



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
**ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Κατασκευαστικός Τομέας

Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων

& Αυτοματισμού

**Επιλογή βέλτιστων θέσεων Αισθητηρίων και Ανίχνευσης  
Βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας εν λειτουργίᾳ βάσει  
ταλαντωτικών σημάτων και μη παραμετρικής μεθόδου  
Πολλαπλών Μοντέλων**

Σταμόπουλος Χρήστος

[Αριθμός Μητρώου 1057168]



Σπουδαστική Εργασία

υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών  
του Πανεπιστημίου Πατρών

Επιβλέπων: Σ.Δ. Φασόης, Καθηγητής

Πάτρα, Ιούνιος 2022

Πανεπιστήμιο Πατρών, [Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών  
Μηχανικών]

[Χρήστος Σταμόπουλος]

© [2022] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

Η παρούσα σπουδαστική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

**Σταμόπουλο Χρήστο**

[1057168]

την [21, Ιούνιος, 2022]

## **Περίληψη**

### **Επιλογή Βέλτιστων Θέσεων Αισθητηρίων και Ανίχνευση Βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας εν λειτουργίᾳ βάσει ταλαντωτικών σημάτων και μη παραμετρικής μεθόδου Πολλαπλών Μοντέλων**

#### **Σταμόπουλος Χρήστος**

Μεταβολές σε περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ελέγχου δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται έλεγχος της δομικής ακεραιότητας πτερυγίου ανεμογεννήτριας Vestas V27, μέσω στατιστικής μεθόδου χρονοσειρών υπό κανονική λειτουργία και πραγματικές μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα δεδομένα αφορούν αποκλειστικά αποκρίσεις στοχαστικής ταλάντωσης, που ελήφθησαν σε διάστημα τριών μηνών μέσω 12 επιταχυνσιομέτρων τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις στο πραγματικών διαστάσεων πτερύγιο, με την ταυτόχρονη καταγραφή περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών. Το πτερύγιο χαρακτηρίζεται από μία κατάσταση υγείας και τρείς υπό βλάβη. Οι τρείς καταστάσεις υπό βλάβη αφορούν μη διαδιδόμενες ρωγμές 15, 30 και 45 εκατοστών, οι οποίες προέκυψαν από την τεχνητή δημιουργία της μικρότερης εξ αυτών αφήνοντας την να εξελιχθεί σταδιακά μέχρι τα 45 εκατοστά. Πραγματοποιείται επιλογή βέλτιστων θέσεων και πλήθους αισθητηρίων για την εφαρμογή μη παραμετρικής μεθόδου Πολλαπλών Μοντέλων βάσει κριτηρίου Συνάρτησης Συνάφειας. Στις μετρήσεις εισάγεται σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας, λόγω των μεταβλητών περιβαλλοντικών συνθηκών, καθιστώντας το πρόβλημα ανίχνευσης ιδιαίτερα απαιτητικό. Ωστόσο, επιτυγχάνεται ανίχνευση για τις μεγαλύτερες βλάβες των 30 και 45 εκατοστών.

## **Λέξεις κλειδιά**

στατιστικές μέθοδοι χρονοσειρών, απλοποιημένο σύστημα SHM, ανίχνευση βλαβών, πτερύγιο ανεμογεννήτριας, μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, επιλογή βέλτιστων θέσεων και πλήθους αισθητηρίων

## *Abstract*

# **Optimum Selection of Sensors' location and Damage Detection on an Operating Wind Turbine via vibration signals and non-parametric Multiple Models Method**

**Stamopoulos Christos**

Slight changes of Environmental and Operating Conditions (EOCs) may significantly affect the performance of Structural Health of Monitoring of constructions. Present thesis attempts structural health of monitoring in a Vestas V27 wind turbine blade, via a robust non-parametric Stochastic Time Series method under real operating and environmental conditions. Random stochastic acceleration measurements are acquired from 12 accelerometers placed in separate positions on the blade over a three-month period. The system is studied under a healthy state and three damaged ones, each considering a non-evolving crack of 15, 30 and 45 cm length respectively. These damages were artificially induced by creating the smallest one and letting it evolve naturally. Optimal total amount and locations for the sensors is investigated via a Coherence Function criterion for the implementation of a non-parametric Multiple Model based method for damage detection. Varying EOCs insert a significant level of uncertainty to the data measurements hindering the detection problem. Nevertheless, cracks of 30 and 45 cm length are successfully detected with high true positive rates over low false alarms.

## *Keywords*

statistical time series method, simplified system SHM, damage detection, wind turbine blade, variable environmental and operating conditions, optimum selection of sensors' number and location

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Συμβάσεων .....	vii
Κατάλογος Συμβόλων.....	viii
Κατάλογος Συντομεύσεων .....	ix
Πρόλογος.....	x
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Το πρόβλημα .....	1
1.2 Τεχνική & επιστημονική σημασία του γενικού προβλήματος.....	1
2. Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας .....	3
3. Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης.....	5
3.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης (Tcherniak & Molgaard, 2017) .....	5
3.2 Περιγραφή των βλαβών .....	6
3.3 Μετρητική Διαδικασία .....	7
4. Αναλυτική Περιγραφή του Προβλήματος – Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας – Πρωτοτυπία.	9
5. Μεθοδολογία της Εργασίας .....	11
5.1. Φάση εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF .....	11
5.1.1. Φάση ελέγχου της μεθόδου U-MM-MISO-TF .....	12
5.2 Υποθέσεις και παραδοχές .....	12
5.3 Συσχέτιση με εναλλακτικές μεθοδολογίες.....	12
6. Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων.....	13
6.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου .....	14
6.2 Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων .....	17
6.3 Επιλογή αισθητηρίων.....	28
6.3.1. Συνάρτηση Συνάφειας SISO .....	28
6.3.2. Συνάρτηση Συνάφειας MISO.....	30
6.4 Επίδραση των βλαβών στην Δυναμική της Κατασκευής .....	35
7. Αποτελέσματα Ανίχνευσης Βλαβών & Συζήτηση.....	37
7.1 Πειραματικά Αποτελέσματα .....	37
7.2 Συζήτηση και κριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων .....	41
7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF με προγενέστερες εναλλακτικές στοχαστικές μεθόδου (Tsikouras, 2020).....	42
8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	45
Βιβλιογραφία.....	46
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πρόσθετα Αποτελέσματα .....	48

## Κατάλογος Συμβάσεων

Πίνακες - διανύσματα υποδεικνύονται με έντονους (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

$\gamma_{xy12}^2(f)$	Εμβαδόν συνάρτησης Multiple Coherence για το αισθητήριο εξόδου – 12° αισθητήριο
$df$	Συχνοτική Διακρισιμότητα
$Fs$	Συχνότητα δειγματοληψίας
$f$	Συχνότητα
$G_{xx12}(f)$	Πίνακας φάσματος ισχύος (psd) και διασταυρούμενου φάσματος ισχύος μεταξύ των ψευδο-εισόδων
$g_{xy12}(f)$	Διάνυσμα διασταυρούμενου φάσματος ισχύος της εξόδου – αισθητήριο 12 - με τις ψευδο-εισόδους
$g_{y12y12}(f)$	Φάσμα ισχύος του αισθητηρίου εξόδου 12
$H$	Ανάστροφο μιγαδικό συζυγές της συνάρτησης $G_{xy12}^H(f)$
$H_1(f), H_2(f), H_{v-1}(f)$	Συναρτήσεις Transmittance των σημάτων απόκρισης – ψευδο-εισόδων των αισθητηρίων στις θέσεις από 1 έως v-1
$K$	ο αριθμός των τιμών του μέτρου του μη παραμετρικού Transmittance
$M_0$	Αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων υγιούς δυναμικής της κατασκευής
$M_{0,i}$	i-οστό χαρακτηριστικό διάνυσμα παραμέτρων υγιούς υποχώρου πολλαπλών μοντέλων
$M_u$	Αναπαράσταση άγνωστης δυναμικής της κατασκευής
$N$	Μήκος Σήματος
$TFRF_{j,i}$	$j$ -οστή τιμή του μέτρου του μη παραμετρικού Transmittance της i μέτρησης
$x$	Διάνυσμα ψευδο-εισόδων
$Y_v(f)$	Μετασχηματισμός Fourier των σημάτων απόκρισης εξόδου του αισθητηρίου στην θέση v
$Y_1(f), Y_2(f), Y_{v-1}(f)$	Μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων απόκρισης – ψευδο-εισόδων των αισθητηρίων στις θέσεις από 1 έως v-1

## Κατάλογος Συντομεύσεων

AR	AutoRegressive
AUC	Area Under Curve
FPR	False Positive Rate
LPV-VAR	Linear Parameter Varying – Vector AutoRegressive
MM	Multiple Model
MAX-AUC-CF	MAXimum-Area Under Curve-Coherence Function
MAX-AUC-MCF	MAXimum-Area Under Curve-Multiple Coherence Function
MEAN-AUC-CF	MEAN-Area Under Curve-Coherence Function
MEAN-AUC-MCF	MEAN-Area Under Curve- Multiple Coherence Function
MISO	Multiple Input Single Output
MIN-AUC-CF	MINimum-Area Under Curve-Coherence Function
MIN-AUC-MCF	MINimum-Area Under Curve-Multiple Coherence Function
PCA	Principal Component Analysis
PSD	Power Spectral Density
ROC	Receiver Operating Characteristic curve
RSS	Residual Sum of Squares
SHM	Structural Health Monitoring
SISO	Single Input Single Output
TPR	True Positive Rate
U-AR	Unsupervised AutoRegressive parameter-based method
U-MM-AR	Unsupervised - Multiple Model - AutoRegressive
U-MM-MISO-TF	Unsupervised - Multiple Model – Multiple Input Single Output-Transmittance Function
U-MM-PSD	Unsupervised - Multiple Model - Power Spectral Density
U-PCA-AR	Unsupervised-Principal Component Analysis - Autoregressive

U-PCA-MM-AR

Unsupervised - Principal Component Analysis - Multiple Model -  
AutoRegressive

## Πρόλογος

Η παρούσα Σπουδαστική Εργασία εκπονήθηκε από το Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων και Αυτοματισμού του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή Σ.Δ. Φασόη και τον Επίκουρο Καθηγητή Ι.Σ. Σακελλαρίου, για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που προσέφεραν. Σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση της εργασίας συνέβαλαν οι υποψήφιοι διδάκτορες, Ιωάννης Σαραμαντάς, Παναγιώτης Σπηλιωτόπουλος και Φέρα Φατιόν τόσο σε επιστημονικό όσο και σε ψυχολογικό επίπεδο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη υποστήριξη που μου πρόσφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς επίσης και την Ειρήνη.

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Το πρόβλημα

Η παρούσα σπουδαστική εργασία στοχεύει στην ανίχνευση βλάβης σε μια εν λειτουργία ανεμογεννήτρια, μέσω απομακρυσμένου ελέγχου δομικής ακεραιότητας της κατασκευής, χρησιμοποιώντας διανυσματικά στοχαστικά ταλαντωτικά σήματα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με φυσική διέγερση λόγω περιστροφής της ανεμογεννήτριας στα 32RPM υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή να απορρίπτεται, για τον σκοπό της εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο, οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι μεταβλητές, ως αποτέλεσμα τα στοιχεία του θορύβου και της αβεβαιότητας να εμπεριέχονται στα διαθέσιμα σήματα. Οι βλάβες που εξετάζονται αντιστοιχούν σε ρωγμές στο κάτω άκρο (trailedge) του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας Vestas V27, με τα εκάστοτε μήκη να ανέρχονται στα 15cm, 30cm και 45 cm. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται μελέτη για την επιλογή των 12 επιταχυνσιομέτρων που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπόνηση της εργασίας. Η ανίχνευση βλαβών μέσω ταλαντωτικών σημάτων βασίζεται στην ανίχνευση μεταβολών στα δυναμικά χαρακτηριστικά. Έτσι, το πρόβλημα έγκειται στην δυσκολία εύρεσης των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, με αποτέλεσμα δυσκολίας σωστής και αποτελεσματικής ανίχνευσης βλάβης.

Οι εργασίες που πραγματοποίησαν ανίχνευση βλαβών στο ίδιο πείραμα με την παρούσα, είναι αυτές των ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), ([Panagiotopoulos, Dmitri, & Spiliros, 2022](#)) και ([Tsikouras, 2020](#)) με τα αποτελέσματα να κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά στην ανίχνευση βλάβης, δίνοντας, παράλληλα, χώρο για περαιτέρω βελτίωση. Η παρούσα εργασία, στοχεύει στην βελτίωση των αποτελεσμάτων ανίχνευσης των τριών σεναρίων βλάβης, μέσω απαλοιφής της επίδρασης της διέγερσης λόγω περιστροφής της ανεμογεννήτριας στα 32 RPM.

### 1.2 Τεχνική & επιστημονική σημασία του γενικού προβλήματος

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αποτελεί σημαντική απειλή της σύγχρονης εποχής, με τις βιομηχανίες να στρέφονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι η αιολική και η ηλιακή. Η αιολική βιομηχανία αποτελεί βασικό μέρος του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος και για να καταστεί βιώσιμη χρειάζεται να είναι όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική στην δυναμική αναγνώριση των πτερυγίων ανεμογεννήτριας. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί ο εύκολος, γρήγορος και επιτόπου έλεγχος της κατασκευής λόγω του μεγάλου κόστους των επιθεωρήσεων και των αστοχιών στα πτερύγια ανεμογεννήτριας. Η επιθυμία για μέγιστη απόδοση απαιτεί πολλές φορές την κατασκευή της ανεμογεννήτριας σε απομακρυσμένες περιοχές. Ο απομακρυσμένος έλεγχος είναι ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα Structural Health Monitoring (SHM). Παράλληλα, η διάγνωση σε πραγματικό χρόνο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των συστημάτων SHM, με την ταυτόχρονη λειτουργία της κατασκευής, συμβάλλοντας στην πραγματοποίηση επιδιορθώσεων εφόσον κρίνεται αναγκαίο. Απόρροια της εφαρμογής των συστημάτων SHM αποτελεί η περαιτέρω βελτίωση και ανάπτυξη των μηχανολογικών κατασκευών με στόχο βελτιστοποίηση συντηρήσεων, μικρότερη ανάγκη για μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, μείωση βάρους και συνολικού κόστους κατασκευών.



## 2. Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Τις τελευταίες 2 δεκαετίες ποικίλουν οι εργασίες που εστιάζουν στην δυναμική αναγνώριση και παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας ανεμογεννητριών μέσω μεθόδων SHM. Οι μέθοδοι SHM βασίζονται στη ανάλυση ταλαντωτικών σημάτων, με σκοπό διάγνωσης και πρόβλεψης μίας βλάβης. Η διάγνωση μίας βλάβης περιλαμβάνει τόσο την ανίχνευσή της όσο και τον προσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους της, ενώ η πρόβλεψη περιλαμβάνει τη δημιουργία πληροφοριών σχετικά με τις συνέπειες της διάγνωσης. Μέσω της ανάλυσης των ταλαντωτικών σημάτων εξάγονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Η παρατήρηση αλλαγών στα δυναμικά χαρακτηριστικά υποδεικνύει μία κατάσταση υπό βλάβη. Οι περισσότερες προσπάθειες ανίχνευσης βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας μέσω μεθόδων SHM, υλοποιούνται σε περιβάλλον προσομοίωσης (Garcia, Tcherniak, & Branner, 2018) ή σε εργαστηριακές συνθήκες μέσω αριθμητικών μοντέλων ή πειραμάτων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες με, κυρίως, στάσιμο πτερύγιο ανεμογεννήτριας, όπως των (Doliński, Krawczuk, & Żak, 2018), (Ou, Chatzi, Dertimanis, & Spiridonakos, 2016) και (Ulriksen, Tcherniak, Kirkegaard, & Damkilde, 2016), ενώ λίγες είναι αυτές που πραγματοποιούνται σε κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες (Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015).

Επιτυχείς μέθοδοι σε μη ρεαλιστικές συνθήκες, τίθενται υπό αμφισβήτηση όταν πρόκειται για εφαρμογή τους υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015) αφού, περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την δυναμική της κατασκευής. Οι (Avendaño-Valencia & Fassois, 2014) παρουσίασαν μέσω στάσιμων και μη στάσιμων μεθόδων πως οι κύριοι τύποι δυναμικής συμπεριφοράς μίας πραγματικής εν λειτουργία ανεμογεννήτριας επηρεάζεται κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών του ανέμου, των αξόνων χαμηλής και υψηλής ταχύτητας του συστήματος μετάδοσης και της έντονης κυκλο-στάσιμης δυναμικής που σχετίζεται με την περιστροφή της λεπίδας. Στο ίδιο πείραμα, με την παρούσα σπουδαστική εργασία, οι (Roberts, Cava, & Avendaño-Valencia, 2021) έδειξαν την επίδραση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών για ανίχνευση βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27, μέσω μεθόδων μηχανικής μάθησης. Επιπλέον, με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου επιτυγχάνεται βελτίωση των αποτελεσμάτων παρά το καμουφλάρισμα των τριών σεναρίων βλάβης από τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες (Movsessian, Cava, & Tcherniak, 2021).

Για την σημαντικότητα της τοποθέτησης των αισθητηρίων και του ενεργοποιητή κάνουν λόγο οι (García & Tcherniak, 2019) στην προσπάθεια ανίχνευσης βλάβης σε ανεμογεννήτρια Vestas V27. Η χρήση ενεργοποιητή δημιουργεί εντονότερα δυναμικά χαρακτηριστικά με την ανίχνευση βλάβης να επιτυγχάνεται με ευκολότερο τρόπο, τουλάχιστον μέσω απλών στοχαστικών μοντέλων αυτοπαλινδρόμησης AR (Tsikouras, 2020), ενώ όσον αφορά πολύπλοκα μοντέλα LPV-VAR χωρίς χρήση ενεργοποιητή οι (Avendaño-Valencia, Chatzi, & Fassois, 2017) πραγματοποιούν ικανοποιητική μοντελοποίηση της μη στάσιμης δυναμικής ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας ενώρα λειτουργίας. Οι εργασίες που χρησιμοποιούν την ίδια πειραματική διάταξη και τα ίδια δεδομένα με την παρούσα σπουδαστική εργασία και την μη χρήση ενεργοποιητή είναι αυτές των (Tcherniak & Mølgaard, 2017), (Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015) και (Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018).

Η παρούσα κατάσταση στις διεθνείς προσπάθειες υλοποίησης συστήματος SHM, στο ίδιο πρόβλημα, χωρίς την χρήση διεγέρτη είναι λιγοστές, με τις εργασίες των (Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018) και (Tsikouras, 2020) να σηματοδοτούν την έναρξη για την ανάπτυξη απλοποιημένων συστημάτων SHM. Και στις τρείς εργασίες, ο έλεγχος επιτυγχάνεται υπό

πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες λειτουργίας σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας με την 2<sup>η</sup> να διαφοροποιείται στη χρήση ενός μόνο αισθητηρίου πραγματοποιώντας απλές στοχαστικές μεθόδους. Η παρούσα σπουδαστική, πραγματοποιεί με τρία και τέσσερα αισθητήρια ανίχνευση βλάβης, ενώ η 1<sup>η</sup> εργασία επιτυγχάνει χρήση μεγάλου πλήθους αισθητηρίων για αποδοτική ανίχνευση. Στην εργασία ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), επετεύχθη έλεγχος πτερυγίου της ανεμογεννήτριας με χρήση ενός αισθητηρίου λαμβάνοντας υπόψιν την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή, με τα αποτελέσματα να επιβεβαιώνονται στην ([Panagiotopoulos, Dmitri, & Spilios, 2022](#)) με την εύρεση ελάχιστου δυνατού αριθμού αισθητηρίων για την αποτελεσματική ανίχνευση. Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η επιτυχής ανίχνευση βλαβών με χρήση κατάλληλων αισθητηρίων με την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή να μην λαμβάνεται υπόψη. Η κύρια διαφορά του σκοπού από προγενέστερες εργασίες έγκειται στην απαλοιφή της επίδρασης της διέγερσης λόγω περιστροφής της ανεμογεννήτριας στα 32 RPM.

### 3. Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Στην εργασία ([Tsikouras, 2020](#)) επιτυγχάνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης ίδιας με την παρούσα εργασία. Έτσι, για λόγους πληρότητας της σπουδαστικής εργασίας ακολουθεί ενδεικτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης, των βλαβών και της μετρητικής διαδικασίας, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες προτείνεται η εργασία του ([Tsikouras, 2020](#)).

#### 3.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης ([Tcherniak & Molgaard, 2017](#))

Στην παρούσα σπουδαστική εργασία, μελετάται πτερύγιο ανεμογεννήτριας μοντέλου Vestas V27. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει, το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας, έναν ηλεκτρομηχανικό ενεργοποιητή<sup>1</sup>, τα επιταχυνσιόμετρα και το καταγραφικό σύστημα των δεδομένων. Στις παρακάτω εικόνες ([Εικόνα 1](#), [Εικόνα 2](#), [Εικόνα 3](#)) παρουσιάζεται η τοποθέτηση των αισθητηρίων, του ενεργοποιητή και του συστήματος καταγραφής, αντίστοιχα.



*Εικόνα 1. Τοποθεσία επιταχυνσιομέτρων ([Tcherniak & Molgaard, 2017](#)). Εικόνα 2. Τοποθεσία ενεργοποιητή ([Tcherniak & Molgaard, 2017](#)).*

<sup>1</sup> Ο οποίος δεν χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας σπουδαστικής εργασίας



**Εικόνα 3.** Σύστημα καταγραφής με σύστημα LAN-XI ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)).

Η περάτωση του πειράματος έλαβε χώρα υπό κανονικές λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και για μεγάλο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα εισαγωγής αβεβαιοτήτων στα διαθέσιμα σήματα. Στον παρακάτω [Πίνακα 1](#), παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες που επηρεάζουν περισσότερο την κατασκευή και για τις τέσσερις καταστάσεις.

**Πίνακας 1.** Εύρη τιμών των αβεβαιοτήτων θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου για τις τέσσερις καταστάσεις ([Tsikouras, 2020](#)).

Κατάσταση πτερυγίου	Υγιής	Ρωγμή 15 cm	Ρωγμή 30 cm	Ρωγμή 45 cm
Θερμοκρασία (°C)	1.4-3.5	3.1-3.7	4.1-4.5	4.7-6
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	2.9-4.7	4.9-5.8	5.2-6.3	5.2-6.3

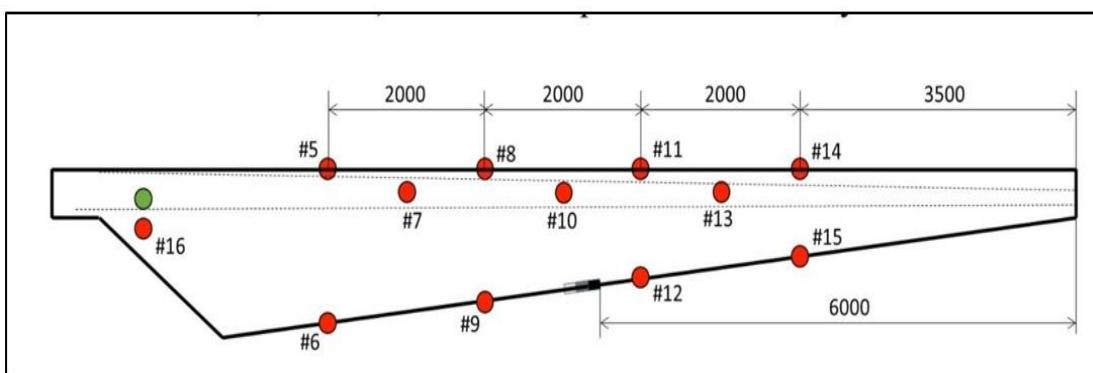
### 3.2 Περιγραφή των βλαβών

Οι καταστάσεις που περιγράφουν το πτερύγιο είναι μία υγείας και τρείς υπό βλάβη. Οι τρείς βλάβες είναι ρωγμές μεγέθους 15, 30 και 45 εκατοστών και προέκυψαν από την σταδιακή εξέλιξη της τεχνητής ρωγμή των 15 εκατοστών, στο κάτω άκρο του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας (trailing edge), στις 9 Δεκεμβρίου 2014. Στις 15 Δεκεμβρίου και στις 6 Ιανουαρίου 2015 το μήκος της βλάβης επεκτάθηκε στα 30 και 45 εκατοστά, αντίστοιχα. Οι προαναφερθείσες πληροφορίες παρουσιάζονται στον [Πίνακα 2](#), με τον αντίστοιχο αριθμό σημάτων που θα χρησιμοποιηθεί για τις εκάστοτε καταστάσεις.

**Πίνακας 2.** Περιγραφή των χαρακτηριστικών των βλαβών στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας και των διαθέσιμων σημάτων για την κάθε βλάβη ([Tsikouras, 2020](#)).

Χαρακτηρισμός	Βλάβη 1	Βλάβη 2	Βλάβη 3
Είδος βλάβης	Ρωγμή	Ρωγμή	Ρωγμή
Μέγεθος	15 cm	30 cm	45 cm
Περιοχή	Trailing edge	Trailing edge	Trailing edge
Σήματα	50	50	50

Στην παρακάτω [Εικόνα 4](#), παρουσιάζεται η ακριβής θέση των επιταχυνσιομέτρων (κόκκινο χρώμα), του ενεργοποιητή (πράσινο χρώμα) και των εκάστοτε βλαβών 15, 30 και 45 εκατοστά με τα αντίστοιχα χρώματα λευκό, γκρι και μαύρο.



**Εικόνα 4.** Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)).

### 3.3 Μετρητική Διαδικασία

Στην εργασία ([Tsikouras, 2020](#)) περιγράφεται λεπτομερώς η διεξαγωγή του πειράματος. Ωστόσο, για την πληρότητα της εργασία παρατίθεται στον [Πίνακα 3](#), ο συνολικός αριθμός και τα χαρακτηριστικά των σημάτων για την κατάσταση υγείας και για τις υπό βλάβη καταστάσεις, των τριών καταστάσεων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

**Πίνακας 3.** Συνολικός αριθμός σημάτων από την διεξαγωγή του πειράματος για τις τρείς ταχύτητες περιστροφής, και τις τέσσερις καταστάσεις υγείας, καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά τους ([Tsikouras, 2020](#)).

Κατάσταση πτερυγίου	Υγιής	Ρωγμή 15 cm	Ρωγμή 30 cm	Ρωγμή 45 cm
0 RPM	420	1 432	3 082	3 322
32 RPM	1 344	79	131	144
43 RPM	1 301	258	194	256

Είδος σημάτων: Στοχαστικό

Συχνότητα δειγματοληψίας: 16 384 Hz

Αριθμός δειγμάτων ανά μέτρηση: 491 520

Χρόνος δειγματοληψίας: 30 s



## 4. Αναλυτική Περιγραφή του Προβλήματος – Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας – Πρωτοτυπία

Στην συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιώντας ταλαντωτικά σήματα, μελετάται ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 κανονικών διαστάσεων υπό κανονικές και περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Δημιουργήθηκε τεχνητή ρωγμή 15 εκατοστά αφήνοντας να εξελιχθεί σε 30 και 45 εκατοστά, οι οποίες βρίσκονται στο κάτω άκρο (trailedge) του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο της τρείς καταστάσεις υπό βλάβη. Η κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή τίθεται εκτός και η διέγερση προέρχεται από την περιστροφή του πτερυγίου στα 32 RPM. Οι μετρήσεις λήφθηκαν και παραχωρήθηκαν από τον Dr Tcherniak Dmitri, στο Πολυτεχνείο της Κοπεγχάγης (DTU) μέσα σε ένα διάστημα τεσσάρων περίπου μηνών, από τον Νοέμβριο του 2014 έως τον Μάρτιο του 2015. Το γεγονός πως, τα πειράματα έλαβαν χώρα εκτός εργαστηριακού περιβάλλοντος καθιστά το πρόβλημα ιδιαίτερα δύσκολο, καθώς, με αυτόν τον τρόπο, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα δυναμικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου, εισάγοντας έτσι περαιτέρω παράγοντες αιβεβαιότητας. Τέλος, η ανίχνευση βλαβών επιχειρείται στο εν κινήσει πτερύγιο ανεμογεννήτριας υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, καθιστώντας το πρόβλημα πιο σύνθετο αλλά ρεαλιστικό.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιόπιστη ανίχνευσης βλαβών στο εν κινήσει πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, μέσω μεθόδου Πολλαπλών Μοντέλων και χρήση της Συνάρτησης Μετάδοσης Πολλαπλών Ψευδο-Εισόδων και Μίας Εξόδου (Multiple pseudo-Input Single Output Transmittance Function based Multiple Models, MM-MISO-TF models). Για αξιόπιστο έλεγχο αποτελεσματικότητας των μεθόδων κατασκευάζονται καμπύλες ROC και scatter diagram.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι ο εξής:

1. Η αποτελεσματική ανίχνευση βλαβών με χρήση κατάλληλων αισθητηρίων σε εν λειτουργία πτερύγιο ανεμογεννήτριας υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες μέσω στοχαστικών σημάτων ταλάντωσης.

Οι περισσότερες εργασίες που αναφέρθηκαν στην [Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας](#) κάνουν χρήση ενεργοποιητή, ένα βασικό στοιχείο διέγερσης κατασκευών που καθιστά ευκολότερη την ανίχνευση, ενώ, τα περισσότερα πειράματα πραγματοποιούνται είτε σε περιβάλλον προσομοίωσης ή σε εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μόνες προσπάθειες για την ανίχνευση βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας χωρίς χρήση ενεργοποιητή αναφέρονται στις εργασίες ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)) και ([Tsikouras, 2020](#)).

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

- a. Ανίχνευση βλαβών υπό πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες.
- b. Παράλειψη της διέγερσης του ενεργοποιητή.
- c. Διερεύνηση κατάλληλης επιλογής αισθητηρίων, για την απαλοιφή της επίδρασης της διέγερσης των 32RPM στα διαθέσιμα σήματα απόκρισης.
- d. Διερεύνηση βέλτιστων αισθητηρίων για χρήση απλοποιημένου συστήματος SHM.
- e. Διερεύνηση της βελτίωσης των μεθόδων Πολλαπλών Μοντέλων με χρήση του MISO-TF.



## 5. Μεθοδολογία της Εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία Unsupervised Multiple Model MISO Transmittance Function (U-MM-MISO-TF) ([Mantas, 2020](#)) με σκοπό την ανίχνευση βλαβών. Κατά την μέθοδο χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σήματα απόκρισης (response only) στοχαστικής ταλάντωσης μετρούμενα από ένα πλήθος αισθητηρίων. Χαρακτηριστικό των μεθόδων μη επιβλεπόμενης μάθησης (Unsupervised), είναι πως στην Φάση Εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται σήματα που προέρχονται αποκλειστικά από την υγιή κατάσταση της κατασκευής ([Farrar & Worden, 2007](#)). Τέλος, η μέθοδος βασίζεται στη μη παραμετρική εκτίμηση των Συναρτήσεων Μετάδοσης.

Οι συναρτήσεις MISO-TF, προκύπτουν μεταξύ σημάτων απόκρισης της μεταφορικής επιτάχυνσης που καταγράφονται στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας μοντέλου Vestas V27. Χαρακτηριστικό των συναρτήσεων MISO-TF είναι πως παραμένουν ανεπηρέαστες από την διέγερση ([Saramantas I.E., 2022](#)). Με αυτόν τον τρόπο, η κεντρική ιδέα της μεθοδολογίας MISO-TF είναι πως δύναται να εκτιμηθούν όταν υπάρχει αβεβαιότητα της διέγερσης, με την χρήση μόνο σημάτων απόκρισης (Output-Only Case).

Οι συναρτήσεις MISO-TF που εξετάζονται στην ([Mantas, 2020](#)), εξίσωση (1), προκύπτουν μέσω σημάτων απόκρισης από ν αισθητήρια, όπου ένα εξ αυτών λογίζεται ως έξοδος και τα υπόλοιπα ως ψευδο-είσοδοι.

$$Y_v = H_1(f)Y_1(f) + H_2(f)Y_2(f) + \cdots H_{v-1}(f)Y_{v-1}(f) \quad (1)$$

Όπου:

$f$	Συχνότητα
$Y_1(f), Y_2(f), Y_{v-1}(f)$	Μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων απόκρισης ψευδο-εισόδων των αισθητηρίων στις θέσεις από 1 έως v-1.
$Y_v$	Μετασχηματισμός Fourier των σημάτων απόκρισης εξόδου του αισθητηρίου στην θέση v.
$H_1(f), H_2(f), H_{v-1}(f)$	Συναρτήσεις Transmittance των σημάτων απόκρισης ψευδο-εισόδων των αισθητηρίων στις θέσεις από 1 έως v-1.

### 5.1. Φάση εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF

Κατά την Φάση Εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF, λαμβάνονται  $p$  σήματα στοχαστικής ταλάντωσης από κάθε αισθητήριο πάνω στο σώμα της κατασκευής. Βάσει αυτών κατασκευάζονται  $p$  μοντέλα MISO-TF, έστω  $M_{o,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ). Το σύνολο των  $M_{o,i}$  αποτελεί τον Υγιή Υποχώρο της μεθόδου. Έτσι, τα χαρακτηριστικά διανύσματα του Υγιούς Υποχώρου  $M_{o,i}$  υπολογίζονται ως το μέτρο του MISO-TF, για το επιλεγμένο εύρος συχνοτήτων, ως εξής:

$$\mathbf{M}_{o,i} = [TFRF(f)_{1,i}, TFRF(f)_{2,i}, \dots, TFRF(f)_{k,i}]^T, \text{ για } i=1, 2, \dots, p \quad (2)$$

με  $TFRF(f)_{j,i}$  να είναι η  $j$ -οστή τιμή του μέτρου του μη παραμετρικού Transmittance της  $i$  μέτρησης, ενώ με  $k$  συμβολίζεται ο αριθμός των τιμών του μέτρου του μη παραμετρικού Transmittance.

