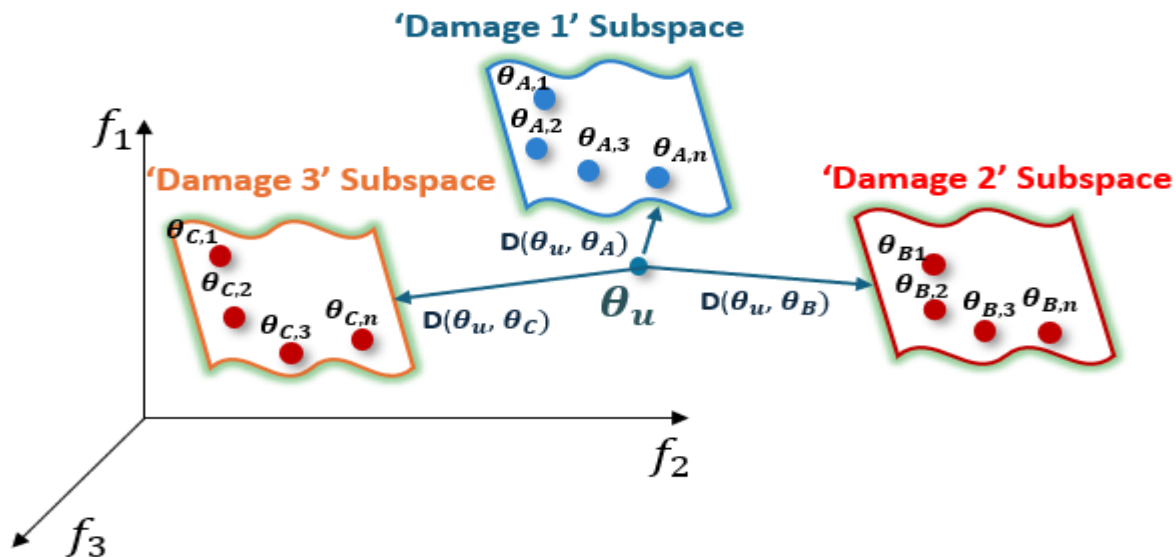
Predicted Damage Position	Position 1	865 36.0% 86 3.6% 91.0% 9.0%
	Position 2	335 14.0% 1114 46.4% 76.9% 23.1%
		72.1% 27.9% 92.8% 7.2% 82.5% 17.5%
	Position 1 Position 2	
	True Damage Position	

Εικόνα 45: Το confusion Matrix για τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV

Παρατηρείται πως οι τεχνητές βλάβες της θέσης 1 χαρακτηρίζονται σαφώς χειρότερα ως προς την θέση τους έναντι αυτόν στην θέση 2 για την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17).

6.5 Καθορισμός μεγέθους βλαβών

Για τον χαρακτηρισμό του μεγέθους των βλαβών χρησιμοποιείται η μέθοδος Principal Components Analysis (PCA), πραγματοποιώντας στο σύνολο τρεις εκπαιδεύσεις με τα χαρακτηριστικά τους να εμφανίζονται στον Πίνακα 17, όπου στην πραγματικότητα επιλέγονται 16 επιβλαβής κατασκευές τυχαία από το σύνολο των 24ρων με κοινό χαρακτηριστικό το μέγεθος της βλάβης. Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε μία κατασκευή ανά κατάσταση λειτουργίας δεν χρησιμοποιείται στην φάση ελέγχου. Για την ταξινόμηση των βλαβών ως προς το μέγεθος τους ουσιαστικά ελέγχονται οι αποστάσεις των αγνώστων σημάτων και συγκρίνονται αυτές μεταξύ τους. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται ως μέγεθος βλάβης 1(μικρή βλάβη), το σύνολο των κατασκευών που προκύπτει μικρότερη απόσταση στην εκπαίδευση της μεθόδου με δεδομένα από την βλάβη μεγέθους 1 (μικρή βλάβη). Με παρόμοιο τρόπο καθορίζονται ως προς το μέγεθος τους και οι υπόλοιπες δυο βλάβες, Εικόνα 44.



Εικόνα 46: Γεωμετρική αναπαράσταση καθορισμού μεγέθους βλαβών

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά στοιχεία για τον καθορισμό μεγέθους βλαβών

Number Of Baseline Structures (bs)	Number Of Inspection Phase Structures (is)	Number Of Experiments in each Damage Location in The Inspection Phase (Position1/Position 2) (p)	Number Of Employed Sets Of bs. (q)	Number Of Aggregate Test Cases (q*is)
16	8	24/36	100	800

6.5.1 Καθορισμός μεγέθους βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS

Στην μέθοδο PCA στο μοντέλο MM-TF-ARX-OLS χρησιμοποιήθηκαν 5 παράμετροι, δίνοντας τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σύνολο των 100 rotations. Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 47.

