



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
**ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Κατασκευαστικός Τομέας

Εργαστήριο Στοχαστικών Μηχανολογικών Συστημάτων

& Αυτοματισμού

## Ανίχνευση Βλαβών σε Εν Λειτουργία Πτερύγιο Ανεμογεννήτριας βάσει Ταλαντωτικών Σημάτων με Χρήση MISO-ARX Συναρτήσεων Μετάδοσης και Μη Εποπτευόμενων Μεθόδων Πολλαπλών Μοντέλων

Σταμόπουλος Χρήστος

[Αριθμός Μητρώου 1057168]



### Διπλωματική Εργασία

υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών  
του Πανεπιστημίου Πατρών

Επιβλέπων: Σ.Δ. Φασόης, Καθηγητής

Πάτρα, Ιούλιος 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 Διπλωματική Εργασία παρουσιάστηκε

από τον

**Σταμόπουλο Χρήστο**

[1057168]

την [13, Ιούλιος, 2022]

## **Περίληψη**

**Ανίχνευση Βλαβών σε Εν Λειτουργία Πτερύγιο Ανεμογεννήτριας βάσει  
Ταλαντωτικών Σημάτων με Χρήση MISO-ARX Συναρτήσεων  
Μετάδοσης και Μη Εποπτευόμενων Μεθόδων Πολλαπλών Μοντέλων**

### **Σταμόπουλος Χρήστος**

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιείται έλεγχος δομικής ακεραιότητας σε εν λειτουργία πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27, μέσω στατιστικών μεθόδων χρονοσειρών υπό κανονική λειτουργία και πραγματικές 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. Η προσπάθεια ανίχνευσης των τριών βλαβών επιτυγχάνεται μέσω παραμετρικής μεθόδου Πολλαπλών Μοντέλων με χρήση τεσσάρων και πέντε αισθητηρίων. Το πείραμα έλαβε χώρα υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, με αποτέλεσμα στις διαθέσιμες μετρήσεις να εμπειριέχεται έντονα το στοιχείο της αβεβαιότητας και του θορύβου, 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

## *Abstract*

# **Vibration-based Unsupervised Damage Detection on an Operating Wind Turbine using MISO-ARX Transmittance Functions and Multiple Model Based Methods**

**Stamopoulos Christos**

Present thesis attempts structural health of monitoring in a Vestas V27 wind turbine blade, via 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. The detection attempt of three damages is achieved through a parametric method of Multiple Models using four and five sensors. The experiment took place under variable Environmental and Operational Conditions (EOCs), as a result the available measurements has a significant level of uncertainty and noise 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

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Συμβάσεων .....	vii
Κατάλογος Συμβόλων.....	viii
Κατάλογος Συντομεύσεων .....	ix
Πρόλογος.....	xi
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. Μοντελοποίηση με Στοχαστικά Μοντέλα MISO-TF-ARX .....	11
5.1.1. Φάση Εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX .....	13
5.1.2. Φάση ελέγχου της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX .....	13
5.2 Υποθέσεις και παραδοχές .....	14
5.3 Συσχέτιση με εναλλακτικές μεθοδολογίες.....	15
6. Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων.....	17
6.1 Επίδραση των βλαβών στην Δυναμική της Κατασκευής .....	18
6.2 Μοντελοποίηση σημάτων μέσω Παραμετρικής μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX .....	19
7. Αποτελέσματα Ανίχνευσης Βλαβών & Συζήτηση.....	29
7.1 Πειραματικά Αποτελέσματα .....	29
7.2 Συζήτηση και κριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων .....	33
7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF-ARX με προγενέστερες εναλλακτικές στοχαστικές μεθόδους. ....	34
8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	37
Βιβλιογραφία .....	37
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πρόσθετα Αποτελέσματα .....	40

## 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

$a_{i,k}$	i-οστή παράμετρος του τμήματος AR της k μέτρησης.
$b_{i,k}^\delta$	i-οστή παράμετρος του τμήματος X της k μέτρησης της δ-οστής ψευδο-εισόδου
$\dim\theta$	Διάσταση διανύσματος $\theta$
$e[t]$	Σφάλμα πρόβλεψης ενός βήματος
$\theta$	Χαρακτηριστικό διάνυσμα
$\widehat{\theta}$	Εκτιμηθέν διάνυσμα των παραμέτρων
$\theta_{0,\kappa}$	Χαρακτηριστικό διάνυσμα υγιούς υποχώρου
$M_0$	Αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων υγιούς δυναμικής της κατασκευής
$M_u$	Αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων άγνωστης δυναμικής της κατασκευής
$N$	Μήκος Σήματος
$\sigma_w^2$	Εκτιμηθήσα διασπορά λευκού θορύβου
$\Sigma$	Πίνακας συνδιασποράς
$\varphi[t]$	Διάνυσμα παλινδρόμησης

## Κατάλογος Συντομεύσεων

AR	AutoRegressive
ACF	AutoCorrelation Function
AUC	Area Under Curve
BIC	Bayesian Information Criterion
CCF	Cross Covariance Function
FPR	False Positive Rate
LPV-VAR	Linear Parameter Varying – Vector AutoRegressive
MM	Multiple Model
CF	Coherence Function
MCF	Multiple Coherence Function
MISO	Multiple Input Single Output
PCA	Principal Component Analysis
ROC	Receiver Operating Characteristic curve
RSS	Residual Sum of Squares
SHM	Structural Health Monitoring
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-MISO-TF-ARX	Unsupervised - Multiple Model – Multiple Input Single Output – Transmittance Function – Autoregressive with eXogenous pseudo-inputs
U-PCA-AR	Unsupervised-Principal Component Analysis - Autoregressive
U-PCA-HS-MISO-ARX	Unsupervised - Principal Component Analysis – Hyper Spheres – Multiple Input Single Output – AutoRegressive with eXogenous input

U-PCA-HS-VAR      Unsupervised - Principal Component Analysis – Hyper Spheres –  
Vector AutoRegressive

U-PCA-MM-AR      Unsupervised - Principal Component Analysis - Multiple Model -  
AutoRegressive

## Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική 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 Φατιόν Φέρα 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 Διπλωματική Εργασία στοχεύει στην ανίχνευση βλάβης σε μια εν λειτουργίᾳ ανεμογεννήτρια, μέσω απομακρυσμένου ελέγχου δομικής ακεραιότητας της κατασκευής, χρησιμοποιώντας διανυσματικά στοχαστικά ταλαντωτικά σήματα απόκρισης. Τα πειράματα έλαβαν χώρα υπό πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες με φυσική διέγερση λόγω περιστροφής της ανεμογεννήτριας στα 32RPM. Στις διαθέσιμες μετρήσεις εισάγεται σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας λόγω των μεταβλητών περιβαλλοντικών συνθηκών και η κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή τίθεται εκτός για τον σκοπό της εργασίας. 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. Οι δύο μεγαλύτερες βλάβες είναι απόρροια της τεχνητής ρωγμής των 15 εκατοστών, η οποία αφέθηκε να εξελιχθεί σταδιακά. Έπειτα της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε για την επιλογή κατάλληλων αισθητηρίων ([Stamopoulos, 2022](#)), στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση τεσσάρων και πέντε επιταχυνσιομέτρων για την ανίχνευση των τριών βλαβών. Η προσπάθεια ανίχνευσης βλαβών βασίζεται στην ανίχνευση μεταβολών στα δυναμικά χαρακτηριστικά. Επομένως, 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 ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)), ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)), ([Tsikouras, 2020](#)), ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), ([Panagiotopoulos, Tcherniak & Fassois, 2022](#)), ([Konis, 2022](#)<sub>A</sub>), ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) και ([Stamopoulos, 2022](#)) με τα αποτελέσματα να κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά έως και εξαιρετικά ([Konis, 2022](#)<sub>A</sub>), ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) στην ανίχνευση βλάβης, δίνοντας, παράλληλα, χώρο για περαιτέρω βελτίωση, τόσο στην απόδοση ανίχνευσης όσο και στην πολυπλοκότητα των μεθόδων και το υπολογιστικό κόστος. 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

Στην σύγχρονη εποχή, οι ανεμογεννήτριες καθίσταται το κυριότερο μέσο παραγωγής ανανεώσιμων πηγών αιολικής ενέργειας. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας αποτελεί βασικό μέρος του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος και για να καταστεί βιώσιμη χρειάζεται να είναι όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική στην παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας πτερυγίων ανεμογεννήτριας. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί ο απομακρυσμένος έλεγχός τους, λόγω της δραματικής αύξησης κατασκευής αιολικών πάρκων σε απομακρυσμένες περιοχές. Επιπλέον, η προσπάθεια επιβίωσης των εκάστοτε βιομηχανιών και η επιθυμία για μέγιστη απόδοση έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη συστημάτων Structural Health of Monitoring (SHM). Τα συστήματα SHM συμβάλουν σημαντικά στην διάγνωση και πρόβλεψη βλαβών, με την τελευταία να χρήζει περισσότερης διερεύνησης για να καταστεί έμπιστη και αποδοτική. Το βασικότερο πλεονέκτημα τους είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας των κατασκευών σε πραγματικό χρόνο, με την εκάστοτε κατασκευή να βρίσκεται σε λειτουργία. Μέσω συστημάτων SHM πραγματοποιείται η δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης μιας βλάβης και του εντοπισμού της θέσης της με ικανοποιητική ακρίβεια, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και αυτόματα, καθιστώντας τον

επιτόπου έλεγχο, εύκολο, οικονομικό και γρήγορο. Κατά την εφαρμογή συστημάτων SHM συλλέγονται δεδομένα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των εκάστοτε κατασκευών τόσο ως προς την συντήρηση όσο και ως προς την κατασκευαστική αβεβαιότητα.

## 2. Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας

Καθώς η βιομηχανία αιολικής ενέργειας ωριμάζει και οι ανεμογεννήτριες αναπτύσσονται, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη για οικονομικά αποδοτικές λύσεις παρακολούθησής τους. Τις τελευταίες 2 δεκαετίες ποικίλουν οι εργασίες που εστιάζουν στην δυναμική αναγνώριση και παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας ανεμογεννητριών μέσω μεθόδων SHM. Διάφορες αιτίες βλάβης και τύποι ζημιών στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας αξίζει να ληφθούν υπόψιν κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας ([Sun, Wang, & Chu, 2022](#)), για την αποφυγή μίας κοστοβόρας λύσης και όχι μόνο. Οι μέθοδοι SHM βασίζονται στη ανάλυση ταλαντωτικών σημάτων, με σκοπό διάγνωσης και πρόβλεψης μίας βλάβης, ή ακόμα και στην αξιολόγηση πληροφοριών για την βελτιστοποίηση του κόστους συντήρησης ([Nielsen, Tcherniak, & Ulriksen, 2021](#)). Η διάγνωση μίας βλάβης περιλαμβάνει τόσο την ανίχνευση 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, ενώ η παρατήρηση αλλαγών τους 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, & Źak, 2018](#)), ([Ou, Chatzi, Dertimanis, & Spiridonakos, 2016](#)), ([Ulriksen, Tcherniak, Kirkegaard, & Damkilde, 2016](#)) και ([González & Fassois, 2016](#)), ενώ λίγες είναι αυτές που πραγματοποιούνται σε κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)).