### 5.1.1. Φάση ελέγχου της μεθόδου U-MM-MISO-TF

Στην Φάση Ελέγχου, λαμβάνονται νέα άγνωστα σήματα από κάθε αισθητήριο, εκτιμώνται τα νέα μοντέλα MISO-TF και δημιουργείται, με αντίστοιχο τρόπο, η αναπαράσταση της δυναμικής της κατασκευής,  $M_u$ . Στην συνέχεια, υπολογίζεται μέσω κατάλληλου ψευδο-στατιστικού τεστ ο παρακάτω έλεγχος υποθέσεων:

$$\begin{aligned} D(M_u, M_{0,i}) \leq l_{lim} &\Rightarrow \text{Υγιής Λειτουργία} \\ \text{διαφορετικά} &\Rightarrow \text{Λειτουργία υπό βλάβη} \end{aligned} \quad (3)$$

Υπολογίζοντας την ελάχιστη απόσταση της αναπαράστασης  $M_u$  από τον υγιή υποχώρο  $M_0$  ξεχωριστά, πραγματοποιείται το προαναφερθέν ψευδο-στατιστικό τεστ ως εξής:

$$D(M_u, M_{0,i}) = \min_i \{i \in 1, 2, \dots, p \mid d(M_{0,i}, M_u)\} \quad (4)$$

Όπου  $d(M_u, M_{0,i})$  είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο MISO-TF, η οποία υπολογίζεται μέσω της απόστασης, ως εξής:

$$d(M_u, M_{0,i}) = \sqrt{\sum (M_u - M_{0,i})^2} \quad (5)$$

### 5.2 Υποθέσεις και παραδοχές

Η διαδικασία λήψης των διαθέσιμων σημάτων γίνεται υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Οστόσο για τα εκάστοτε σήματα ισχύουν οι εξής παραδοχές:

1. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές κατά την κάθε μέτρηση.
2. Οι λειτουργικές συνθήκες παραμένουν σταθερές κατά την κάθε μέτρηση.
3. Στα πειράματα υπό βλάβη καταστάσεων δεν συνυπάρχουν πολλαπλές βλάβες.

### 5.3 Συσχέτιση με εναλλακτικές μεθοδολογίες

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται, σύμφωνα με την αναφερθείσα **Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας**, εναλλακτικές μεθοδολογίες ανίχνευσης βλαβών που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 υπό κανονικές λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες με την πειραματική διάταξη και τα ληφθέντα πειραματικά δεδομένα να παραμένουν ίδια με την παρούσα εργασία. Παρακάτω παρουσιάζονται 5 εργασίες, οι οποίες πραγματοποιούν απομακρυσμένο έλεγχο με χρήση στοχαστικών σημάτων ταλάντωσης.

Στην εργασία ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)), παραλείποντας την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή, εφαρμόστηκε μεθοδολογία που χρησιμοποιεί την PCA για μείωση της αβεβαιότητας. Αποτέλεσμα αυτού, μέσω χρήσης 11 επιταχυνσιομέτρων επιτυγχάνεται αποδοτική ανίχνευση για τις 2 μεγαλύτερες βλάβες (30 και 45 εκατοστών) για τα 32 RPM. Οι εργασίες ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)) και ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)) επικεντρώθηκαν μόνο στο τμήμα απόκρισης του ενεργοποιητή με την ανίχνευση βλάβης να είναι αποδοτική και για τις τρεις ρωγμές 15, 30 και 45 εκατοστών με την διαφορά πως τα αποτελέσματα της ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)) αφορούν ταχύτητα περιστροφής στα 43 RPM. Οι ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)) πραγματοποίησαν ανεπιτυχής ανίχνευση για την μικρότερη βλάβη, 15 εκατοστών, με χρήση τριών αισθητηρίων. Τα

αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται στην ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), όπου υποδεικνύεται πως συγκεκριμένες θέσεις παρέχουν περισσότερη πληροφορία από άλλες και πως όσο μειώνεται ο αριθμός των αισθητηρίων τόσο υποβαθμίζεται η ανίχνευση.

Στην εργασία ([Tsikouras, 2020](#)), μέσω ενός αισθητηρίου και των μεθόδων MM και PCA, επετεύχθη η ανίχνευση τριών βλαβών με και χωρίς την χρήση ενεργοποιητή, με τα εκάστοτε αποτελέσματα ανίχνευσης να ήταν εξαιρετικά κοντά. Αντίστοιχα, με ένα επιταχυνσιόμετρο και εκμετάλλευση της κρουστικής απόκρισης, στην εργασία ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)) πραγματοποιήθηκε μέσω μοντέλου AR επιτυχής ανίχνευση βλάβης και για τα 3 σενάρια βλάβης, με δύο μεθόδους κοινές με την ([Tsikouras, 2020](#)), με τα αποτελέσματα να επιβεβαιώνονται στην ([Panagiotopoulos, Dmitri, & Spilos, 2022](#)) με την εύρεση ελάχιστου δυνατού αριθμού αισθητηρίων για την αποτελεσματική ανίχνευση και τις ίδιες μεθοδολογίες.

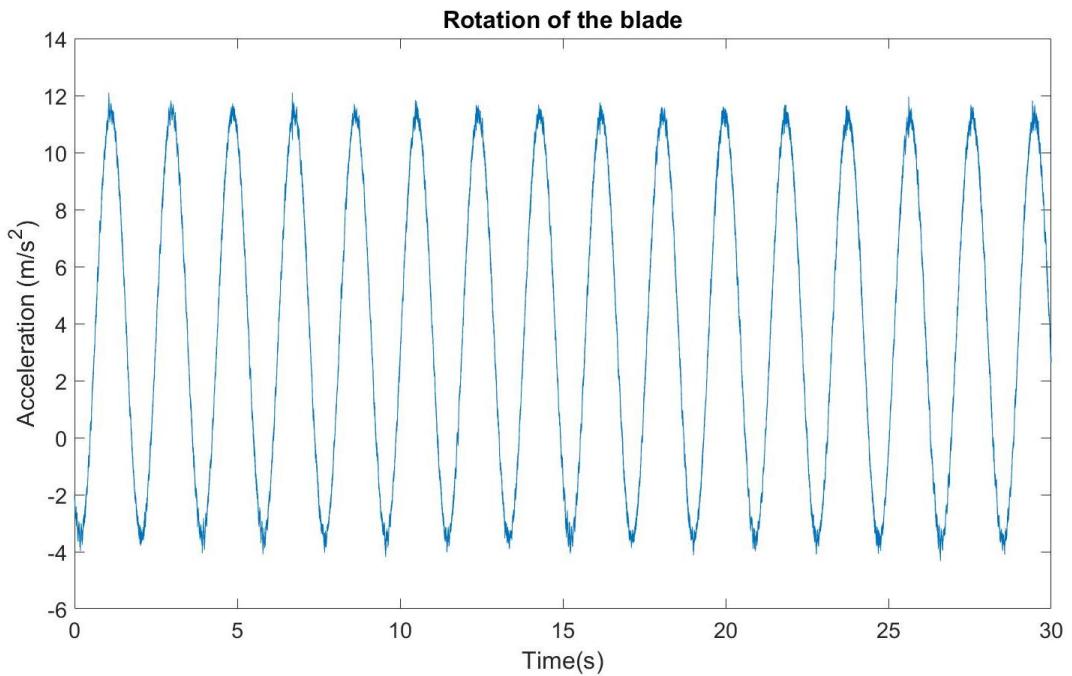
## 6. Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προ-επεξεργασία και η προκαταρκτική ανάλυση των σημάτων καθώς και η επιλογή κατάλληλων αισθητηρίων για την εφαρμογή της μεθόδου. Η προ-επεξεργασία των διαθέσιμων σημάτων απαρτίζεται από τα εξής βήματα:

1. Επιλογή τμήματος, απορρίπτοντας την κρουστική του ενεργοποιητή.
2. Φίλτραρισμα στις ψευδο-εισόδους και στην έξοδο της Συνάρτησης Μετάδοσης (Σ.Μ.).
3. Επαναδειγματοληψία.
4. Αφαίρεση με την μέση τιμή και κανονικοποίηση.

Εν συνεχείᾳ πραγματοποιείται διερεύνηση για την επιλογή κατάλληλων αισθητηρίων μέσω της Συνάρτησης Συνάφειας (Coherence Function, CF).

Η ανάλυση που παρουσιάζεται αφορά την κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας στα 32RPM, [Εικόνα 5](#). Τα συνολικά διαθέσιμα σήματα στην κατάσταση υγείας είναι 250, ενώ, αντίστοιχα, τα τρία σενάρια βλάβης 15cm, 30cm και 45cm περιγράφονται από 50 σήματα έκαστο.



**Εικόνα 5.** Ενδεικτικό σήμα επιτάχυνσης για ταχύτητα περιστροφής στα 32RPM για το πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27.

Παρακάτω, παρουσιάζεται στον [Πίνακα 4](#) ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των αρχικών σημάτων που χρησιμοποιούνται.

**Πίνακας 4.** Συνολικός αριθμός των σημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τις τέσσερις καταστάσεις, με τα βασικά τους χαρακτηριστικά.

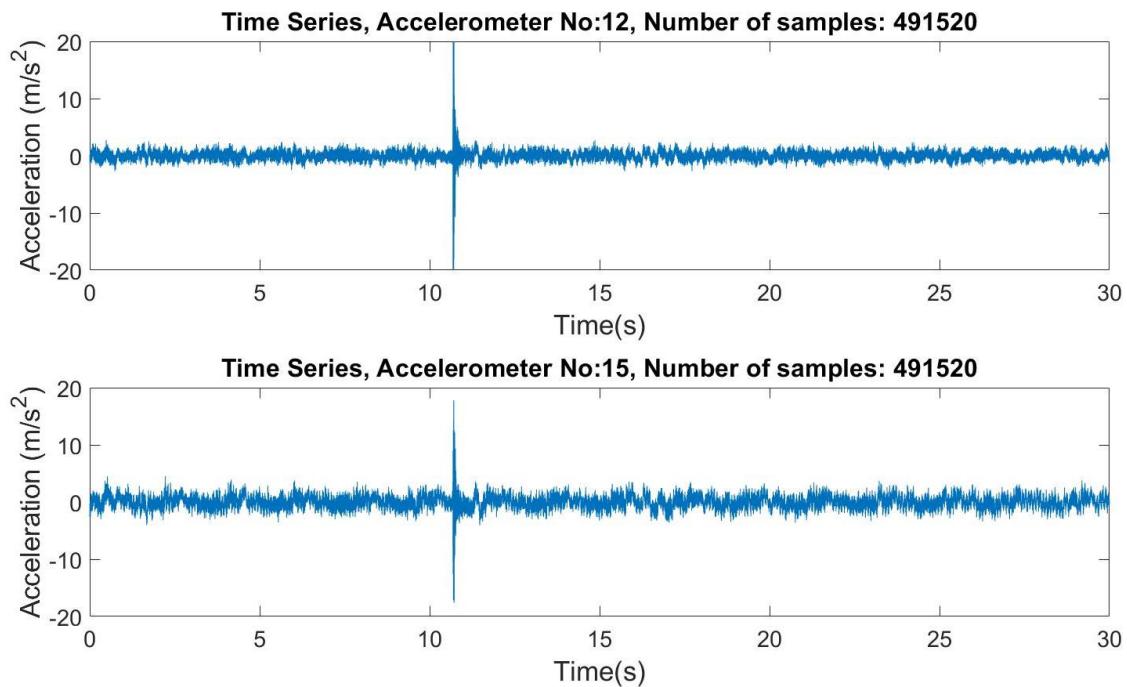
Κατάσταση πτερυγίου	Υγής	Ρωγμή 15 cm	Ρωγμή 30 cm	Ρωγμή 45 cm
<b>Συνολικός Αριθμός Σημάτων</b>	250	50	50	50
<b>Συχνότητα δειγματοληψίας:</b> $F_s = 16384\text{Hz}$				
<b>Μήκος σήματος:</b> $N = 491\,520 \text{ samples (30 s)}$				

## 6.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Αρχικά, στην παρακάτω [Εικόνα 6](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά για μία από τις ψευδο-εισόδους (αισθητήριο 15) και την έξοδο (αισθητήριο 12) της Σ.Μ. οι χρονοσειρές των σημάτων. Η κυκλοστάσιμη<sup>2</sup> αλλά και η στοχαστική φύση των σημάτων είναι εμφανής. Αναλυτικότερα, η κυκλοστασιμότητα μεταφράζεται μέσω της ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα την συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας - 16 κύκλους σε 30 δευτερόλεπτα - ενώ τα έντονα στοιχεία του θορύβου από την θερμοκρασία και την μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου ευθύνονται για την μη ντετερμινιστική συμπεριφορά των σημάτων. Η τοπική δυναμική διαφέρει από σημείο σε σημείο εφόσον η απόκριση του κάθε αισθητήριου είναι διαφορετική, ([Tsikouras, 2020](#)). Στις διαθέσιμες μετρήσεις, παρατηρείται το χτύπημα του

<sup>2</sup> Κυκλοστάσιμα ορίζονται τα μη στάσιμα σήματα των οποίων τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τον χρόνο και είναι χαρακτηριστικό των περιστρεφόμενων μηχανών.

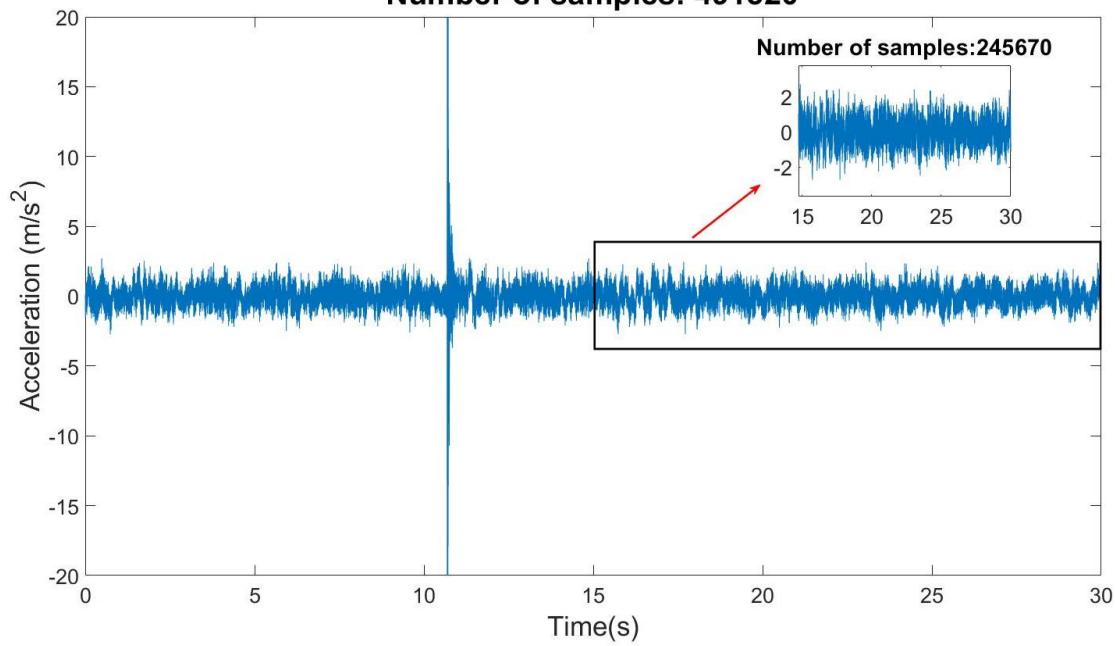
ενεργοποιητή, περίπου στο  $10^{\circ}$  δευτερόλεπτο της καταγραφής, με τον χρόνο απόσβεσης να είναι περίπου στα 0.4 δευτερόλεπτα ([Tsikouras, 2020](#)).



**Εικόνα 6.** Μη επεξεργασμένο σήμα 12<sup>ου</sup> και 15<sup>ου</sup> αισθητήριου, στο πάνω και κάτω μέρος της εικόνας αντίστοιχα.

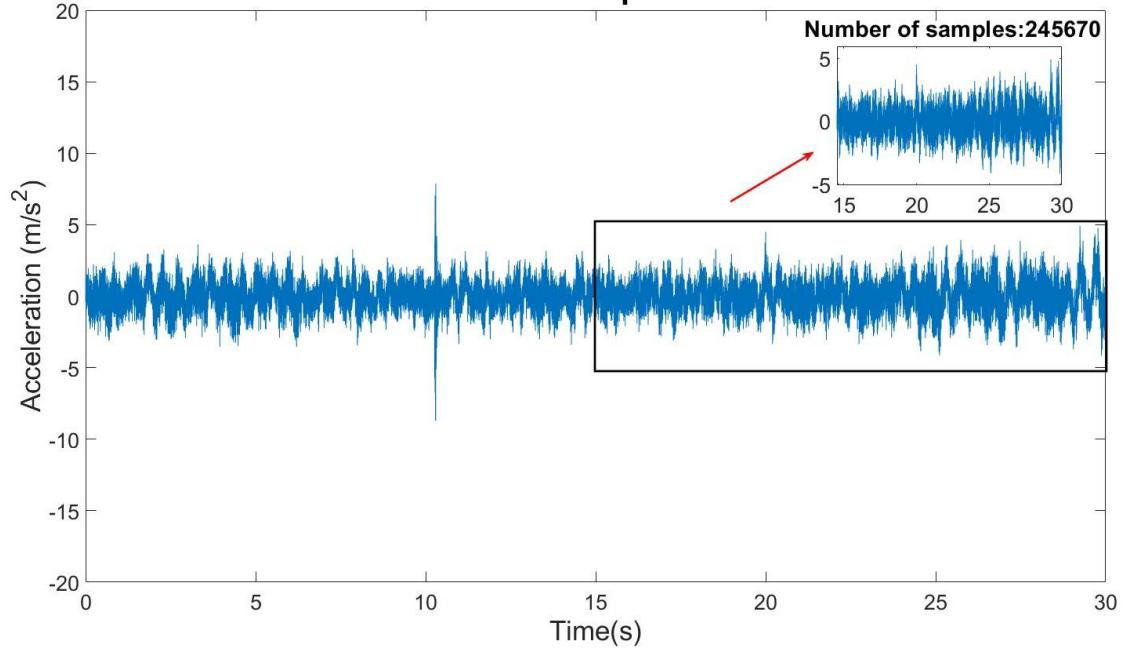
Στα διαθέσιμα σήματα η κρουστική ενεργούσε πριν ή μετά τα 15 δευτερόλεπτα. Εντοπίζοντας την μέγιστη τιμή του σήματος (Matlab function: max) επιλέγεται χρήση διαστήματος 15 δευτερολέπτων (245 760 δείγματα) για τα εκάστοτε σήματα, με σκοπό την απομόνωση της κρουστικής απόκρισης, ([Tsikouras, 2020](#)). Παρακάτω παρουσιάζεται για την έξοδο ([Εικόνα 7](#)) και ενδεικτικά για μία από τις φευδο-εισόδους ([Εικόνα 8](#)) το επιλεχθέν τμήμα (μαύρο πλαίσιο) στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση.

**Time Series of normalized selected data, Accelerometer No:12**  
**Number of samples: 491520**



**Εικόνα 7.** Το τμήμα της χρονοσειράς του μη επεξεργασμένου σήματος της υγιούς κατάστασης που χρησιμοποιείται (μαύρο πλαίσιο) για το  $12^\circ$  επιταχυνσιόμετρο.

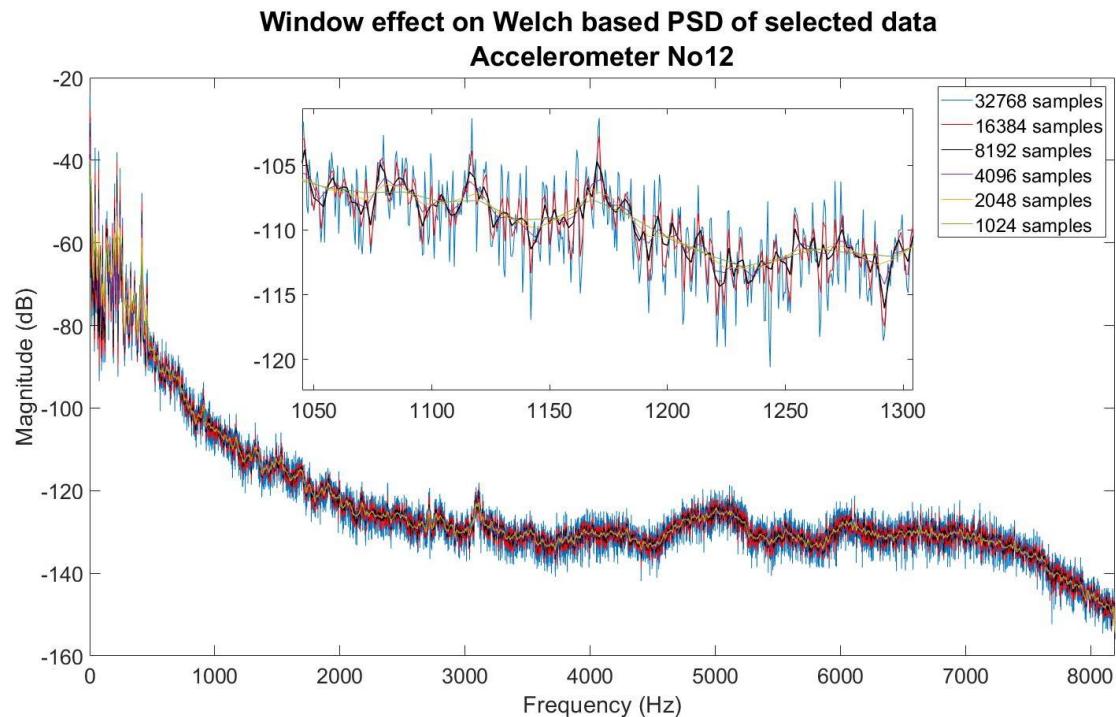
**Time series of normalized selected data, Accelerometer No:15**  
**Number of samples:491520**



**Εικόνα 8.** Το τμήμα της χρονοσειράς του μη επεξεργασμένου σήματος της υγιούς κατάστασης που χρησιμοποιείται (μαύρο πλαίσιο) για το  $15^\circ$  επιταχυνσιόμετρο.

## 6.2 Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων

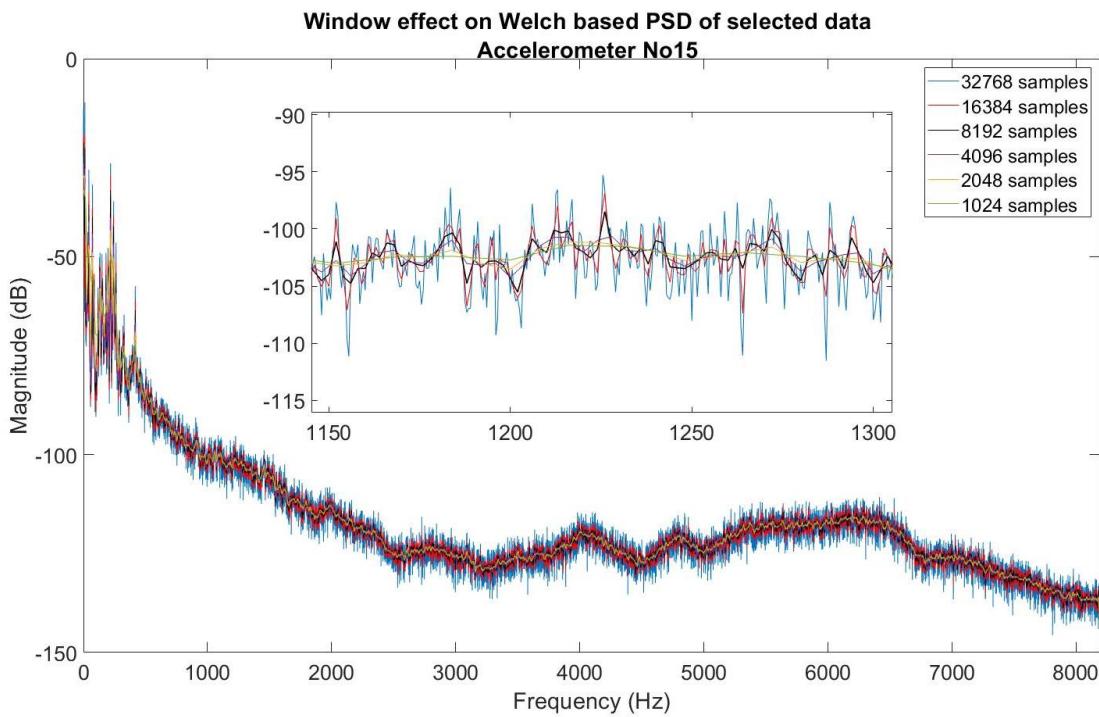
Για καλύτερη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στο πεδίο συχνοτήτων είναι απαραίτητη η εκτίμηση του φάσματος<sup>3</sup>, η οποία πραγματοποιείται με την μη παραμετρική φασματική εκτιμήτρια Welch (Matlab function: *pwelch*). Η επιλογή των παραμέτρων της φασματικής εκτιμήτριας αφορά το μήκος του παραθύρου που χρησιμοποιείται καθώς και το ποσοστό επικάλυψης του (overlap). Στις [Εικόνες 9 και 10](#) παρουσιάζεται για τυχαίο σήμα σύγκριση των φασμάτων ισχύος για διάφορα μήκη παραθύρων με σταθερή επικάλυψη 90%, για την έξοδο και για μία από τις ψευδο-εισόδους της Σ.Μ., αντίστοιχα. Η διαθέσιμη πληροφορία είναι άμεσα εξαρτώμενη από το μήκος του παραθύρου που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, για μεγάλα μήκη παραθύρων η στοχαστικότητα του φάσματος γίνεται εντονότερη, ενώ για μικρότερα μήκη η συχνοτική πληροφορία μειώνεται.



**Εικόνα 9.** Σύγκριση της εκτίμησης του φάσματος κατά Welch για το 12<sup>ο</sup> αισθητήριο της υγιούς κατάστασης του επιλεγμένου τμήματος του σήματος για αυξανόμενα μήκη παραθύρων και ποσοστό επικάλυψης 90%.

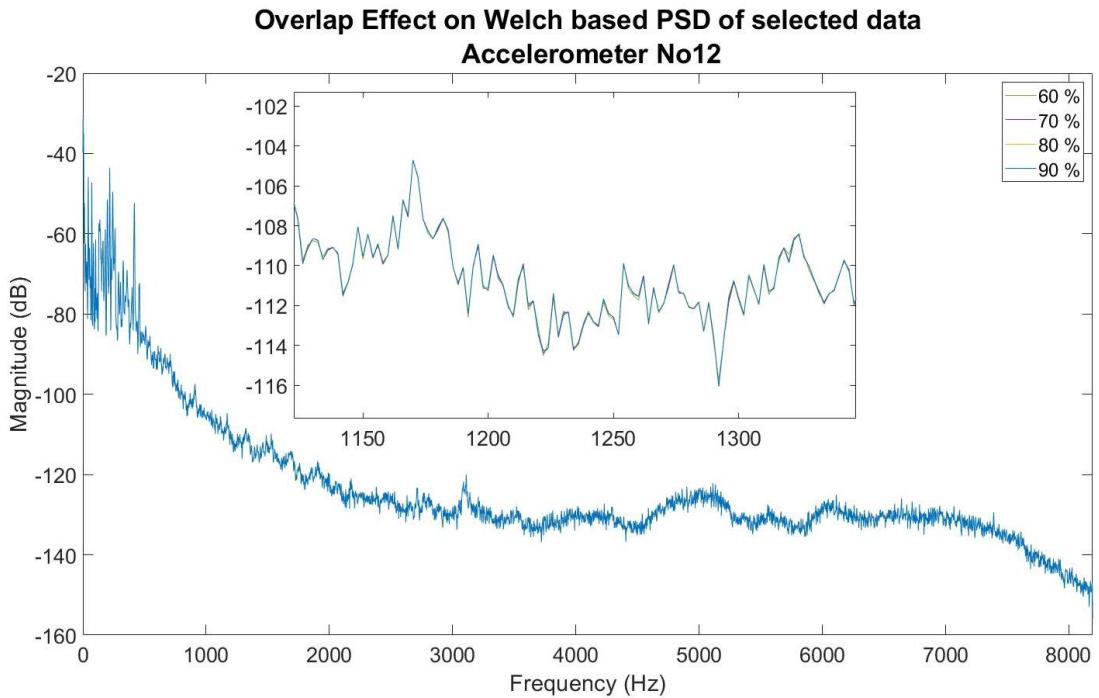
---

<sup>3</sup> Ως φάσμα (φάσμα ισχύος) αναφέρεται ο κατά περίπτωση κατάλληλος μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυμμεταβλητότητας.

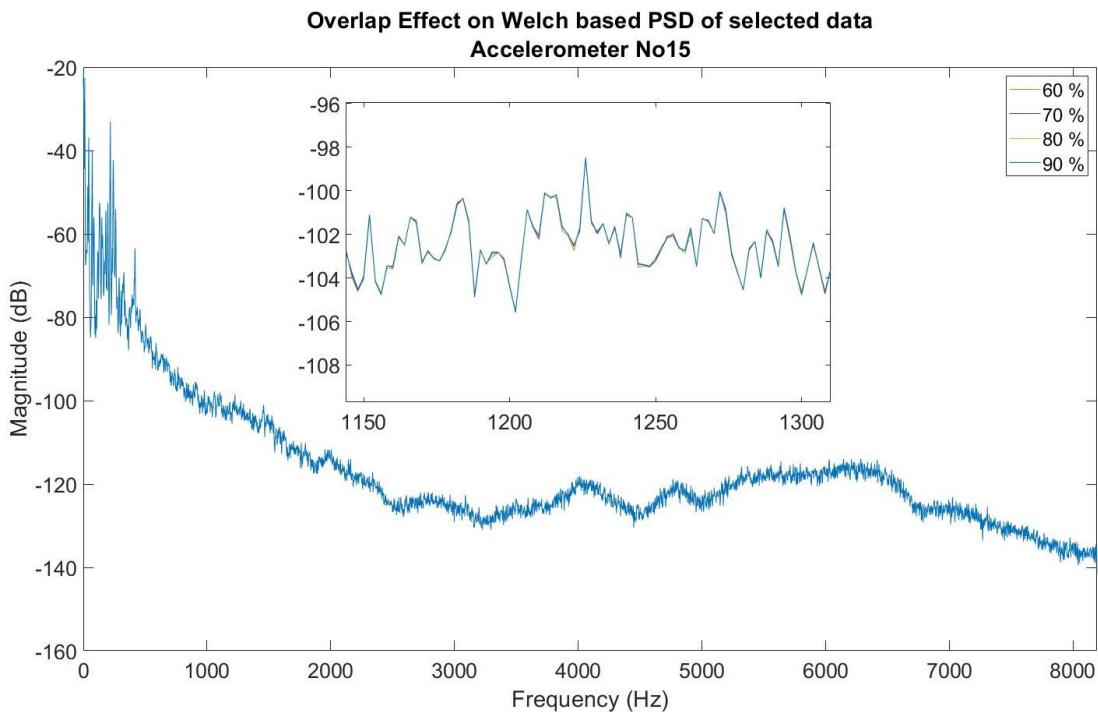


**Εικόνα 10.** Σύγκριση της εκτίμησης του φάσματος κατά Welch για το  $15^o$  αισθητήριο της υγιούς κατάστασης του επιλεγμένου τμήματος του σήματος για αυξανόμενα μήκη παραθύρων και ποσοστό επικάλυψης 90%.

Στις παρακάτω [Εικόνες 11](#) και [12](#) παρουσιάζεται για τυχαίο σήμα, η σύγκριση φασμάτων ισχύος για διάφορες τιμές επικάλυψης με σταθερό μήκος παραθύρου στα 8192 δείγματα, αντίστοιχα για την έξοδο και μία ψευδο-είσοδο της Σ.Μ.. Παρατηρείται πως, η αύξηση του overlap συνεισφέρει σε μικρό βαθμό στην καλύτερη εκτίμηση του φάσματος. Ωστόσο, η μετάβαση της πληροφορίας γίνεται πιο ομαλή κατά την αύξηση του ποσοστού επικάλυψης.



**Εικόνα 11.** Σύγκριση της εκτίμησης του φάσματος κατά Welch για το  $12^o$  αισθητήριο της υγιούς κατάστασης του επιλεγμένου τμήματος του σήματος για αυξανόμενο ποσοστό επικάλυψης και μήκος παραθύρου 8192 δείγματα.



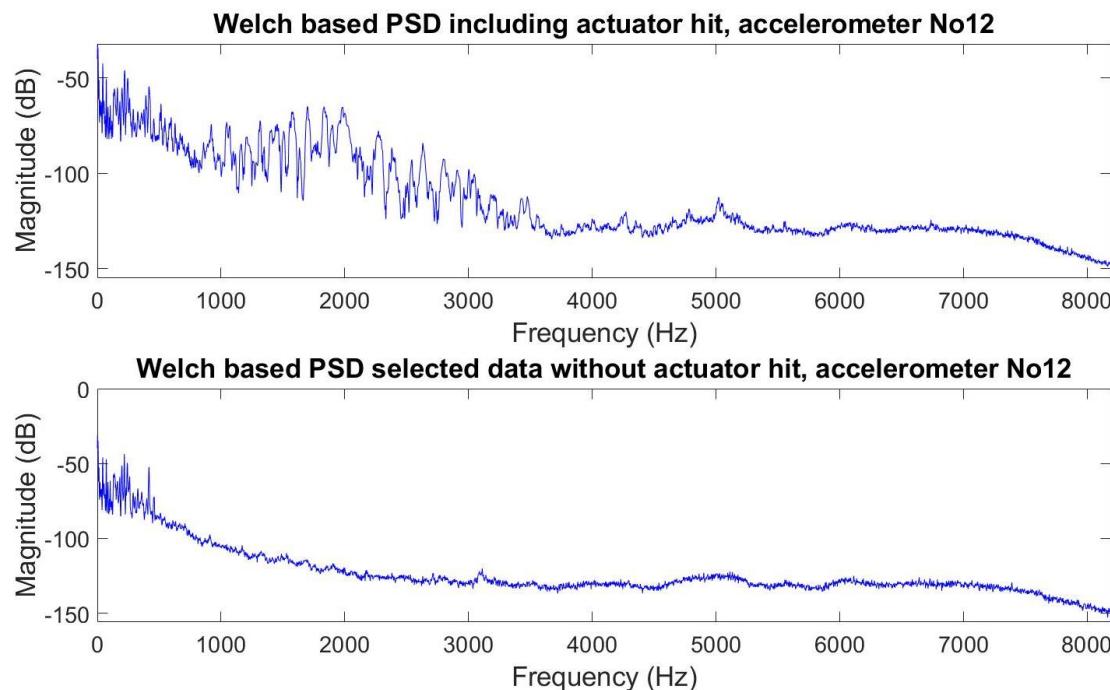
**Εικόνα 12.** Σύγκριση της εκτίμησης του φάσματος κατά Welch για το 15<sup>ο</sup> αισθητήριο της υγιούς κατάστασης του επιλεγμένου τμήματος του σήματος για αυξανόμενο ποσοστό επικάλυψης και μήκος παραθύρου 8192 δείγματα.

Στον [Πίνακα 5](#) παρουσιάζονται οι τελικοί παράμετροι της εκτίμησης κατά Welch.