Damage Level Characterization: PCA-MM-TF-ARX-OLS

Predicted Damage Level	1 cm crack	551 23.0%	143 6.0%	70 2.9%	72.1% 27.9%
	2 cm crack	108 4.5%	584 24.3%	122 5.1%	71.7% 28.3%
	3 cm crack	141 5.9%	73 3.0%	608 25.3%	74.0% 26.0%
		68.9% 31.1%	73.0% 27.0%	76.0% 24.0%	72.6% 27.4%
		1 cm crack	2 cm crack	3 cm crack	
		True Damage Level			

Εικόνα 47: Το confusion Matrix για τον καθορισμό του μεγέθους των βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS

Παρατηρείται πως καθώς οι βλάβες γίνονται μεγαλύτερες στο μήκος τους η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28) τις χαρακτηρίζει με μεγαλύτερη ευκολία ως προς το μέγεθος τους, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο.

6.5.2 Καθορισμός μεγέθους βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV

Στην μέθοδο PCA στο μοντέλο MM-TF-IV χρησιμοποιήθηκαν 2 παράμετροι, δίνοντας τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σύνολο των 100 rotations. Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 48.

Damage Level Characterization: PCA-MM-TF-ARX-IV

Predicted Damage Level	1 cm crack	647 27.0%	168 7.0%	98 4.1%	70.9% 29.1%
	2 cm crack	100 4.2%	538 22.4%	116 4.8%	71.4% 28.6%
	3 cm crack	53 2.2%	94 3.9%	586 24.4%	79.9% 20.1%
		80.9% 19.1%	67.2% 32.8%	73.2% 26.7%	73.8% 26.2%
		1 cm crack	2 cm crack	3 cm crack	
		True Damage Level			

Εικόνα 48: To confusion Matrix για τον καθορισμό του μεγέθους των βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV

7. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι η διεξοδική και τεκμηριωμένη εξέταση της δυνατότητας αποτελεσματικής διάγνωσης τεχνητών βλαβών σε ένα πληθυσμό ονομαστικά όμοιων συνθέτων δοκών που διαφοροποιούνται ως προς το ονομαστικό πάχος τους, με χρήση μιας στατιστικής μεθόδου (Μέθοδος βάσει των Παραμέτρων του Μοντέλου) βασιζόμενης σε διανυσματικά στοχαστικά σήματα που προέκυψαν από προσομοίωση. Όπως φάνηκε στην Ενότητα 6, ο κύριος στόχος της εργασίας ως προς την ανίχνευση βλαβών πραγματοποιήθηκε επιτυχώς, αλλά και οι βλάβες καθορίστηκαν τόσο ως προς την θέση που βρίσκονται αλλά και ως προς το μέγεθος τους. Ο κύριος στόχος της εργασίας για την επιτυχή δυναμική αναγνώριση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένος καθώς και τα δυο παραμετρικά μοντέλα TF-ARX-OLS, TF-ARX-IV περνούν τα test εγκυρότητας, εμφανίζοντας το κάθε ένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αρχικά το μοντέλο TF-ARX-OLS(28,28) παρέχει ικανοποιητική πρόβλεψη ενός βήματος, αποτυγχάνοντας όμως να διατηρήσει την ευστάθειά του. Ο έλεγχος τόσο για την κανονικότητα όσο και για την λευκότητα των υπολοίπων δεν είναι ιδανική, χωρίς όμως να μπορεί να θεωρηθεί πως το παραμετρικό μοντέλο δεν μπορεί να επαληθευτεί. Συγκεκριμένα ο έλεγχος λευκότητας των υπολοίπων για μερικές συχνότητες αποκλίνει από το διάστημα 5% που έχει τεθεί ως όριο, ενώ ως προς την κανονικότητα των υπολοίπων υπάρχει και εκεί μια απόκλιση, η οποία φάνηκε να είναι αναπόφευκτη. Ακριβώς αυτό το πρόβλημα επιλύεται διαμέσου του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17) το οποίο δεν απαιτεί τον έλεγχο της κανονικότητας και της λευκότητας των υπολοίπων, καθώς βασίζεται στο γεγονός πως το σφάλμα πρόβλεψης $e[t]$ ενός καλού μοντέλου παραμένει ασυσχέτιστο με τα δεδομένα που έχουν προηγηθεί $Z_0^{k-1} = \{y_{1t-1}, y_{2t-1}, y_{1t-2}, y_{2t-2} \dots\}$. Ταυτόχρονα φέρει όλα τα πλεονεκτήματα του μοντέλου TF-ARX-OLS, καθώς αντιλαμβάνεται την δυναμική της κατασκευής και άρα και τις μεταβολές της με μεγάλη επιτυχία αλλά επιτυγχάνοντας και αρκετά καλή ικανότητα πρόβλεψης ενός βήματος, ταυτόχρονα με την εξασφάλιση της ευστάθειας. Μάλιστα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-IV αποτελεί το γεγονός της μείωσης της τάξης από 28 που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο TF-ARX-OLS σε 17 για το TF-ARX-IV χρησιμοποιώντας τον ίδιο αριθμό δεδομένων, μειώνοντας έτσι το υπολογιστικό κόστος τόσο στον τομέα της ανίχνευσης αλλά και στον τομέα του καθορισμού βλαβών. Εν κατακλείδι θεωρήθηκε ότι και τα δυο παραμετρικά μοντέλα δίνουν να περάσουν τον έλεγχο εγκυρότητας τους, εμφανίζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταξύ τους και χρησιμοποιήθηκαν για τον βασικό στόχο της παρούσας εργασίας που αποτελεί η διάγνωση των τριών βλαβών σε κάθε μια από τις δυο θέσεις που εφαρμόζονται.