Η δυναμική των κατασκευών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη περιβαλλοντικών παραγόντων. Γι' αυτό, επιτυχημένες μεθοδολογίες σε εργαστηριακό περιβάλλον ή περιβάλλον προσομοίωσης αποτυγχάνουν αποδοτικής ανίχνευσης σε πραγματικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνθήκες λειτουργίας ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)). Στο ίδιο πείραμα, με την παρούσα Διπλωματική Εργασία, οι ([Roberts, Cava, & Avendaño-Valencia, 2021](#)) έδειξαν την επίδραση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών στην ανίχνευση βλαβών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27, μέσω μεθόδων μηχανικής μάθησης, με τους ([Qadri, Ulriksen, Damkilde, & Tcherniak, 2020](#)) να επιτυγχάνουν τον επιτυχή μετριασμό τους μέσω της τεχνικής συνολοκλήρωσης. 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](#)). Τέλος, οι κύριοι τύποι δυναμικής συμπεριφοράς, μίας πραγματικής εν λειτουργίᾳ ανεμογεννήτριας, επηρεάζονται και 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 ([Avendaño-Valencia & Fassois, 2014](#)).

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 Διπλωματική Εργασία και την μη χρήση ενεργοποιητή είναι αυτές των ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)) και ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)).

Οι εργασίες που πραγματοποίησαν ανίχνευση βλάβης και δεν συμπεριέλαβαν την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή στα διαθέσιμα σήματα, για εν λειτουργία πτερύγιο ανεμογεννήτριας υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, είναι αυτές των ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)), ([Tsikouras, 2020](#)), ([Konis, 2022](#)<sub>A</sub>), ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) και ([Stamopoulos, 2022](#)). Στην εργασία ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)) επετεύχθη αποτελεσματική ανίχνευση για μεγάλο αριθμό αισθητηρίων και όλα τα σενάρια βλάβης, ενώ με χρήση ενός αισθητηρίου η πιο μικρή βλάβη ανιχνεύεται λιγότερο ικανοποιητικά ([Tsikouras, 2020](#)). Και στις δύο εργασίες εφαρμόστηκαν οι μεθοδολογίες των MM και PCA, ενώ με λιγότερο από πέντε αισθητήρια και χρήση Υπερ-παραμέτρων με PCA παρουσιάστηκαν εξαιρετικά αποτελέσματα ανίχνευσης με μοντελοποίηση ARX ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) και VAR ([Konis, 2022](#)<sub>A</sub>), αντίστοιχα. Τέλος, με χρήση ίδιων αισθητηρίων με ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) και μεθοδολογίας Συνάρτησης Μετάδοσης (Σ.Μ.) πραγματοποιήθηκε επιτυχής ανίχνευση για μία από τις τρείς ρωγμές ([Stamopoulos, 2022](#)). Στο ίδιο πρόβλημα, με χρήση ενός αισθητηρίου και διεγέρητη πραγματοποιήθηκε επιτυχής έλεγχος στο εν λειτουργία πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), ενώ παρουσιάστηκε και η σημαντικότητα της θέσης του αισθητηρίου για την απόδοση ανίχνευσης ([Panagiotopoulos, Tcherniak & Fassois, 2022](#)). Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η επιτυχής ανίχνευση βλαβών με χρήση τεσσάρων και πέντε αισθητηρίων, απορρίπτοντας την κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή, καθιστώντας το σύστημα SHM όσο το δυνατόν πιο απλοποιημένο. 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 Διπλωματικής 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 Διπλωματική 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 Διπλωματικής 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

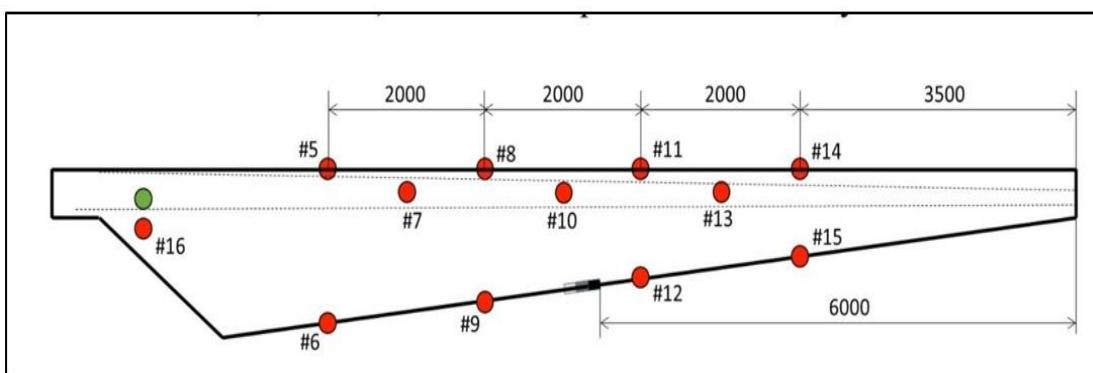
### 3.2 Περιγραφή των βλαβών

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 κουτί.



**Εικόνα 4.** Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)). Με κόκκινο και πράσινο χρώμα συμβολίζεται οι θέσεις των αισθητηρίων και του ενεργοποιητή, αντίστοιχα. Το λευκό, γκρι και μαύρο κουτί συμβολίζουν τις βλάβες των 15, 30 και 45 εκατοστών, αντίστοιχα.

### 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 τις τρείς ταχύτητες περιστροφής και τις τέσσερις καταστάσεις υγείας.

**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.

Το πρόβλημα, που αντιμετωπίζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά την ανίχνευση πρώιμων βλαβών σε εν λειτουργία πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 κανονικών διαστάσεων υπό κανονικές και περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας, με τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας της κατασκευής να επιτυχάνεται μέσω στοχαστικών ταλαντωτικών σημάτων. Στο πείραμα λαμβάνουν χώρα μία υγιής κατάσταση και τρείς καταστάσεις υπό βλάβη. Οι βλάβες είναι ρωγμές 15, 30 και 45 εκατοστών και δημιουργήθηκαν από την εξέλιξη της τεχνητής ρωγμής των 15 εκατοστών, στο κάτω άκρο (trailedge) του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας. Η κρουστική απόκριση του ενεργοποιητή τίθεται εκτός, με την διέγερση να προέρχεται από την περιστροφή του πτερυγίου στα 32 RPM. Οι μετρήσεις ελήφθησαν και παραχωρήθηκαν από τον Dr Tcherniak Dmitri στο Πολυτεχνείο της Δανίας (DTU) μέσα σε ένα διάστημα τεσσάρων περίπου μηνών, από τον Νοέμβριο του 2014 έως τον Μάρτιο του 2015. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, καθιστώντας το πρόβλημα ιδιαίτερα δύσκολο, αφού περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα δυναμικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου, αυξάνοντας έτσι την αβεβαιότητα των χαρακτηριστικών του.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιόπιστη ανίχνευση των τριών σεναρίων υπό βλάβη σε ένα εν κινήσει πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, μέσω της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX (Unsupervised-Multiple Models-Multiple Input Single Output-Transmittance Function- AutoRegressive with eXogenous pseudo-inputs). Για αξιόπιστο έλεγχο αποτελεσματικότητας των μεθόδων χρησιμοποιούνται καμπύλες ROC και το διάγραμμα διασποράς.

Ο κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας για το εν λειτουργία πτερύγιο είναι:

1. Η αποτελεσματική ανίχνευση των τριών βλαβών υπό κανονικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες μέσω στοχαστικών ταλαντωτικών σημάτων.

Όπως αναφέρεται στην Αναλυτική Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας, στις εργασίες ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)), ([Tsikouras, 2020](#)), ([Konis, 2022](#)<sub>A</sub>), ([Konis, 2022](#)<sub>B</sub>) και ([Stamopoulos, 2022](#)) πραγματοποιήθηκε, υπό πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, χωρίς την χρήση διεγέρτη, προσπάθεια ανίχνευσης βλαβών. Η πραγματοποίηση του πειράματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και η ταυτόχρονη απουσία διεγέρτη δυσχεραίνει την απόδοση ανίχνευσης, καθιστώντας το πρόβλημα ιδιαίτερα σύνθετο αλλά ρεαλιστικό.

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 της βελτίωσης των μεθόδων Πολλαπλών Μοντέλων με χρήση του MISO-TF-ARX.



## 5. Μεθοδολογία της Εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύσσεται παραμετρική μεθοδολογία βάσει Πολλαπλών Μοντέλων (MM). Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κύρια ιδέα της μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF-ARX τόσο στην φάση εκπαίδευσης όσο και στην φάση ελέγχου, με σκοπό ανίχνευση βλαβών. Κατά τις μεθόδους 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).

### 5.1. Μοντελοποίηση με Στοχαστικά Μοντέλα MISO-TF-ARX

Η μοντελοποίηση των εκάστοτε σημάτων επιτυγχάνεται μέσω στοχαστικού μοντέλου MISO-TF-ARX. Η μορφή του μοντέλου περιγράφεται από την παρακάτω (1), (Ljung, 1999):

$$y[t] + \sum_{i=1}^{n_a} a_i \cdot y[t-i] = \sum_{i=0}^{nb} \sum_{j=1}^{\delta} b_i^j \cdot x_j[t-i] + e[t] \quad (1)$$

$$e[t] \sim NID(0, \sigma^2_e)$$

Όπου οι παραπάνω συμβολισμοί αναφέρονται ως εξής:

$t=1, 2, \dots, N$	κανονικοποιημένος διακριτός χρόνος
$x_j[t]$	τιμή σήματος απόκρισης $j$ -οστής ψευδο-εισόδου χρονικής στιγμής $t$
$y[t]$	τιμή σήματος απόκρισης εξόδου χρονικής στιγμής $t$
$a_i$	$i$ - οστή παράμετρος του πολυωνύμου AR
$b_i^j$	$i$ -οστή παράμετρος της $j$ -οστής ψευδο-εισόδου του πολυωνύμου X
$\delta$	αριθμός ψευδο-εισόδων του πολυωνύμου X
$na$	τάξη του μοντέλου AR
$nb$	τάξη των εκάστοτε ψευδο-εισόδων του X μοντέλου
$e[t]$	υπόλοιπα μοντέλου ARX, λευκός θόρυβος γκαουσιανής κατανομής

Η (1) μπορεί να γραφτεί στο πεδίο του χρόνου σε διανυσματική μορφή και ως εξής:

$$y[t] = \varphi^T[t] * \theta + e[t] \quad (2)$$

Όπου

$$\varphi[t] = [-y[t-1] \dots -y[t-na] : x_1[t-1] \dots x_1[t-nb] \dots : x_\delta[t-1] \dots x_\delta[t-nb]]^T \quad \begin{array}{l} \text{Διάνυσμα Παλινδρόμησης} \\ \text{(regression vector)} \end{array}$$

$$\theta = [\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_{na} : b_1^1, b_2^1, \dots, b_{nb}^1 : \dots : b_1^\delta, b_2^\delta, \dots, b_{nb}^\delta]^T \quad \begin{array}{l} \text{Χαρακτηριστικό Διάνυσμα} \\ \text{(διάνυσμα παραμέτρων)} \end{array}$$

$$e[t] \quad \begin{array}{l} \text{Σφάλμα πρόβλεψης ενός} \\ \text{βήματος} \end{array}$$

Η εκτίμηση του άγνωστου χαρακτηριστικού διανύσματος (διάνυσμα παραμέτρων) των μοντέλων MISO-TF-ARX γίνεται με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων(Least Squares Method), ([Ljung, 1999](#)) που ανήκει στις μεθόδους σφάλματος πρόβλεψης (Prediction Error Methods) ως εξής:

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e^2[t] \quad (3)$$

Όπου  $N$  το μήκος των σημάτων.