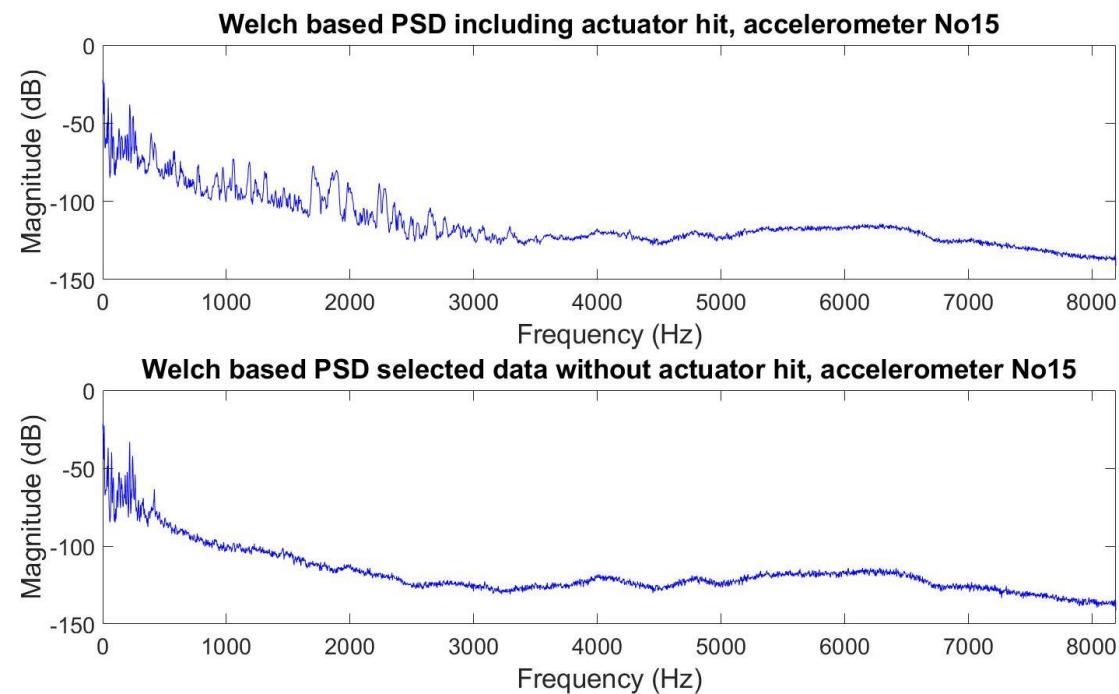
**Πίνακας 5.** Παράμετροι Εκτίμησης κατά Welch.

Παράμετροι εκτίμησης κατά Welch				
Τύπος Παραθύρου	Μήκος Παραθύρου	Ποσοστό Επικάλυψης Παραθύρων	Συχνότητα Δειγματοληψίας Fs	Συχνοτική Διακρισιμότητα df
Hamming	8192 samples	90%	16384 Hz	2 Hz

Στις [Εικόνες 13](#) και [14](#) παρουσιάζεται η έντονη επίδραση του ενεργοποιητή στο εύρος συχνοτήτων 950 έως και περίπου 3500 Hz, ενδεικτικά για μία ψευδο-είσοδο και την έξοδο της Σ.Μ.. Άξιο αναφοράς είναι πως, οι κορυφές που εμφανίζονται στα φάσματα περιστρεφόμενων μηχανών κατηγοριοποιούνται στις αρμονικές και στις δομικές. Οι αρμονικές κορυφές είναι απόρροια των ακέραιων πολλαπλάσιων της συχνότητας περιστροφής και δεν λαμβάνονται υπόψιν, ενώ στις δομικές ανήκουν οι υπόλοιπες.

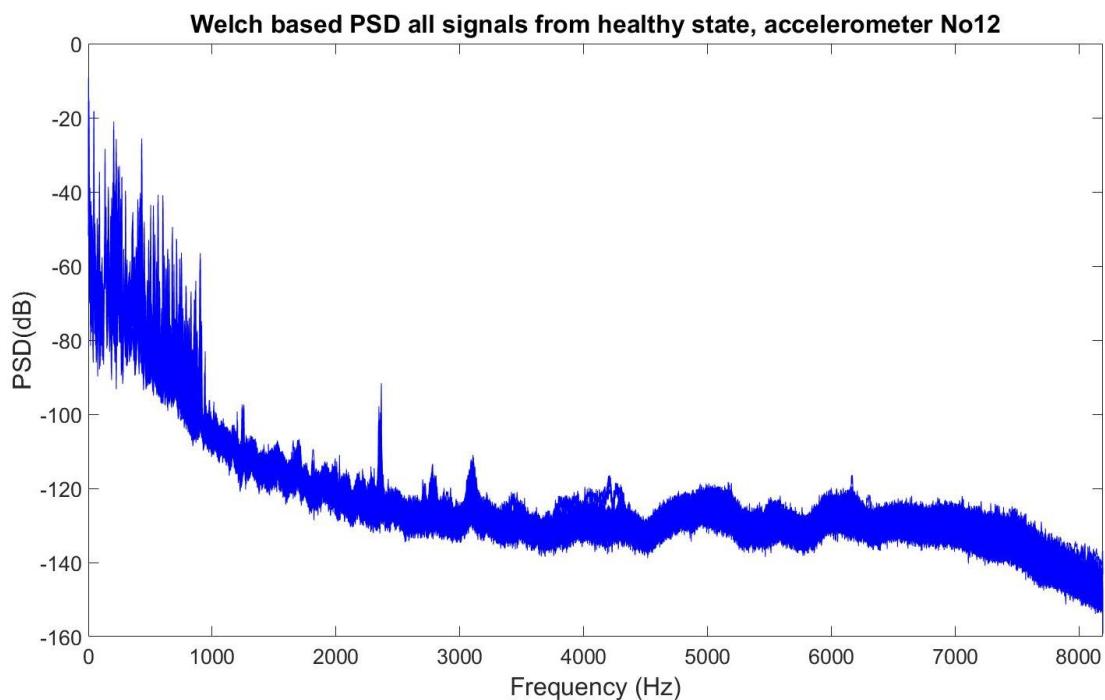


**Εικόνα 13.** Σύγκριση των εκτιμώμενων φασμάτων κατά Welch της υγιούς κατάστασης για το αισθητήριο εξόδου 12, με και χωρίς χρήση ενεργοποιητή στο πάνω και κάτω μέρος της εικόνας, αντίστοιχα.

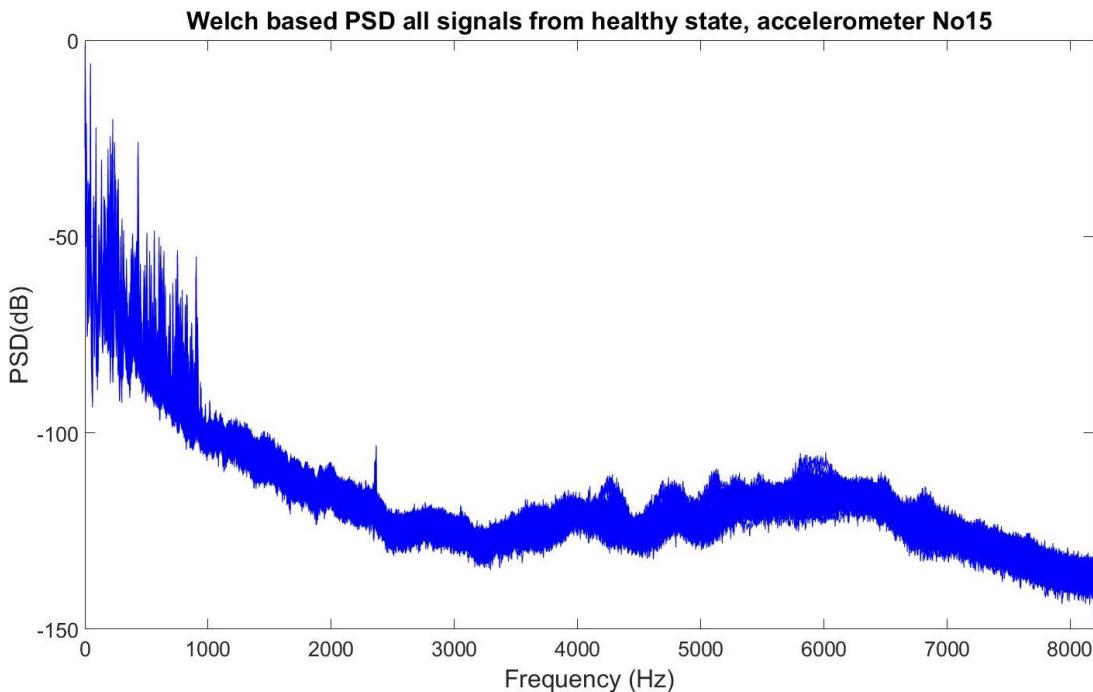


**Εικόνα 14.** Σύγκριση των εκτιμώμενων φασμάτων κατά Welch της υγιούς κατάστασης για την ψευδο-είσοδο 15, με και χωρίς χρήση ενεργοποιητή στο πάνω και κάτω μέρος της εικόνας, αντίστοιχα.

Για την πλήρη κατανόηση της δυναμικής της κατασκευής, στις [Εικόνες 14](#) και [15](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά για το  $12^\circ$  και το  $15^\circ$  επιταχυνσιόμετρο, αντίστοιχα, η εκτίμηση φασμάτων για την κατάσταση υγείας. Απόρροια της έντονης στοχαστικότητας στο εύρος συχνοτήτων 0 έως 950Hz είναι η ύπαρξη αρμονικών κορυφών και εισαγόμενου θορύβου. Επιπλέον, παρατηρείται και πτώση του φάσματος σε μέγεθος, η οποία πραγματοποιείται λίγο πριν τα 1000Hz, όπως αναφέρεται και στην ([Tsikouras, 2020](#)).



**Εικόνα 15.** Εκτίμηση των φασμάτων κατά Welch για το αισθητήριο εξόδου 12 και τα 250 σήματα της κατάστασης υγείας. (μήκος παράθυρου: 8 192, επικάλυψη παράθυρου: 90%).



**Εικόνα 16.** Εκτίμηση των φασμάτων κατά Welch για την ψευδο-είσοδο 15 και τα 250 σήματα της κατάστασης υγείας. (μήκος παράθυρου: 8 192, επικάλυψη παράθυρου: 90%).

Όσον αφορά το φιλτράρισμα, στόχος είναι η εύρεση περιοχής η οποία επηρεάζεται περισσότερο λόγω βλαβών. Στο ίδιο πρόβλημα αναδείχθηκε ως βέλτιστο το εύρος συχνοτήτων από 1000 έως 1500Hz, ([Tsikouras, 2020](#)). Παρακάτω, αναφέρεται ενδεικτική περιγραφή της επιλογής αυτής, η οποία θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία.

Αρχικά, στην προγενέστερη εργασία των ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)) αναφέρεται πως είναι επιθυμητό, για το συγκεκριμένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27, τα 1000Hz να αποτελούν την κεντρική συχνότητα της περιοχής φιλτραρίσματος, με τα εκατέρωθεν εύρη να κυμαίνονται στα 500 έως 600 Hz. Παρατηρείται πως, λίγο πριν τα 1000 Hz υπάρχει πτώση στο μέγεθος του φάσματος, αναδεικνύοντας την συγκεκριμένη περιοχή για περαιτέρω διερεύνηση, καθώς αποφεύγονται τυχόν δυσκολίες για την μετέπειτα μοντελοποίηση του πτερυγίου. Επιπλέον, το έντονο συχνοτικό περιεχόμενο που παρουσιάζεται στις συχνότητες έως τα 950Hz οφείλεται στις αρμονικές κορυφές, όπου λόγω των τριών συμμετρικών τοποθετημένων πτερυγίων, είναι ακέραια πολλαπλάσια του 1/3 της συχνότητας περιστροφής. Τέλος, σημειώνεται πως οι προδιαγραφές των αισθητηρίων καθιστούν τις συχνότητες μετά τα 6000 Hz ως μη έγκυρες.

Επομένως, επιλέγεται για την έξοδο και το 12° αισθητήριο ζωνοπερατό φίλτρο για τις συχνότητες 1000-1500 Hz. Μέσω Matlab και της εφαρμογής του *Filter Designer* (Matlab app: *Filter Designer*), σχεδιάζεται ελλειπτικό φίλτρο απόκρισης απεύρου παλμού. Παρακάτω αναγράφονται στον [Πίνακα 6](#) τα βασικά χαρακτηριστικά του φίλτρου, με την αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση στην [Εικόνα 17](#).

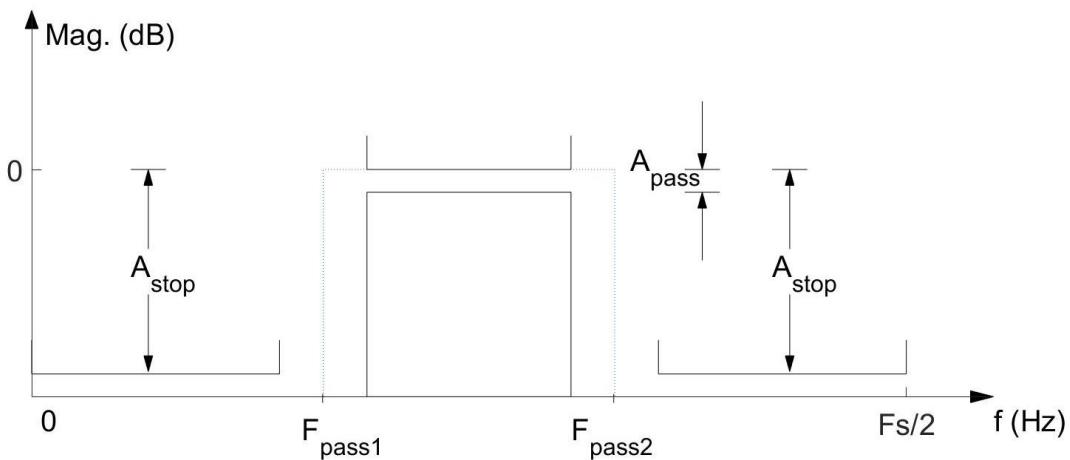
**Πίνακας 6.** Χαρακτηριστικά ζωνοπερατού φίλτρου που χρησιμοποιείται για το επιταχυνσιόμετρο εξόδου No12.

$F_s$	$F_{stop1}$	$F_{pass1}$	$F_{pass2}$	$F_{stop2}$	$A_{stop1}$	$A_{pass}$	$A_{stop2}$
16384 Hz	950 Hz	1000 Hz	1500 Hz	1552 Hz	60 dB	0.1 dB	60 dB

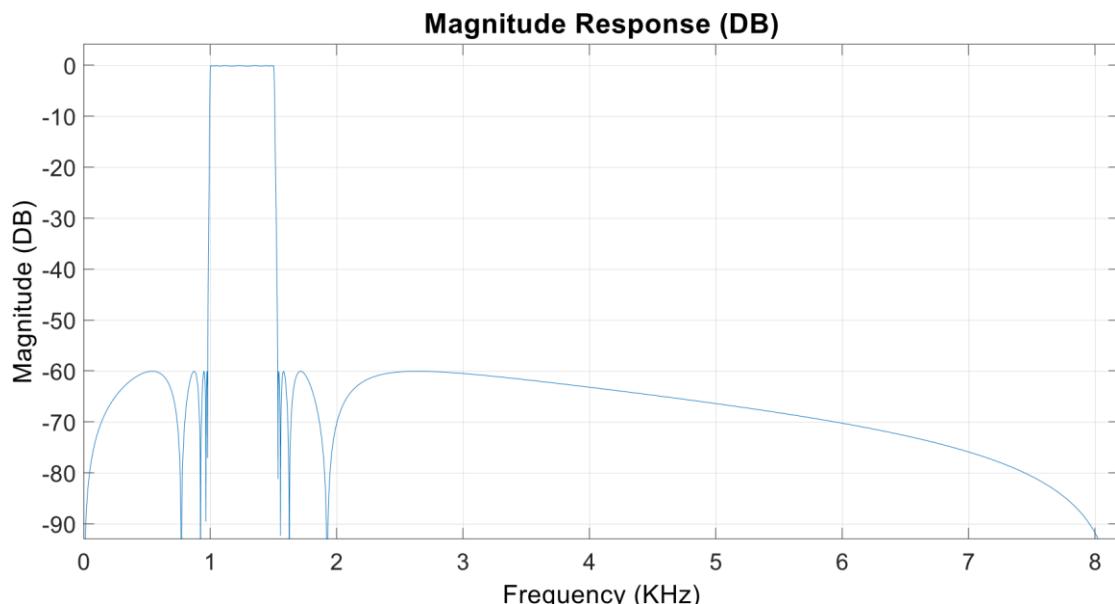
Τύπος φίλτρου: Ελλειπτικό

Είδος φιλτραρίσματος: Ζωνοπερατό

Τάξη: 18



**Εικόνα 17.** Σχηματική απεικόνιση των συμβόλων του ανωτέρω **Πίνακα 6**.

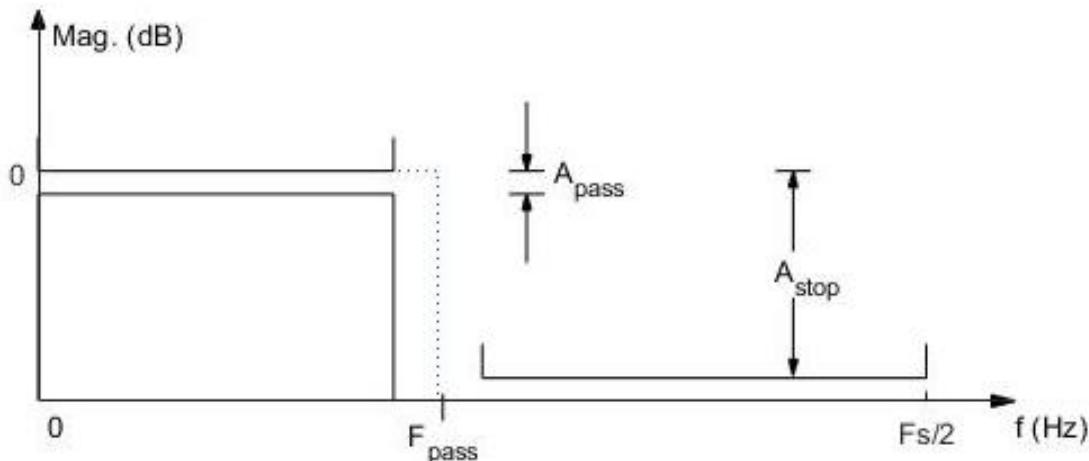


**Εικόνα 18.** Απόκριση ελλειπτικού φίλτρου απέριου παλμού τάξης 18.

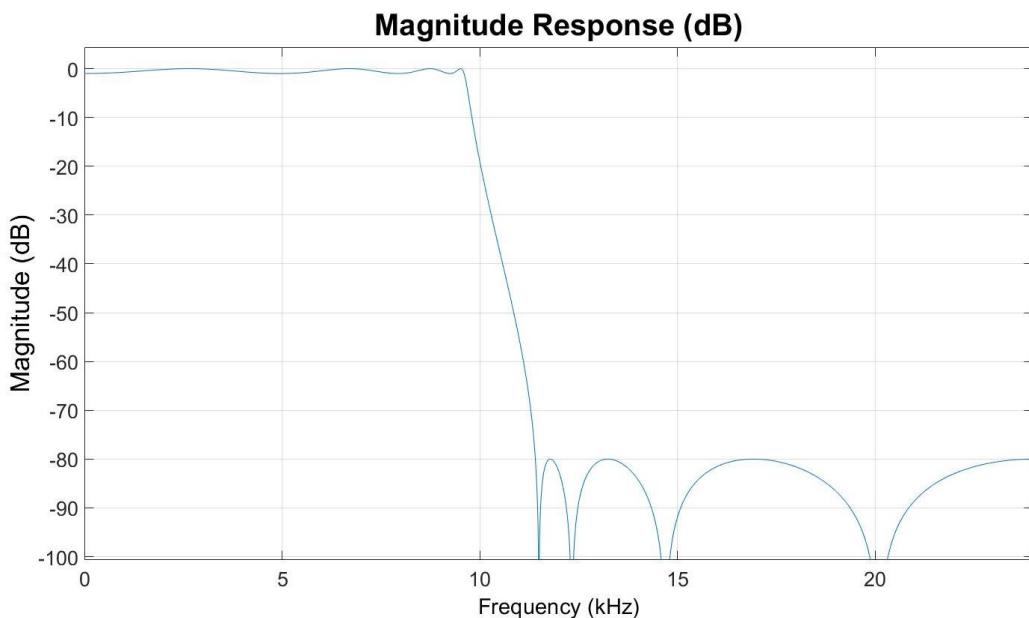
Η χρήση επαναδειγματοληψίας είναι απαραίτητη τόσο για τις ψευδο-εισόδους όσο και για την έξοδο του συστήματος. Η παράλειψη χρήσης φίλτρου παραβιάζει το θεώρημα Shannon στην μετέπειτα επαναδειγματοληψία των ψευδο-εισόδων. Επομένως, επιλέγεται χρήση βαθυπερατού φίλτρου για τις ψευδο-εισόδους. Μέσω Matlab και της εφαρμογής του Filter Designer (Matlab app: Filter Designer) σχεδιάζεται, αντίστοιχα, ελλειπτικό φίλτρο απόκρισης απέριου παλμού, με τα χαρακτηριστικά να αναγράφονται στον παρακάτω **Πίνακα 7** και την **Εικόνα 19** να αποτελεί σχηματική απεικόνιση αυτών.

**Πίνακας 7.** Χαρακτηριστικά βαθυπερατού φίλτρου που χρησιμοποιείται για το επιταχυνσιόμετρα εισόδου.

Fs 16384 Hz	Fpass 1998 Hz	Astop 0.1 dB	Apass 60 dB
Τύπος φίλτρου: Ελλειπτικό			
Είδος φιλτραρίσματος: Βαθυπερατό			
Τάξη: 18			



**Εικόνα 19.** Σχηματική απεικόνιση των συμβόλων του ανωτέρω **Πίνακας 7**.



**Εικόνα 20.** Απόκριση ελλειπτικού φίλτρου απείρου παλμού τάξης 18.

Έχοντας πραγματοποιήσει το απαραίτητο φιλτράρισμα (Matlab function: *filtfilt*), επιτυγχάνεται η διαδικασία της επαναδειγματοληψίας, σύμφωνα με την οποία απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ικανοποίηση του θεωρήματος Shannon. Στόχος είναι η εκμετάλλευση της πληροφορίας σε όλο το φάσμα των μελετώμενων συχνοτήτων, 1000-1500Hz. Όπως αναφέρεται και στην ([Tsikouras, 2020](#)), η διαθέσιμη πληροφορία δίνεται μέχρι και  $F_s/2$ , με λόγο υποδειγματοληψίας 4. Έτσι, η νέα συχνότητα δειγματοληψίας ορίζεται στα 4 096 Hz με

πληροφορία διαθέσιμη έως και τα 2 048 Hz<sup>4</sup>, με τα χαρακτηριστικά των τελικών και αρχικών σημάτων να παρατίθενται συγκεντρωτικά στον [Πίνακα 8](#).

[Πίνακας 8.](#) Χαρακτηριστικά αρχικών και τελικών σημάτων.

Αρχική συχνότητα δειγματοληψίας	16 384 Hz
Τελική συχνότητα δειγματοληψίας	4 096 Hz
Αρχικό μήκος σημάτων	491 520 δείγματα (30 s)
Τελικό μήκος σημάτων	61 440 δείγματα (15 s)

Η ακριβής σύγκριση των φιλτραρισμένων και των μη φιλτραρισμένων φασμάτων επιτυγχάνεται στην περίπτωση που τα φάσματα έχουν ίδια συχνοτική διακρισιμότητα. Αφού, η διακρισιμότητα του μη φιλτραρισμένου σήματος είναι στα 2Hz<sup>5</sup>, τότε επιλέγεται μήκος παραθύρου τα 2048 δείγματα, με την συχνοτική διακρισιμότητα να περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (7) :

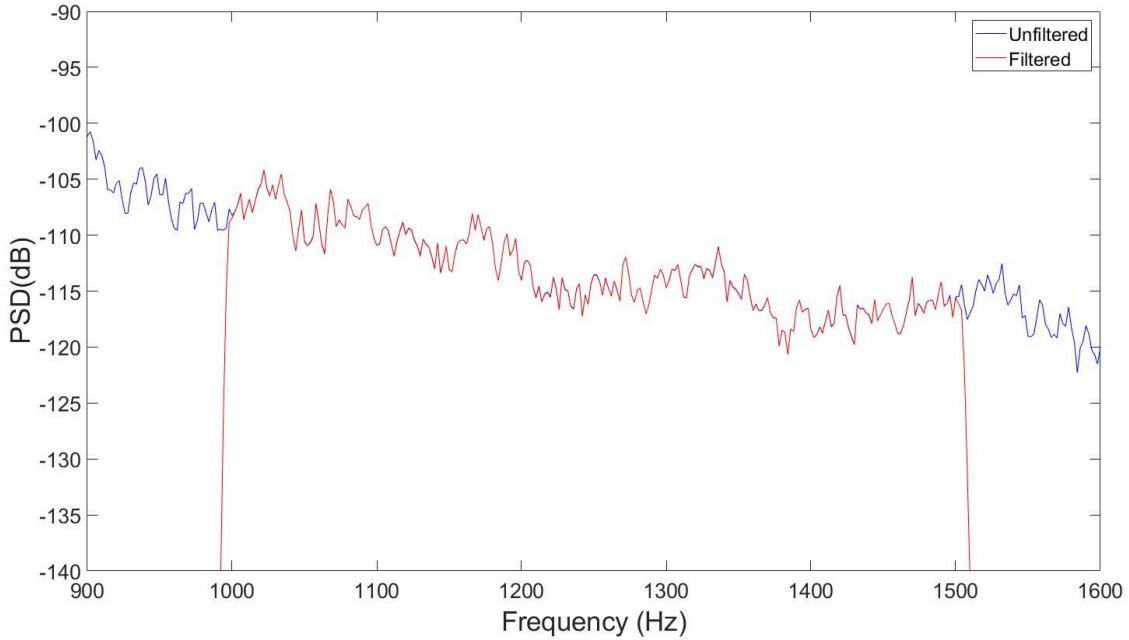
$$df = \frac{Fs}{Window} \quad (7)$$

Στις παρακάτω [Εικόνες 21](#) και [22](#) παρουσιάζεται, ενδεικτικά για μία από τις ψευδο-εισόδους και την έξοδο της Σ.Μ., η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου των ψευδο-εισόδων και της εξόδου, αντίστοιχα. Συνολικά, τόσο η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου της εξόδου όσο και των ψευδο-εισόδων δεν επηρεάζουν την δυναμική της κατασκευής.

<sup>4</sup> Γι' αυτό τον λόγο το Fpass επιλέχθηκε -αυθαίρετα- 50Hz λιγότερα από την προκύπτουσα συχνότητα δειγματοληψίας ύστερα της επαναδειγματοληψίας.

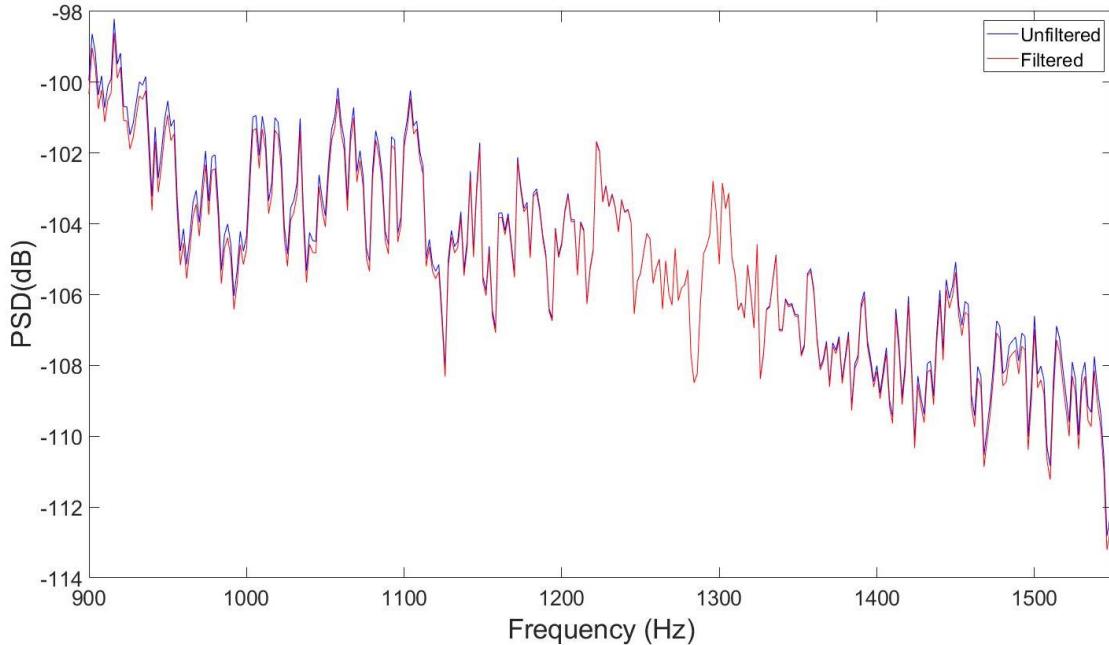
<sup>5</sup> Με μήκος παραθύρου 8192 δειγμάτων και συχνότητα δειγματοληψίας 16384Hz.

**Welch based PSD comparison, unfiltered/filtered data  
Accelerometer 12**



**Εικόνα 21.** Σύγκριση των εκτιμώμενων φασμάτων κατά Welch της κατάστασης υγείας για το αισθητήριο εξόδου 12, με και χωρίς φιλτράρισμα. (κόκκινη και μπλε γραμμή, αντίστοιχα).

**Welch based PSD comparison, filtered/unfiltered data  
Accelerometer 15**



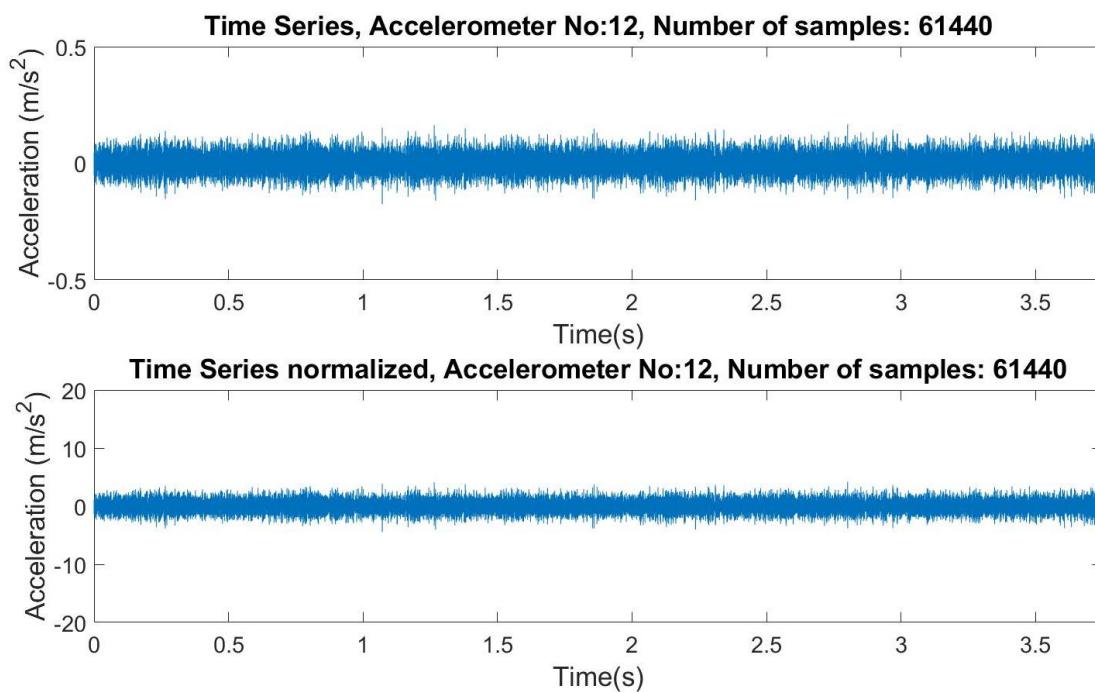
**Εικόνα 22.** Σύγκριση των εκτιμώμενων φασμάτων κατά Welch της κατάστασης υγείας για το αισθητήριο ψευδο-είσοδου 15, με και χωρίς φιλτράρισμα. (κόκκινη και μπλε γραμμή, αντίστοιχα).

Στον παρακάτω [Πίνακα 9](#) παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τελικοί παράμετροι του φάσματος που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων, με τους λόγους της επιλογής να αναγράφονται με λεπτομέρεια στην εργασία του ([Tsikouras, 2020](#)).

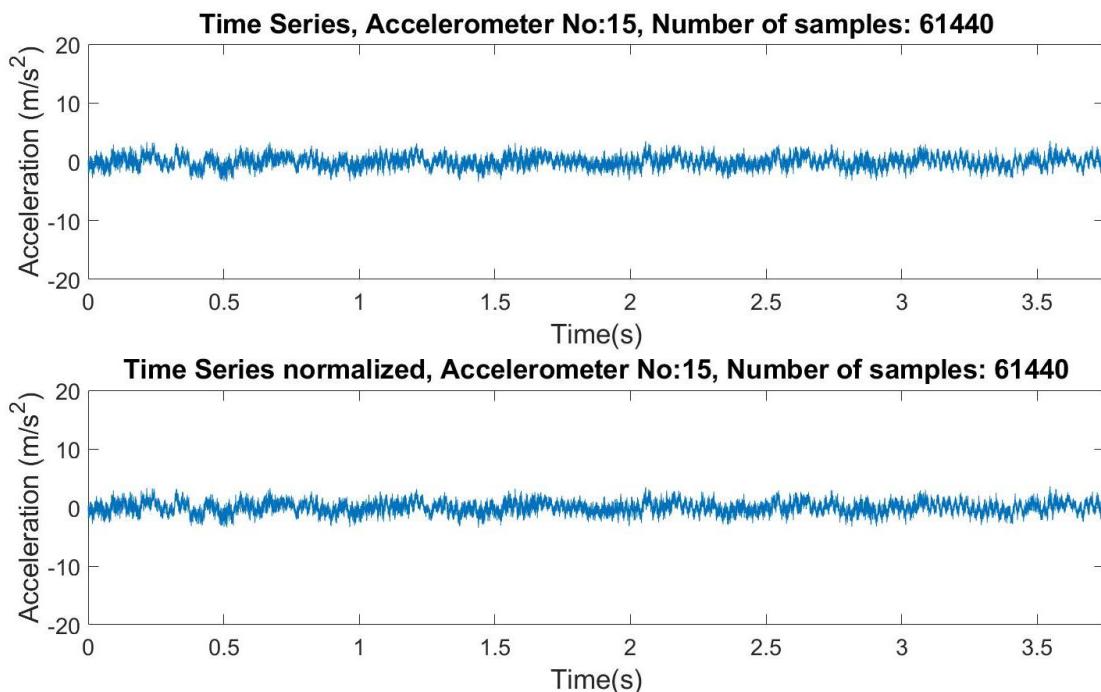
**Πίνακας 9.** Χαρακτηριστικά τελικών παραμέτρων εκτίμησης κατά Welch.