7.1 Ανίχνευση Βλαβών

Η ανίχνευση των βλαβών χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πολλαπλών μοντέλων λαμβάνοντας υπόψη το ελάχιστο των αποστάσεων της εξίσωσης Kullback-Leibler, εξίσωση (19), (20), εμφάνισε απόλυτη επιτυχία και για τα δυο παραμετρικά μοντέλα MM-TF-ARX-OLS(28,28), MM-TF-ARX-IV(17,17).

Συγκεκριμένα οι **στόχοι** της εργασίας στο κομμάτι της ανίχνευσης βλαβών εμφανίστηκαν στην Ενότητα 3.

- Ανίχνευση των τεχνητών βλαβών που εφαρμόστηκαν στην κατασκευή βάση στοχαστικών μοντέλων Αυτοπαλινδρόμησης με Εξωγενή είσοδο (AutoRegressive with exogenous excitation-ARX), χρησιμοποιώντας την εκτιμήτρια Ordinary Least Squares (OLS) και την εκτιμήτρια (instrumental variables), σχηματίζοντας τα μοντέλα TF-ARX-OLS και TF-ARX-IV, εφαρμόζοντας σε αυτά την μέθοδο των πολλαπλών μοντέλων: Όπως φαίνεται στην Ενότητα 6.3.1, 6.3.2, το μοντέλο MM-TF-ARX-OLS(28,28) ανίχνευσε με απόλυτη επιτυχία τις βλάβες και στις δυο θέσεις, Εικόνα 38, Εικόνα 39, Πίνακας 16, όπως και το μοντέλο MM-TF-ARX-IV(17,17) στο σύνολο των 30 διαφορετικών εκπαιδεύσεων που πραγματοποιήθηκαν ανίχνευσε τέλεια τις βλάβες και στις δυο θέσεις, Εικόνα 41, Εικόνα 42, Πίνακας 16. Συμπερασματικά και τα δυο παραμετρικά μοντέλα μπορούν να περάσουν στα επόμενα στάδια της εργασίας που αποτελεί πλέον ο χαρακτηρισμός των βλαβών ως προς το μέγεθος και την θέση τους.

Πίνακας 16: Σύγκριση μεθόδων μεταξύ τους στην ανίχνευση της εκάστοτε θλάθης για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 5%

Model	D11 TPR / FPR (%)	D21 TPR / FPR (%)	D31 TPR / FPR (%)	D12 TPR / FPR (%)	D22 TPR / FPR (%)	D32 TPR / FPR (%)
MM-TF-ARX-OLS (28,28)	100	100	100	100	100	100
MM-TF-ARX-IV (17,17)	100	100	100	100	100	100

7.2 Καθορισμός Θέσης βλάβης

Καθώς και τα δυο παραμετρικά μοντέλα εμφάνισαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον πρώτο στόχο που αποτέλεσε η ανίχνευση των βλαβών σε κάθε μία από τις δυο θέσεις, εφαρμόζονται και στον επόμενο στόχο που είναι ο καθορισμός των βλαβών ως προς την θέση στην οποία βρίσκονται φέροντας και εδώ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα οι **στόχοι** της εργασίας στο κομμάτι του καθορισμού βλαβών ως προς την θέση που βρίσκονται εμφανίστηκαν στην Ενότητα 3.

- Καθορισμός των βλαβών ως προς την θέση που βρίσκονται εφαρμόζοντας την μέθοδο Principal Components Analysis (PCA) στα παραμετρικά μοντέλα τα οποία αφού περάσουν τον απαραίτητο έλεγχο εγκυρότητας τους εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο πρώτο στάδιο που αποτελεί η ανίχνευση των τεχνητών βλαβών: Αρχικά η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28) καθόρισε σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο τις βλάβες ως προς την θέση που βρίσκονται, καθορίζοντας ελαφρώς καλύτερα αυτές που βρίσκονται στην θέση 1, Εικόνα 3, έναντι αυτών στην θέση 2, Εικόνα 4, Εικόνα 5, όπως φαίνεται στον Εικόνα 44. Σε αντίθεση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17) η οποία καθόρισε υποδεέστερα τις βλάβες ως προς την θέση τους για την θέση 1, αλλά καλύτερα για την θέση 2, την οποία και χαρακτήρισε με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα, Εικόνα 45. Παρά ταύτα και τα δυο παραμετρικά μοντέλα μπορούν να περάσουν στον επόμενο στόχο της εργασίας που αποτελεί τον καθορισμό των βλαβών ως προς το μέγεθος τους. Δεδομένου του αριθμού των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο αυτό φαίνεται πως και οι δυο μέθοδοι παρέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα και ο στόχος μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.