Παραγωγίζοντας και μηδενίζοντας την παράγωγο της παραπάνω (3), προκύπτει η ελαχιστοποίησή της που οδηγεί στην ακόλουθη εκτιμήστρια ελαχίστων τετραγώνων.

$$\hat{\theta} = \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi[t] \varphi^T[t] \right)^{-1} \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi[t] y[t] \right) \quad (4)$$

Έχοντας προκύψει το εκτιμηθέν διάνυσμα των παραμέτρων  $\hat{\theta}$  από την (4), εκτιμάται και η διασπορά ως εξής:

$$\hat{\sigma}_w^2 = \hat{\sigma}_e^2(\hat{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e^2[t, \hat{\theta}] \quad (5)$$

Το μοντέλο AR μοντελοποιεί την έξοδο του συστήματός μέσω κατάλληλης επιλογής τάξης  $n_a$ , ενώ η μοντελοποίηση των ψευδο-εισόδων επιτυγχάνεται μέσω του μοντέλου  $X$  τάξης  $n_b$  των εκάστοτε δ ψευδο-εισόδων. Σημειώνεται πως, για MISO-TF-ARX η τάξη  $n_b$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων των εκάστοτε αισθητηρίων που αποτελούν τις δ ψευδο-εισόδους της TF. Η εύρεση κατάλληλης τάξης μοντέλου MISO-TF-ARX( $n_a, n_b^1, n_b^2, \dots, n_b^\delta$ ) επιλέγεται μέσω των κριτηρίων Bayesian Inspection Criterion (BIC), (6), και Residual Sum of Squares προς Series Sum of Squares (RSS/SSS), (7), ως εξής:

$$BIC = \ln(\hat{\sigma}_w^2) + \dim\theta \frac{1}{N} \ln(N) \quad (6)$$

Όπου

$N$	Μήκος σήματος
$\hat{\sigma}_w^2$	Εκτιμηθήσα διασπορά λευκού θορύβου
$\dim\theta$	Διάσταση διανύσματος $\theta$

$$\frac{RSS}{SSS} = \frac{\left[ \sum_{t=1}^N e^2[t] \right]}{\left[ \sum_{t=1}^N y^2[t] \right]} * 100 \quad (7)$$

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας της επιλεχθείσας τάξης, ελέγχεται ο αριθμός των δειγμάτων ως προς τις επιλεγμένες παραμέτρους, Samples Per Parameter (SPP), ως εξής:

$$SPP = \frac{N}{\dim\theta} \quad (8)$$

### 5.1.1. Φάση Εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX

Κατά την Φάση Εκπαίδευσης της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX, λαμβάνονται  $p$  σήματα στοχαστικής ταλάντωσης από κάθε αισθητήριο πάνω στο σώμα της κατασκευής. Βάσει αυτών κατασκευάζονται  $p$  μοντέλα MISO-TF-ARX, έστω  $M_{o,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, p$ ). Το σύνολο των  $M_{o,k}$  αποτελεί τον Υγιή Υποχώρο της μεθόδου. Κάθε ένα μοντέλο  $M_{o,k}$  αποτελείται από την εκτιμώμενη χαρακτηριστική ποσότητα  $\theta_{o,k}$ , όπου υπολογίζεται από τις παραμέτρους  $n_a$  και  $n_b$  των μοντέλων MISO-TF-ARX( $n_a, n_b^1, n_b^2, \dots, n_b^\delta$ ), για το επιλεγμένο εύρος συχνοτήτων, ως εξής:

$$\theta_{o,k} = [a_{1,k}, a_{2,k}, \dots, a_{n_a,k} : b_{1,k}^1, b_{2,k}^1, \dots, b_{n_b,k}^1 : \dots : b_{1,k}^\delta, b_{2,k}^\delta, \dots, b_{n_b,k}^\delta]^T \quad (9)$$

Όπου,

$a_{i,k}$  i-οστή παράμετρος του τμήματος AR της k μέτρησης.

$b_{i,k}^1$  i-οστή παράμετρος του τμήματος X της k μέτρησης της 1<sup>ης</sup> ψευδο-εισόδου

$b_{i,k}^\delta$  i-οστή παράμετρος του τμήματος X της k μέτρησης της δ-οστής ψευδο-εισόδου

### 5.1.2. Φάση ελέγχου της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX

Στην Φάση Ελέγχου, λαμβάνονται νέα άγνωστα σήματα από κάθε αισθητήριο, εκτιμώνται τα νέα μοντέλα MISO-TF-ARX 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:

$$\begin{aligned} D(M_u, M_{o,k}) &\leq l_{lim} \Rightarrow \text{Υγιής Λειτουργία} \\ \text{διαφορετικά} &\Rightarrow \text{Λειτουργία υπό βλάβη} \end{aligned} \quad (10)$$

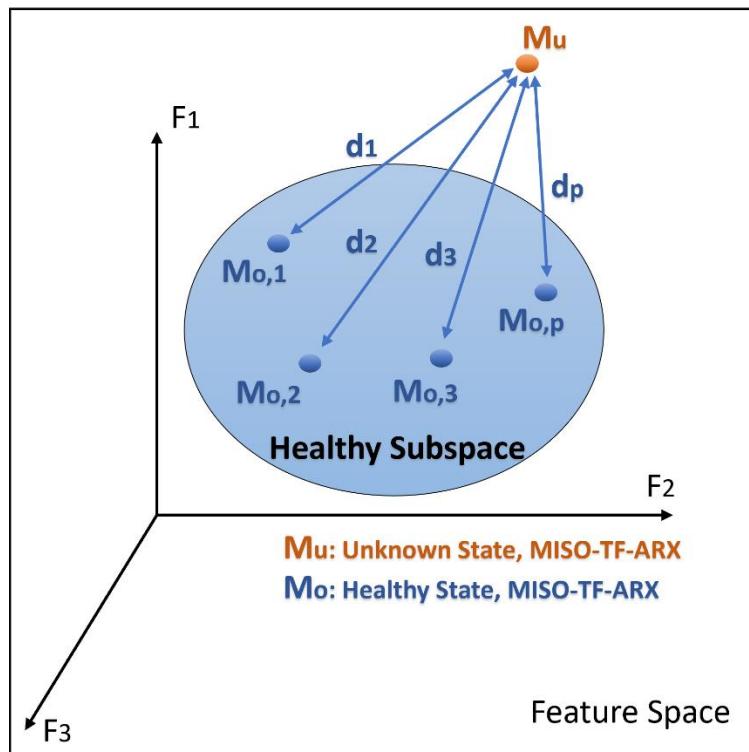
Υπολογίζοντας την ελάχιστη απόσταση της αναπαράστασης  $M_u$  από τον υγιή υποχώρο  $M_o$  ξεχωριστά, πραγματοποιείται το προαναφερθέν ψευδο-στατιστικό τεστ ως εξής:

$$D(M_u, M_{o,k}) = \min_i \{i \in 1, 2, \dots, p \mid d(M_u, M_{o,k})\} \quad (11)$$

Όπου  $d(M_u, M_{o,k})$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο MISO-TF-ARX, η οποία υπολογίζεται μέσω της απόκλισης Kullback – Leibler (Joyce, 2011). Εφόσον, τα διανύσματα των παραμέτρων τείνουν ασυμπτωματικά ( $N \rightarrow \infty$ ) να ακολουθήσουν κανονικές κατανομές, τότε η απόκλιση Kullback – Leibler υπολογίζεται ως εξής:

$$d(M_u, M_{o,k}) = \frac{1}{2} \left[ \text{tr}(\Sigma_{o,k}^{-1} \Sigma_u) + (\boldsymbol{a}_{o,k} - \boldsymbol{a}_u)^T \Sigma_{o,k}^{-1} (\boldsymbol{a}_{o,k} - \boldsymbol{a}_u) - 1 - \ln \left( \frac{\det \Sigma_u}{\det \Sigma_{o,k}} \right) \right] \quad (12)$$

Στην παρακάτω [Εικόνα 5](#) παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση των μεθόδων Πολλαπλών Μοντέλων.



**Εικόνα 5.** Σχηματική απεικόνιση Μεθόδου Πολλαπλών Μοντέλων βασιζόμενη με MISO-TF-ARX.

## 5.2 Υποθέσεις και παραδοχές

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

1. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες παραμένουν σταθερές.
2. Οι λειτουργικές συνθήκες παραμένουν σταθερές.
3. Στα πειράματα δεν ισχύουν ταυτόχρονα δύο καταστάσεις, παρά μόνο μία. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα λαμβάνουν χώρα τέσσερις καταστάσεις, μία υγιής και τρείς υπό βλάβη.

### 5.3 Συσχέτιση με εναλλακτικές μεθοδολογίες

Στην παρούσα ενότητα 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 ίδια πειραματική διάταξη και πειραματικά δεδομένα με την παρούσα. Οι κύριες διαφορές των 7 εργασιών που ακολουθούν έγκειται στην χρήση κρουστικής, κατάλληλων αισθητηρίων και ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας.

Σχετικά με τις εργασίες που εφαρμόστηκε η διέγερση του ενεργοποιητή και πλήθος αισθητηρίων στα 32RPM, επετεύχθη αποτελεσματική ανίχνευσης των δύο μεγαλύτερων ρωγμών ([Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015](#)) αλλά και των τριών βλαβών ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), με την τελευταία να επεκτείνεται και στα 43RPM. Αν και συγκεκριμένες θέσεις αισθητηρίων παρέχουν περισσότερη πληροφορία συγκριτικά με άλλες και η μείωση των αριθμών των επιταχυνσιομέτρων υποβαθμίζει την αποτελεσματική ανίχνευση ([Tcherniak & Mølgaard, 2017](#)), πραγματοποιήθηκε επιτυχής ανίχνευση με χρήση ενός αισθητηρίου για τις βλάβες των 30 και 45 εκατοστών ([Tsikouras, 2020](#)). Επιπλέον, επιτεύχθηκε ανίχνευση και για τα τρία σενάρια βλάβης ([Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021](#)), ενώ εξετάστηκε και η απόδοση ανίχνευσης για κάθε ένα αισθητήριο ξεχωριστά ([Panagiotopoulos, Tcherniak & Fassois, 2022](#)).