Τελικοί Παράμετροι εκτίμησης κατά Welch				
Τύπος Παραθύρου	Μήκος Παραθύρου	Ποσοστό Επικάλυψης Παραθύρων	Συχνότητα Δειγματοληψίας Fs	Συχνοτική Διακρισιμότητα df
Hamming	2048 samples	90%	4096Hz	2Hz

Τέλος αφαιρείται η μέση τιμή του κάθε σήματος (Matlab function: *mean*) και στην συνέχεια πραγματοποιείται κανονικοποίηση με την διαίρεση της τυπικής απόκλισης (Matlab function: *std*). Στις παρακάτω [Εικόνες 23](#) και [24](#) παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χρονοσειρές πριν και μετά την κανονικοποίηση, για το  $12^\circ$  και  $15^\circ$  αισθητήριο, αντίστοιχα.



**Εικόνα 23.** Σύγκριση απόκρισης επιταχυνσιομέτρου No12 για το επιλεχθέν τμήμα κανονικοποιημένου σήματος με το μη επεξεργασμένο, στο κάτω και πάνω μέρος της εικόνας, αντίστοιχα.



**Εικόνα 24.** Σύγκριση απόκρισης επιταχυνσιομέτρου No15 για το επιλεχθέν τμήμα κανονικοποιημένου σήματος με το μη επεξεργασμένο, στο κάτω και πάνω μέρος της εικόνας, αντίστοιχα.

### 6.3 Επιλογή αισθητηρίων

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η επιλογή κατάλληλων αισθητηρίων για την εφαρμογή της μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF. Ως αισθητήριο εξόδου, επιλέγεται το  $12^\circ$  αισθητήριο, που βρίσκεται πιο κοντά στην βλάβη. Επομένως, η διερεύνηση αφορά την επιλογή των αισθητηρίων που αποτελούν τις ψευδο-εισόδους της Σ.Μ., με στόχο την απαλοιφή της επίδρασης των δυναμικών χαρακτηριστικών της διέγερσης στα σήματα απόκρισης και την αποφυγή μη γραμμικών χαρακτηριστικών. Αρχικά, υπολογίζεται η μέση τιμή (MEAN) του εμβαδού που περικλείεται κάτω (Area Under Curve, AUC) από την Συνάρτηση Συνάφειας<sup>6</sup> (Coherence Function, CF). Με βάση την καλύτερη MEAN-AUC-CF εφαρμόζεται αύξηση των ψευδο-εισόδων από 2 έως 11 και υπολογίζεται, πλέον, η Multiple Coherence Function (MCF) μεταξύ της εξόδου και των ψευδο-εισόδων εξίσωση (8). Το εύρος τιμών της MCF κυμαίνεται από 0 έως 1. Η ιδανική MCF ορίζεται στο 1, υποδεικνύοντας την εν μέρει απαλοιφή της επίδρασης της διέγερσης και των μη γραμμικών χαρακτηριστικών.

#### 6.3.1. Συνάρτηση Συνάφειας SISO

Με την ιδανική CF να περιλαμβάνει το 100% του εμβαδού, παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 10, για δεδομένο αισθητήριο εξόδου (Output) και τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους, (Pseudo-Input), το μέσο (MEAN-AUC-CF), το μέγιστο (MAXimum AUC CF, MAX-AUC-CF) και ελάχιστο (MINimum AUC CF, MIN-AUC-CF) εμβαδόν με το αντίστοιχο σετ μετρήσεων που επιτεύχθηκε αυτό. Παρατηρείται πως, το καλύτερο MEAN-AUC-CF κατά φθίνουσα ταξινόμηση επιτυγχάνεται από τα αισθητήρια 15, 9, 6, 7, 11, 16, 5, 14, 8, 13 και 10.

<sup>6</sup> Μειώνεται με την εμφάνιση σφάλματος εξαιτίας εισαγωγής μη γραμμικών χαρακτηριστικών.

**Πίνακας 10.** Εμβαδό συνάρτησης συνάφειας μίας ψευδο-εισόδου και εξόδου. Στην 3<sup>η</sup> στήλη αναγράφεται το μέσο εμβαδόν, ενώ στην 4<sup>η</sup> το μέγιστο και 5<sup>η</sup> το ελάχιστο εμβαδό, με τα αντίστοιχα σετ σημάτων που επιτεύχθηκαν αυτά.

Pseudo-Input	Output	MEAN-AUC-CF (%)	MAX-AUC-CF (%)	MIN-AUC-CF (%)
5	12	4.17	6.07 (4° σετ σημάτων)	3.05 (82° σετ σημάτων)
6	12	9.61	14.19 (98° σετ σημάτων)	1.44 (247° σετ σημάτων)
7	12	4.61	8.44 (18° σετ σημάτων)	2.67 (154° σετ σημάτων)
8	12	3.38	4.94 (4° σετ σημάτων)	2.42 (141° σετ σημάτων)
9	12	10.34	13.77 (105° σετ σημάτων)	7.78 (245° σετ σημάτων)
10	12	3.21	6.27 (236° σετ σημάτων)	1.63 (244° σετ σημάτων)
11	12	4.40	6.30 (18° σετ σημάτων)	2.99 (245° σετ σημάτων)
13	12	3.25	5.24 (18° σετ σημάτων)	1.59 (244° σετ σημάτων)
14	12	3.68	5.46 (18° σετ σημάτων)	1.58 (246° σετ σημάτων)
15	12	25.56	28.98 (103° σετ σημάτων)	1.58 (248° σετ σημάτων)
16	12	4.24	7.43 (236° σετ σημάτων)	2.75 (172° σετ σημάτων)

### 6.3.2. Συνάρτηση Συνάφειας MISO

Πριν την εκτίμηση της Multiple Coherence Function (MCF) απαραίτητος είναι ο υπολογισμός του Condition Number (CN) του εκάστοτε πλήθους ψευδο-εισόδων. Το CN υπολογίζεται στην περίπτωση αντιστροφής πίνακα και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερο είναι και το αριθμητικό σφάλμα που προκύπτει κατά την εκτίμηση του MCF, εξίσωση (8). Επεξηγηματικά, το CN αποτελεί μια ένδειξη του κατά πόσο το (MCF) κρίνεται "αξιόπιστο" και δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή  $10^{15}$ .

$$\gamma_{xy12}^2(f) = \frac{\mathbf{g}_{xy12}^H(f) \mathbf{G}_{xx12}^{-1}(f) \mathbf{g}_{xy12}(f)}{\mathbf{g}_{y12y12}(f)} \quad (8)$$

Όπου

$f$	Συχνότητα
$\mathbf{x}$	Διάνυσμα ψευδο-εισόδων
$\gamma_{xy12}^2(f)$	Εμβαδόν συνάρτησης Multiple Coherence για το αισθητήριο εξόδου – 12° αισθητήριο
$\mathbf{H}$	Ανάστροφο μιγαδικό συζυγές της συνάρτησης $G_{xy12}^H(f)$
$\mathbf{G}_{xx12}(f)$	Πίνακας φάσματος ισχύος (psd) και διασταυρούμενου φάσματος ισχύος μεταξύ των ψευδο-εισόδων
$\mathbf{g}_{xy12}(f)$	Διάνυσμα διασταυρούμενου φάσματος ισχύος της εξόδου – αισθητήριο 12 – με τις ψευδο-εισόδους
$\mathbf{g}_{y12y12}(f)$	Φάσμα ισχύος του αισθητηρίου εξόδου 12

Το μέγιστο CN (Maximum Condition Number) του πίνακα ψευδο-εισόδων παρουσιάζεται για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων, στον παρακάτω [Πίνακα 11](#), με τις τιμές να κυμαίνονται περίπου από 10 έως  $10^9$ , οι οποίες είναι αποδεκτές αφού δεν ξεπερνάνε το  $10^{15}$ . Στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α](#) παρατίθενται πρόσθετα αποτελέσματα μέγιστου CN για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων για όλες τις μετρήσεις, σε μορφή διαγράμματος διασποράς.

**Πίνακας 11.** Μέγιστο Condition Number ανά αυξανόμενο πλήθος εισόδων.

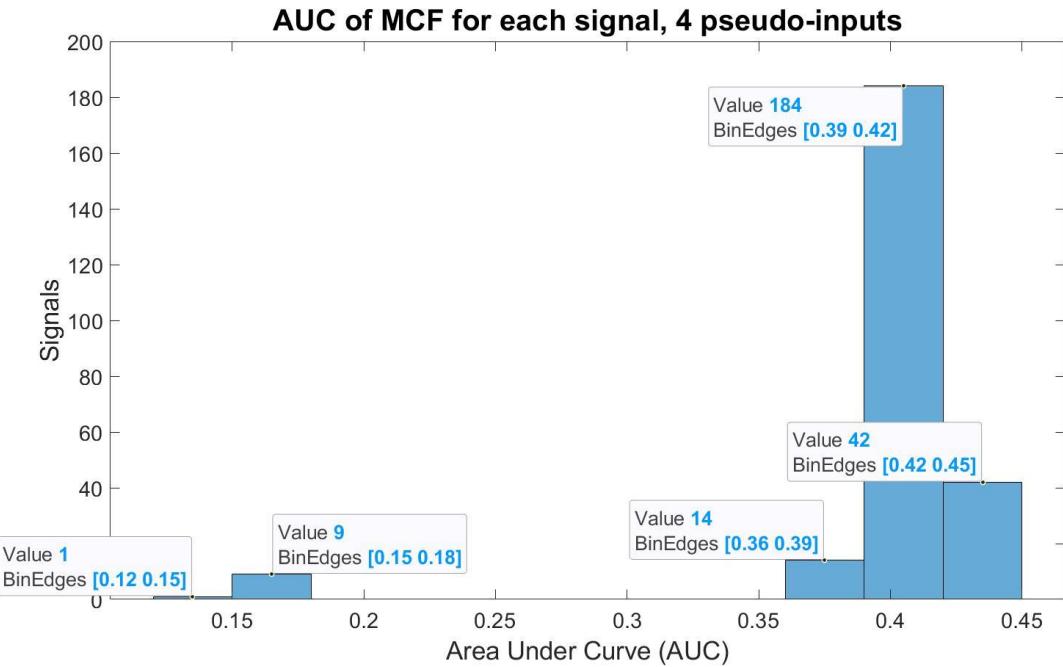
Pseudo-Inputs	Output	Maximum Condition Number
15,9	12	202.6618
15,9,6	12	5.4253*10 <sup>3</sup>
15,9,6,7	12	2.2000*10 <sup>4</sup>
15,9,6,7,11	12	6.7228*10 <sup>4</sup>
15,9,6,7,11,16	12	3.1932*10 <sup>5</sup>
15,9,6,7,11,16,5	12	4.1947*10 <sup>5</sup>
15,9,6,7,11,16,5,14	12	2.2742*10 <sup>6</sup>
15,9,6,7,11,16,5,14,8	12	3.7550*10 <sup>6</sup>
15,9,6,7,11,16,5,14,8,13	12	4.8305*10 <sup>6</sup>
15,9,6,7,11,16,5,14,8,13,10	12	7.6047*10 <sup>6</sup>

Η μεθοδολογία MISO-TF επιτυγχάνεται για πλήθος ψευδο-εισόδων και μοναδική έξοδο. Αυξάνοντας κατά ένα το πλήθος των ψευδο-εισόδων, με κριτήριο το καλύτερο MEAN-AUC-CF, , υπολογίζεται η μέση τιμή AUC του MCF (MEAN-AUC-MCF), η μέγιστη (MAXimum AUC MCF, MAX-AUC-MCF) και η ελάχιστη (MINimum AUC MCF, MIN-AUC-MCF), όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω [Πίνακα 12](#).

**Πίνακας 12.** Αποτελέσματα εμβαδού πολλαπλών εισόδων και μίας εξόδου συνάρτησης συνάφειας. Στην 3<sup>η</sup> στήλη αναγράφεται το μέσο εμβαδόν, ενώ στην 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> το μέγιστο και ελάχιστο εμβαδό, αντίστοιχα, με τα αντίστοιχα σήματα που επιτεύχθηκαν αυτά.

Pseudo-Inputs	Output	MEAN-AUC-MCF (%)	MAX-AUC-MCF (%)	MIN-AUC-MCF (%)
15,9	12	32.98 (116° σετ σημάτων)	37.16 (116° σετ σημάτων)	9.32 (245° σετ σημάτων)
15,9,6	12	37.11 (116° σετ σημάτων)	41.25 (116° σετ σημάτων)	10.89 (245° σετ σημάτων)
15,9,6,7	12	39.84 (116° σετ σημάτων)	43.29 (116° σετ σημάτων)	14.80 (245° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11	12	42.10 (120° σετ σημάτων)	45.64 (120° σετ σημάτων)	17.21 (245° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16	12	44.31 (18° σετ σημάτων)	48.00 (18° σετ σημάτων)	20.72 (245° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16,5	12	46.10 (18° σετ σημάτων)	49.74 (18° σετ σημάτων)	23.55 (244° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16,5,14	12	47.80 (18° σετ σημάτων)	51.42 (18° σετ σημάτων)	25.03 (244° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16,5,14,8	12	49.09 (18° σετ σημάτων)	52.83 (18° σετ σημάτων)	26.68 (244° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16,5,14,8,13	12	50.53 (18° σετ σημάτων)	54.56 (18° σετ σημάτων)	27.98 (244° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11,16,5,14,8,13,10	12	51.78 (18° σετ σημάτων)	55.76 (18° σετ σημάτων)	29.28 (244° σετ σημάτων)

Στον παραπάνω Πίνακα 12 παρατηρείται πως, για έκαστο πλήθος ψευδο-εισόδων, η διαφορά του MEAN-AUC-MCF από το MEAN-AUC-MCF είναι πάνω από το 20% του συνολικού εμβαδού. Εφαρμόζεται διάστημα εμπιστοσύνης (δ.ε.) 80% με μέση τιμή το έκαστο MEAN-AUC-MCF για την απόρριψη σετ σημάτων με χαμηλό AUC-MCF. Στην παρακάτω Εικόνα 25, παρουσιάζεται το απαραίτητο ιστόγραμμα, ενδεικτικά, για 4 ψευδο-εισόδους. Παρατηρείται πως, το AUC 10 συγκεκριμένων σετ σημάτων απέχουν αρκετά της μέσης τιμής. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα πλήθη ψευδο-εισόδων που παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ A.



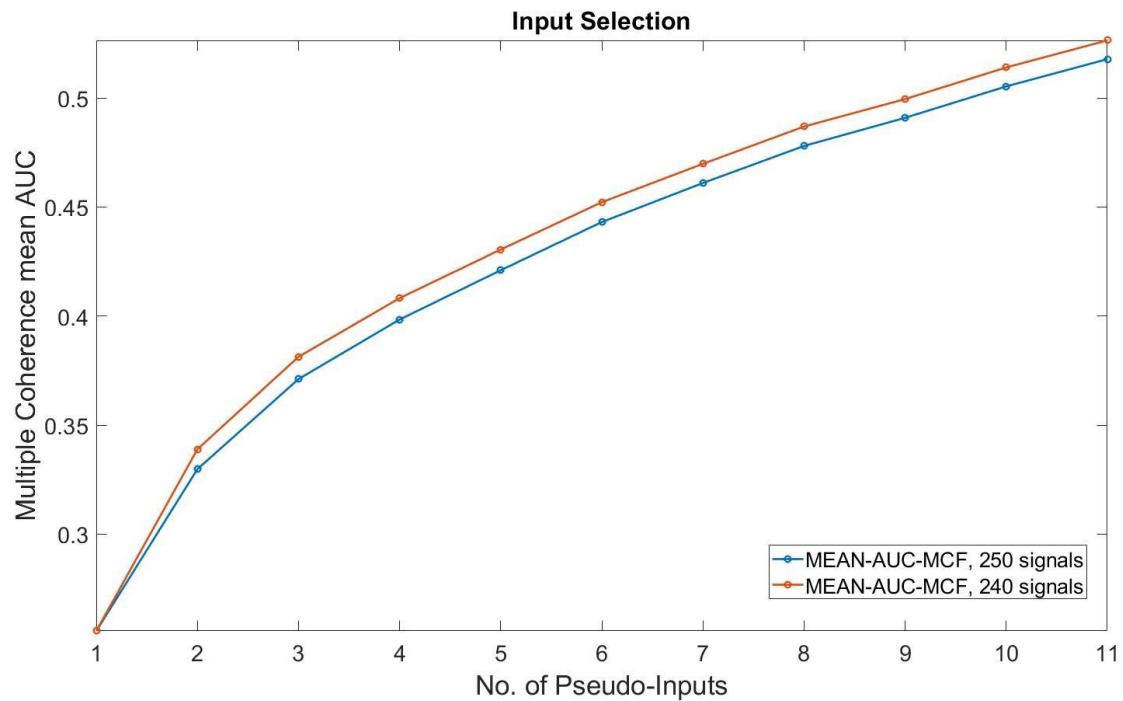
**Εικόνα 25.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 4 ψευδο-εισόδους.

Στον παρακάτω Πίνακα 13, παρουσιάζονται τα αρχικά και τελικά MEAN-AUC-MCF και MIN-AUC-MCF, για το αντίστοιχα πλήθη ψευδο-εισόδων. Παρατηρείται αύξηση περίπου 3% στα εκάστοτε τελικά MEAN-AUC-MCF. Επομένως, για την περαιτέρω μελέτη του προβλήματος επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα πρώτα 240 σετ μετρήσεων.

**Πίνακας 13.** Αποτελέσματα εμβαδού πολλαπλών εισόδων και μίας εξόδου συνάρτησης συνάφειας για τα πρώτα 240 σετ μετρήσεων. Στην 3<sup>η</sup> στήλη και 4<sup>η</sup> στήλη αναγράφεται το αρχικό και τελικό μέσο εμβαδόν, ενώ στην 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> το αρχικό και τελικό ελάχιστο εμβαδό, με τα αντίστοιχα σετ σημάτων που επιτεύχθηκε αυτό.

Pseudo-Inputs	Output	Αρχικό MEAN-AUC- MCF (%)	Τελικό MEAN-AUC- MCF (%)	Αρχικό MIN- AUC-MCF (%)	Τελικό MIN- AUC-MCF (%)
15,9	12	32.98	33.89	9.32 (245° σετ σημάτων)	31.20 (45° σετ σημάτων)
15,9,6	12	37.11	38.13	10.89 (245° σετ σημάτων)	35.20 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7	12	39.84	40.82	14.80 (245° σετ σημάτων)	37.72 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11	12	42.10	43.05	17.21 (245° σετ σημάτων)	40.11 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16	12	44.31	45.22	20.72 (245° σετ σημάτων)	41.64 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16,5	12	46.10	46.98	23.55 (244° σετ σημάτων)	43.85 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16,5,14	12	47.80	48.69	25.03 (244° σετ σημάτων)	45.42 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16,5,14,8	12	49.09	49.95	26.68 (244° σετ σημάτων)	46.83 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16,5,14,8,13	12	50.53	51.40	27.98 (244° σετ σημάτων)	48.39 (45° σετ σημάτων)
15,9,6,7,11, 16,5,14,8,13,10	12	51.78	52.64	29.28 (244° σετ σημάτων)	49.61 (45° σετ σημάτων)

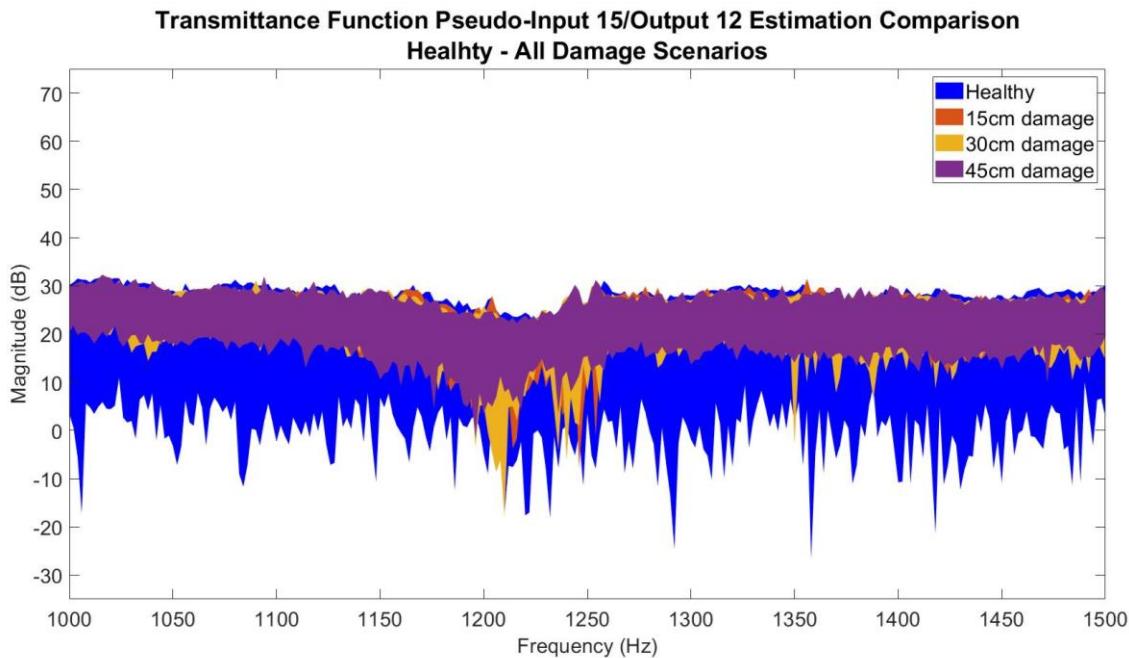
Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του αρχικού (μπλε γραμμή) και τελικού MEAN-AUC-MCF (πορτοκαλί γραμμή) για αυξανόμενο πλήθος εισόδων με τις αντίστοιχες 250 και 240 μετρήσεις.



Εικόνα 26. Αύξηση μέσου εμβαδού συνάρτησης συνάφειας ανά αυξανόμενο πλήθος εισόδων για 250 και 240 σήματα.

#### 6.4 Επίδραση των βλαβών στην Δυναμική της Κατασκευής

Στην [Εικόνα 27](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά για μία από τις ψευδο-εισόδους η επίδραση των τριών σεναρίων βλάβης στην δυναμική της κατασκευής, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους της εκτιμήτριας Welch από τον [Πίνακα 9](#). Η κατάσταση υγείας απαρτίζεται από 240 σήματα, ενώ τα τρία σενάρια βλάβης 15cm, 30cm και 45cm περιγράφονται από 50 σήματα έκαστο. Παρατηρείται πως, η υγιής δυναμική της κατασκευής επικαλύπτει εξ ολοκλήρου την δυναμική της υπό βλάβης κατασκευής, των εκάστοτε ρωγμών. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού πρόκειται για ρωγμές 15, 30 και 45 εκατοστών που καλύπτουν το 1,2%, 2.3% και 3.5% του συνολικού μήκους του πτερυγίου, αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι, οι βλάβες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και αναμένεται δυσκολία στην ανίχνευσή τους. Στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ A](#) παρουσιάζεται η επίδραση της δυναμικής της κατασκευής για όλες τις ψευδο-εισόδους.



**Εικόνα 27.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό βλάβη, μέσω εκτίμησης `tfeestimate`, για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 15 και 12, αντίστοιχα.



## 7. Αποτελέσματα Ανίχνευσης Βλαβών & Συζήτηση

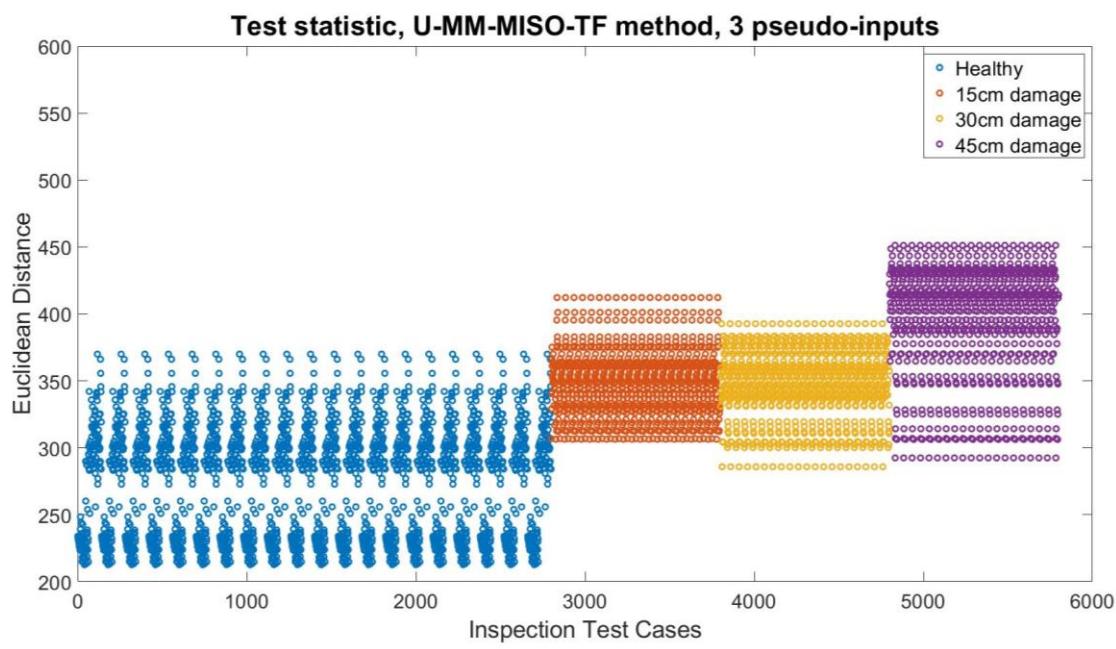
### 7.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

Κατά την φάση εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF, δημιουργείται η αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων που αποτελείται από την απόλυτη τιμή (Matlab function: abs) των Transmittance Functions για τις επιλεγμένες τιμές φασμάτων ισχύος. Για την εξέταση της ευρωστία της μεθόδου, πραγματοποιούνται 20 περιστροφές, οι οποίες μεταφράζονται ως 20 εναλλαγές μεταξύ των σημάτων υγείας της φάσης εκπαίδευσης με αυτά της φάσης ελέγχου (Tsikouras, 2020). Ο συγκεκριμένος αριθμός περιστροφών επιλέχθηκε για την σύγκριση της μεθοδολογίας της παρούσης εργασίας με την (Tsikouras, 2020). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκαν 20 αναπαραστάσεις MM, όπου η κάθε μία συγκρίνεται ξεχωριστά με τα εκάστοτε σήματα της φάσης ελέγχου. Στον παρακάτω [Πίνακα 14](#), παρουσιάζονται αναλυτικά οι λεπτομέρειες της μεθόδου.

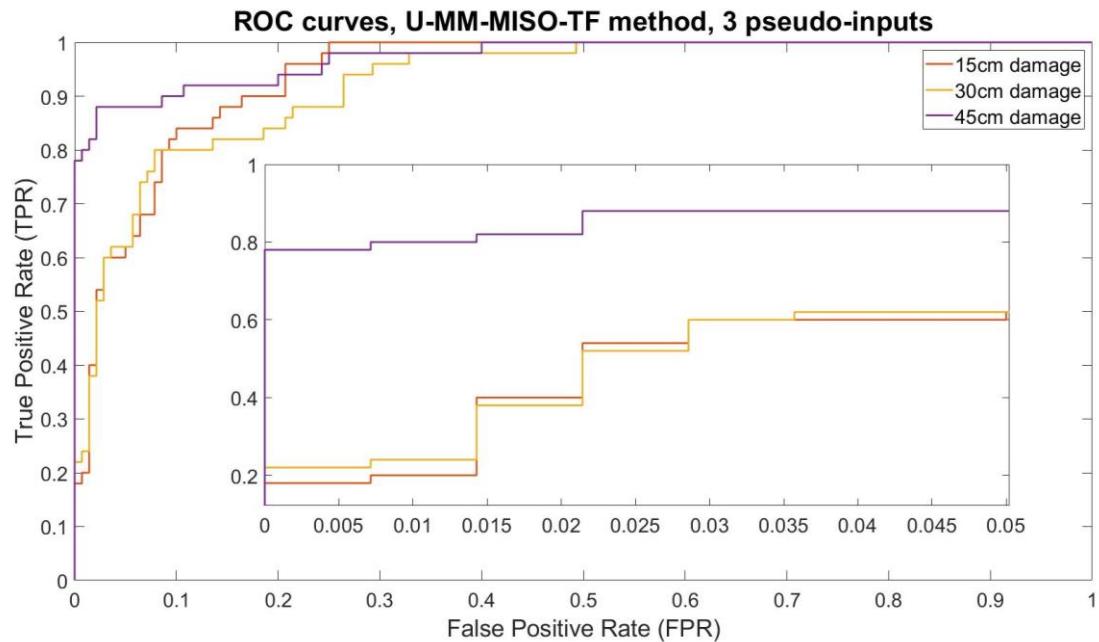
**Πίνακας 14.** Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανίχνευση βλαβών με την μέθοδο U-MM-MISO-TF.

Μέθοδος	Αριθμός Παραμέτρων	Στατιστική ποσότητα ελέγχου
U-MM-MISO-TF	251(τιμές φασμάτος)	Ελάχιστη απόσταση ευκλείδεια
Αριθμός περιστροφών: 20		
Διάσταση MM: 20		
Αριθμός σετ σημάτων εκάστοτε περιστροφής για την κατάσταση υγείας	Φάση Εκπαίδευσης: 100 Φάση Ελέγχου: 140	
Αριθμός σετ σημάτων εκάστοτε περιστροφής για τα τρία σενάρια βλάβης	Φάση Εκπαίδευσης: -- Φάση Ελέγχου: 50	

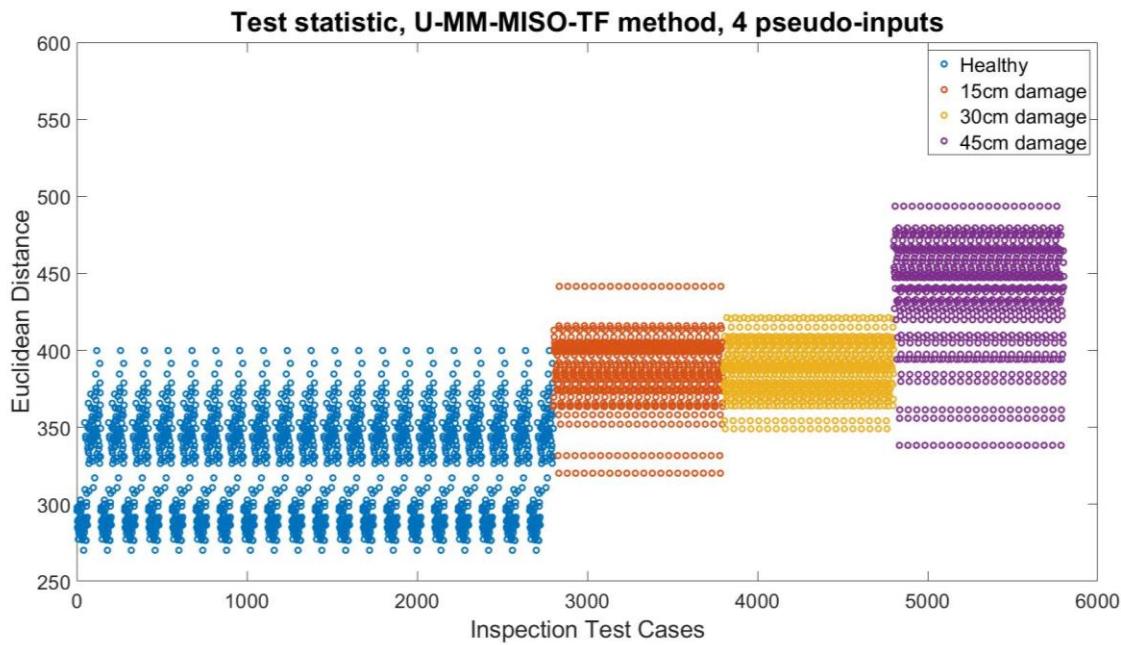
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου κρίνεται μέσω διαγράμματος διασποράς (scatter diagram) και καμπύλων ROC (Receiver Operating Characteristic). Στο διάγραμμα διασποράς απεικονίζονται, οι τιμές της χαρακτηριστικής ψευδο-στατιστικής ποσότητας της μεθόδου. Οι καμπύλες ROC (Fawcett, 2006) είναι απόρροια των στατιστικών ελέγχων, με τον κατακόρυφο άξονα και οριζόντιο άξονα να υποδεικνύουν τα Ποσοστά Σωστής Ανίχνευσης (True Positive Rate, TPR) και τα Ποσοστά Εσφαλμένης Ανίχνευσης (False Positive Rate, FPR), αντίστοιχα. Σημειώνεται πως, βέλτιστο αποτέλεσμα της παρούσης θεωρείται, όσο το δυνατόν, η αξιόπιστη ικανότητα ανίχνευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF σε συνδυασμό με το μικρό πλήθος ψευδο-εισόδων για την χρήση απλοποιημένου συστήματος SHM. Αυτό επιτυγχάνεται για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, όπως δικαιολογείται στο [Πίνακα 19](#) του [Παραρτήματος Α](#). Στις παρακάτω εικόνες ([Εικόνα 28](#), [Εικόνα 29](#), [Εικόνα 30](#), [Εικόνα 31](#)) παρουσιάζεται, ο διαχωρισμός των καταστάσεων – μία υγιής και τρείς υπό βλάβη - που επιτυγχάνεται από την μέθοδο U-MM-MISO-TF μέσω στατιστικού τεστ και η απόδοση ανίχνευσης των τριών σεναρίων βλάβης, για αριθμό ψευδο-εισόδων 3 και 4, αντίστοιχα. Τέλος, στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανίχνευσης για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων.



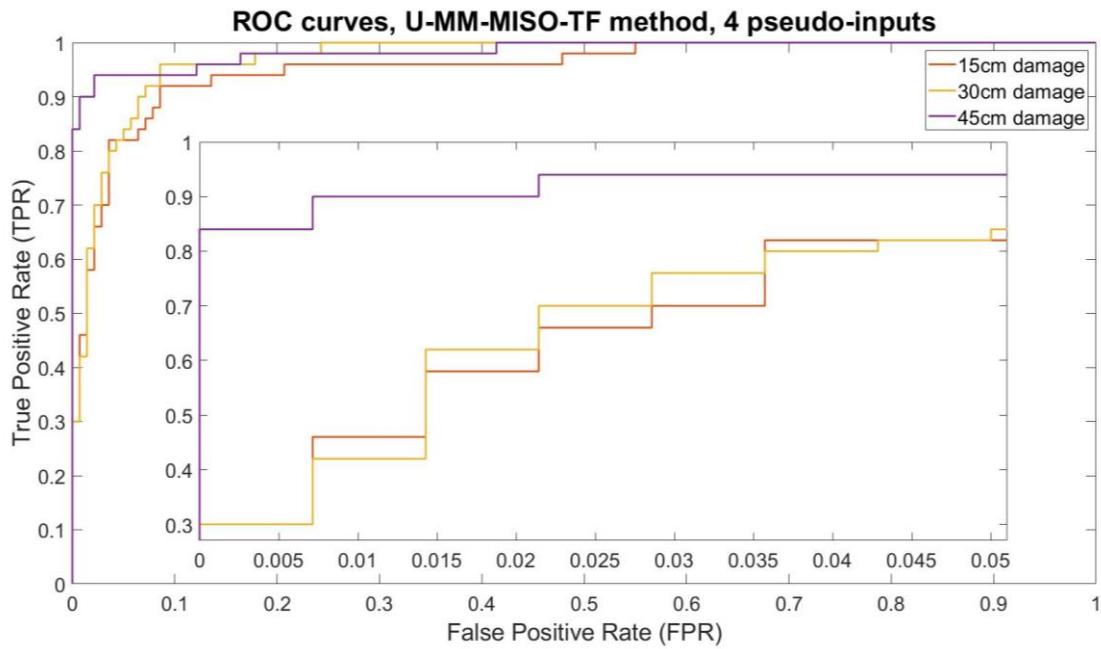
**Εικόνα 28.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια θλάβης με 3 ψευδο-εισόδους.