7.3 Καθορισμός Μεγέθους βλάβης

Για τον καθορισμό του μεγέθους των βλαβών που αποτελεί και ο τελικός στόχος της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και τα δυο παραμετρικά μοντέλα TF-ARX-OLS, TF-ARX-IV εφαρμόζοντας τα στην μέθοδο PCA.

Συγκεκριμένα οι **στόχοι** της εργασίας στο κομμάτι του χαρακτηρισμού του μεγέθους των βλαβών εμφανίστηκαν στην Ενότητα 3.

- 1) Καθορισμός των βλαβών ως προς το μέγεθος τους εφαρμόζοντας την μέθοδο Principal Components Analysis (PCA) στα παραμετρικά μοντέλα τα οποία εμφάνισαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο δεύτερο στάδιο που αποτελεί ο καθορισμός των βλαβών ως προς την θέση τους : Αρχικά η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28) χαρακτήρισε τις βλάβες ως προς το μέγεθος τους με αποτελέσματα που αυξάνονται ως προς την αποτελεσματικότητα τους σε σχέση με την αύξηση του μήκους της βλάβης, κάτι που ήταν αναμενόμενο, καθώς μεγαλύτερα μεγέθη βλάβης εμφανίζουν μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στην δυναμική έναντι της αβεβαιότητας του πάχους του πληθυσμού, [Εικόνα 47](#). En αντίθεση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17), η οποία καθόρισε με πολύ καλά αποτελέσματα το μέγεθος της βλάβης 1 και ύστερα της βλάβης 3, ενώ υποδεέστερα το μέγεθος της βλάβης 2, [Εικόνα 48](#). Συγκεντρωτικά και οι 2 μέθοδοι καθόρισαν της βλάβες ως προς το μέγεθος τους ικανοποιητικά, εμφανίζοντας καλύτερα και χειρότερα αποτελέσματα ανάλογα το μέγεθος που εξετάζεται. Δεδομένου του μικρού πλήθους δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για το στάδιο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί πως τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν ικανοποιητικά και ο στόχος μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.

8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως **αντικείμενο μελέτης** την διάγνωση βλαβών σε ένα πληθυσμό όμοιων δοκών που μεταβάλλονται ως προς το πάχος τους διαμέσου παραμετρικών μοντέλων βάσει στοχαστικών σημάτων (απόκρισης)ταλάντωσης και της μεθόδου των πολλαπλών μοντέλων. Η διάγνωση των βλαβών εξετάστηκε σε τρία στάδια-στόχους , την ανίχνευση των βλαβών, τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση τους και τον καθορισμό των βλαβών ως προς το μέγεθος τους. Η δυσκολία του προβλήματος έγκειται στο γεγονός πως η μεταβολή του πάχους στις κατασκευές του πληθυσμού, οδηγεί στην μεταβολή της δυναμικής του πληθυσμού σε τέτοιο βαθμό που επικαλύπτει σε μεγάλο ποσοστό αυτής των βλαβών, [Εικόνα 19](#), [Εικόνα 20](#), [Εικόνα 21](#), [Εικόνα 22](#), [Εικόνα 23](#), [Εικόνα 24](#). Τα παραμετρικά μοντέλα TF-ARX-OLS και TF-ARX-IV διαμέσου της μεθόδου πολλαπλών μοντέλων MM για το πρώτο στόχο και της μεθόδου PCA για το δεύτερο και τον τρίτο στόχο φαίνεται να υπερνίκησαν τις δυσκολίες εμφανίζοντας απόλυτα ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανίχνευση των βλαβών και δυνατότητα καθορισμού των βλαβών ανάλογα την θέση τους ή το μέγεθος τους, δείχνοντας την δυνατότητα εφαρμογής τους.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- 1) Η ανίχνευση των βλαβών και με τις δυο μεθόδους MM-TF-ARX-OLS και MM-TF-ARX-IV στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία διαφοροποιώντας την δυναμική των βλαβών έναντι των υγιών κατασκευών.
- 2) Κατά τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση τους φάνηκε πως η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-OLS καθόρισε καλύτερα τις βλάβες της θέσης 1, ενώ η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-IV χαρακτήρισε καλύτερα τις βλάβες της θέσης 2. Συμπερασματικά όμως και οι δυο μέθοδοι παρέδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- 3) Κατά τον καθορισμό των βλαβών ως προς το μέγεθος τους φάνηκε πως η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-OLS χαρακτήρισε ελαφρώς καλύτερα τις βλάβες 3 και αρκετά καλύτερα τις βλάβες 3, ενώ η μέθοδος PCA-MM-TF-ARX-IV χαρακτήρισε καλύτερα το μέγεθος της μικρότερης βλάβης 1. Ωστόσο και οι δυο μέθοδοι κατάφεραν να δώσουν ένα καλό αποτέλεσμα στην διαδικασία αυτή.