Η αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης δυσχεραίνει στις περιπτώσεις μη εκμετάλλευσης της κρουστικής του ενεργοποιητή είτε με λιγότερα από 5 αισθητήρια ([Stamopoulos, 2022](#)), είτε και με μεγάλο πλήθος επιταχυνσιομέτρων ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)). Στην ([Stamopoulos, 2022](#)) πραγματοποιήθηκε μερικώς ικανοποιητική ανίχνευση μόνο για την μεγαλύτερη βλάβη, ενώ στην ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)) οι ρωγμές των 30 και 45 εκατοστών ανιχνεύτηκαν ικανοποιητικά. Ωστόσο, μέσω εφαρμογής μεθοδολογιών PCA και MM και χρήση ενός αισθητηρίου επετεύχθη, εκτός της επιτυχής ανίχνευσης των δύο μεγαλύτερων ρωγμών, οριακή ανίχνευση για την μικρότερη ([Tsikouras, 2020](#)). Τέλος, εξαιρετικά αποτελέσματα ανίχνευσης πραγματοποιήθηκαν για τις εκάστοτε ρωγμές μέσω καινούργιας, αυτοματοποιημένης ως προς τον χρήστη, μεθοδολογίας Υπερ-Σφαιρών με μοντελοποίηση ARX ([Konis, 2022](#))<sub>B</sub> και VAR ([Konis, 2022](#))<sub>A</sub>. Παρακάτω, παρατίθεται συγκεντρωτικός [Πίνακας 4](#) των παραπάνω σχολιασμών.

**Πίνακας 4.** Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας Vestas V27 και τα χαρακτηριστικά τους.

Έρευνες	Χρήση Κρουστικής	Αισθητήρια	Επιτυχής Ανίχνευση	Ταχύτητα Περιστροφής
(Ulriksen, Tcherniak, & Damkilde, 2015)	ΝΑΙ	11	30cm 45cm	43RPM
(Tcherniak & Mølgård, 2017)	ΝΑΙ	3 έως 11	15cm 30cm 45cm	32RPM 43RPM
(Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018)		11	30cm 45cm	32 RPM
(Tsikouras, 2020)	ΝΑΙ	1	30cm 45cm	32 RPM
(Tsikouras, 2020)	ΟΧΙ	1	15cm(οριακά) 30cm 45cm	32 RPM
(Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021)	ΝΑΙ	1	30cm 45cm	32RPM
(Panagiotopoulos, Tcherniak, & Fassois, 2021)	ΝΑΙ	8	15cm 30cm 45cm	32RPM
(Panagiotopoulos, Tcherniak & Fassois, 2022)	ΝΑΙ	1	15cm 30cm 45cm	32RPM
(Konis, 2022) <sub>B</sub>	ΟΧΙ	4,5	15cm 30cm 45cm	32RPM
(Konis, 2022) <sub>A</sub>	ΟΧΙ	3,4	15cm 30cm 45cm	32RPM
(Stamopoulos, 2022)	ΟΧΙ	5	45cm (μερικώς ικανοποιητική)	32RPM

## 6. Προ-Επεξεργασία και Προκαταρκτική Ανάλυση Σημάτων

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εφαρμόζεται μεθοδολογία MISO-TF-ARX για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, για 240 σήματα υγείας. Στην εργασία (Stamopoulos, 2022) υπολογίστηκε το Multiple Coherence Function (MCF) και Coherence Function (CF) για την εύρεση κατάλληλων σημάτων και αισθητηρίων με τα λιγότερα μη γραμμικά χαρακτηριστικά, αντίστοιχα. Βάσει αυτών δημιουργήθηκαν μη παραμετρικά μοντέλα MISO-TF, με τα αποτελέσματα ανίχνευσης να υποδεικνύουν ως βέλτιστο αριθμό ψευδο-εισόδων τα 3 και 4. Στον παρακάτω Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται στην μεθοδολογία U-MM-MISO-TF-ARX των τριών και τεσσάρων ψευδο-εισόδων, καθώς επίσης και ο αρχικός και τελικός αριθμός σημάτων υγείας.

**Πίνακας 5.** Υπόδειξη αισθητηρίων για την εφαρμογή παραμετρικής μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF-ARX τριών και τεσσάρων ψευδο-εισόδων και αρχικός και τελικός αριθμός σημάτων υγείας που χρησιμοποιούνται.

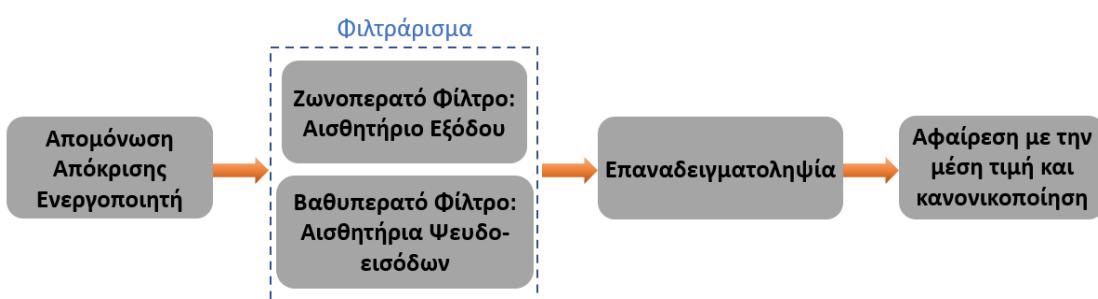
Μεθοδολογία	Αισθητήρια Ψευδο-εισόδου	Αισθητήριο εξόδου
U-MM-MISO-TF-ARX	15, 9, 6	12
U-MM-MISO-TF-ARX	15, 9, 6, 7	12

Αρχικός Αριθμός Σημάτων Υγείας: 250  
Τελικός Αριθμός Σημάτων Υγείας: 240

Στην εργασία (Stamopoulos, 2022) πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη προ-επεξεργασία και προκαταρκτική ανάλυση των σημάτων ενδεικτικά για μία ψευδο-είσοδο (Αισθητήριο 15) και την έξοδο (Αισθητήριο 12) της Σ.Μ.. Συνοπτικά, 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 διαίρεση με τυπική απόκλιση.

Μελετάται το συχνοτικό περιεχόμενο από 1000 έως 1500Hz, εφαρμόζοντας ζωνοπερατό φίλτραρισμα για το αισθητήριο εξόδου ( $12^{\circ}$  επιταχυνσιόμετρο) και βαθυπερατό για τις ψευδο-εισόδους. Στην παρακάτω Εικόνα 6 παρουσιάζεται σε μορφή διαγράμματος ροής η διαδικασία προ-επεξεργασίας των σημάτων.



Εικόνα 6. Διαδικασία προ-επεξεργασίας σημάτων.

Ακολούθως, παρουσιάζεται συνοπτικός [Πίνακας 6](#) με τα χαρακτηριστικά των αρχικών και τελικών σημάτων και ο αριθμός των εκάστοτε σημάτων που χρησιμοποιούνται στην φάση εκπαίδευσης και ελέγχου για τις τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας.

**Πίνακας 6.** Χαρακτηριστικά αρχικών και τελικών σημάτων και αριθμός σημάτων της φάσης εκπαίδευσης και ελέγχου για τις εκάστοτε καταστάσεις.

Καταστάσεις Λειτουργίας	Υγιής	Ρωγμή 15cm	Ρωγμή 30cm	Ρωγμή 45cm
<b>Σήματα Φάσης Εκπαίδευσης</b>	100	-	-	-
<b>Σήματα Φάσης Ελέγχου</b>	140	50	50	50
<b>Αρχικά Σήματα</b>		Μήκος Σήματος: 491520 δείγματα (30s)		
		Συχνότητα Δειγματοληψίας: 16384 Hz		
<b>Τελικά Σήματα</b>		Μήκος Σήματος: 61440 δείγματα (15s)		
		Συχνότητα Δειγματοληψίας: 4096 Hz		

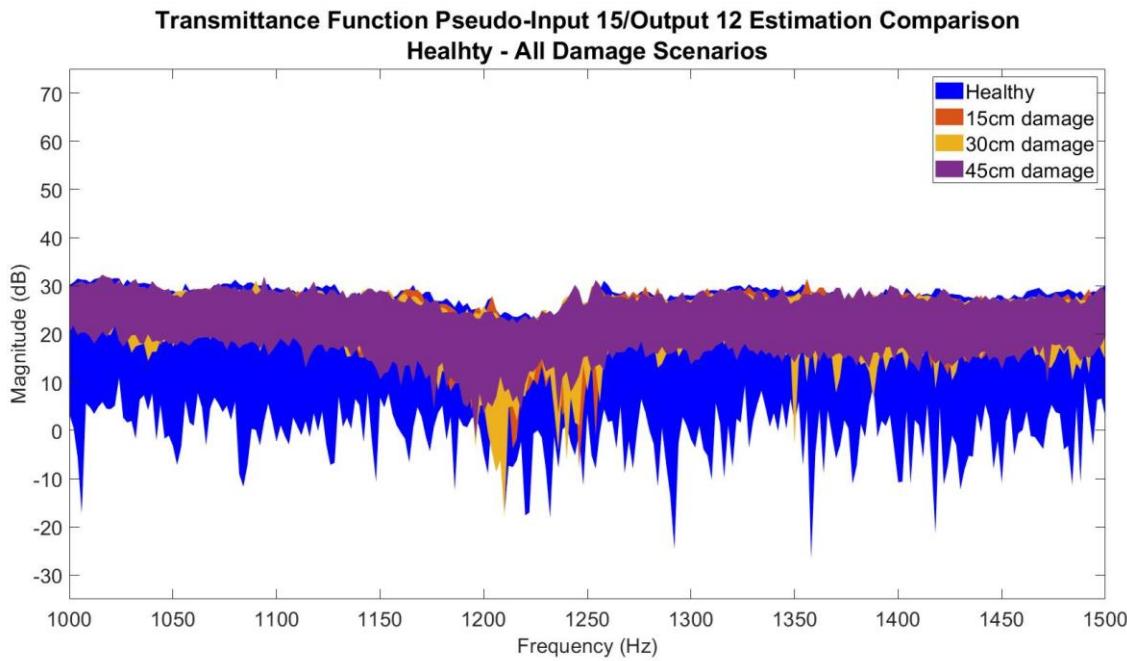
### 6.1 Επίδραση των βλαβών στην Δυναμική της Κατασκευής

Στην [Εικόνα 7](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά για μία από τις ψευδο-εισόδους η επίδραση των τριών σεναρίων βλάβης στην δυναμική της κατασκευής, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της εργασίας ([Stamopoulos, 2022](#)), [Πίνακας 7](#).

**Πίνακας 7.** Χαρακτηριστικά τελικών παραμέτρων εκτιμήσεων *tfeestimate*.

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

Σημειώνεται πως, 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. 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.



**Εικόνα 7.** Η δυναμική της κατασκευής στην κατάσταση υγείας συγκρινόμενη με τα τρία σενάρια υπό βλάβη, μέσω εκτίμησης  $t\text{festimate}$ , για τα αισθητήρια ψευδο-εισόδου και εξόδου, 15 και 12, αντίστοιχα (Stamopoulos, 2022).