**Εικόνα 29.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια θλάβης με 3 ψευδο-εισόδους.

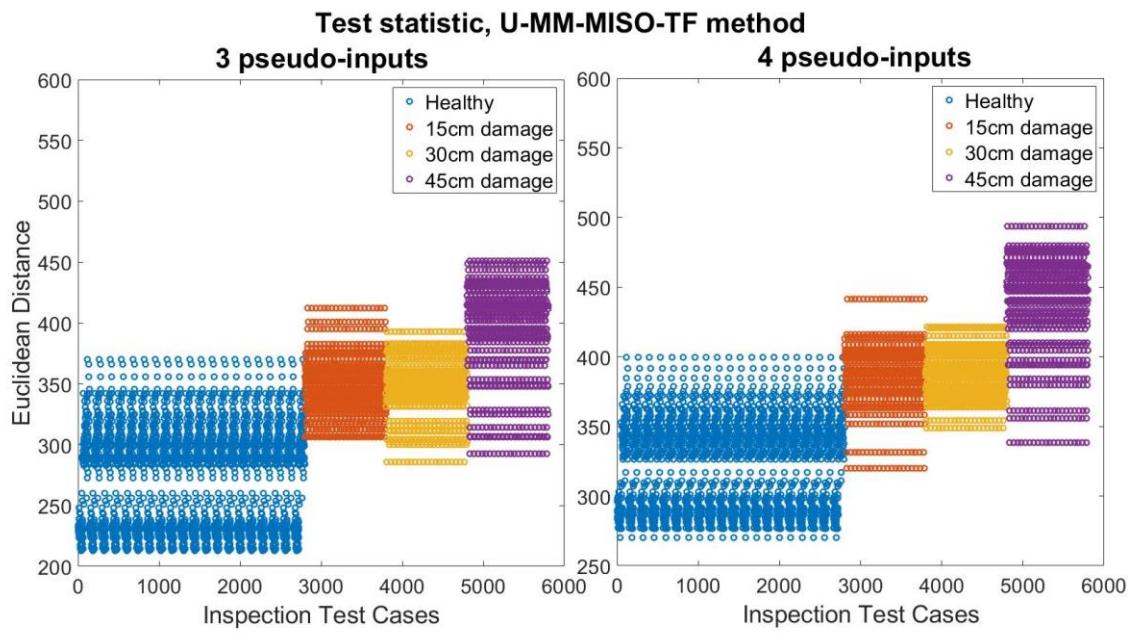


**Εικόνα 30.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 4 ψευδο-εισόδους.

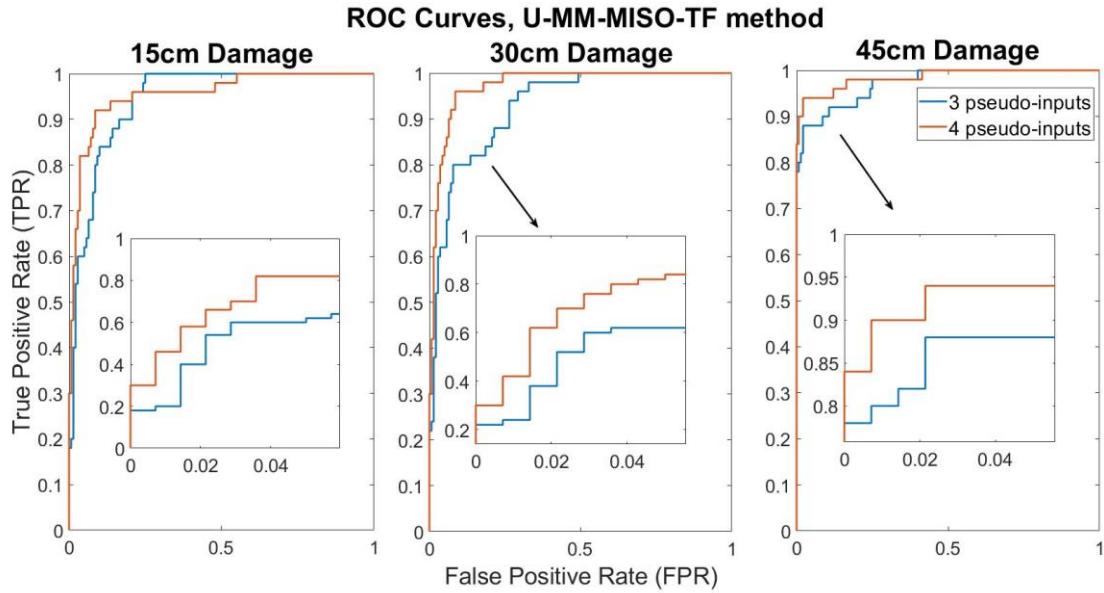


**Εικόνα 31.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης για 4 ψευδο-εισόδους.

Στις παρακάτω [Εικόνες 36](#) και [37](#) παρατίθενται συγκεντρωτικά τα παραπάνω διαγράμματα για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους.



**Εικόνα 32.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για 3 και 4 ψευδο-εισόδους, αριστερά και δεξιά της εικόνας αντίστοιχα.



**Εικόνα 33.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια θλάβης, με 3 και 4 ψευδο-εισόδους.

## 7.2 Συζήτηση και κριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στην συγκεκριμένη ενότητα, σχολιάζεται η επίτευξη των στόχων, αναφορικά με το κεφάλαιο **Σκοπός και Στόχοι**, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης.

Αρχικά, όσον αφορά τα διαγράμματα διασποράς -σε γενικά πλαίσια- τα αποτελέσματα φαίνεται να συνάδουν για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων. Συγκεκριμένα, για την βλάβη των 15 εκατοστών ο διαχωρισμός κρίνεται ανεπιτυχής, αφού σχεδόν οι μισές καταστάσεις της μικρότερης βλάβης επικαλύπτονται από την κατάσταση υγείας. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι μεγαλύτερες βλάβες, με την μεγαλύτερη να διαχωρίζεται ελαφρώς καλύτεραι συγκριτικά των μικρότερών της.

Σχετικά με τις καμπύλες ROC, ένα αυστηρό όριο για αποτελεσματική ανίχνευση βλάβης είθισται να θεωρείται για διάστημα εμπιστοσύνης άνω του 95% ( $TPR > 95\%$ ) για ποσοστό ψευδοσυναγερμών μικρότερο του 2% ( $FPR < 2\%$ ), ενώ γενικότερα αποσκοπείται να επιτευχθεί μεγάλο ποσοστό TPR για μικρό ποσοστό ψευδοσυναγερμών. Έτσι, παρουσιάζεται συγκεντρωτικός **Πίνακας 15**, για τις αντίστοιχες βλάβες για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2 και 5%, για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων. Συμπεραίνεται πως, τόσο για τρείς όσο και τέσσερις ψευδο-εισόδους καμία βλάβη δεν ανιχνεύεται με επιτυχία. Μόνο η μεγαλύτερη βλάβη των 45 εκατοστών προσεγγίζεται μερικώς ικανοποιητικά, αφού τα ποσοστά σωστής ανίχνευσης ανέρχονται άνω του 90% για τα εκάστοτε ποσοστά ψευδο-συναγερμών. Συνολικά, η απόδοση ανίχνευσης των τεσσάρων ψευδο-εισόδων βελτιώνεται συγκριτικά των τριών, ωστόσο καμία από τις βλάβες δεν ανιχνεύεται αξιόπιστα.

**Πίνακας 15.** Ποσοστά επιτυχημένης ανίχνευσης για 3 και 4 ψευδο-εισόδους με την μέθοδο U-MM-MISO-TF. Τα αποτελέσματα με έντονα γράμματα δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα ανίχνευσης μεταξύ σύγκρισης των δύο περιπτώσεων ψευδο-εισόδων.

Αριθμός Ψευδο-εισόδων	Βλάβες	FPR 2%	FPR 5%
3	15 cm	40% TPR	62% TPR
	30 cm	38% TPR	62% TPR
	45 cm	82% TPR	88% TPR
4	15 cm	<b>58% TPR</b>	<b>82% TPR</b>
	30 cm	<b>62% TPR</b>	<b>84% TPR</b>
	45 cm	<b>90% TPR</b>	<b>94% TPR</b>

Όπως έχει προαναφερθεί, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό κανονικές λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες σε διάρκεια τριών μηνών, ενώ στα σήματα εμπεριέχεται έντονη μη μετρούμενη αβεβαιότητα. Επί τη βάσει των ανώτερων αποτελεσμάτων, ο σκοπός και στόχος της εργασίας για αξιόπιστη και αποτελεσματική ανίχνευση βλαβών, αντίστοιχα, δεν επετεύχθη για τα εκάστοτε σενάρια βλάβης.

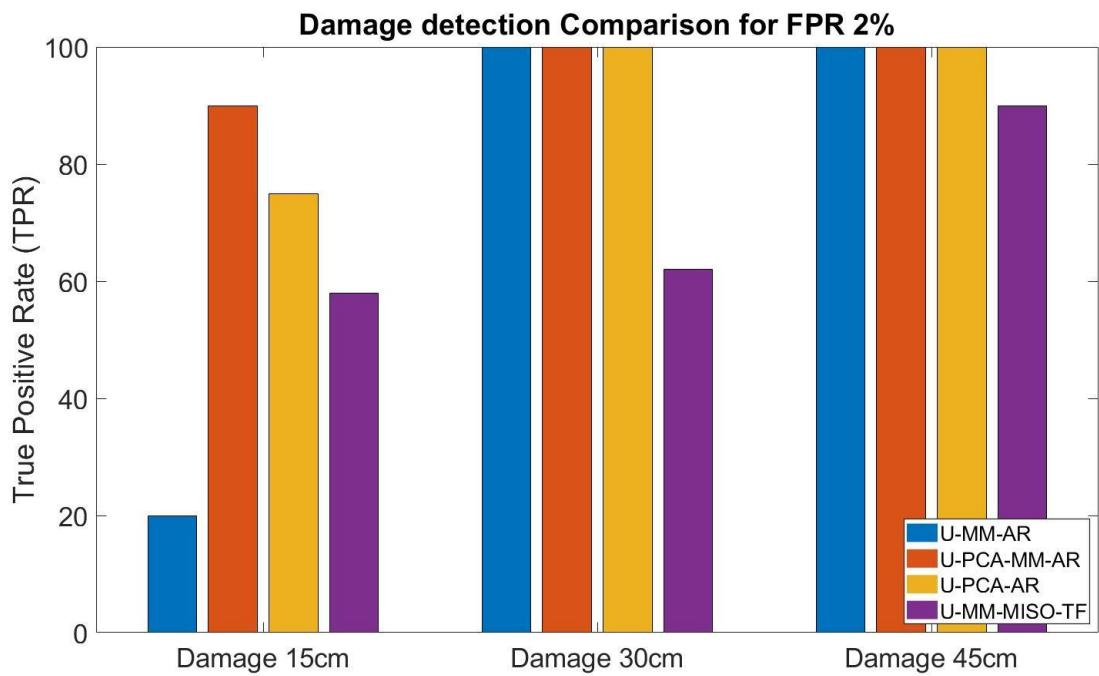
### 7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF με προγενέστερες εναλλακτικές στοχαστικές μεθόδου (Tsikouras, 2020)

Στην παρούσα εργασία, έγινε χρήση περισσότερων αισθητηρίων και πραγματοποιήθηκε διαφορετική προ-επεξεργασία σημάτων με την εργασία (Tsikouras, 2020). Στον παρακάτω Πίνακα 16 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι διαφορές των δύο εργασιών.

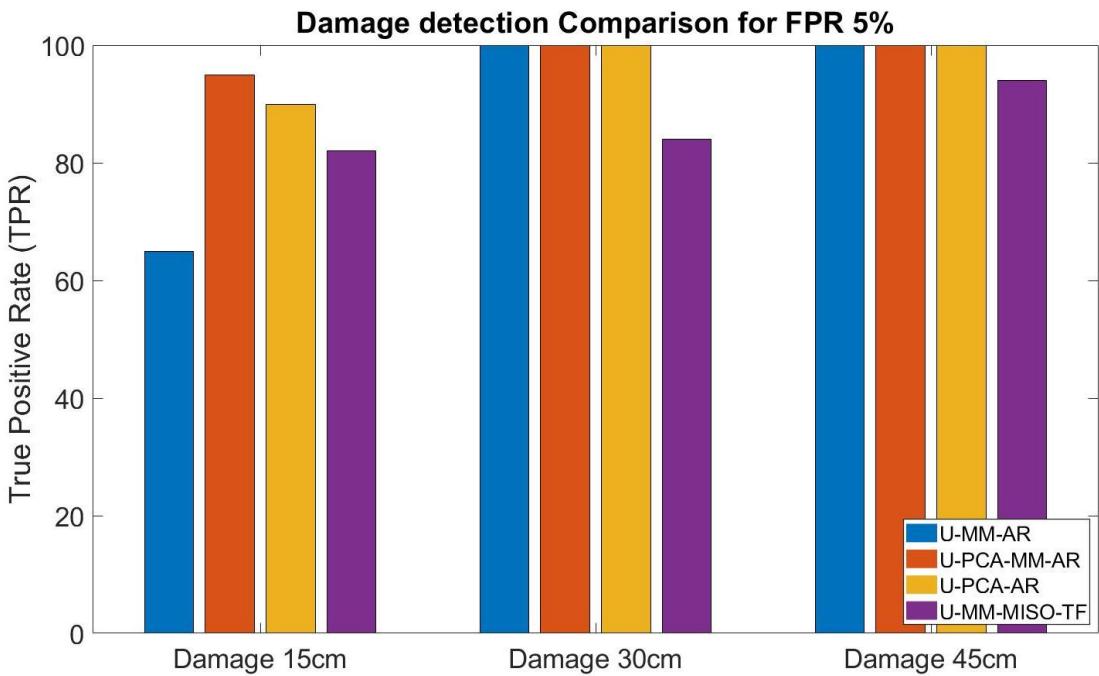
**Πίνακας 16.** Διαφορές παρούσης Σπουδαστικής Εργασίας με (Tsikouras, 2020).

Διαφορές	(Tsikouras, 2020)	Παρούσα Σπουδαστική Εργασία
Προ-Επεξεργασία Σημάτων	Βήμα 1 Αφαίρεση με την μέση τιμή και κανονικοποίηση	Απομόνωση κρουστικής απόκρισης
	Βήμα 2 Απομόνωση κρουστικής απόκρισης	Φιλτράρισμα
	Βήμα 3 Φιλτράρισμα	Επαναδειγματοληψία
	Βήμα 4 Επαναδειγματοληψία	Αφαίρεση με την μέση τιμή και κανονικοποίηση
Αισθητήρια	1	4 και 5
Αρχικός Αριθμός Σημάτων	250	250
Τελικός Αριθμός Σημάτων	250	240

Παρακάτω, παρουσιάζονται σε μορφή bar diagrams (Εικόνα 34, Εικόνα 35) τα αποτελέσματα των παραμετρικών μεθόδων U-MM-AR, U-PCA-AR, U-PCA-MM-AR (Tsikouras, 2020) και U-MM-MISO-TF για 4 ψευδο-εισόδους χωρίς την χρήση ενεργοποιητή. Η μη παραμετρική μέθοδος U-MM-PSD (Tsikouras, 2020) είναι πλήρως αναποτελεσματική και δεν παρουσιάζεται στην παρούσα. Όλες οι παραμετρικές μέθοδοι πλην της U-MM-AR, υπερέχουν της μη παραμετρικής μεθόδου της παρούσης. Παρατηρείται, πως η U-MM-MISO-TF αποδίδει καλύτερη ανίχνευση για την μικρότερη βλάβη συγκριτικά με της U-MM-AR, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται αξιόπιστη και αποτελεσματική ανίχνευση. Ωστόσο για την ίδια βλάβη, οι μέθοδοι U-MM-AR, U-PCA-MM-AR και U-PCA-AR επιτυγχάνουν 100% ανίχνευση και κατ' επέκταση αποδίδουν καλύτερα ποσοστά σωστής ανίχνευσης συγκριτικά της U-MM-MISO-TF.



**Εικόνα 34.** Σύγκριση μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν στο ίδιο πρόβλημα χωρίς χρήση ενεργοποιητή για ποσοστό ψευδο-συναγερμών 2%.



**Εικόνα 35.** Σύγκριση μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν στο ίδιο πρόβλημα χωρίς χρήση ενεργοποιητή για ποσοστό ψευδο-συναγερμών 5%.



## 8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στον τελευταίο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και επιτεύγματα της παρούσης σπουδαστικής εργασίας ως εξής:

1. Η απόδοση ανίχνευσης της μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF παρουσιάστηκε αναποτελεσματική για τα τρία σενάρια βλάβης και τις τρείς ψευδο-εισόδους.
2. Η απόδοση ανίχνευσης της μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF των τεσσάρων ψευδο-εισόδων παρουσιάστηκε αναποτελεσματική για τις ρωγμές των 15 και 30 εκατοστών και μερικώς επιτυχής για την μεγαλύτερη βλάβη.
3. Η μέθοδος U-MM-MISO-TF επηρεάζεται σημαντικά από την εισαχθείσα αβεβαιότητα όσον αφορά την ανίχνευση βλάβης των 15 εκατοστών.

Υπενθυμίζοντας, τις κύριες παραδοχές του προβλήματος, πως για τα εκάστοτε σήματα οι περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες παραμένουν σταθερές και πως στα πειράματα δεν ισχύουν ταυτόχρονα δύο βλάβες, παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Εφαρμογή των μεθοδολογιών MISO-TF και MIMO-TF με χρήση περισσότερων ή/και διαφορετικών αισθητηρίων τόσο στην ψευδο-είσοδο όσο και στην έξοδο της Συνάρτηση Μετάδοσης, με και χωρίς χρήση ενεργοποιητή, για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των βλαβών.
- Βελτίωση ανίχνευσης με παραμετρικά μοντέλα με σκοπό μείωσης αριθμών παραμέτρων.

## Βιβλιογραφία

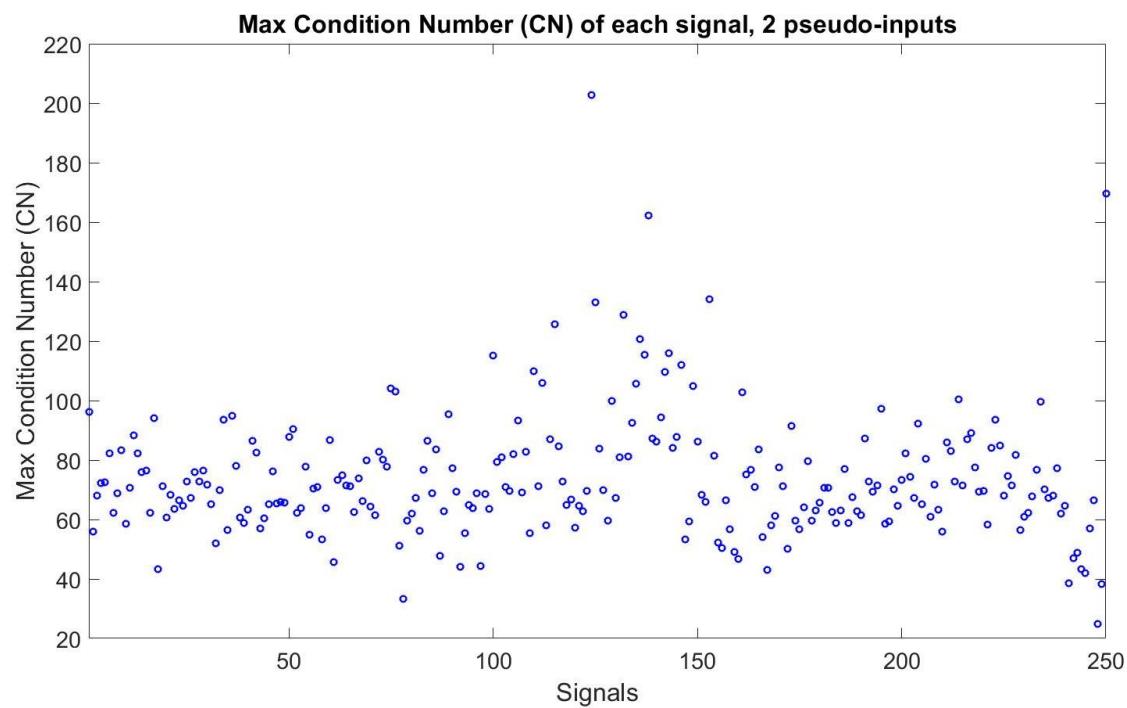
- Avendaño-Valencia, L. D., & Fassois, S. D. (2014). Stationary and non-stationary random vibration modelling and analysis for an operating wind turbine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 47, (pp. 263–285).
- Avendaño-Valencia, L. D., Chatzi, E. N., & Fassois, S. D. (2017). In-Operation Wind Turbine Modal Analysis via LPV-VAR Modeling. *Rotating Machinery, Hybrid Test Methods, Vibro-Acoustics & Laser Vibrometry*, 8, (pp. 47–57). Springer International Publishing.
- Bendat, J. S. (1986). *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. New York: Wiley: Vic Barnett, J. Stuart Hunter, Jozef L. Teugels.
- Bull, T., Ulriksen, M. D., & Tcherniak, D. (2018). The effect of environmental and operational variabilities on damage detection in wind turbine blades. *9th European Workshop on Structural Health Monitoring*, (pp. 84).
- Cava, D. G., Avendaño-Valencia, L. D., Movsessian, A., Roberts, C., & Tcherniak, D. (2021). On Explicit and Implicit Procedures to Mitigate Environmental and Operational Variabilities in Data-Driven Structural Health Monitoring. *Structural Integrity* (pp. 309–330). Springer International Publishing.
- Doliński, Ł., Krawczuk, M., & Żak, A. (2018). Detection of Delamination in Laminate Wind Turbine Blades Using One-Dimensional Wavelet Analysis of Modal Responses. *Shock and Vibration*, 2018, (pp. 1–15).
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365, (pp. 303–315).
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27, (pp. 861–874).
- García, D., & Tcherniak, D. (2019). An experimental study on the data-driven structural health monitoring of large wind turbine blades using a single accelerometer and actuator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 127, (pp. 102–119).
- Garcia, D., Tcherniak, D., & Branner, K. (2018). Virtual prototyping of an actuator-based structural health monitoring system of wind turbine blades. *28th International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA 2018, Including the 5th International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics, USD*.
- González, A. G., & Fassois, S. D. (2014). Excitation and vibration response based damage diagnosis in wind turbine blades: an exploratory study. *Proceedings of the ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Leuven.
- González, A. G., & Fassois, S. D. (2016). A supervised vibration-based statistical methodology for damage detection under varying environmental conditions & its laboratory assessment with a scale wind turbine blade. *Journal of Sound and Vibration*, 366, (pp. 484–500).

- González, A. G., Rodríguez, J., Sagartzazu, X., Schumacher, A., & Isasa, I. (2010). Multiple coherence method in time domain for the analysis of the transmission paths of noise and vibrations with non stationary signals. *Proceedings of ISMA 2010*.
- Mantas, P. (2020). *Fault Detection for In-Motion Vehicle Suspension Systems Under Uncertainty via Vibration Signals and Transmittance Function*. Diploma Thesis, University of Patras, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, Patras.
- Movsessian, A., Cava, D. G., & Tcherniak, D. (2021). An artificial neural network methodology for damage detection: Demonstration on an operating wind turbine blade. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, (pp. 107766).
- Ou, Y., Chatzi, E. N., Dertimanis, V. K., & Spiridonakos, M. D. (2016). Vibration-based experimental damage detection of a small-scale wind turbine blade. *Structural Health Monitoring*, 16, (pp. 79–96).
- Panagiotopoulos, A. I., Tcherniak, D., & Fassois, S. D. (2021). Damage Detection on an Operating Wind Turbine Blade via a Single Vibration Sensor: A Feasibility Study. *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 405–414). Springer International Publishing.
- Panagiotopoulos, A. I., Tcherniak, D., & Fassois, S. D. (2022). Damage Detection on the Blade of an Operating Wind Turbine via a Single Vibration Sensor and Statistical Time Series Methods: Exploring the performance limits of robust methods. *Structural Health Monitoring*.
- Roberts, C., Cava, D. G., & Avendaño-Valecia, L. D. (2021). Understanding the Influence of Environmental and Operational Variability on Wind Turbine Blade Monitoring. *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 109–118). Springer International Publishing.
- Saramantas I.E., S. J. (2022). *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.
- Tcherniak, D., & Mølgaard, L. L. (2017). Active vibration-based structural health monitoring system for wind turbine blade: Demonstration on an operating Vestas V27 wind turbine. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 16, (pp. 536–550).
- Tsikouras, A. (2020). *Multiple Model (MM) Based Damage Detection on an Operating Wind Turbine Blade via a Single Natural Excitation Random Vibration Signal*. Diploma Thesis, University of Patras, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, Patras.
- Ulriksen, M. D., Tcherniak, D., & Damkilde, L. (2015). Damage detection in an operating Vestas V27 wind turbine blade by use of outlier analysis. *2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings* (pp. 50-55). Trento: IEEE.
- Ulriksen, M. D., Tcherniak, D., Kirkegaard, P. H., & Damkilde, L. (2016). Operational modal analysis and wavelet transformation for damage identification in wind turbine blades. *Structural Health Monitoring*, 15, (pp. 381–388).

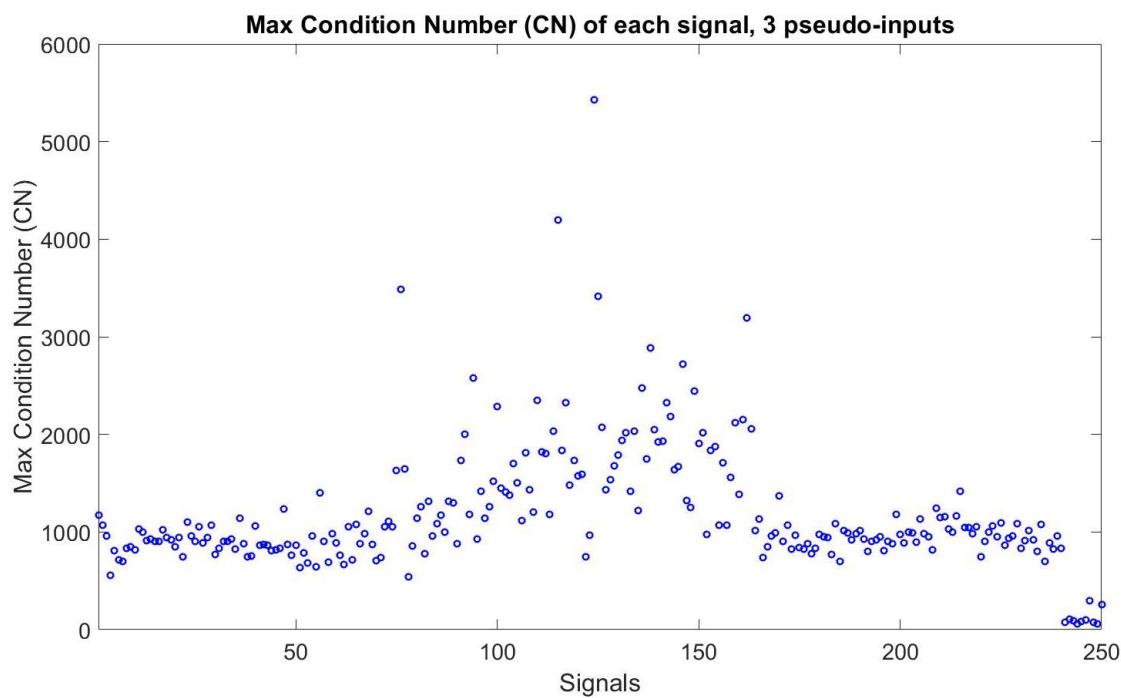
Vamvoudakis-Stefanou, K. J., Sakellariou, J. S., & Fassois, S. D. (2018). Vibration-based damage detection for a population of nominally identical structures: unsupervised Multiple Model (MM) statistical time series type methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, (pp. 149–171).

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πρόσθετα Αποτελέσματα

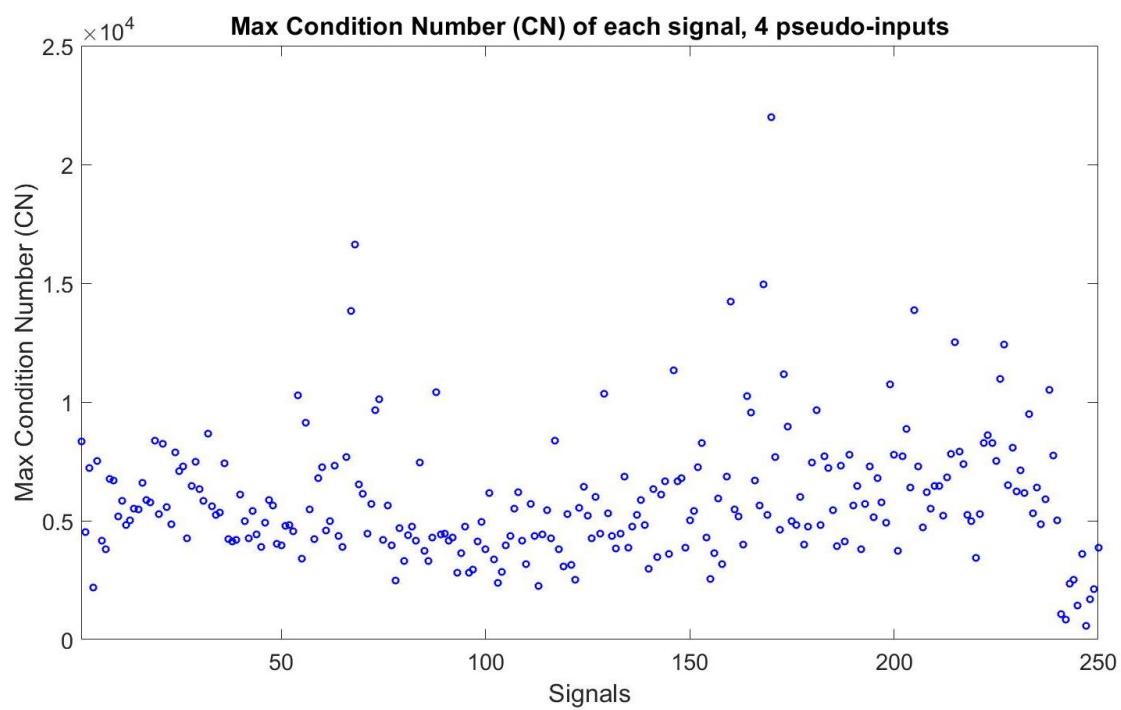
Δίνεται το μέγιστο CN για κάθε σετ σημάτων και το αντίστοιχο πλήθος ψευδο-εισόδων.



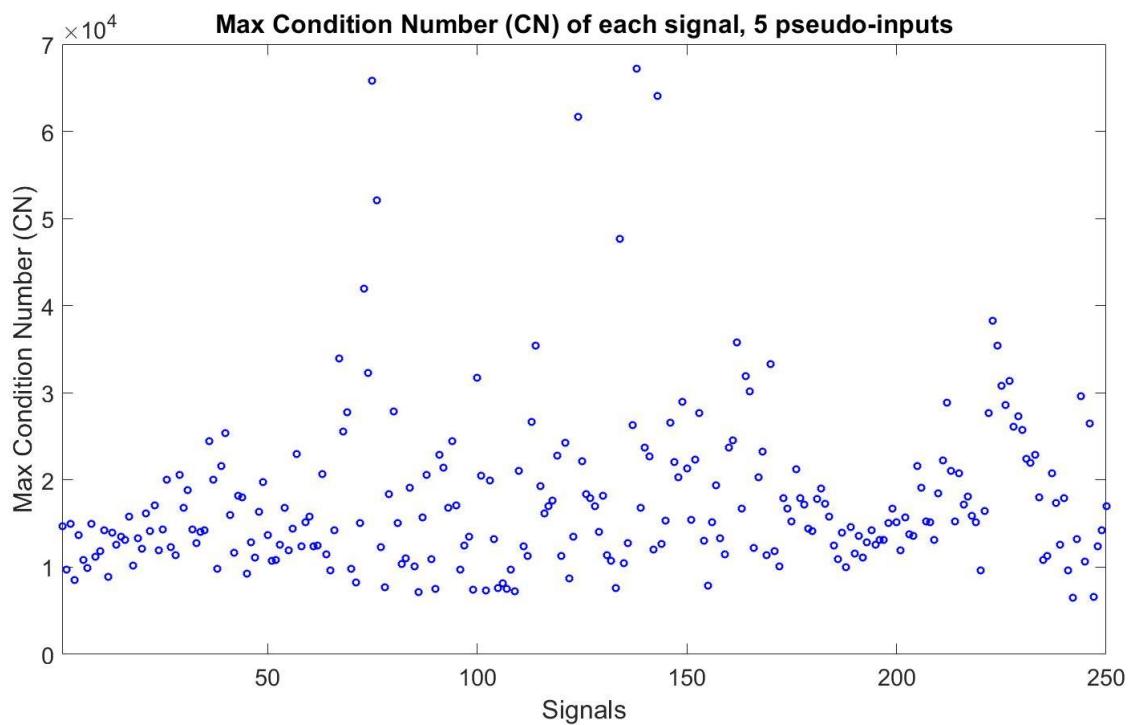
**Εικόνα 36.** Μέγιστο Condition Number (CN) 2 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.