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα:

- 1) Εφαρμογή των μοντέλων TF-ARX-OLS, TF-ARX-IV με στόχο τον χαρακτηρισμό μεγαλύτερων σε πλήθος θέσεων από δυο.
- 2) Καθορισμό των βλαβών τόσο όσο προς την θέση τους όσο και ως προς το μέγεθος τους ταυτοχρόνως.

Βιβλιογραφικές Αναφορές (Works Cited)

- Aravanis, TC., Sakellariou, J., Fassois, S. (2020). Random Vibration Damage Detection for a Composite Beam Under Varying Non-measurable Conditions: Assessment of Statistical Time Series Robust Methods. In: Wahab, M. (eds) Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore pp. 788-803. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8331-1_62
- Boller, C. (Christian), Chang, F.-Kuo., & Fujino, Y. (2009). Encyclopedia of structural health monitoring. John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 9780470058220. [10.1002/9780470061626](https://doi.org/10.1002/9780470061626)
- Mohammad Hassan Daneshvar, Alireza Gharighoran, Seyed Alireza Zareei & Abbas Karamodin (2021) Early damage detection under massive data via innovative hybrid methods: application to a large-scale cable-stayed bridge, Structure, and Infrastructure Engineering, vol 17(7), pp. 902-920 [10.1080/15732479.2020.1777572](https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777572)
- Fassois, S. D. (2001). Identification, Model-Based Methods. In Encyclopedia of Vibration Elsevier. pp. 673–685. <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0121>
- Fassois, S. D., & Sakellariou, J. S. (2007). Time-series methods for fault detection and identification in vibrating structures. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1851), pp. 411–448. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1929>
- Hios, J. D., & Fassois, S. D. (2009). Stochastic identification of temperature effects on the dynamics of a smart composite beam: Assessment of multi-model and global model approaches. Smart Materials and Structures, Vol 18(3). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/3/035011>
- Hios, J. D., & Fassois, S. D. (2014). A global statistical model based approach for vibration response-only damage detection under various temperatures: A proof-of-concept study. Mechanical Systems and Signal Processing, 49(1–2), pp. 77–94. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.02.005>
- Jyrki Kullaa (2014), "Structural Health Monitoring under Nonlinear Environmental or Operational Influences", *Shock and Vibration*, vol. 2014, Article ID 863494, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/863494>
- Kyriakos V-S, Spiliotis F, John S. An automated hypersphere-based healthy subspace method for robust and unsupervised damage detection via random vibration response signals. *Structural Health Monitoring*. 2022;21(2), pp. 465-484: [10.1177/14759217211004429](https://doi.org/10.1177/14759217211004429)
- Liang, Y., Li, D., Song, G., & Feng, Q. (2018). Frequency Co-integration-based damage detection for bridges under the influence of environmental temperature variation. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 125, pp. 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.034>
- Ljung_L_System_Identification_Theory_for_User-ed2. (1999). https://www.academia.edu/8432542/Ljung_L_System_Identification_Theory_For_User
- Petsounis, K. A., & Fassois, S. D. (2001). Parametric time-domain methods for the identification of vibrating structures-a critical comparison and assessment. Mechanical Systems and Signal Processing, 15(6), pp. 1031–1060. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1424>
- Siqueira, M. G., & Diniz, P. S. R. (2005). Digital Filters. The Electrical Engineering Handbook, pp. 839–860. <https://doi.org/10.1016/B978-012170960-0/50062-1>
- Smith, S. W. (2003). Chebyshev Filters. Digital Signal Processing, pp. 333–342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7444-7/50057-1>
- Sohn, H., & Farrar, C. R. (2001). Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. Smart Materials and Structures Vol 10(3) [10.1088/0964-1726/10/3/304](https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/304)
- Vamvoudakis-Stefanou, K. J., Fassois, S. D., & Sakellariou, J. S. (2018). Random vibration-based damage detection for a population of nominally identical structures via supervised PCA-enhanced parametric time series type methods. <http://www.smsa.upatras.gr>