## 6.2 Μοντελοποίηση σημάτων μέσω Παραμετρικής μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX

Τα στάδια μοντελοποίησης μέσω παραμετρικής μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX αφορούν κριτήρια επιλογής τάξης και επιβεβαίωσης επιλεχθέντος μοντέλου. Τα μοντέλα του MISO-TF-ARX που εκτιμώνται αφορούν τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους. Στην παρούσα εργασία, η τάξη έκαστων ψευδο-εισόδων  $n_b$  θα είναι ίδια με την τάξη της εξόδου  $n_a$ . Επομένως, για τάξη μοντέλου  $n_a = n_b = n$  οι παράμετροι που εκτιμώνται έχουν ως εξής:

1. Για MISO-TF-ARX( $n_a, n_b, n_b, n_b$ ) είναι :

$$n_a + 3n_b = n + 3n = 4n \quad (14)$$

2. Για MISO-TF-ARX( $n_a, n_b, n_b, n_b, n_b$ ) είναι :

$$n_a + 4n_b = n + 4n = 5n \quad (15)$$

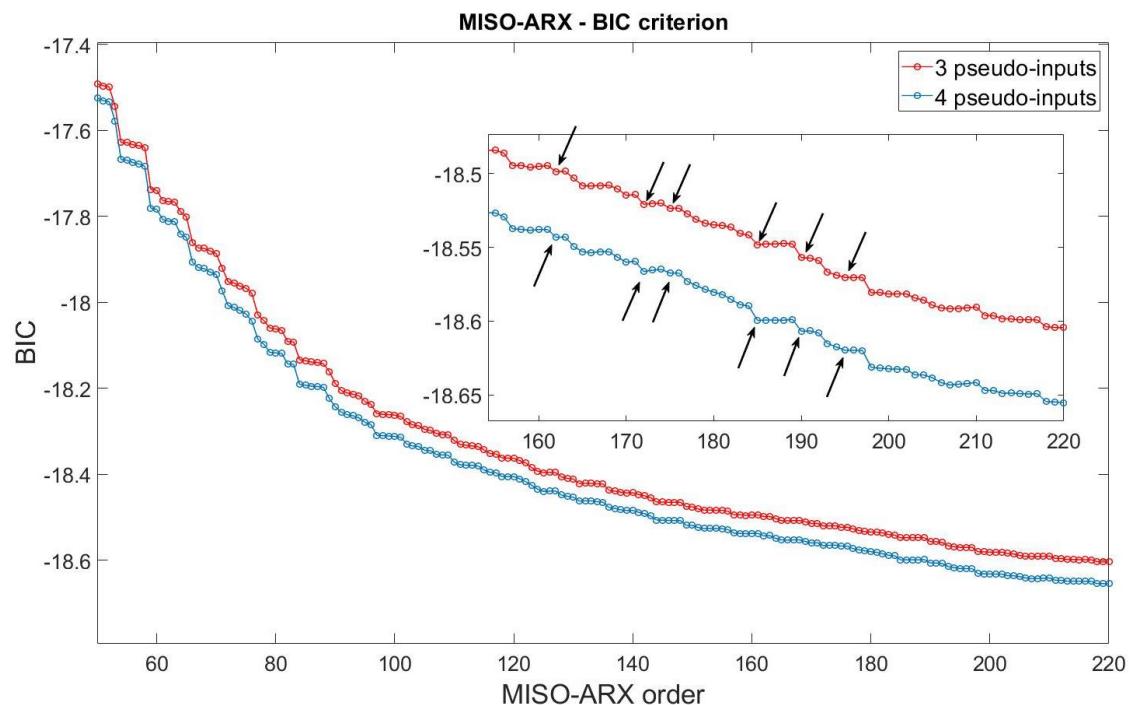
Τα κριτήρια επιλογής τάξης είναι τα εξής:

1. Bayesian Information Criterion (BIC).
2. Residuals Sum of Square / Sample Sum of Square (RSS/SSS).
3. Samples Per Parameter (SPP).
4. Condition Number.

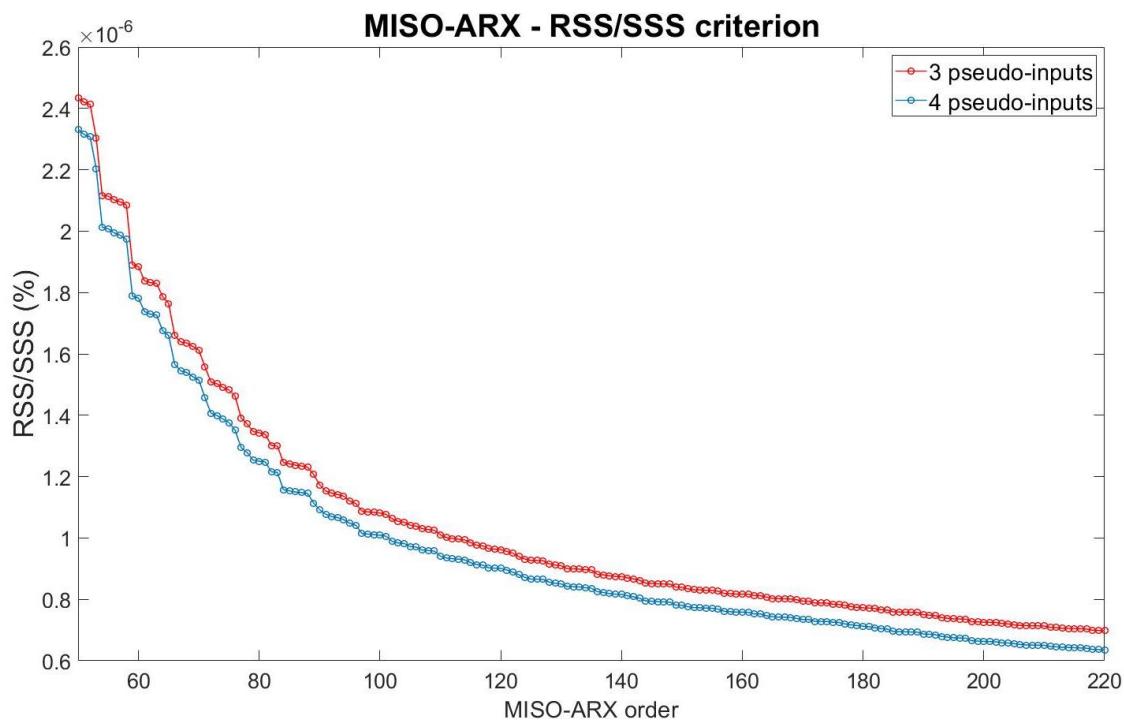
Τα κριτήρια επιβεβαίωσης επιλεχθέντος μοντέλου, τα οποία παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα είναι:

1. Σύγκριση παραμετρικού με το μη παραμετρικό μοντέλο.
2. Έλεγχος λευκότητας υπολοίπων επιλεχθέντος μοντέλου με τις ψευδο-εισόδους μέσω Συνάρτησης Διασταυρούμενης Συσχέτισης (Cross-Covariance Function, CCF).

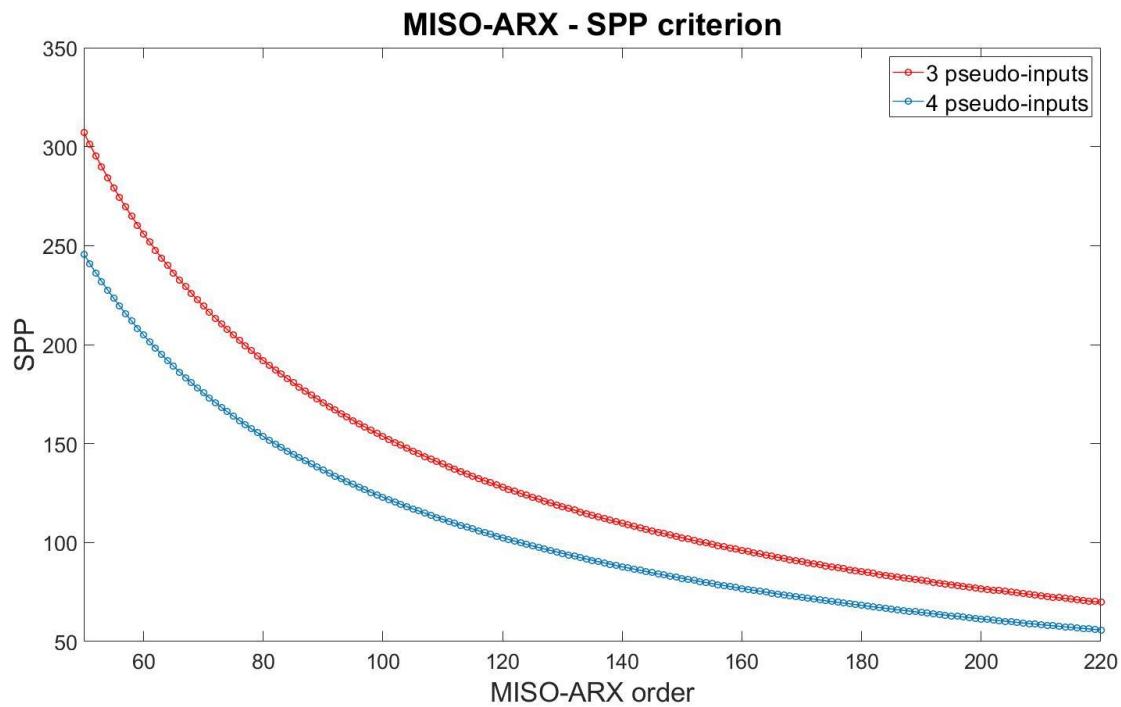
Το πρώτο στάδιο επιλογής τάξης για την παραμετρική μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX επιτυγχάνεται μέσω ελαχιστοποίησης των κριτηρίων BIC, (6), και RSS/SSS, (7). Απαραίτητη προϋπόθεση κατά την εύρεση τάξης είναι όλες οι χρονοσειρές των εκάστοτε καταστάσεων να μοντελοποιούνται με μοντέλο ίδιας τάξης. Ενδεικτικά, για ένα σήμα από την κατάσταση υγείας, παρουσιάζονται στις [Εικόνες 8](#) και [9](#) τα αντίστοιχα κριτήρια BIC και RSS/SSS για τρεις (κόκκινη γραμμή) και για τέσσερις (μπλε γραμμή) ψευδο-εισόδους. Αντί της ελαχιστοποίησης παρατηρείται σταθεροποίηση του κριτηρίου BIC, κυρίως για τάξεις άνω των 160, με το αντίστοιχο RSS/SSS κριτήριο να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά. Επιπλέον, τα τοπικά ελάχιστα των κριτηρίων BIC και RSS/SSS φαίνεται να συμφωνούν, για το εκάστοτε πλήθος ψευδο-εισόδων, με την μόνη διαφορά να διακρίνεται ως προς το μέτρο. Τέλος, στην [Εικόνα 10](#) παρατίθεται το SPP, αντίστοιχα για 3 και 4 ψευδο-εισόδους, το οποίο υποδεικνύει τιμές αποδεκτές -άνω του 15- για τάξεις 50 έως και 220. Επομένως, σύμφωνα και με τα παραπάνω, οι υποψήφιες τάξεις που χρήζουν περισσότερη διερεύνηση είναι οι 162, 172, 175, 185, 190 και 195.