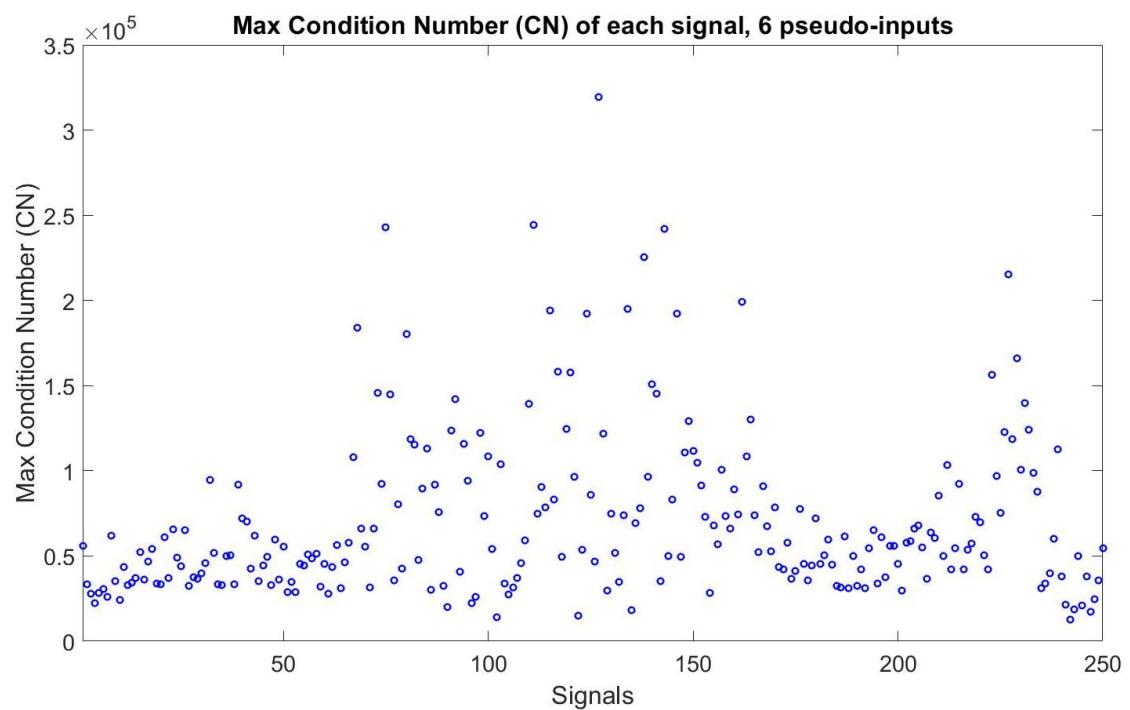
*Εικόνα 37. Μέγιστο Condition Number (CN) 3 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



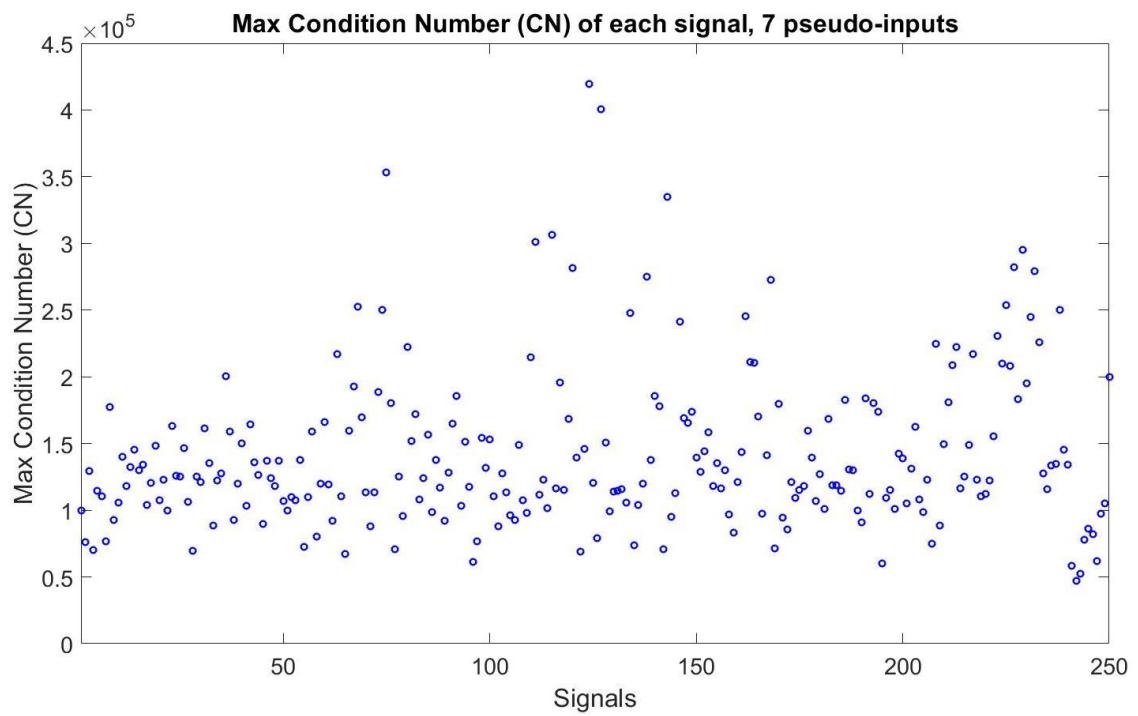
*Εικόνα 38. Μέγιστο Condition Number (CN) 4 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



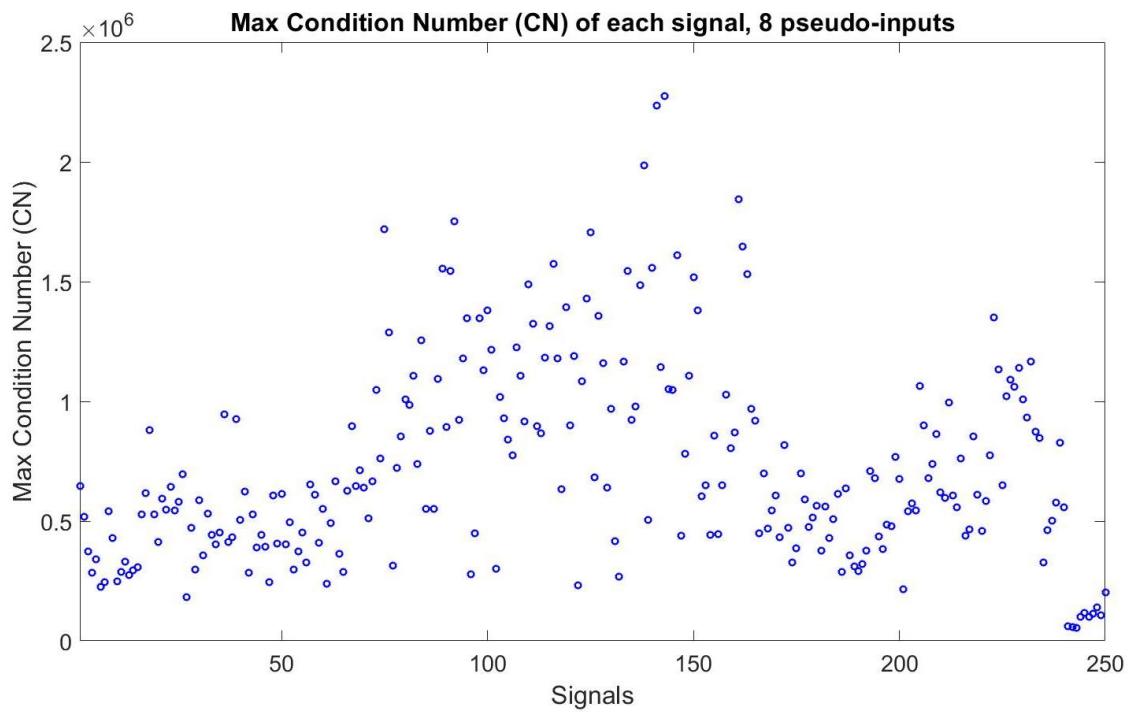
*Εικόνα 39. Μέγιστο Condition Number (CN) 5 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



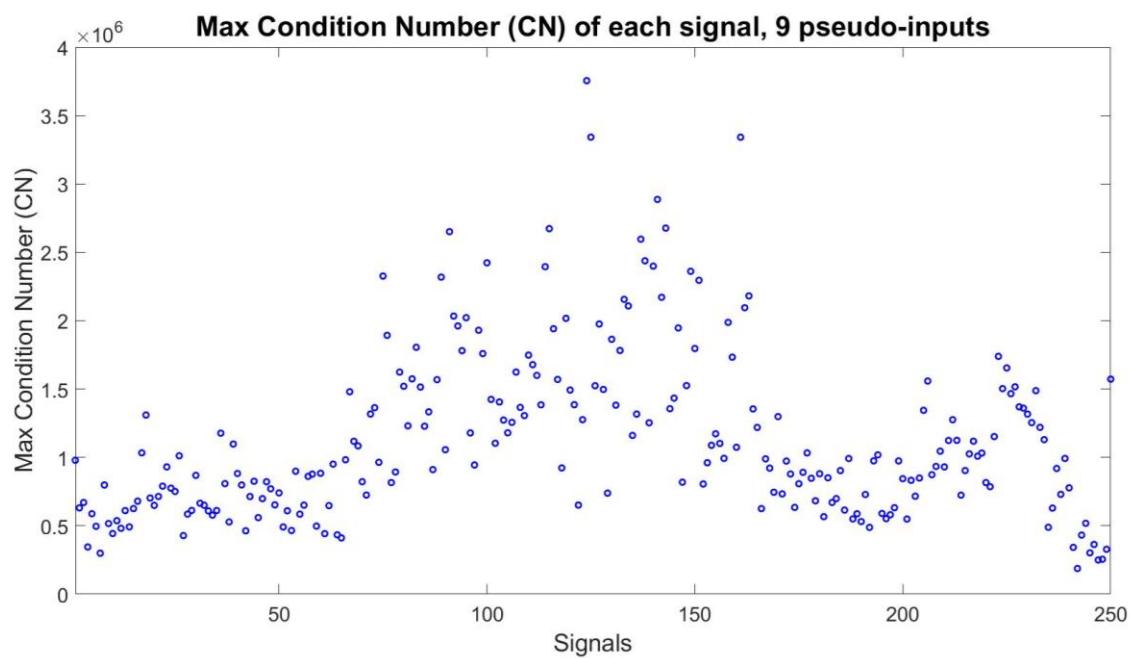
*Εικόνα 40. Μέγιστο Condition Number (CN) 6 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



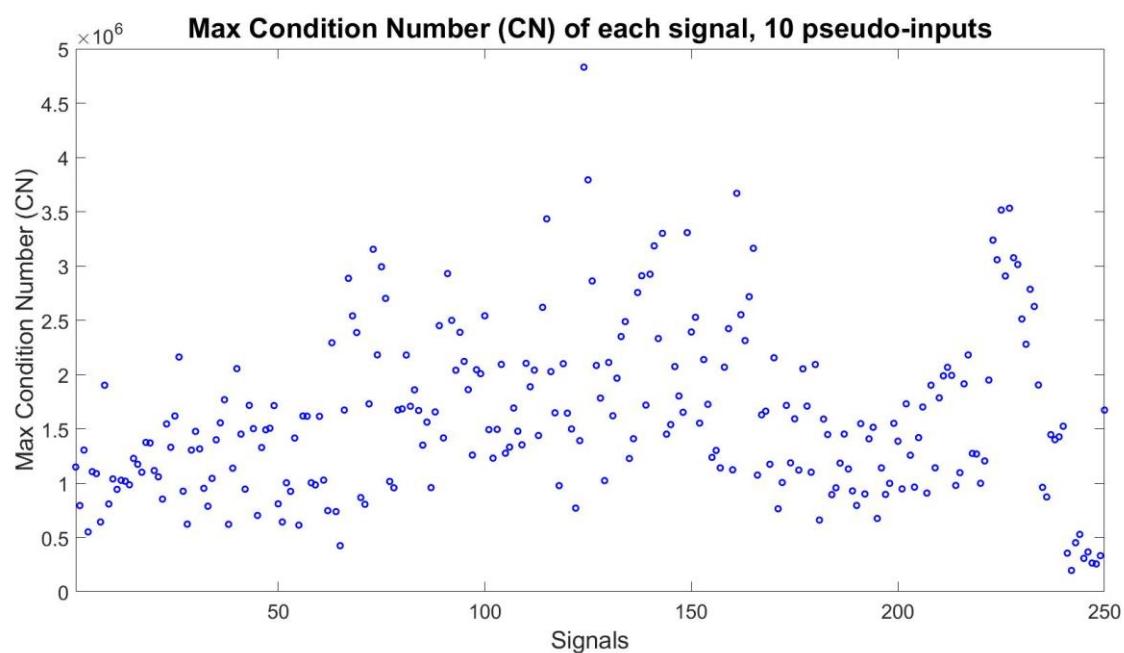
*Εικόνα 41. Μέγιστο Condition Number (CN) 7 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



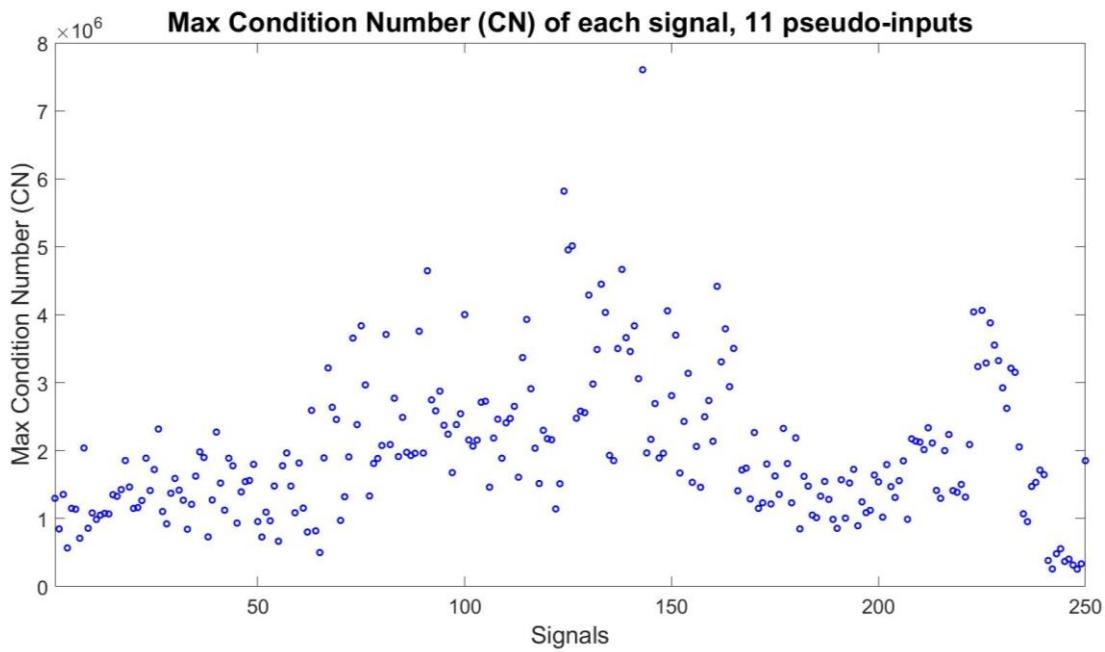
*Εικόνα 42. Μέγιστο Condition Number (CN) 8 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*



*Εικόνα 43. Μέγιστο Condition Number (CN) 9 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*

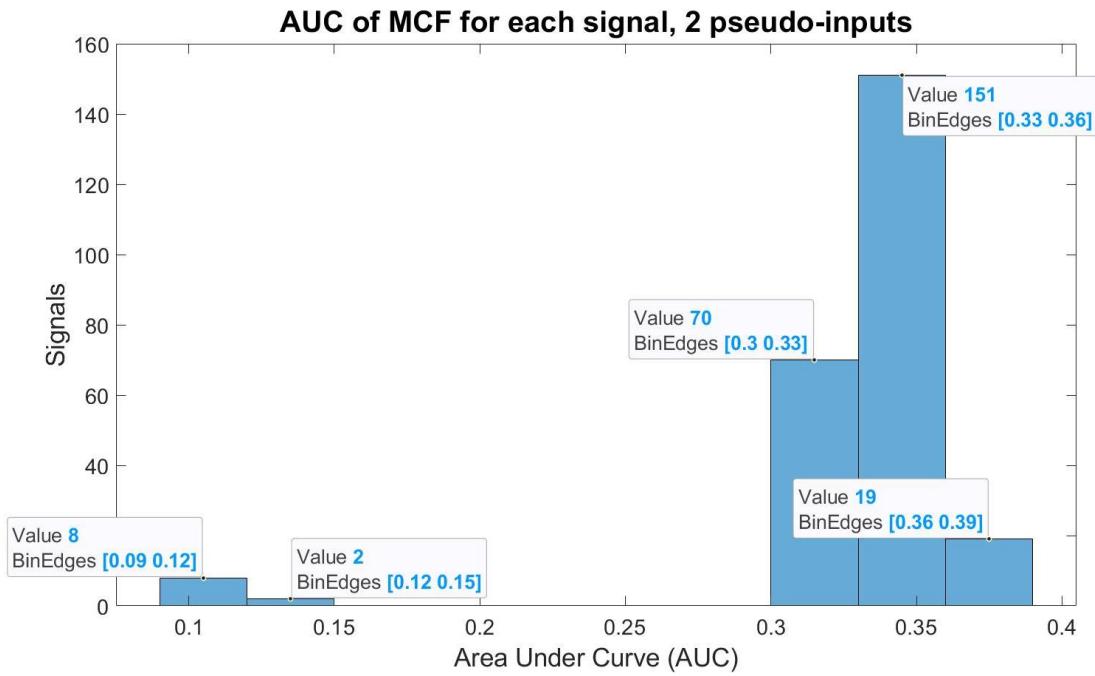


*Εικόνα 44. Μέγιστο Condition Number (CN) 10 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.*

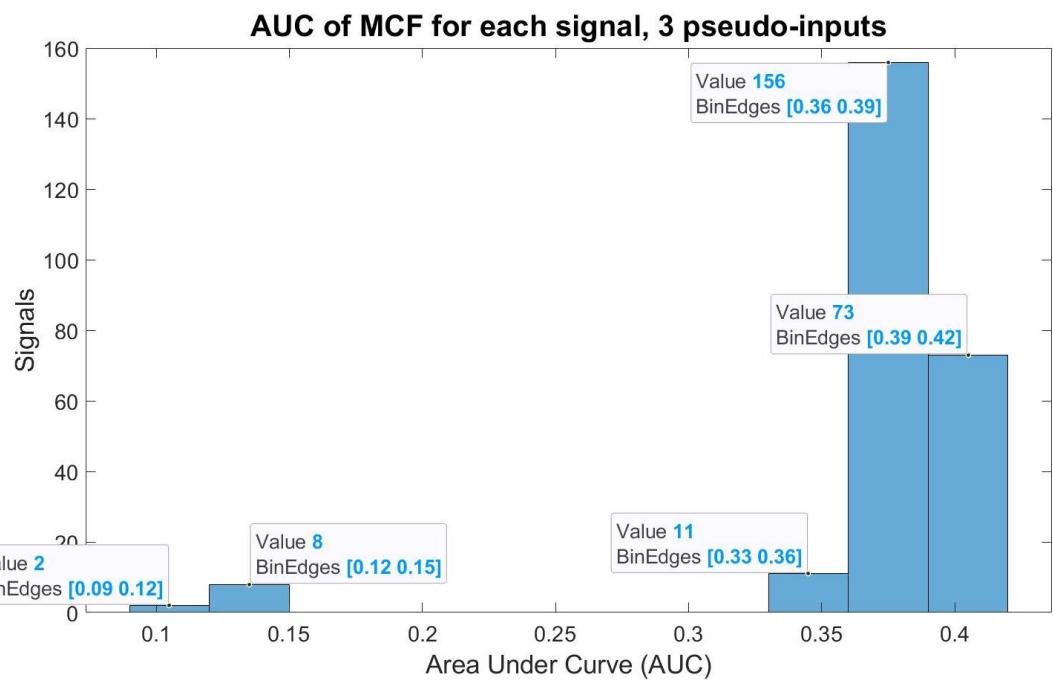


**Εικόνα 45.** Μέγιστο Condition Number (CN) 11 ψευδο-εισόδων για τα εκάστοτε σήματα.

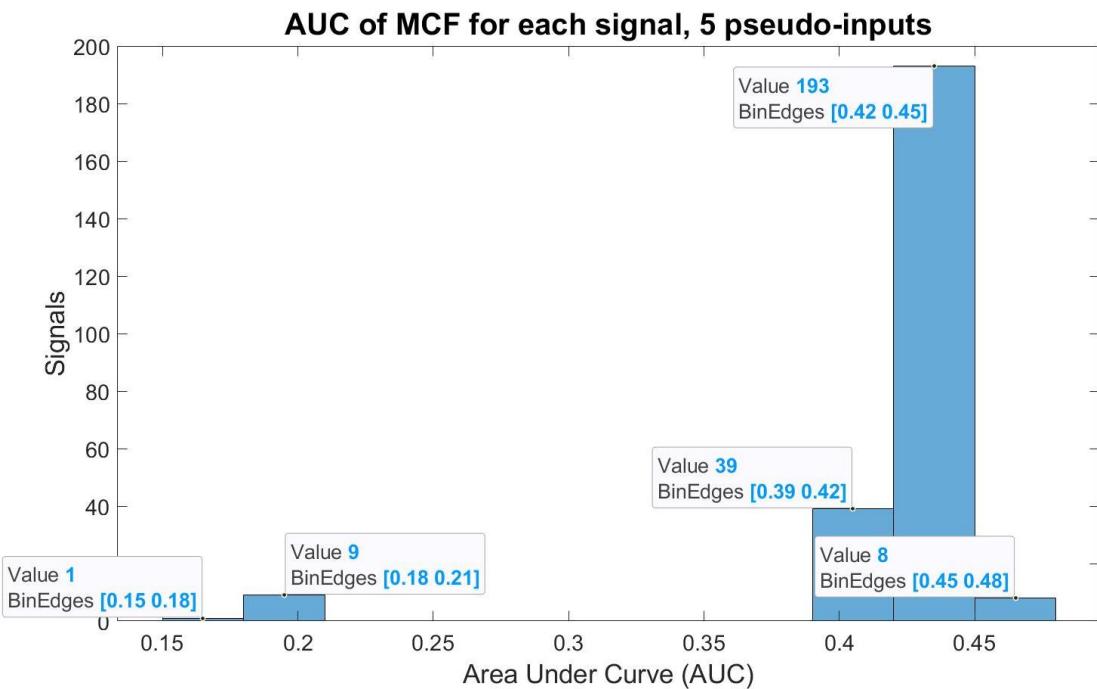
Δίνονται τα AUC των MCF για τα εκάστοτε σετ σημάτων από 3 έως και 11 ψευδο-εισόδους. Παρατηρείται πως, για το εκάστοτε πλήθος ψευδο-εισόδων, 10 συγκεκριμένα σετ σημάτων παρουσιάζουν τιμές πολύ χαμηλότερες του MEAN-AUC-MCF.



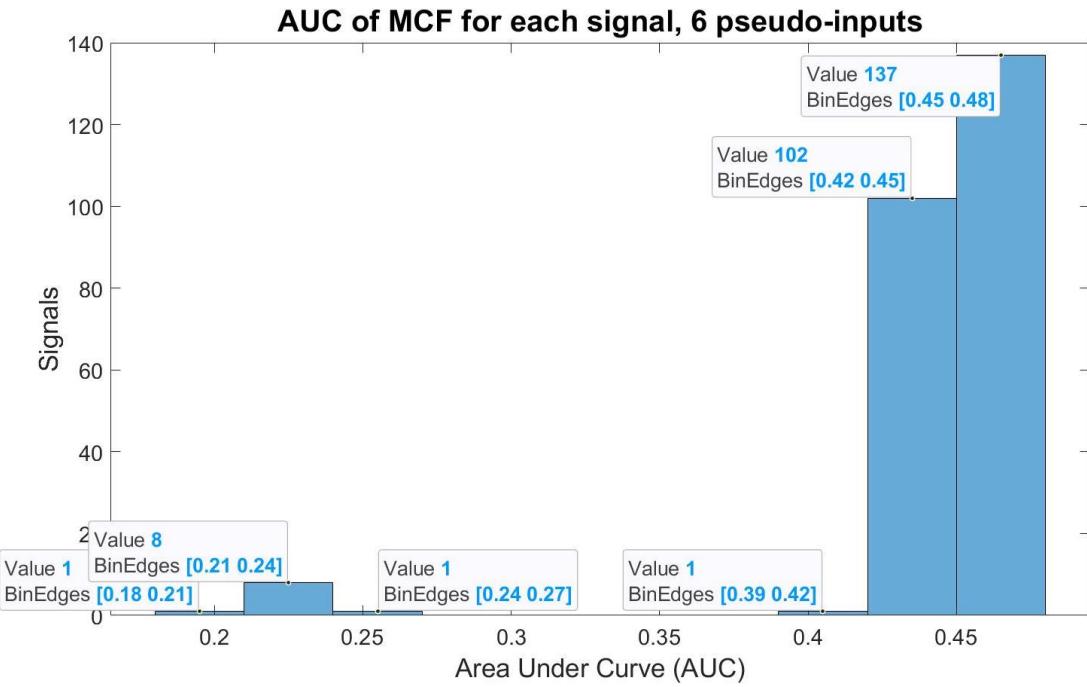
**Εικόνα 46.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 2 ψευδο-εισόδους.



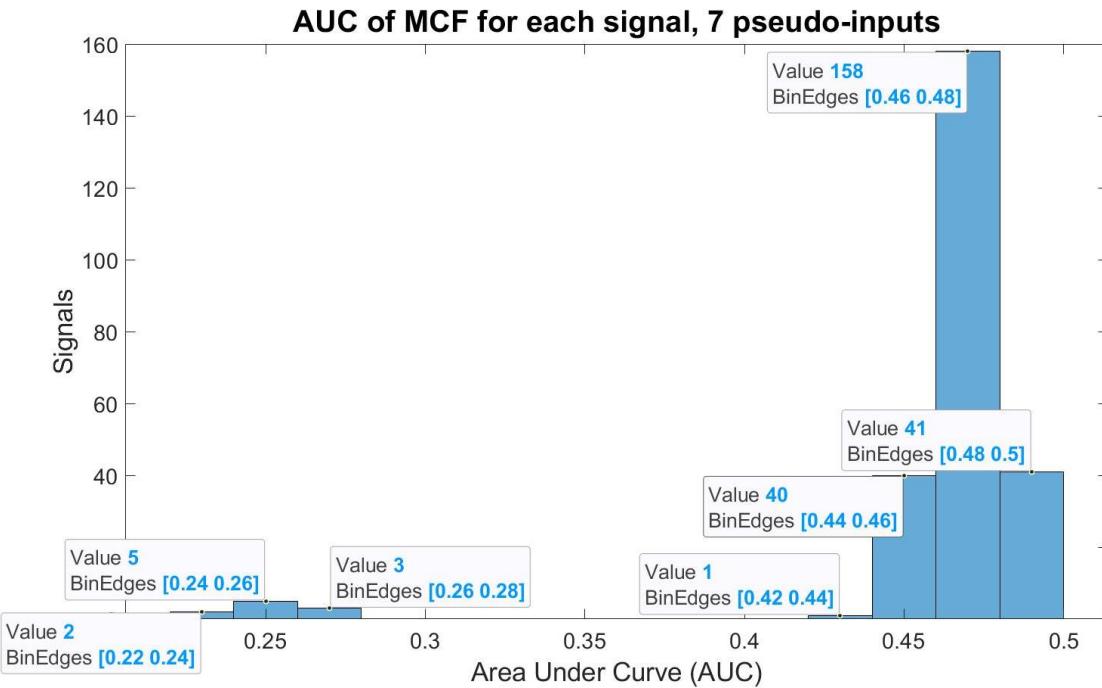
**Εικόνα 47.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 3 ψευδο-εισόδους.



**Εικόνα 48.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 5 ψευδο-εισόδους.

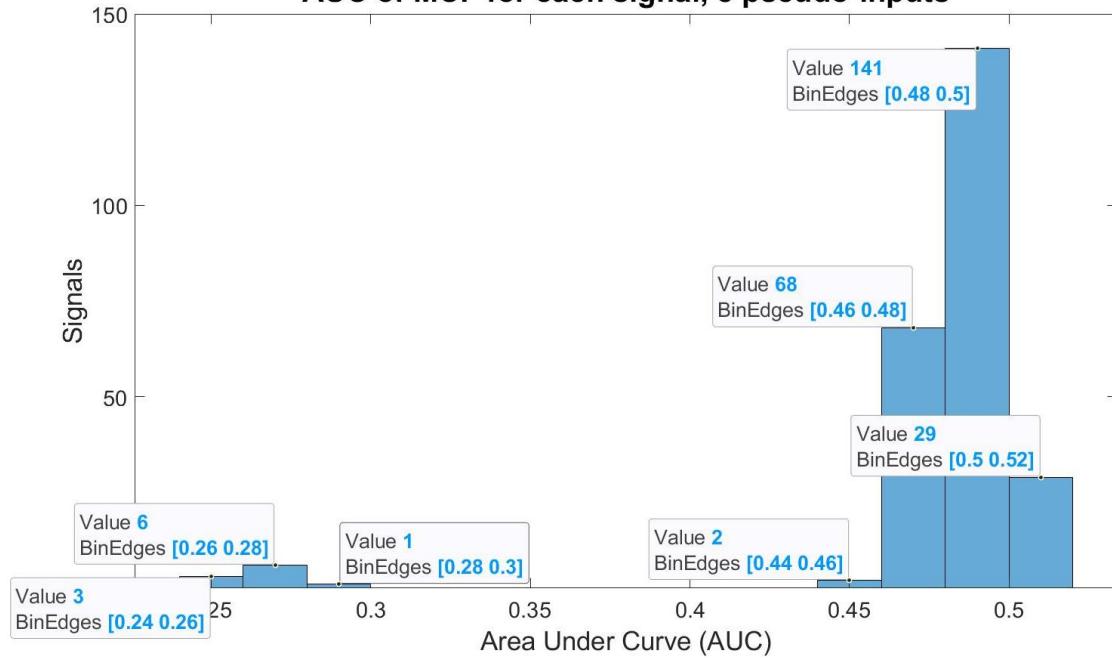


**Εικόνα 49.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 6 ψευδο-εισόδους.



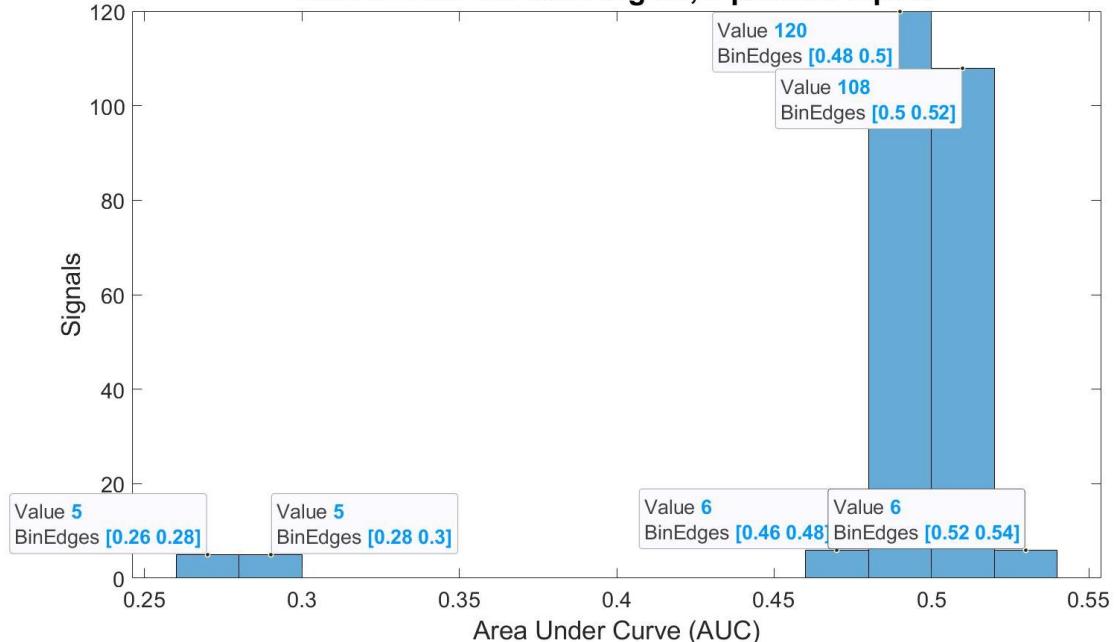
**Εικόνα 50.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 7 ψευδο-εισόδους.