- Vamvoudakis-Stefanou, K. J., Sakellariou, J. S., & Fassois, S. D. (2018). Vibration-based damage detection for a population of nominally identical structures: Unsupervised Multiple Model (MM) statistical time series type methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 111, pp. 149–171. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.054>
- Vamvoudakis-Stefanou K.J., Sakellariou J.S., Fassois S.D., "Vibration-based damage detection for a population of nominally identical structures via a supervised PCA-based Multiple Model method", *Proceedings of the Surveillance 8 International Conference*, Roanne, France, October 2015. <http://www.smsa.upatras.gr>
- Vamvoudakis-Stefanou, K., Sakellariou, J., & Fassois, S. (2016). On the use of unsupervised response-only vibration-based damage detection methods for a population of composite structures. <http://www.smsa.upatras.gr>
- Wei, S., Zhang, Z., Li, S., & Li, H. (2017). Strain features and condition assessment of orthotropic steel deck cable-supported bridges subjected to vehicle loads by using dense FBG strain sensors. *Smart Materials and Structures*, Vol 26(10). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7600>
- Worden, K., Baldacchino, T., Rowson, J., & Cross, E. J. (2016). Some Recent Developments in SHM Based on Nonstationary Time Series Analysis. *Proceedings of the IEEE*, Vol 104(8), pp. 1589–1603. [10.1109/JPROC.2016.2573596](https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2573596)
- Spectrogram using short-time Fourier transform - MATLAB spectrogram. (n.d.). Retrieved February 8, 2022, from <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>
- Papatheou, E., Barthorpe, R. J., & Worden, K. (2015). An experimental investigation of feature availability in nominally identical structures for population-based shm. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 7, pp. 185–191. [10.1007/978-3-319-15230-1_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15230-1_17)
- Transfer function estimate - MATLAB tfestimate*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/tfestimate.html>
- Welch, P. D. (1967). The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), pp. 70–73. [10.1109/TAU.1967.1161901](https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901)
- Saramantas I.E., Sakellariou J.S., Fassois S.D., "On random vibration based robust damage detection for a population of composite aerostructures under variable and non-measurable excitation", *Proceedings of the 2022 European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM2022)*. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 254 LNCE, pp. 277–286. <http://www.smsa.upatras.gr>
- C. E. Shannon. (1949) Communication theory of secrecy systems. [10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x)
- Saramantas I.E., Spiliotopoulos P.E., Fera F.T., Bourdalos D., Sakellariou J.S., Fassois S.D., Ofir Y., Kressel I., Tur M., Spandonidis C., "A vibration-based machine learning type Structural Health Monitoring methodology for populations of composite aerostructures under uncertainty", *Journal of Physics: Conference Series (ICEAF23)*, Vol. 2692(1), 012023, 2024. <http://www.smsa.upatras.gr>
- Spiliotopoulos P.E., Fera F.T., Papadopoulos P., Giannopoulos F., Spandonidis C., Tur M., Ofir Y., Kressel I., <http://www.smsa.upatras.gr>
- Saramantas I.E., Sakellariou J.S., Fassois S.D., "Development and experimental validation of a Machine Learning based SHM prototype system for composite aerostructures", *Journal of Physics: Conference Series (ICEAF23)*, Vol. 2692(1), 012025, 2024. <http://www.smsa.upatras.gr>
- Fera F.T., Saramantas I.E., Spiliotopoulos P.E., Ofir Y., Kressel I., Fassois S.D., Sakellariou J.S., Tur M., Spandonidis C., "Dynamic strain versus acceleration based robust Structural Health Monitoring for a population of composite aerostructures under uncertainty", *10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. Presented at the 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Patras, Greece, 2023, pp. 1053–1064. <http://www.smsa.upatras.gr>
- Fera F.T., Spiliotopoulos P.E., Saramantas I.E., Ofir Y., Kressel I., Fassois S.D., Sakellariou J.S., Tur M.,

Spandonidis C., "Dynamic strain versus acceleration based robust Structural Health Monitoring for a group of composite aerostructures: experimental assessment", 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials. Presented at the 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Patras, Greece, 2023, pp. 1076–1087. <http://www.smsa.upatras.gr>

Saramantas I.E., Konis P.E, Kriatsiotis I.M., Ofir Y., Kressel I., Spiliotopoulos P.E., Fera F.T., Sakellariou J.S., Fassois S.D., Giannopoulos F., Spandonidis C., Tur M., Tzioridis M., "An exploratory study on data-driven vibration based damage detection and characterization for a population of composite aerostructures", XII International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2023), Delft, Netherlands, 2023. <http://www.smsa.upatras.gr>

Spiliotopoulos P.E., Fera F.T., Saramantas I.E., Ofir Y., Kressel I., Tur M., Konis P.E., Kriatsiotis I.M., Sakellariou J.S., Fassois S.D., Giannopoulos F., Spandonidis C., Tzioridis M., "Random vibration response-based damage diagnosis for a population of composite aerostructures under varying operating conditions and uncertainty: Experimental assessment", XII International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2023), Delft, Netherlands, 2023. <http://www.smsa.upatras.gr>

Saramantas I.E., Kriatsiotis I.M., Konis P.E., Sakellariou J.S., Fassois S.D., "Random vibration response based damage detection for a population of nominally identical composite aerostructures via Hyper-Sphere healthy subspace methods", Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2022), pp. 3694-3705, Leuven, Belgium, 2022. <http://www.smsa.upatras.gr>