**Εικόνα 8.** Κριτήριο BIC για 3 και 4 ψευδο-εισόδους, για τυχαίο σήμα της κατάστασης υγείας.



Εικόνα 9. Κριτήριο RSS/SSS για 3 και 4 ψευδο-εισόδους, για τυχαίο σήμα της κατάστασης υγείας.

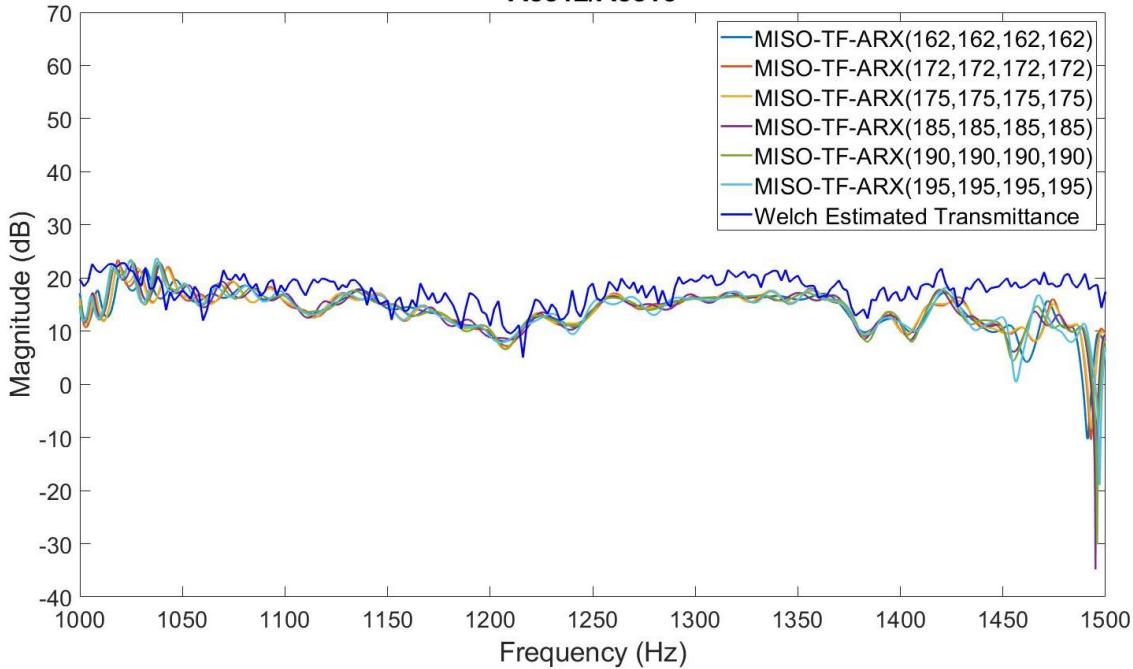


Εικόνα 10. Κριτήριο SPP για 3 και 4 ψευδο-εισόδους, για τυχαίο σήμα της κατάστασης υγείας.

Με τα κριτήρια επιλογής τάξης να μην υποδεικνύουν συγκεκριμένη τάξη, ακολουθείται η σύγκλιση των παραμετρικών Transmittances για τις υποψήφιες τάξεις και η σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό. Βέλτιστη παραμετρική μοντελοποίηση MISO-TF-ARX θεωρείται η πλήρης ταύτιση του με το μη παραμετρικό MISO-TF. Ωστόσο, στα διαθέσιμα σήματα εμπεριέχεται έντονα το στοιχείο της αβεβαιότητας και του θορύβου, λόγω της διεξαγωγής των πειραμάτων υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Επομένως, το μη παραμετρικό MISO-TF επιτυγχάνει μοντελοποίηση θορύβου και αβεβαιότητας, εκτός της υγιής δυναμικής της κατασκευής. Αυτό, παρατηρείται λόγω της έντονης στοχαστικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα μη παραμετρικά MISO-TF για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους στις [Εικόνες 11](#) και [12](#), αντίστοιχα. Γι' αυτό το λόγο και η επιλογή τάξης είναι στην ευχέρεια και στην κρίση του χρήστη.

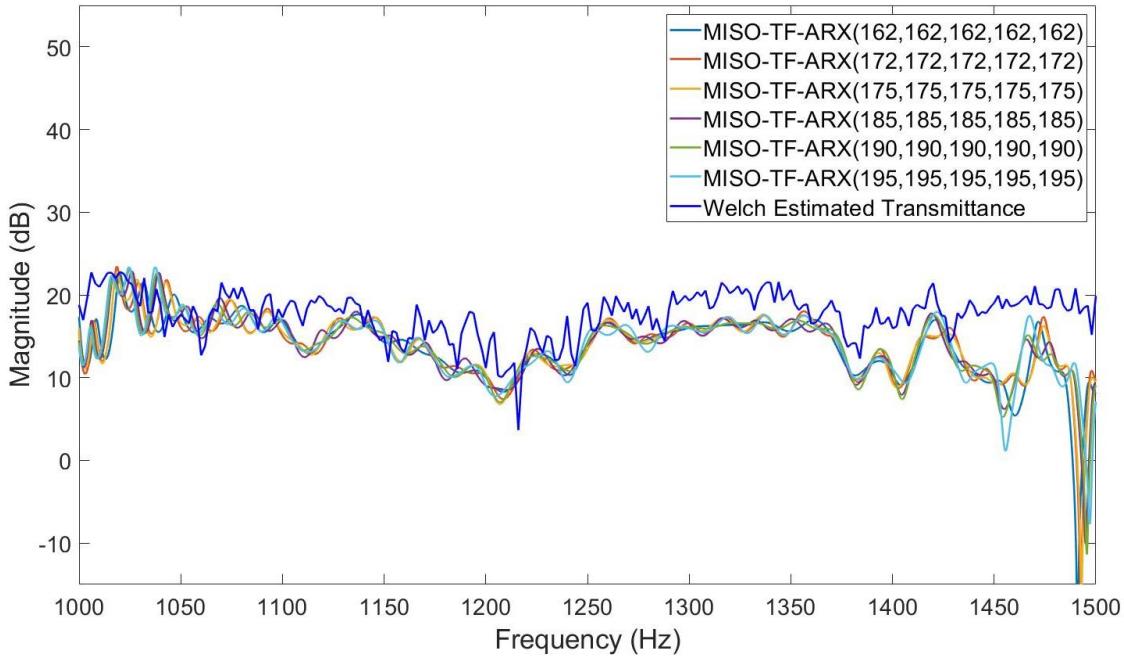
Στις παρακάτω [Εικόνες 11](#) και [12](#) παρουσιάζεται ενδεικτικά για το αισθητήριο 15, η εκτίμηση Transmittance κατά Welch και τα παραμετρικά MISO-TF-ARX για τις υποψήφιες τάξεις, για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, αντίστοιχα. Για τους εκάστοτε αριθμούς ψευδο-εισόδων και για τάξεις άνω από 172 παρουσιάζεται ενδεχομένως μια σχετική σύγκλιση για το εύρος συχνοτήτων 1150 έως και περίπου 1425, ενώ η σύγκλιση φαίνεται να χειροτερεύει για συχνότητες που δεν ανήκουν στο εύρος αυτό. Για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, η μοντελοποίηση έκαστων παραμετρικών μοντέλων δεν επαρκεί όσον αφορά τη σύγκρισή τους με το μη παραμετρικό Transmittance. Ωστόσο, λόγω της έντονης στοχαστικής συμπεριφοράς των μη παραμετρικών Transmittances, διακρίνεται να προσεγγίζεται η μορφή τους από τα παραμετρικά μοντέλα άνω των 172 τάξεων. Αν και η τάξη 195 για έκαστες ψευδο-εισόδους, φαίνεται να ξεχωρίζει των υπόλοιπων παραμετρικών μοντέλων ως προς την καταλληλότητα επιλογής, δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά την δυναμική της κατασκευής. Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** παρουσιάζονται αναλυτικά για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, η σύγκλιση των MISO-TF-ARX για τις υποψήφιες τάξεις και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα μη παραμετρικά MISO-TF.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Input  
Acc12/Acc15**