**AUC of MCF for each signal, 8 pseudo-inputs**

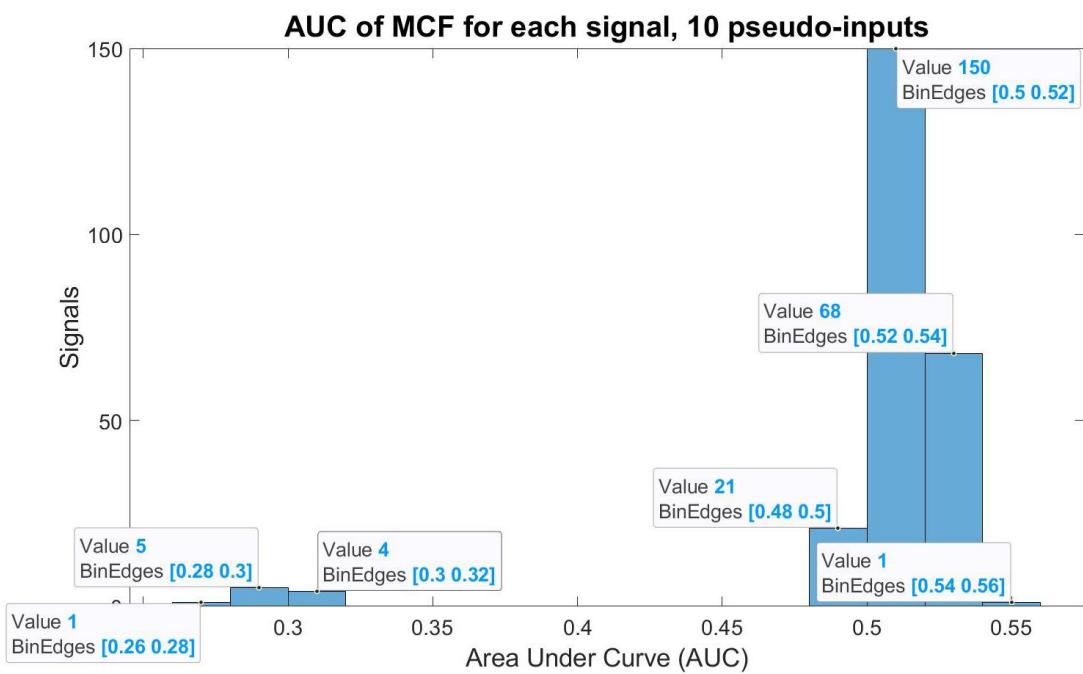


**Εικόνα 51.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 8 ψευδο-εισόδους.

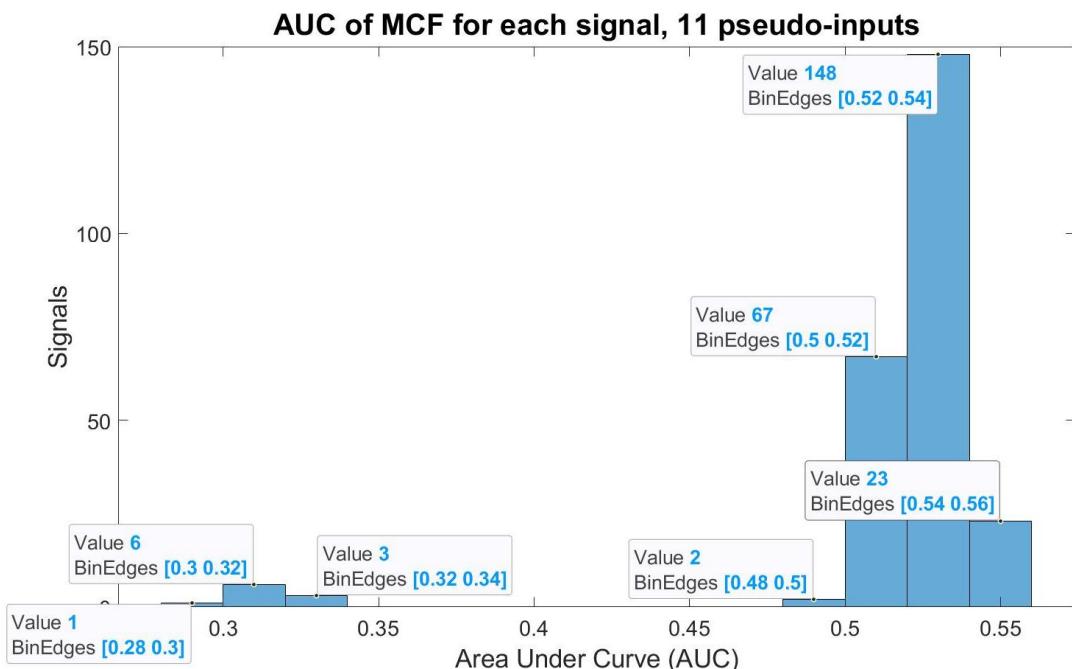
**AUC of MCF for each signal, 9 pseudo-inputs**



**Εικόνα 52.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 9 ψευδο-εισόδους.

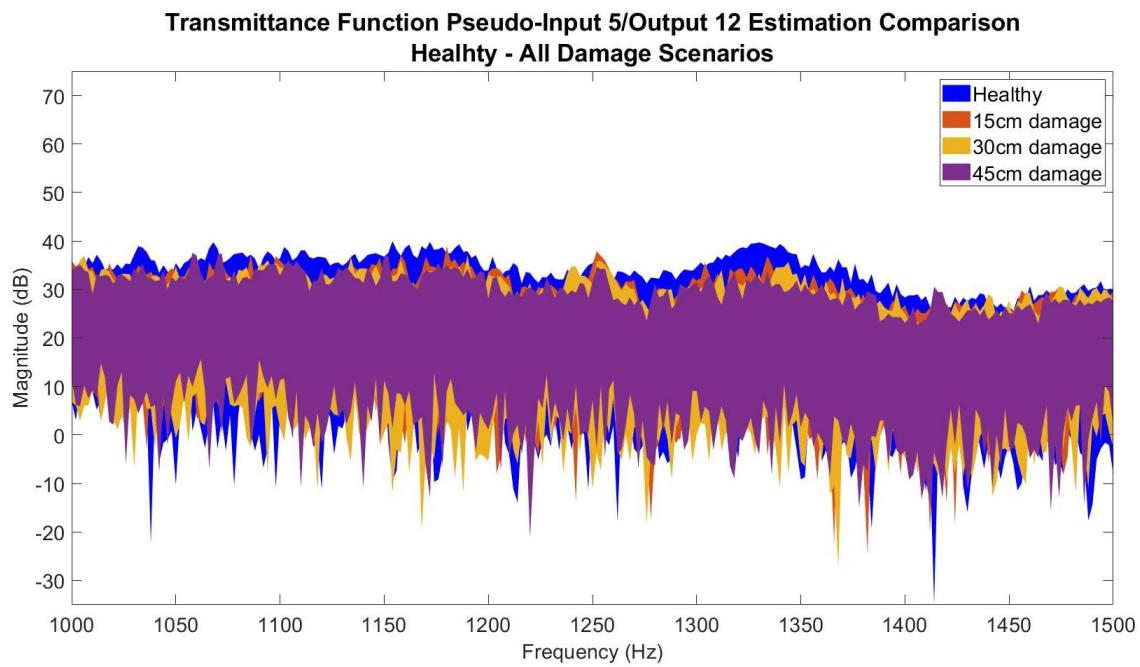


**Εικόνα 53.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 10 ψευδο-εισόδους.

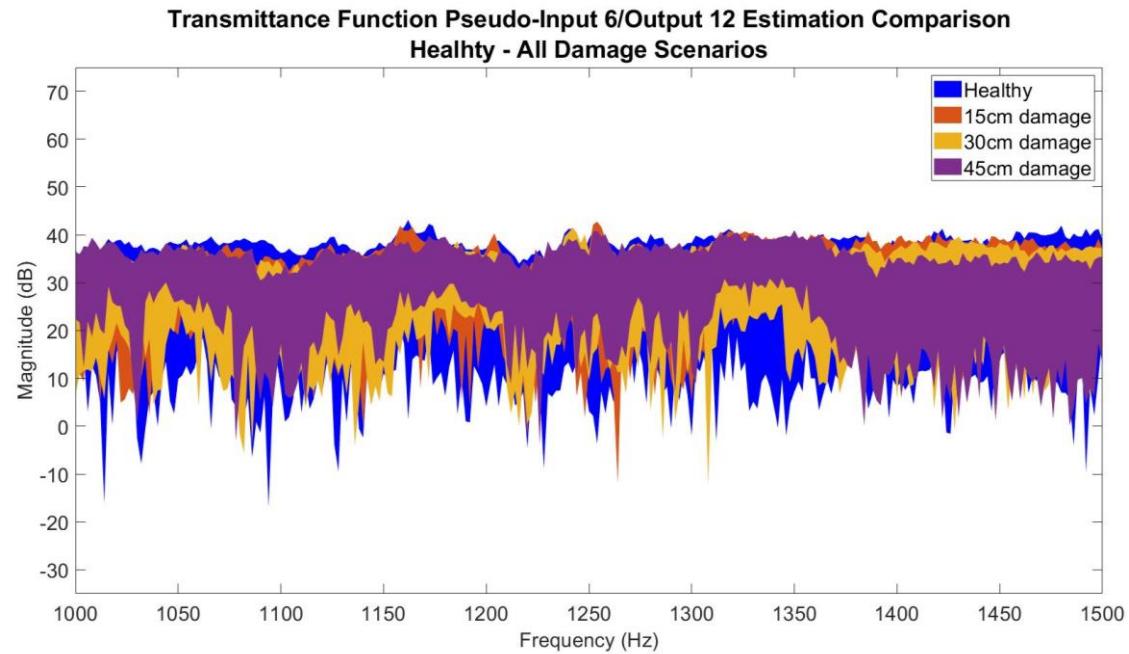


**Εικόνα 54.** Εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη (AUC) Multiple Coherence Function (MCF) για τα εκάστοτε σήματα σε μορφή ιστογράμματος, για 11 ψευδο-εισόδους.

Δίνεται η εκτίμηση Transmittance για τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους για την κατάσταση υγείας και τα τρία σενάρια βλάβης. Παρατηρείται ότι, η δυναμική της υγιούς κατασκευής επικαλύπτεται πλήρως από τις αντίστοιχες υπό βλάβη, για όλες τις ψευδο-εισόδους.

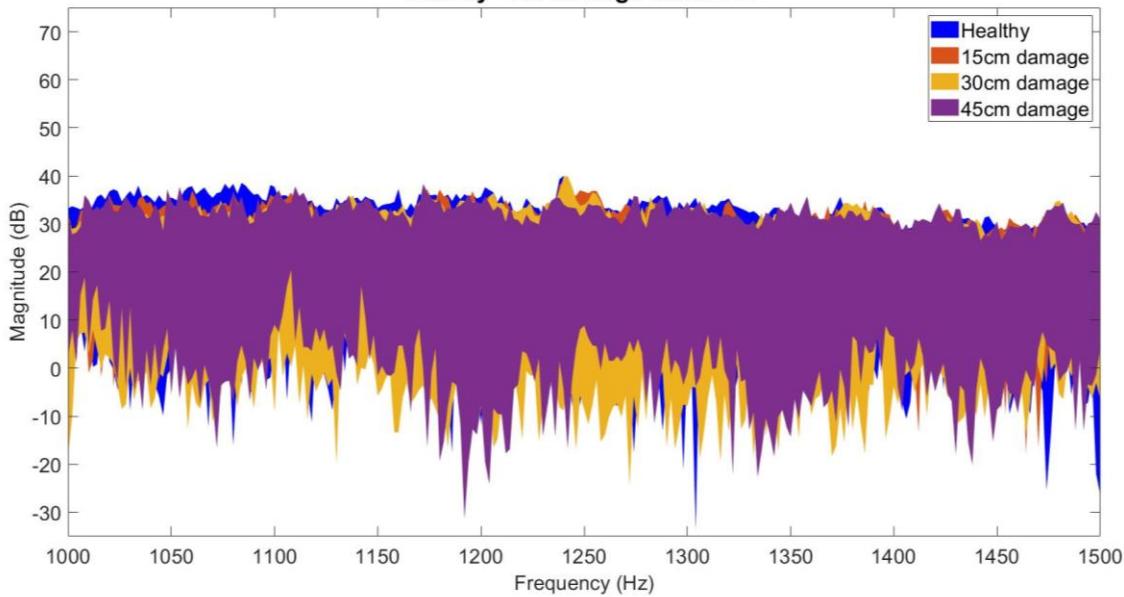


**Εικόνα 55.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 5 και 12, αντίστοιχα.



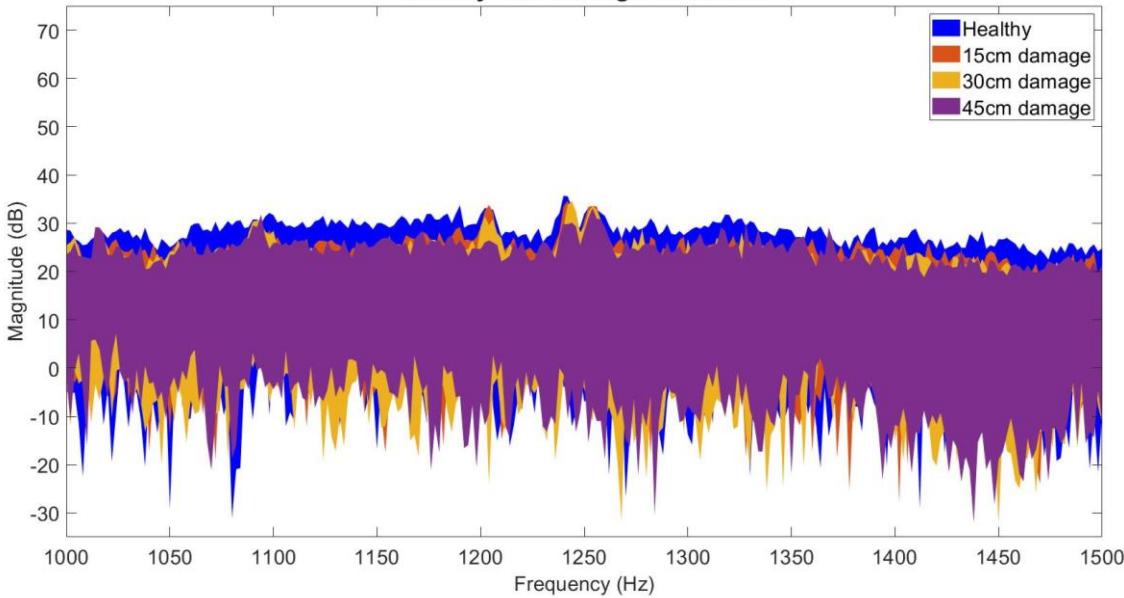
**Εικόνα 56.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 6 και 12, αντίστοιχα.

**Transmittance Function Pseudo-Input 7/Output 12 Estimation Comparison  
Healthy - All Damage Scenarios**

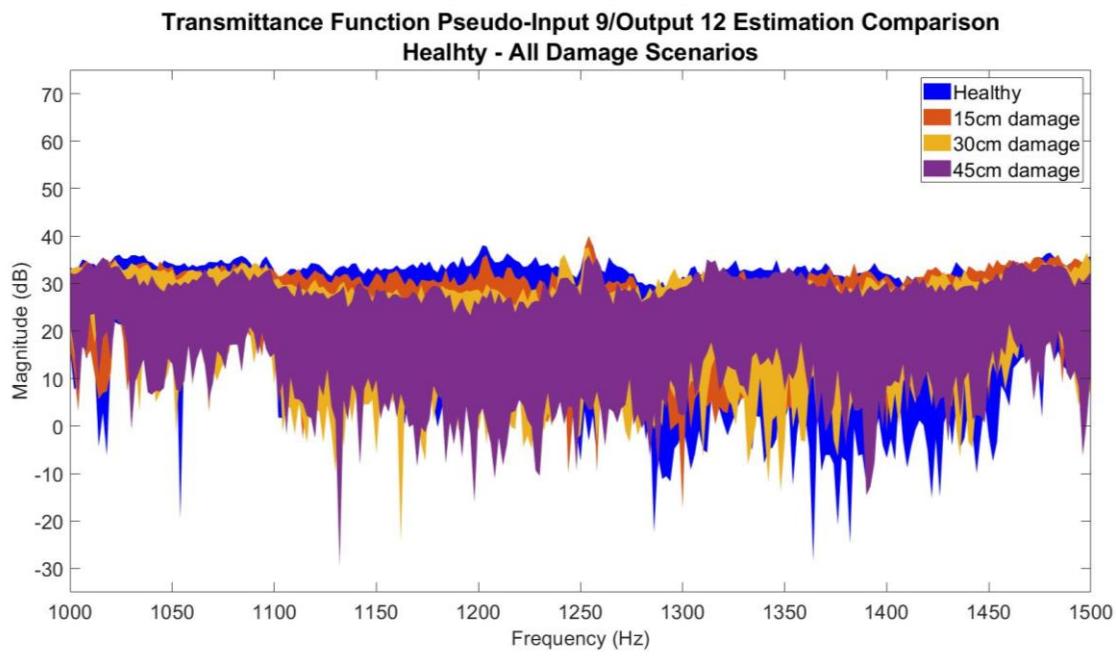


**Εικόνα 57.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 7 και 12, αντίστοιχα.

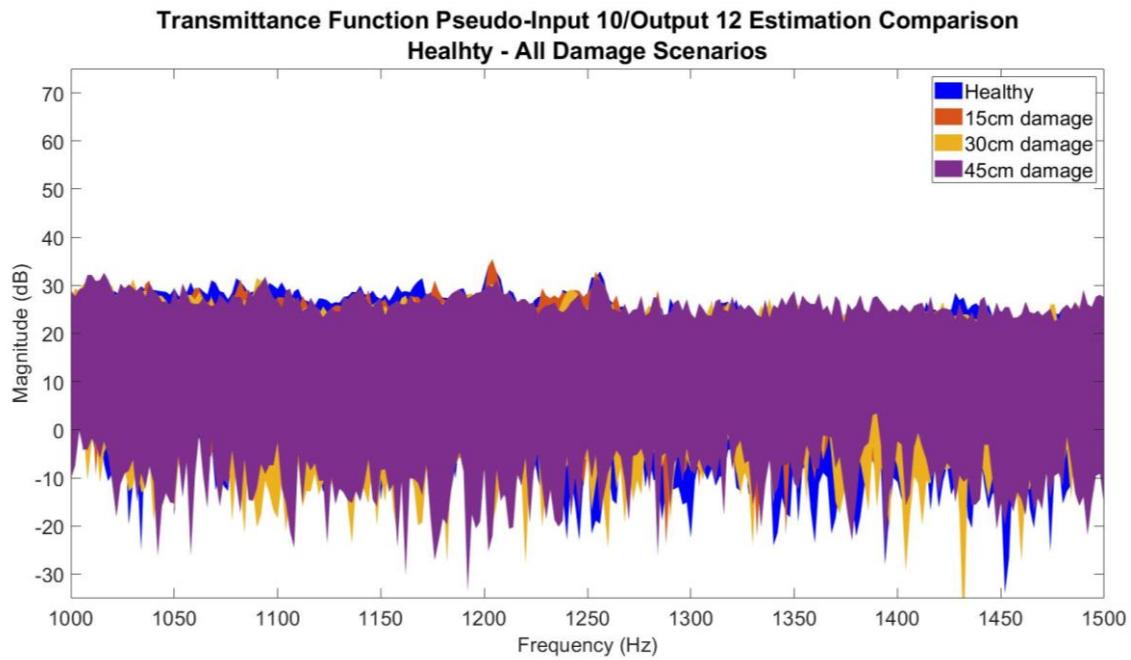
**Transmittance Function Pseudo-Input 8/Output 12 Estimation Comparison  
Healthy - All Damage Scenarios**



**Εικόνα 58.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 8 και 12, αντίστοιχα.

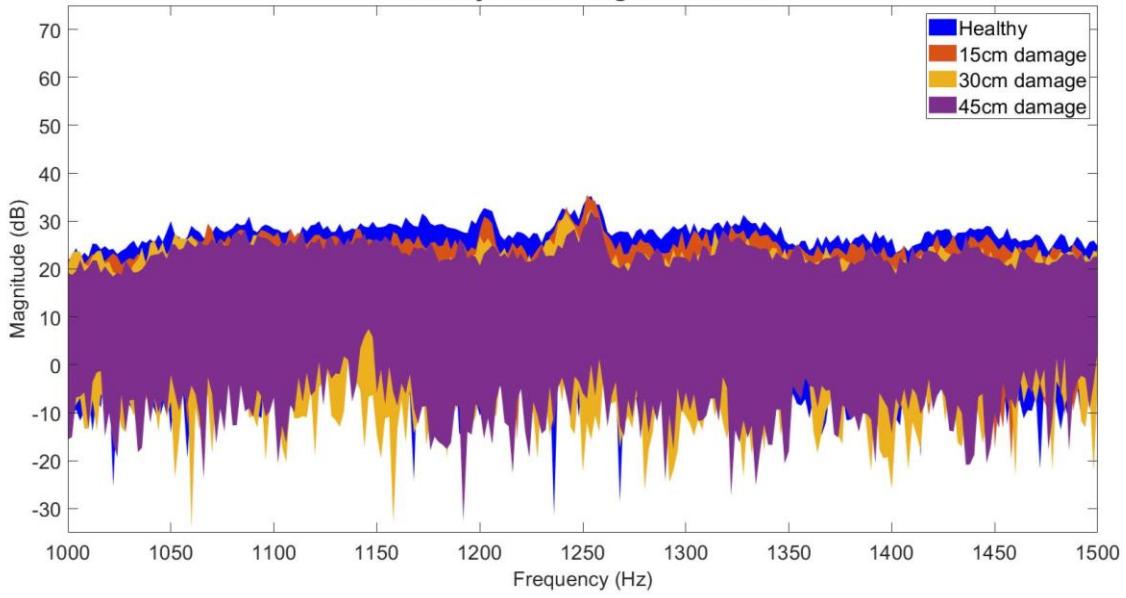


**Εικόνα 59.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 9 και 12, αντίστοιχα.



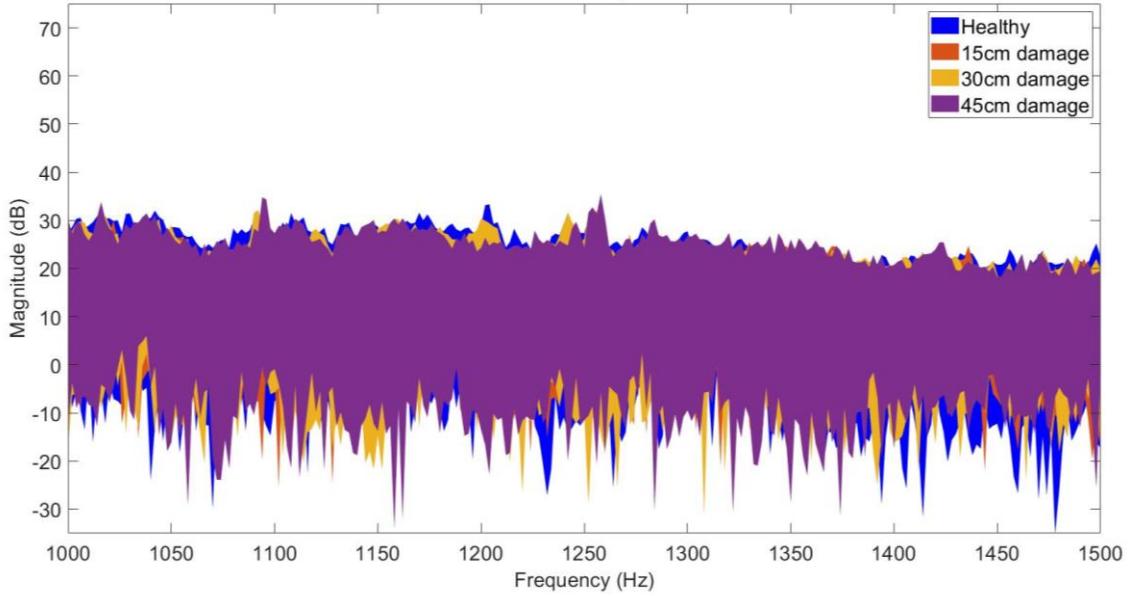
**Εικόνα 60.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 10 και 12, αντίστοιχα.

**Transmittance Function Pseudo-Input 11/Output 12 Estimation Comparison  
Healthy - All Damage Scenarios**

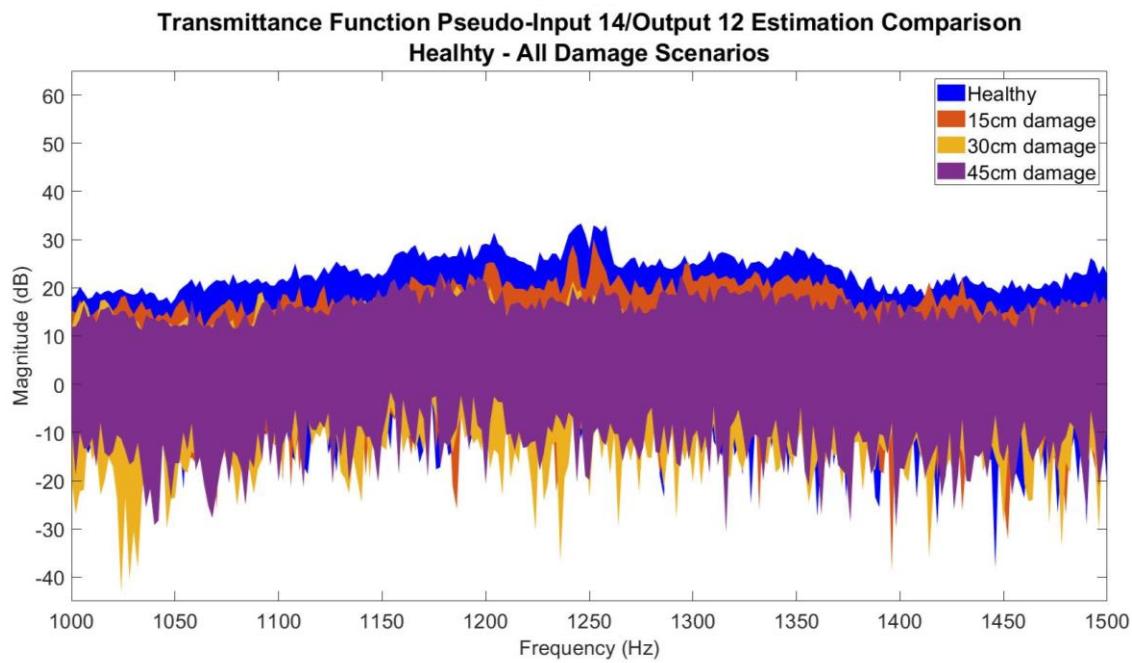


**Εικόνα 61.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 11 και 12, αντίστοιχα.

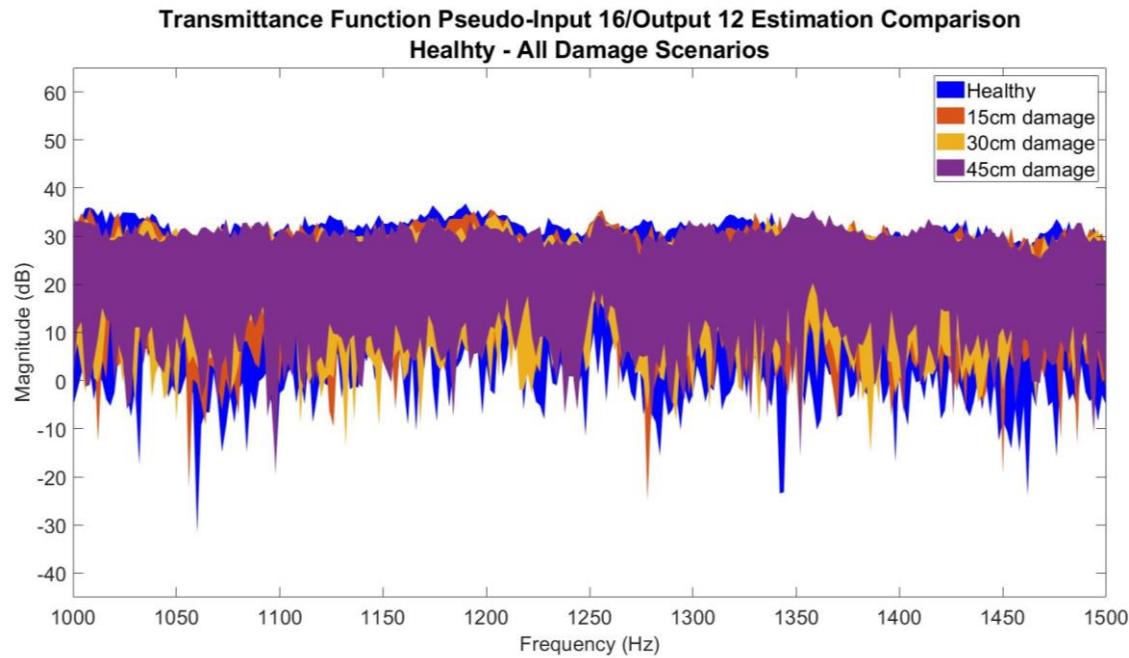
**Transmittance Function Pseudo-Input 13/Output 12 Estimation Comparison  
Healthy - All Damage Scenarios**



**Εικόνα 62.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό θλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου 13 και 12, αντίστοιχα.

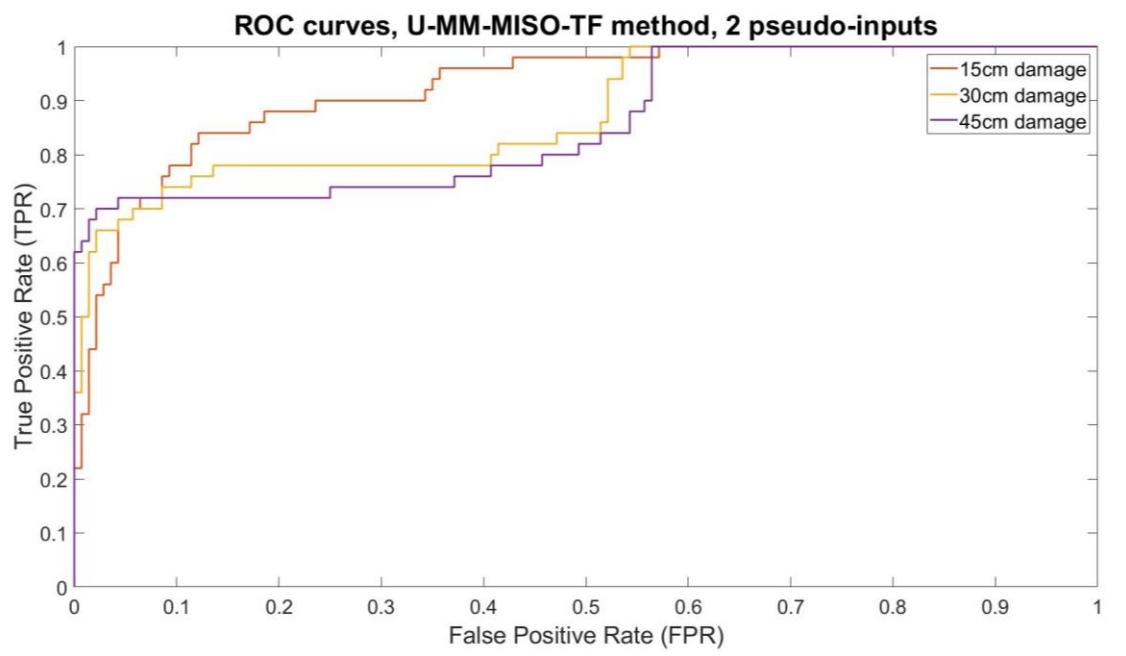


**Εικόνα 63.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό βλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια φευδο-εισόδου και εξόδου 14 και 12, αντίστοιχα.

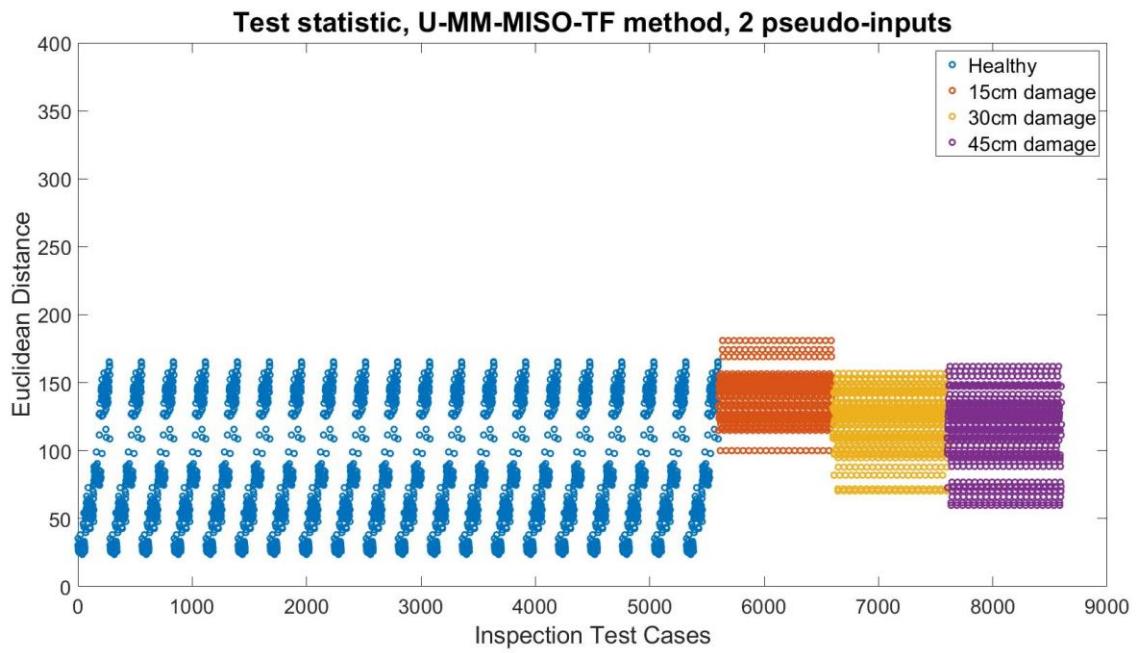


**Εικόνα 64.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό βλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια φευδο-εισόδου και εξόδου 16 και 12, αντίστοιχα.

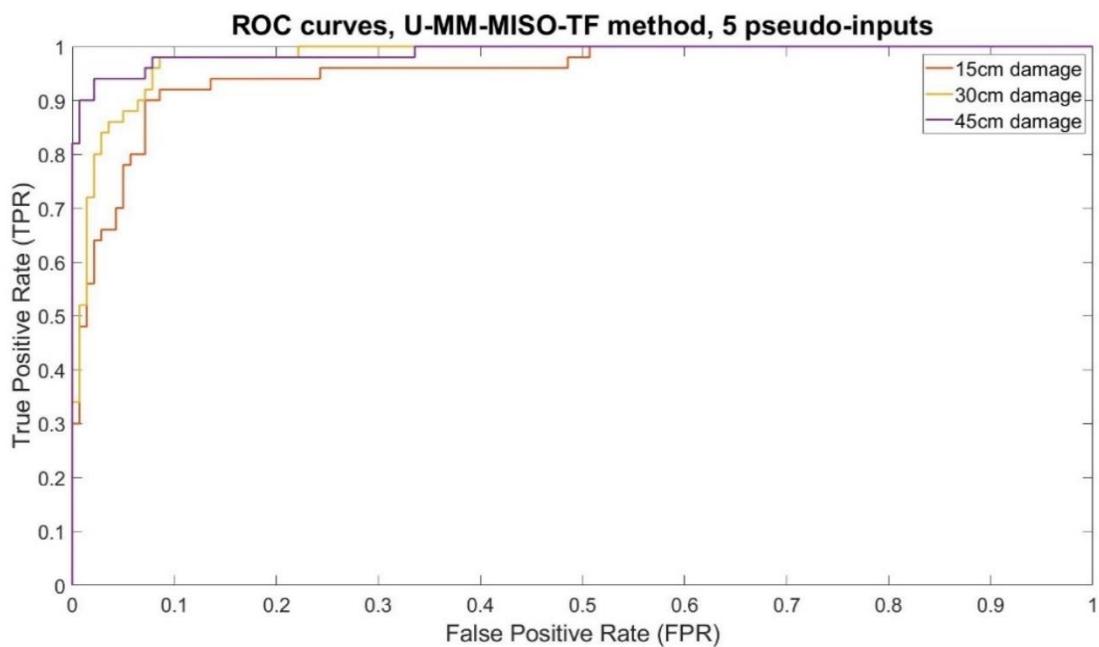
Δίνονται τα διαγράμματα διασποράς και οι καμπύλες ROC της μεθόδου U-MM-MISO-TF για 2 έως και 11 ψευδο-εισόδους. Τα αποτελέσματα για τα εκάστοτε πλήθη δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ τους, με την απόδοση ανίχνευσης και τον διαχωρισμό των καταστάσεων να κρίνονται ως μη ικανοποιητικοί για τις βλάβες των 15 και 30 εκατοστών, αλλά αξιόπιστοι για την μεγαλύτερη βλάβη για αριθμό ψευδο-εισόδων άνω των 6.