Saramantas I.E., Sakellariou J.S., Fassois S.D., "On random vibration based robust damage detection for a population of composite aerostructures under variable and non-measurable excitation", Proceedings of the 2022 European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM2022). Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 254 LNCE, pp. 277–286. <http://www.smsa.upatras.gr>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικού του μοντέλου της σύνθετης δοκού (Ansys® Academic Research Mechanical)	5
Πίνακας 2: Μέγεθος Τεχνητών βλαβών	7
Πίνακας 3: Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων ανά κατασκευή.	10
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά των χρόνων της προσομοίωσης.	11
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Φίλτρου Διέγερσης.	11
Πίνακας 6: Στοιχεία Προσομοιώσεων.	14
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά για την δημιουργία φασματογραφήματος	15
Πίνακας 8: Τιμές των κριτηρίων BIC, RSS/SSS και SPP των τάξεων προς εξέταση.	27
Πίνακας 9: Τιμές κριτηρίων Output Error (OE) και Condition Number των μοντέλων TF-ARX-IV των εξεταζόμενων μοντέλων.	31
Πίνακας 10: Τιμές κριτηρίων Output Error (OE) και Condition Number των μοντέλων TF-ARX-IV των εξεταζόμενων μοντέλων.	31
Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά στοιχεία για την ανίχνευση βλαβών.	34
Πίνακας 12: Ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα (AUC) της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28).	36
Πίνακας 13: Ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα (AUC) της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17)	38

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά στοιχεία για την καθορισμό θέσης βλάβης για μια τυχαία βλάβη σε μια από τις δύο θέσεις	39
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τον καθορισμό θέσης βλάβης διαμέσου του μοντέλου MM-TF-ARX-OLS(28,28)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τον καθορισμό θέσης βλάβης διαμέσου του μοντέλου PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά στοιχεία για τον καθορισμό μεγέθους βλαβών	41
Πίνακας 18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό της βλάβης 1 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό της βλάβης 2 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό της βλάβης 3 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS(28,28)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό μεγέθους της βλάβης 1 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό μεγέθους της βλάβης 2 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 23: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον καθορισμό μεγέθους της βλάβης 3 με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV(17,17)	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 24: Σύγκριση μεθόδων μεταξύ τους στην ανίχνευση της εκάστοτε βλάβης	Error! Bookmark not defined.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1: Η γεωμετρία της σύνθετης δοκού αναπαριστώμενη στο Ansys (Saramantas et al., 2022),	4
Εικόνα 2: Η αρχιτεκτονική της στρώσης [0/90/+45/-45] _s , (Saramantas et al., 2022)	5
Εικόνα 3: Θέση βλάβης Νο1, απόσταση στον άξονα Y από το ελεύθερο άκρο.	6
Εικόνα 4: Θέση βλάβης Νο2, απόσταση στον άξονα Y από το ελεύθερο άκρο.	7
Εικόνα 5: Θέση βλάβης Νο2, απόσταση στον άξονα Z από το ελεύθερο άκρο.	7
Εικόνα 6: Το μπλοκ του ACP στο Ansys, της μορφικής ανάλυσης και της δυναμικής ανάλυσης.	8
Εικόνα 7: Πεπερασμένο στοιχείο.	8
Εικόνα 8: Η διακριτοποιημένη δοκός στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Ansys.	10
Εικόνα 9: Θέσεις διέγερσης και σημείων απόκρισης (Saramantas et al., 2022)	11
Εικόνα 10: Διάγραμμα PSD της διέγερσης.	12
Εικόνα 11: Διάγραμμα σύγκρισης θεωρητικής FRF με αυτή που προκύπτει από την Transient.	13
Εικόνα 12: Σύγκριση θεωρητικής Transmittance με αυτήν που προκύπτει από την Transmittance Welch-based.	13
Εικόνα 13: Προ-επεξεργασμένα σήματα των επιταχυνσιόμετρων στις θέσεις Y1, Y2, Y3 της υγειούς κατασκευής για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.	15