*Εικόνα 11.* Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc15**

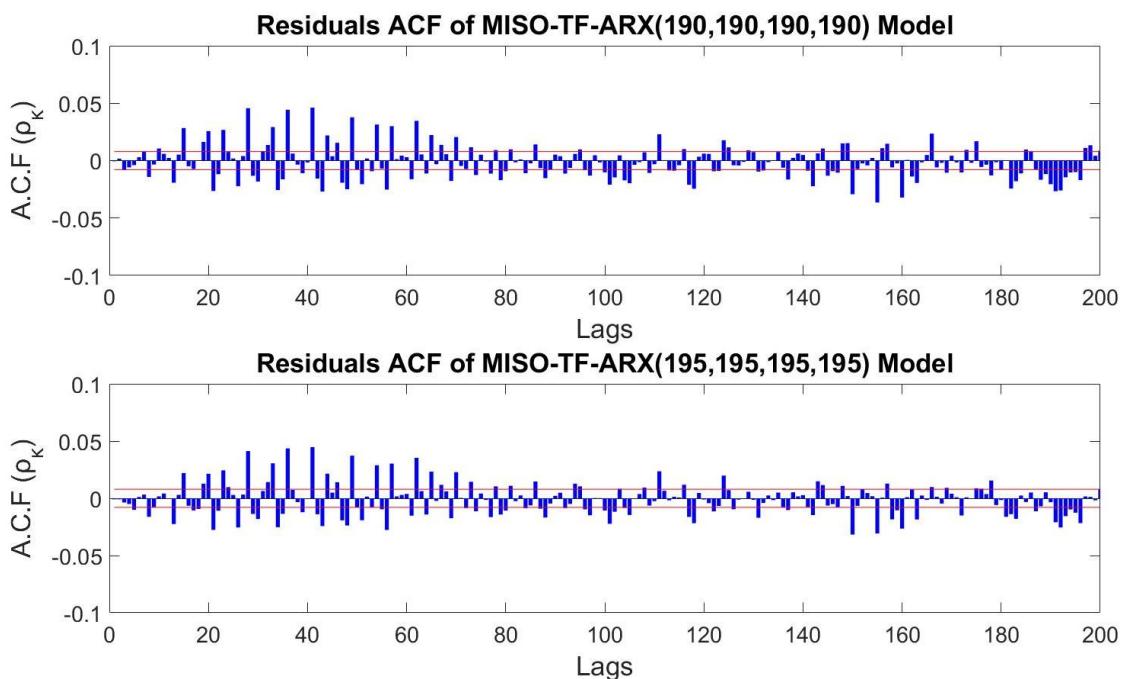


*Εικόνα 12.* Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

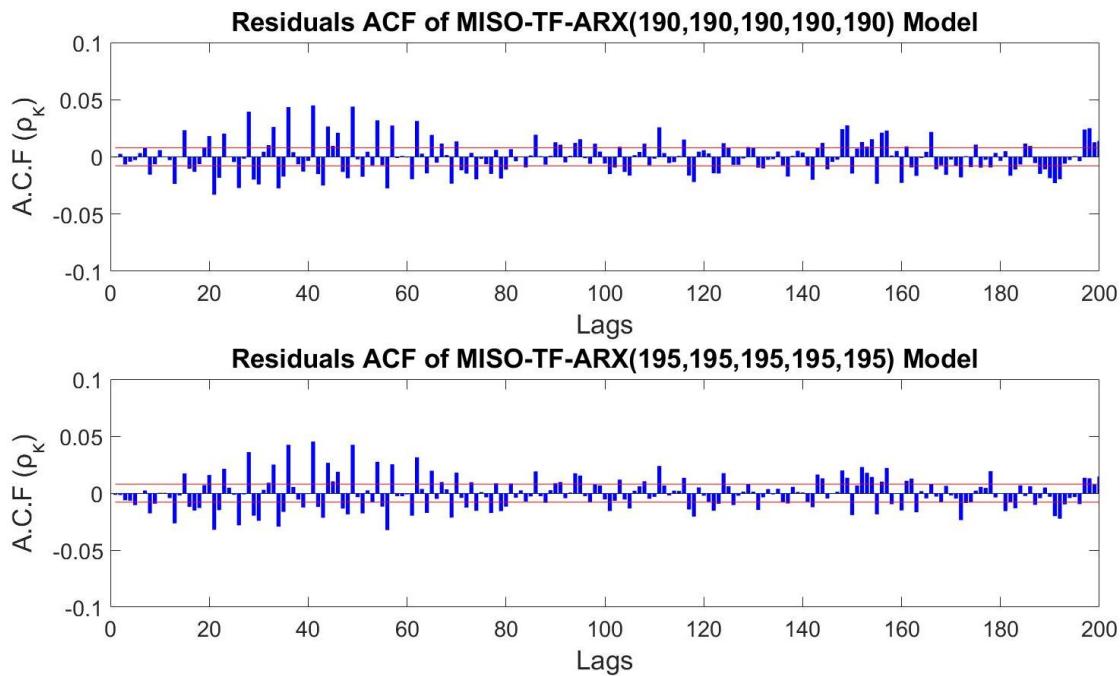
Από τις παραπάνω [Εικόνες 11](#) και [12](#) προκύπτει πως, καμία από τις υποψήφιες τάξεις δεν μοντελοποιεί ικανοποιητικά την δυναμική της κατασκευής. Ένας λόγος είναι πως, οι Transmittance Functions δεν μοντελοποιούνται με τέλεια ακρίβεια από μοντέλα ARX. Επιπλέον, η επιλογή μεγαλύτερων τάξεων δημιουργεί τα εξής προβλήματα:

1. Ξεφεύγει από την φυσική του προβλήματος για λόγους αιτιατότητας.
2. Πραγματοποιείται Overfitting.
3. Πραγματοποιείται υπερ-παραμετρικοποίηση με αποτέλεσμα την μοντελοποίηση θορύβου και αβεβαιότητας.

Στις παρακάτω [Εικόνες 13](#) και [14](#) παρουσιάζεται για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, αντίστοιχα, η Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης (AutoCorrelation Function, ACF) των υπολοίπων, ενδεικτικά για τάξεις μοντέλων 190 και 195. Παρατηρείται πως, η ACF των υπολοίπων δεν είναι λευκή καθώς περισσότερες από το 5% των τιμών της βρίσκονται εκτός στατιστικού ορίου. Πιο συγκεκριμένα, για 200 lags τα στατιστικά όρια δεν πρέπει να υπερβαίνονται πάνω από 10 τιμές. Στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α](#) παρουσιάζονται για τις εναπομείνασες υποψήφιες τάξεις η ACF των υπολοίπων.



**Εικόνα 13.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων  $MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190)$  και  $MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195)$ .

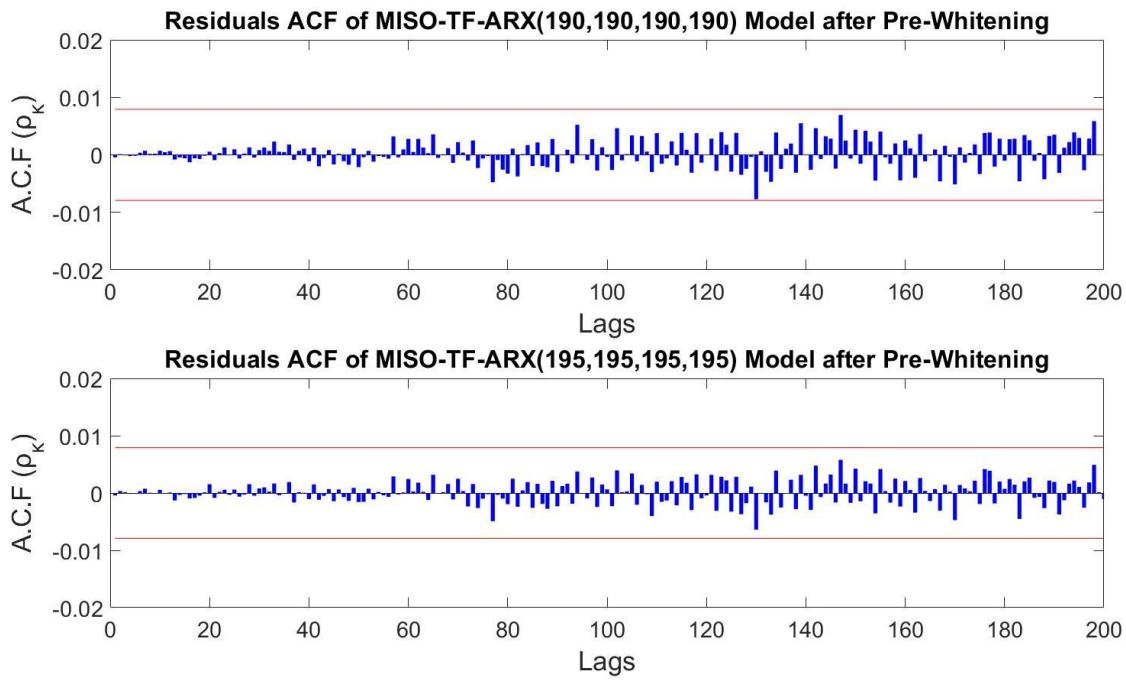


**Εικόνα 14.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων  $MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190, 190)$  και  $MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195, 195)$ .

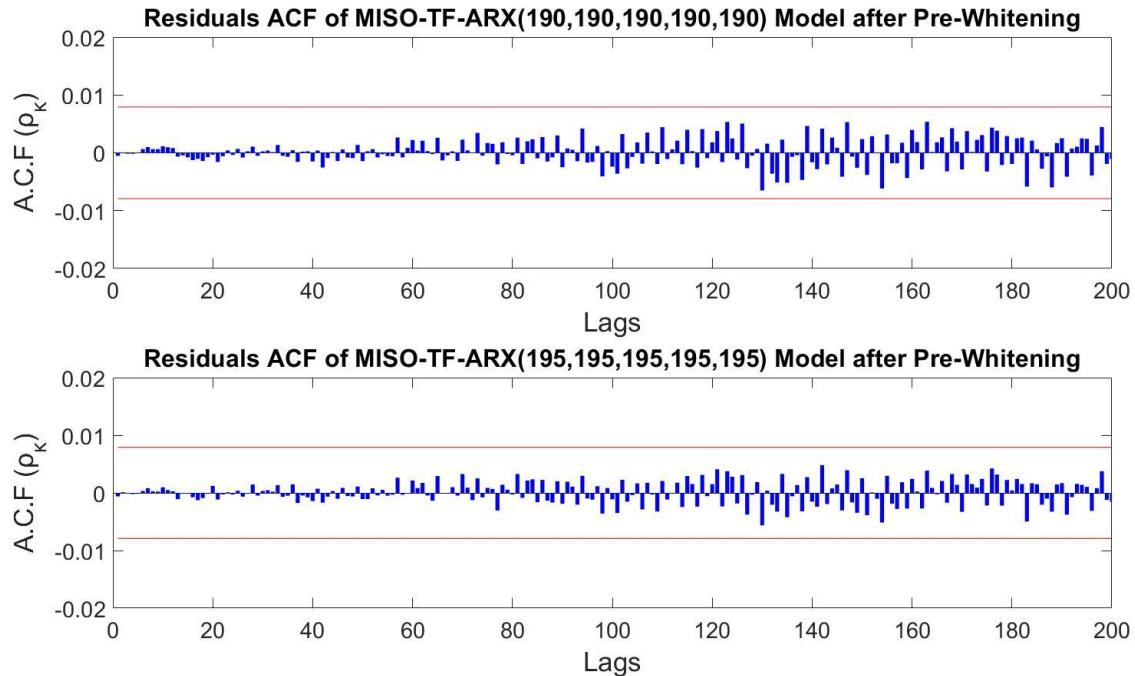
Σύμφωνα με τις παραπάνω [Εικόνες 13 και 14](#), παρατηρείται πως τα υπόλοιπα δεν είναι λευκά για τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους και τις αντίστοιχες τάξεις 190 και 195. Γι' αυτό τον λόγο, εφαρμόζεται λεύκανση (pre-whitening) έτσι ώστε να συγκριθεί η CCF των υπολοίπων με την κάθε ψευδο-είσοδο ξεχωριστά. Η διαδικασία της λεύκανσης έχει ως εξής:

1. Υπολογισμός υπολοίπων εκάστοτε υποψήφιων τάξεων.
2. Μοντελοποίηση υπολογισμένων υπολοίπων με μοντέλο AR τάξης 200.
3. Υπολογισμός υπολοίπων που μοντελοποιήθηκαν με μοντέλο AR τάξης 200.

Στις [Εικόνες 15 και 16](#) παρουσιάζεται η ACF των υπολοίπων των τάξεων 190 και 195, μετά την διαδικασία του Pre-Whitening για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, αντίστοιχα. Παρατηρείται πως, για εκάστοτε αριθμό ψευδο-εισόδων, τα υπόλοιπα των τάξεων 190 και 195 είναι λευκά. Στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α](#) παρατίθενται για τις εναπομείνασες υποψήφιες τάξεις η ACF των υπολοίπων μετά την διαδικασία του Pre-Whitening, για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους.