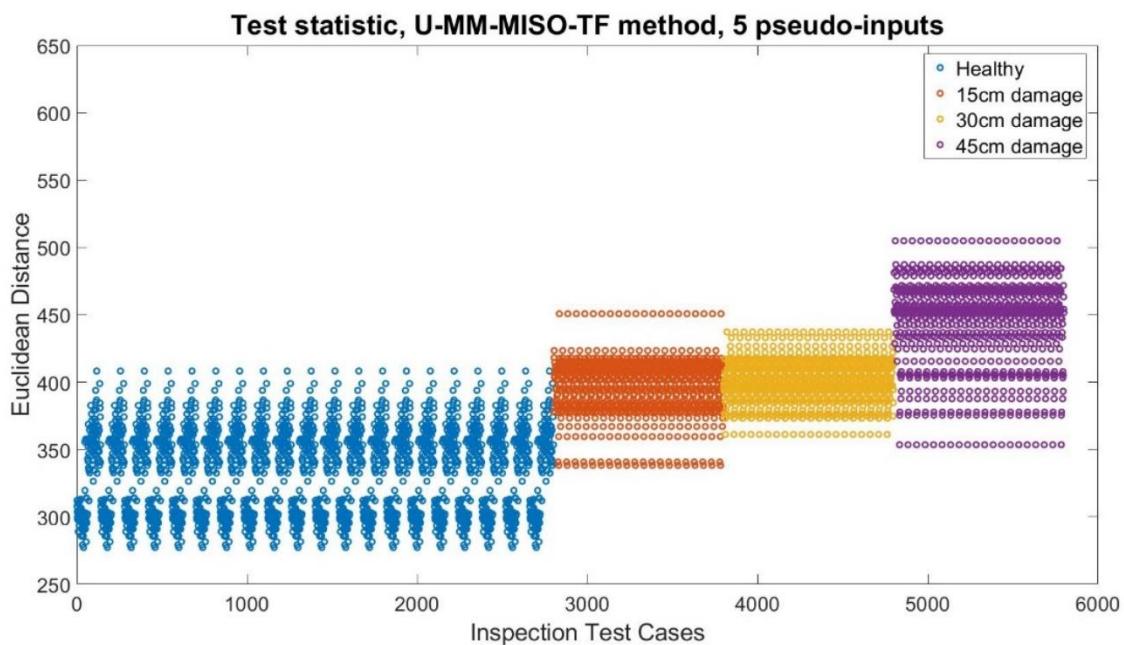
Εικόνα 65. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 2 ψευδο-εισόδους.



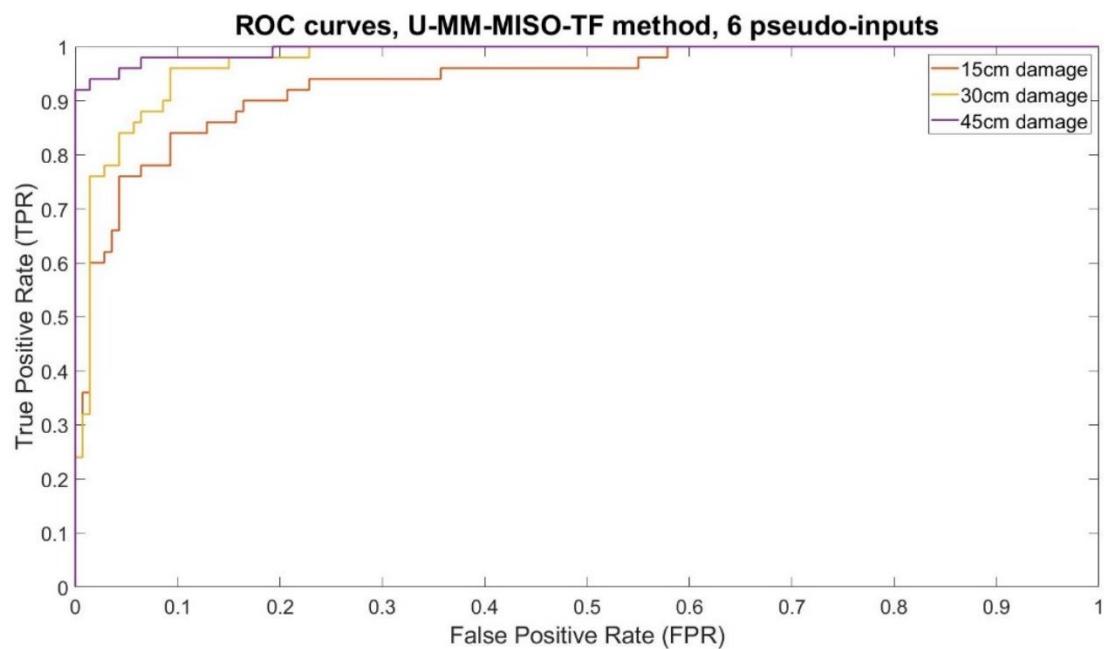
Εικόνα 66. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 2 ψευδο-εισόδους.



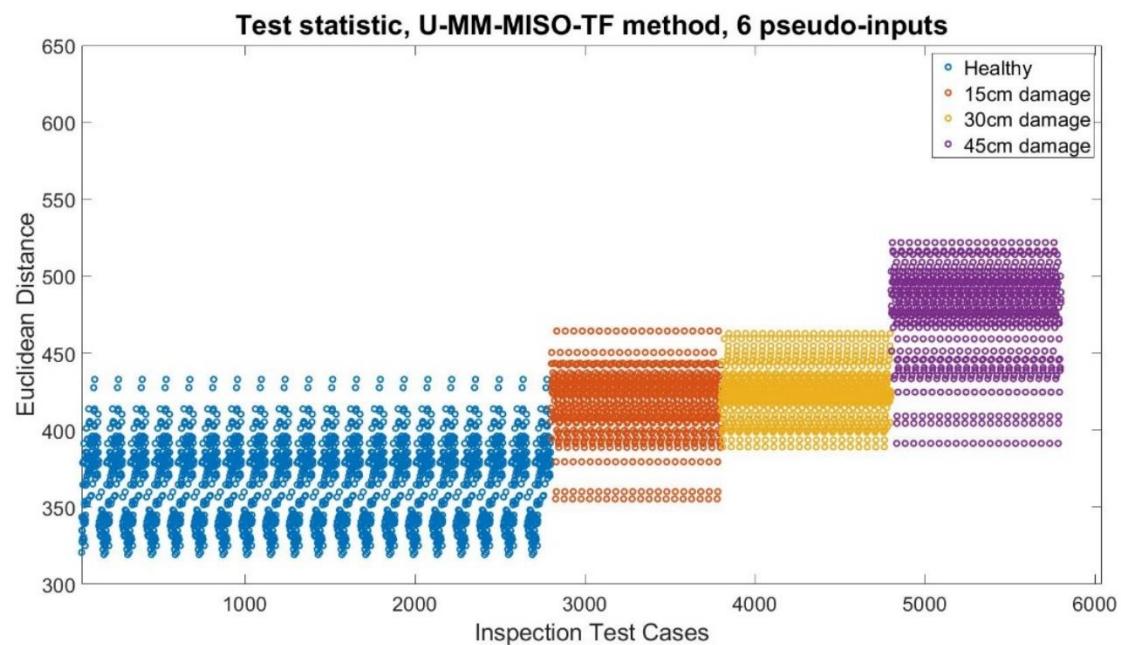
**Εικόνα 67.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης για τα τρία σενάρια βλάβης με 5 ψευδο-εισόδους.



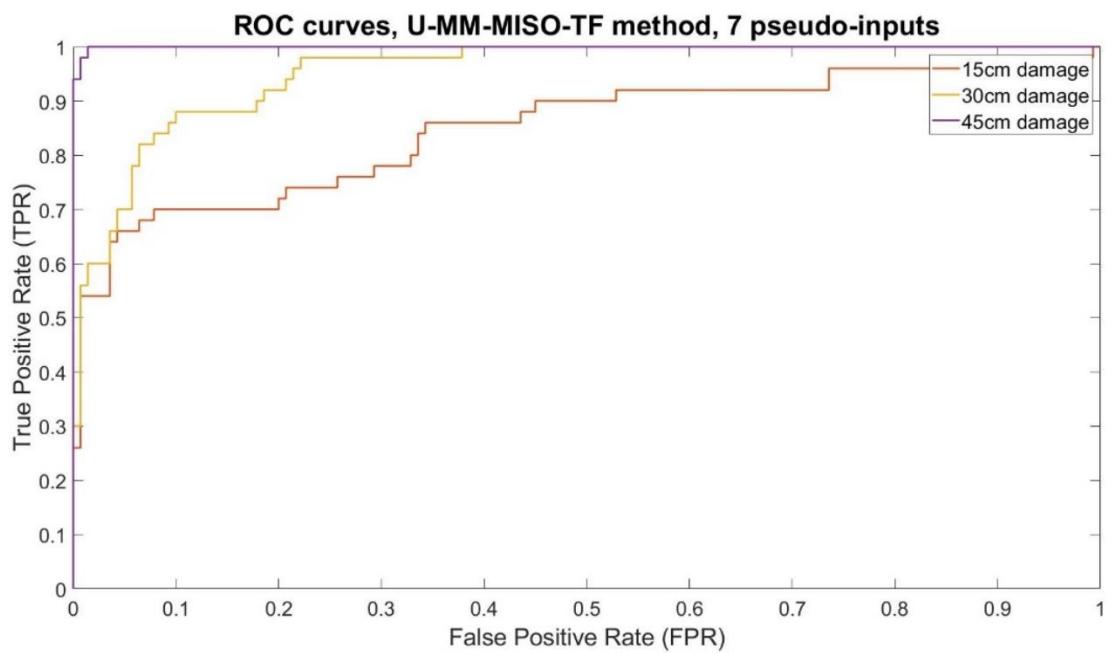
**Εικόνα 68.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 5 ψευδο-εισόδους.



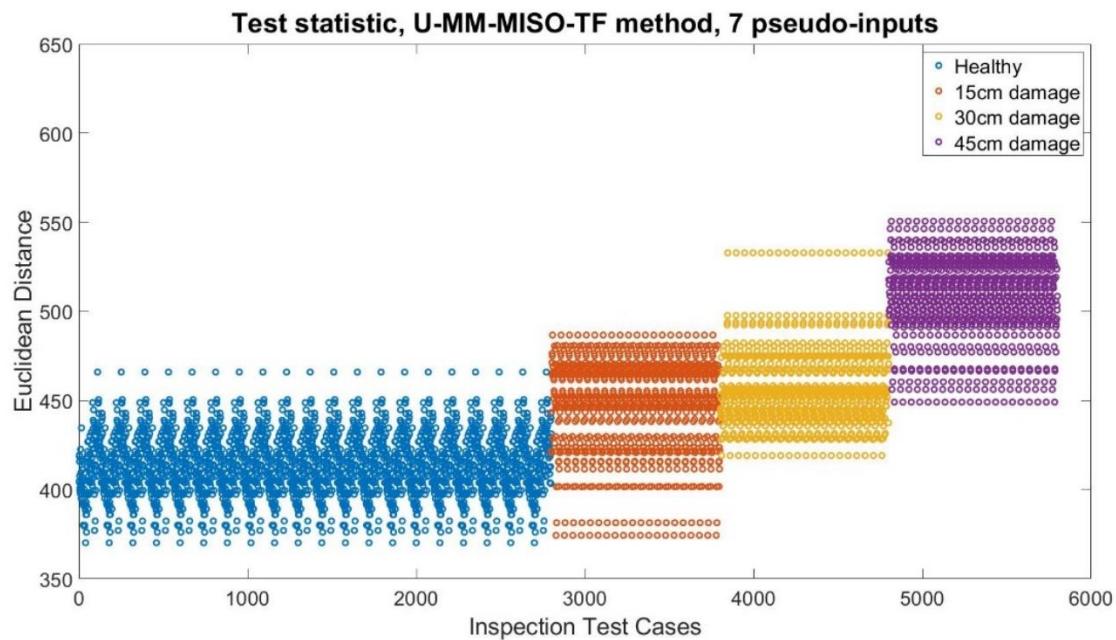
Εικόνα 69. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 6 ψευδο-εισόδους.



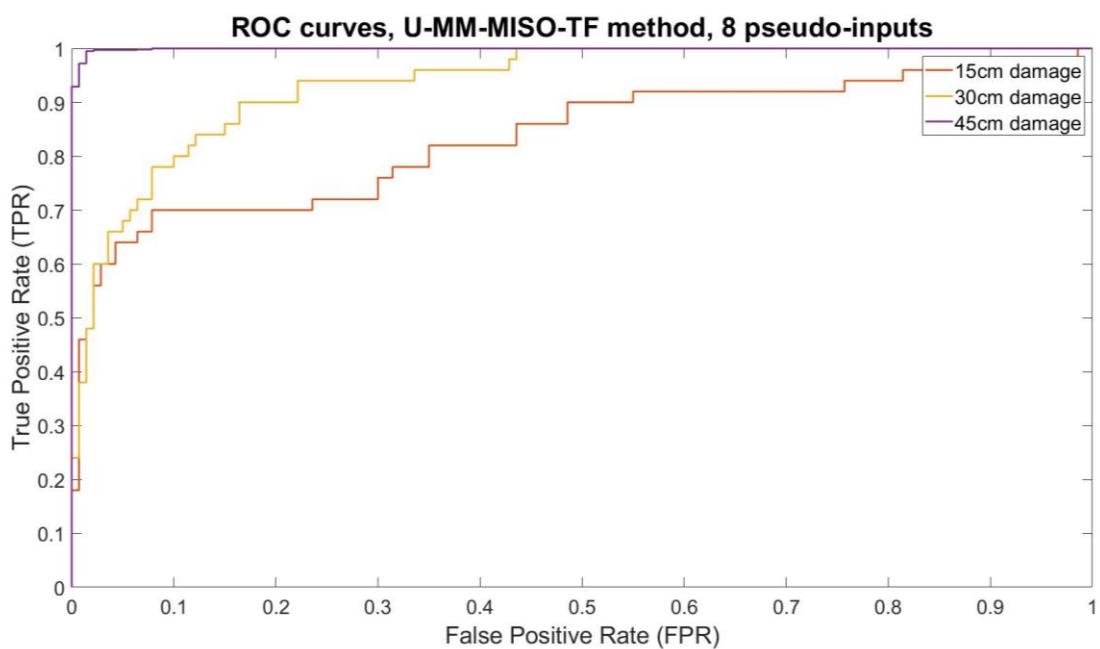
Εικόνα 70. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 6 ψευδο-εισόδους.



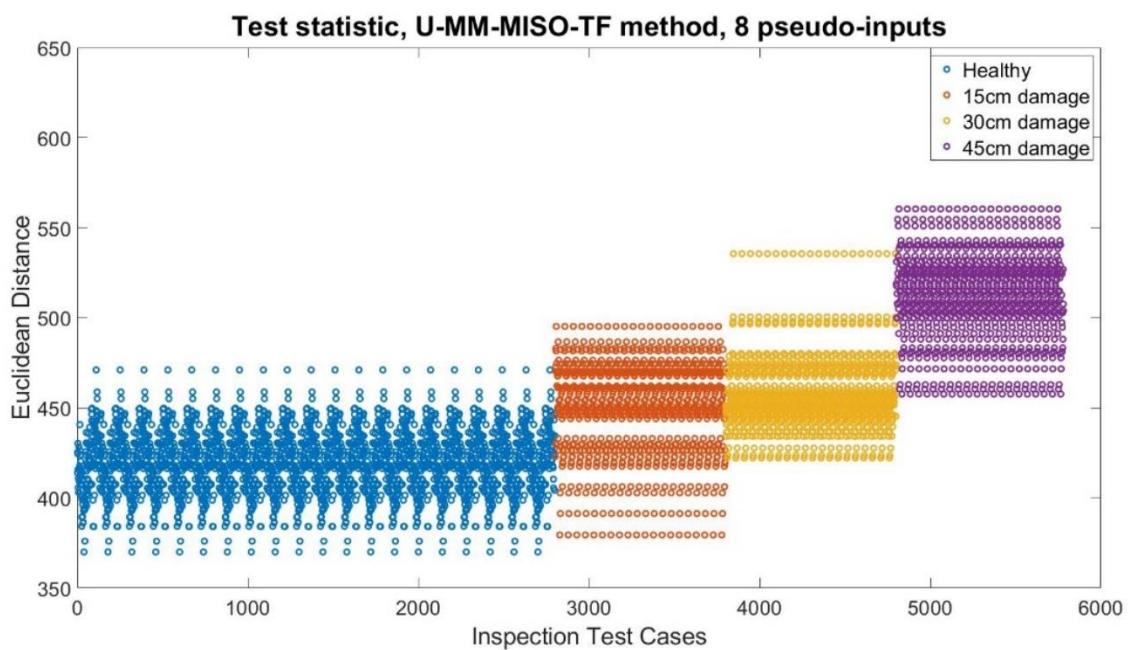
**Εικόνα 71.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 7 ψευδο-εισόδους.



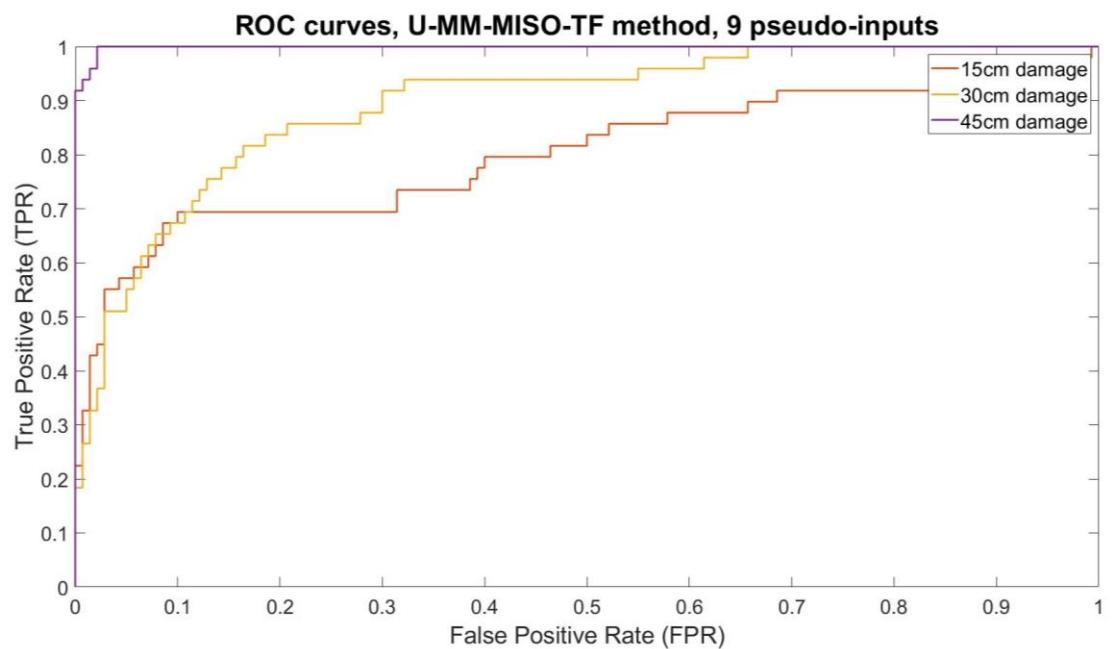
**Εικόνα 72.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 7 ψευδο-εισόδους.



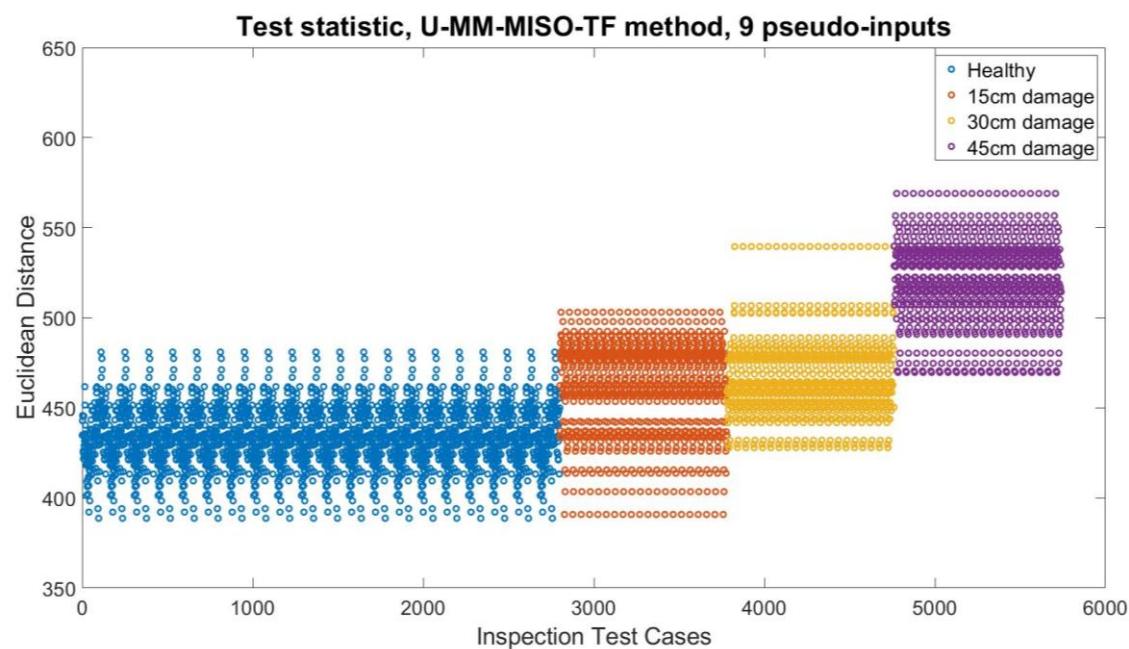
**Εικόνα 73.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 8 ψευδο-εισόδους.



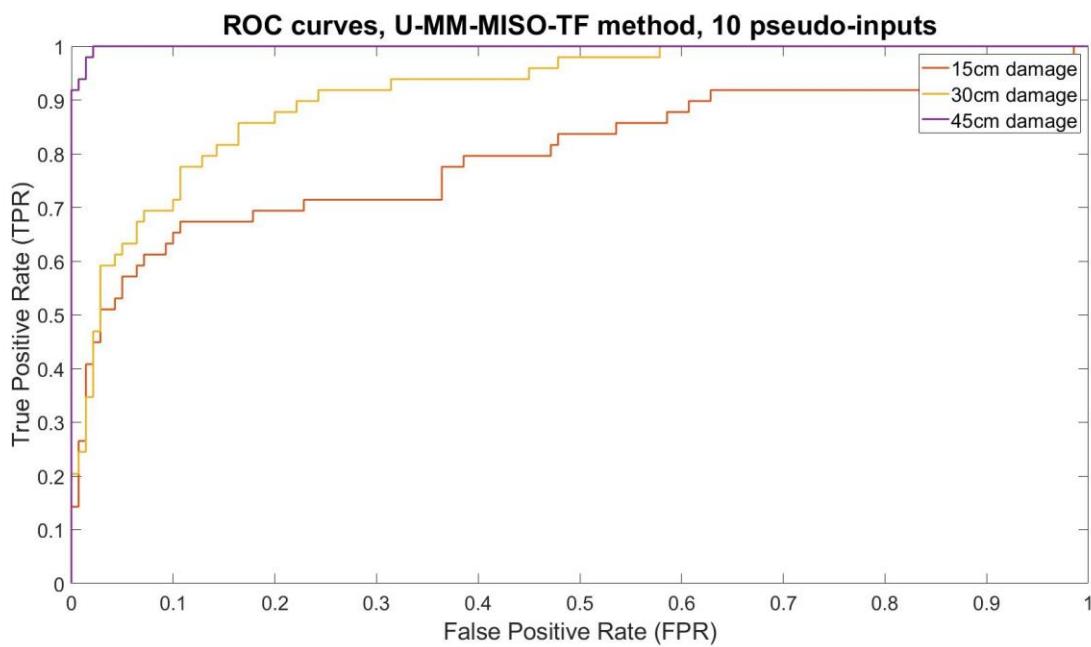
**Εικόνα 74.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 8 ψευδο-εισόδους.



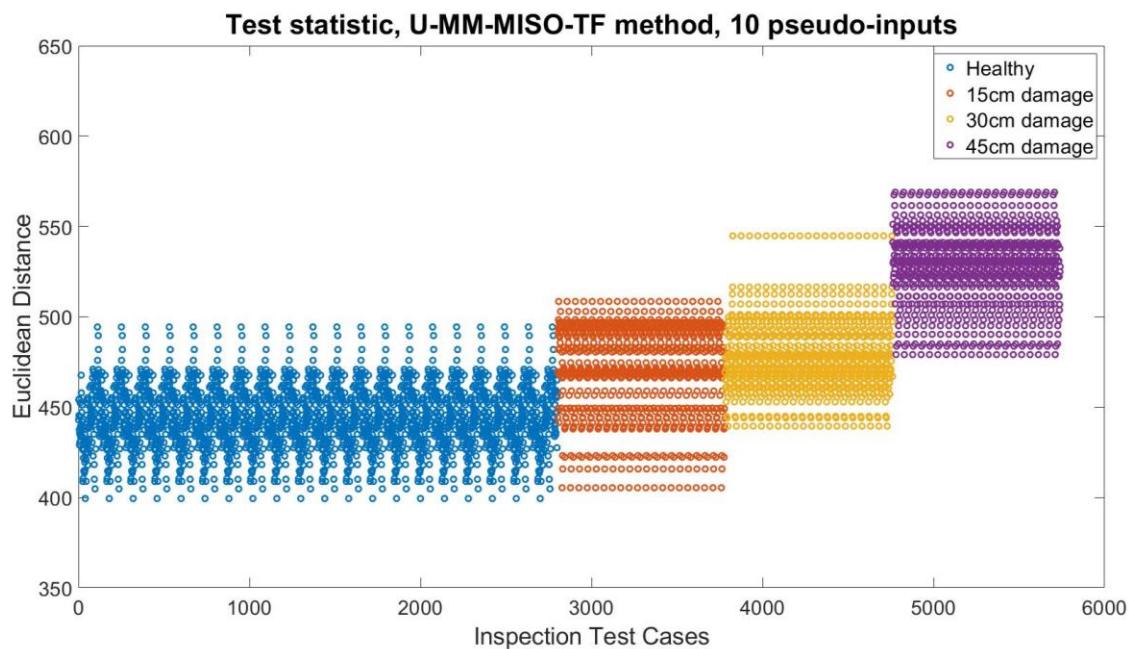
Εικόνα 75. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 9 ψευδο-εισόδους.



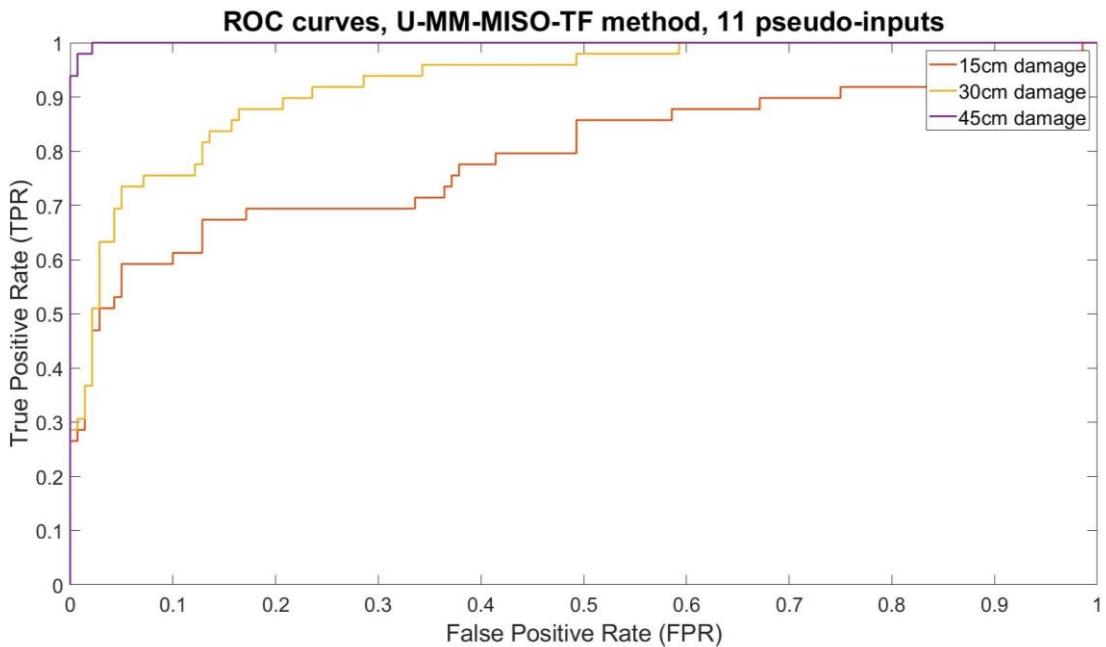
Εικόνα 76. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 9 ψευδο-εισόδους.



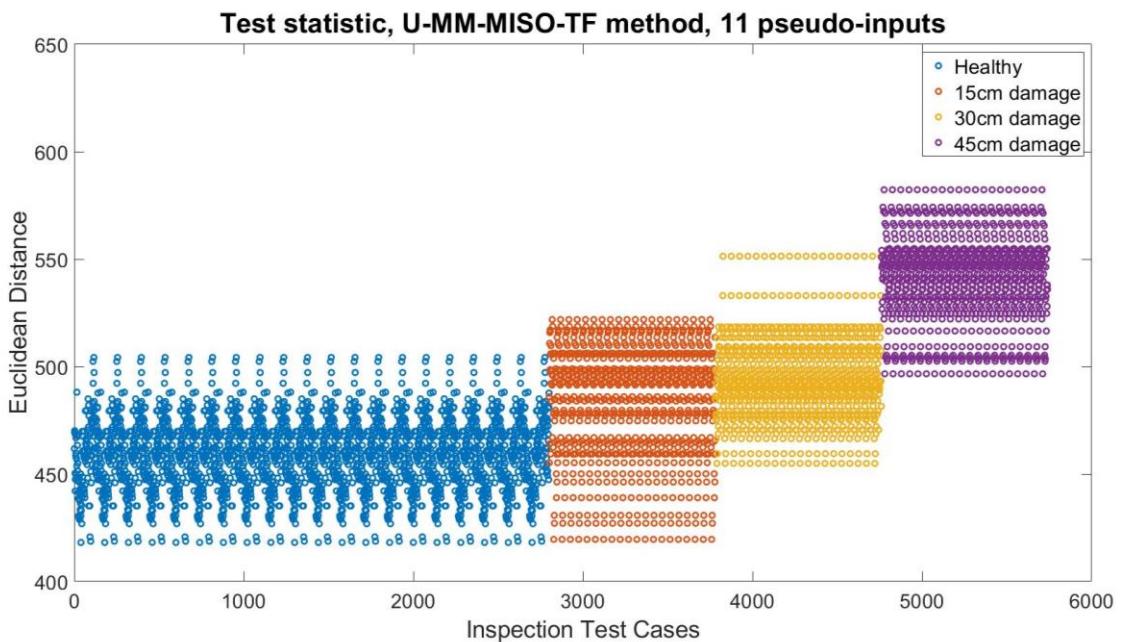
*Εικόνα 77. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια θλάβης με 10 ψευδο-εισόδους.*



*Εικόνα 78. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια θλάβης με 10 ψευδο-εισόδους.*



Εικόνα 79. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF τα τρία σενάρια βλάβης με 11 ψευδο-εισόδους.



Εικόνα 80. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF για τα τρία σενάρια βλάβης με 11 ψευδο-εισόδους.

Δίνονται συγκεντρωτικοί [Πίνακας 17](#), [18](#) και [19](#), των αποτελεσμάτων ανίχνευσης των τριών βλαβών για αριθμό ψευδο-εισόδων από 2 έως και 11 για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2% και 5%.

Στον παρακάτω [Πίνακα 17](#) παρατηρείται πως η βλάβη των 15 εκατοστών ανιχνεύεται αναξιόπιστα για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων και ποσοστών ψευδο-συναγερμών. Επομένως, η απόδοση ανίχνευσης της μικρότερης βλάβης δεν αποτελεί κριτήριο επιλογής κατάλληλων αισθητηρίων.

**Πίνακας 17.** Ποσοστά ανίχνευσης ρωγμής 15 εκατοστών με 2 έως και 11 αριθμούς ψευδο-εισόδων για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2% και 5%.

Ποσοστά Ανίχνευσης ρωγμής 15cm		
Αριθμός Ψευδο-εισόδων	FPR 2%	FPR 5%
2	44% TPR	68% TPR
3	40% TPR	62% TPR
4	58% TPR	82% TPR
5	56% TPR	70% TPR
6	60% TPR	76% TPR
7	54% TPR	66% TPR
8	48% TPR	64% TPR
9	42% TPR	57% TPR
10	40% TPR	57% TPR
11	36% TPR	59% TPR

Αντίστοιχα, στον παρακάτω [Πίνακα 18](#) η ρωγμή των 30 εκατοστών δεν ανιχνεύεται για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων και ποσοστών ψευδο-συναγερμών, με την επιλογή κατάλληλων αισθητηρίων να κρίνεται από την αποτελεσματικότητα ανίχνευσης της μεγαλύτερης βλάβης.

**Πίνακας 18.** Ποσοστά ανίχνευσης ρωγμής 30 εκατοστών με 2 έως και 11 αριθμούς ψευδο-εισόδων για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2% και 5%.

Ποσοστά Ανίχνευσης ρωγμής 30cm		
Αριθμός Ψευδο-εισόδων	FPR 2%	FPR 5%
2	62% TPR	68% TPR
3	38% TPR	62% TPR
4	62% TPR	84% TPR
5	72% TPR	86% TPR
6	76% TPR	84% TPR
7	60% TPR	70% TPR
8	48% TPR	68% TPR
9	32% TPR	55% TPR
10	34% TPR	63% TPR
11	36% TPR	73% TPR

Το αυστηρό όριο για αποτελεσματική ανίχνευση βλάβης (95% TPR για 2% FPR) ικανοποιείται για αριθμό ψευδο-εισόδων άνω των 7, όπως φαίνεται στον [Πίνακα 19](#). Ωστόσο, δεν είθισται απλοποιημένο σύστημα SHM με χρήση μεγάλου πλήθους αισθητηρίων συνολικά. Έτσι, με την απόδοση της ανίχνευσης κατά την αύξηση των ψευδο-εισόδων από τέσσερα σε πέντε να παραμένει ίδια, οι τρείς και τέσσερις ψευδο-είσοδοι θεωρούνται ως η βέλτιστη δυνατή λύση.

**Πίνακας 19.** Ποσοστά ανίχνευσης ρωγμής 45 εκατοστών με 2 έως και 11 αριθμούς ψευδο-εισόδων για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2% και 5%.

Ποσοστά Ανίχνευσης ρωγμής 45cm		
Αριθμός Ψευδο-εισόδων	FPR 2%	FPR 5%
2	68% TPR	72% TPR
3	82% TPR	88% TPR
4	90% TPR	94% TPR
5	90% TPR	94% TPR
6	94% TPR	96% TPR
7	100% TPR	100% TPR
8	99.5% TPR	100% TPR
9	96% TPR	100% TPR
10	98% TPR	100% TPR
11	98% TPR	100% TPR