Εικόνα 14: Φασματογράφημα των εξόδων στις θέσεις Y1,Y2,Y3 της υγειούς κατασκευής για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.	16
Εικόνα 15: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y1 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.	16
Εικόνα 16: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y2 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.	17
Εικόνα 17: Έλεγχος κανονικής κατανομής της απόκρισης από το σημείο απόκρισης Y3 για την δοκό που βρίσκεται σε ονομαστικό πάχος 3.1mm.	17
Εικόνα 18: Διάγραμμα Συνάφειας των αισθητηρίων μεταξύ τους για όλο τον υγιή πληθυσμό, με ποσοστό επικάλυψης 95% και παράθυρο μήκους 2048 δειγμάτων.....	18
Εικόνα 19: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D1 στην θέση 1 (εκτίμηση tfestimate.m).	18
Εικόνα 20: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D1 στην θέση 2, εκτίμηση (εκτίμηση tfestimate.m).....	19
Εικόνα 21: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D2 στην θέση 1 (εκτίμηση tfestimate.m).	19
Εικόνα 22: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D2 στην θέση 2 (εκτίμηση tfestimate.m).	20
Εικόνα 23: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D3 στην θέση 1 (εκτίμηση tfestimate.m).	20
Εικόνα 24: Σύγκριση της δυναμικής του υγειούς πληθυσμού των δοκών με αυτόν υπό βλάβη D3 στην θέση 2 (εκτίμηση tfestimate.m).	21
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου MM. Το σετ των μοντέλων $m_o = \{m_o, 1, \dots, m_o, n\}$ αναπαριστούν τον υγιή υποχώρο, ενώ το μοντέλο m_u την άγνωστη κατάσταση λειτουργίας (Aravanis et al., 2019).	25
Εικόνα 26: Διάγραμμα BIC και RSS/SSS για τάξεις από 20 έως 60 για την δοκό υπό ονομαστικό πάχος 3.1mm.	27
Εικόνα 27: Σύγκριση της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας των μοντέλων προς εξέταση με την μη παραμετρική μέθοδο Welch για την δοκό υπό ονομαστικό πάχος 3.1mm.	28
Εικόνα 28: Έλεγχος κανονικότητας των υπολοίπων του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).....	28
Εικόνα 29: Γράφημα ελέγχου λευκότητας υπολοίπων συναρτήσει της αυτοσυμμεταβλητότητας του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).....	29
Εικόνα 30: Έλεγχος ευστάθειας του μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28).....	30
Εικόνα 31: Ικανότητα πρόβλεψης ενός βήματος του μοντέλου TF-ARX-OLS(28,28) για ένα τυχαίο στιγμιότυπο.....	30
Εικόνα 32: Κριτήριο Output Error (OE) και Condition Number του πίνακα A για τάξεις από 10 έως 50 για σήμα που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.	31
Εικόνα 33: Σύγκριση των μοντέλων TF-ARX-IV προς εξέταση με την μη-παραμετρική μέθοδο Welch για το γράφημα απόκρισης συχνότητας του σήματος που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.	32
Εικόνα 34: Σύγκριση του παραμετρικού μοντέλου TF-ARX-IV (17,17) με την μη-παραμετρική εκτίμηση κατά Welch για το σήμα που προέρχεται από την κατασκευή στο ονομαστικό της πάχος 3.1mm.....	32
Εικόνα 35: Διάγραμμα πόλων μηδενιστών του μοντέλου TF-ARX-IV(17,17).....	33
Εικόνα 36: Πρόβλεψη ενός βήματος για την παραμετρική μέθοδο TF-ARX-IV(17,17) για ένα στιγμιότυπο ενός τυχαίου στιγμιότυπου.	33

Εικόνα 37: Αξιολόγηση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών μέσω απεικόνισης των αποστάσεων D (χρήση ελάχιστης απόστασης Kullback-Leibler)	34
Εικόνα 38: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 1 (διεύθυνση απόκρισης αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.	35
Εικόνα 39: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-OLS(28,28) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 2 (κάθετη διεύθυνση στην απόκριση αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.	35
Εικόνα 40: Αξιολόγηση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών μέσω απεικόνισης των αποστάσεων D (χρήση ελάχιστης απόστασης Kullback-Leibler) για τις τυχαίες εκπαιδεύσεις που μελετήθηκαν.	36
Εικόνα 41: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 1 (διεύθυνση απόκρισης αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.	37
Εικόνα 42: Επίδοση της μεθόδου MM-TF-ARX-IV(17,17) στην ανίχνευση των βλαβών στην θέση 2 (κάθετη διεύθυνση στην μέτρηση αισθητηρίων) μέσω καμπυλών ROC.	37
Εικόνα 43: Γεωμετρική αναπαράσταση του καθορισμού θέσης βλάβης.	38
Εικόνα 44: Το confusion Matrix για τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS	39
Εικόνα 45: Το confusion Matrix για τον καθορισμό των βλαβών ως προς την θέση με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV	40
Εικόνα 46: Γεωμετρική αναπαράσταση καθορισμού μεγέθους βλαβών	40
Εικόνα 47: Το confusion Matrix για τον καθορισμό του μεγέθους των βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-OLS	41
Εικόνα 48: Το confusion Matrix για τον καθορισμό του μεγέθους των βλαβών με την μέθοδο PCA-MM-TF-ARX-IV ..	42

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πρόσθετα Αποτελέσματα

Composite Beam Structure Data

Baseline “frozen”-configuration experiments	
Sampling Frequency	2500 Hz
Signal bandwidth	[5 – 1250] Hz
Signal Length	6000 samples
Number of inputs (excitation signals)	0
Number of outputs (response signals)	2
Number of experiments (data sets)	114
Filtering	Yes filtering in three phases: a) Insert zeros to upsample the signal by 1. b) Apply an FIR antialiasing filter to the upsampled signal. c) Discard samples to downsample the filtered signal by 12.
Pre-processing	Yes Detrending of the down-sampled signal (linear trend

	removal)
--	----------