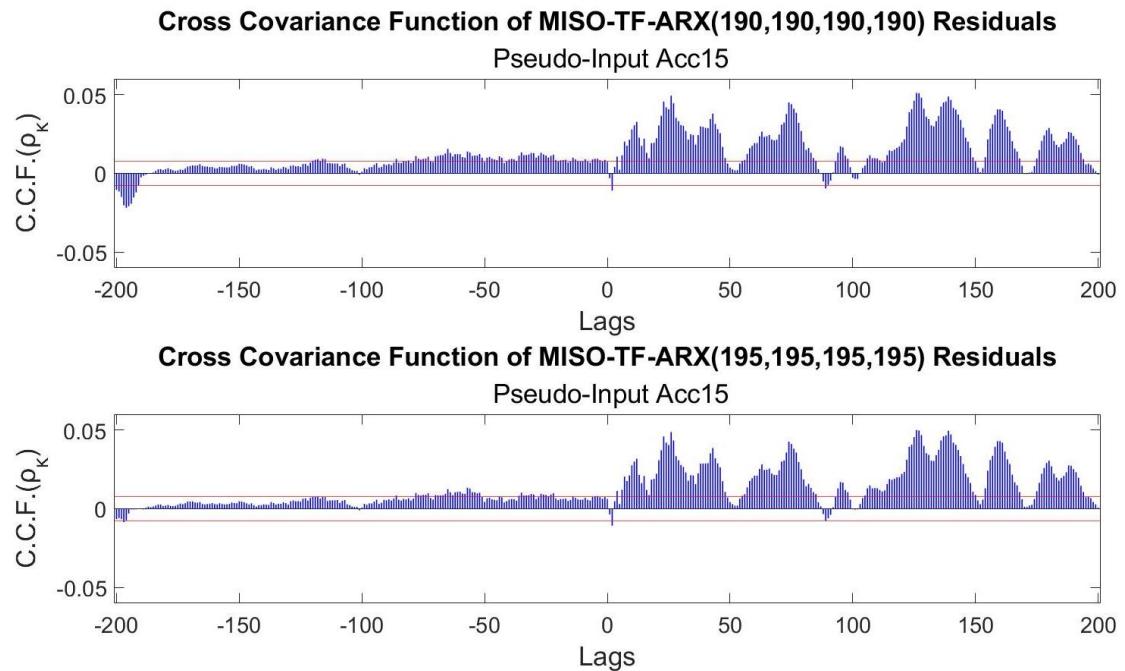
**Εικόνα 15.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190) και MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195), μετά την το Pre-Whitening για 200 lags.



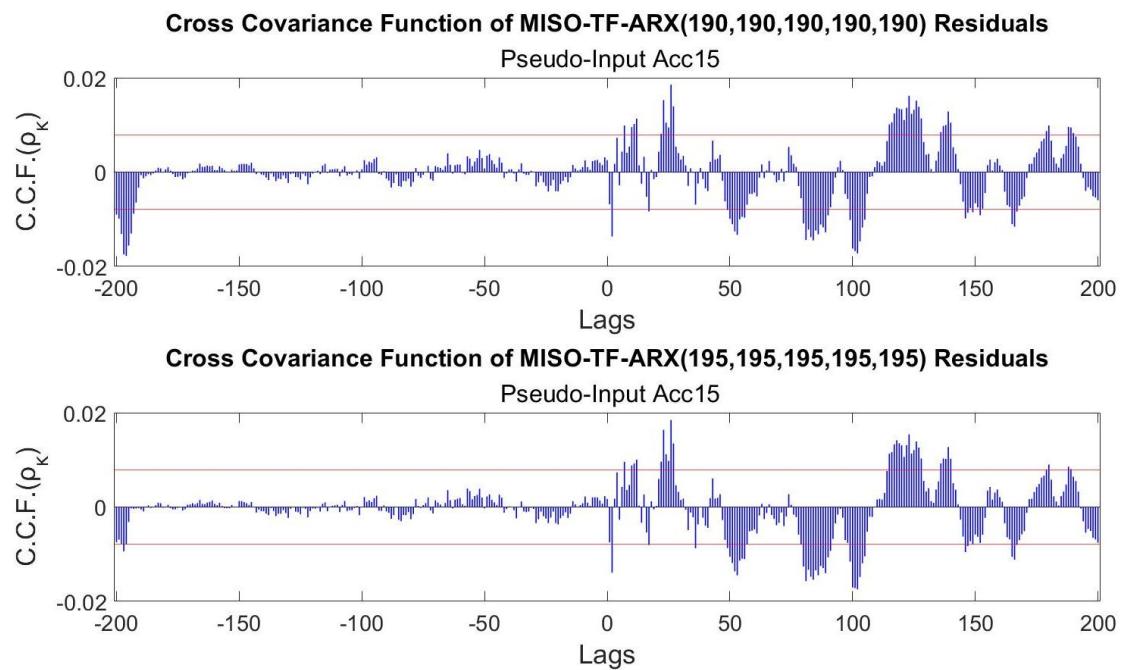
**Εικόνα 16.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190, 190) και MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195, 195), μετά την το Pre-Whitening για 200 lags.

Παρακάτω παρουσιάζεται η CCF των υπολοίπων για τρείς ( [Εικόνα 17](#) ) και τέσσερις ψευδο-εισόδους ( [Εικόνα 18](#) ) ενδεικτικά με το αισθητήριο 15 για τις τάξεις 190 και 195. Τόσο για τρείς όσο και για τέσσερις ψευδο-εισόδους διακρίνεται συσχέτιση των υπολοίπων για θετικά lags, ενώ για αρνητικά lags η συσχέτιση των υπολοίπων φαίνεται να είναι λευκή. Επιπλέον, η λευκότητα της αρνητικής συσχέτισης των υπολοίπων φαίνεται να βελτιώνεται κατά την

αύξηση τάξης για τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους. Όσον αφορά την περίπτωση των τεσσάρων ψευδο-εισόδων παρατηρείται πως, η λευκότητα των υπολοίπων βελτιώνεται για θετική και αρνητική συσχέτιση συγκρινόμενη με την περίπτωση των τριών ψευδο-εισόδων.



**Εικόνα 17.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190) και MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).



**Εικόνα 18.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(190, 190, 190, 190, 190) και MISO-TF-ARX(195, 195, 195, 195, 195) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).

Παρακάτω, παρατίθεται συγκεντρωτικός [Πίνακας 8](#) σχετικά με τα χαρακτηριστικά των παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX για κάθε κατάσταση, για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους. Σημειώνεται πως, κατά την εκτίμηση των παραμέτρων αντιστρέφεται ο πίνακας παλινδρόμησης, (4). Για τον έλεγχο αριθμητικού σφάλματος κατά την αντιστροφή του πίνακα παλινδρόμησης υπολογίζεται το Condition Number το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάει τιμές της τάξης άνω του  $10^{15}$ , [Πίνακας 8](#).

**Πίνακας 8.** Χαρακτηριστικά των σημάτων για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους που μοντελοποιούνται με παραμετρικό μοντέλο MISO-TF-ARX.

Ψευδο-Είσοδοι	Καταστάσεις	BIC	RSS/SSS	SPP	Condition Number
4 Ψευδο-Εισόδους	Υγείας	-24.7832	$6.7455 \cdot 10^{-7}$	63.0154	$6.5831 \cdot 10^{12}$
	Ρωγμή 15cm	-25.3190	$1.1042 \cdot 10^{-6}$	63.0154	$1.3333 \cdot 10^{12}$
	Ρωγμή 30cm	-25.1305	$3.3263 \cdot 10^{-6}$	63.0154	$1.0285 \cdot 10^{12}$
	Ρωγμή 45cm	-25.5151	$1.2068 \cdot 10^{-6}$	63.0154	$1.3131 \cdot 10^{12}$
3 Ψευδο-Εισόδους	Υγείας	-24.7345	$7.3571 \cdot 10^{-7}$	78.7692	$2.8790 \cdot 10^{12}$
	Ρωγμή 15cm	-25.2107	$1.1228 \cdot 10^{-6}$	78.7692	$8.1341 \cdot 10^{11}$
	Ρωγμή 30cm	-25.0574	$1.2222 \cdot 10^{-6}$	78.7692	$5.7770 \cdot 10^{11}$
	Ρωγμή 45cm	-25.4532	$1.2542 \cdot 10^{-6}$	78.7692	$8.6946 \cdot 10^{11}$
Μέθοδος εκτίμησης MISO-TF-ARX			Least Squares (LS) εκτίμηση		
Τάξη ARX για κάθε αισθητήριο			195		
Μήκος σήματος κατά την μοντελοποίηση			61440		

## 7. Αποτελέσματα Ανίχνευσης Βλαβών & Συζήτηση

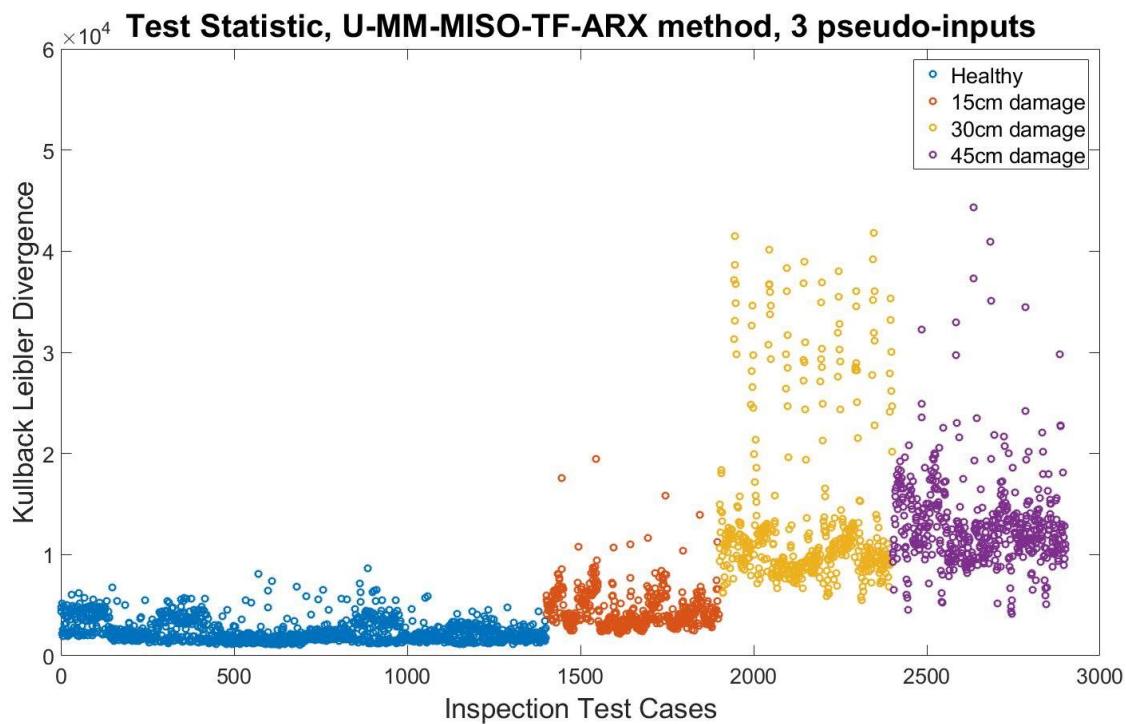
### 7.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου U-MM-MISO-TF-ARX στην φάση εκπαίδευσης, δημιουργείται αναπαράσταση πολλαπλών μοντέλων που αποτελείται από τα εκάστοτε παραμετρικά μοντέλα MISO-TF-ARX. Παράλληλα, για την εξέταση της ευρωστίας της μεθόδου, πραγματοποιούνται 10 περιστροφές, οι οποίες μεταφράζονται ως 10 εναλλαγές μεταξύ των σημάτων υγείας της φάσης εκπαίδευσης με αυτές της φάσης ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται 10 αναπαραστάσεις MM, όπου η κάθε μία συγκρίνεται ξεχωριστά με τα εκάστοτε σήματα της φάσης ελέγχου. Στον παρακάτω [Πίνακα 9](#) παρουσιάζονται αναλυτικά οι λεπτομέρειες της μεθόδου.

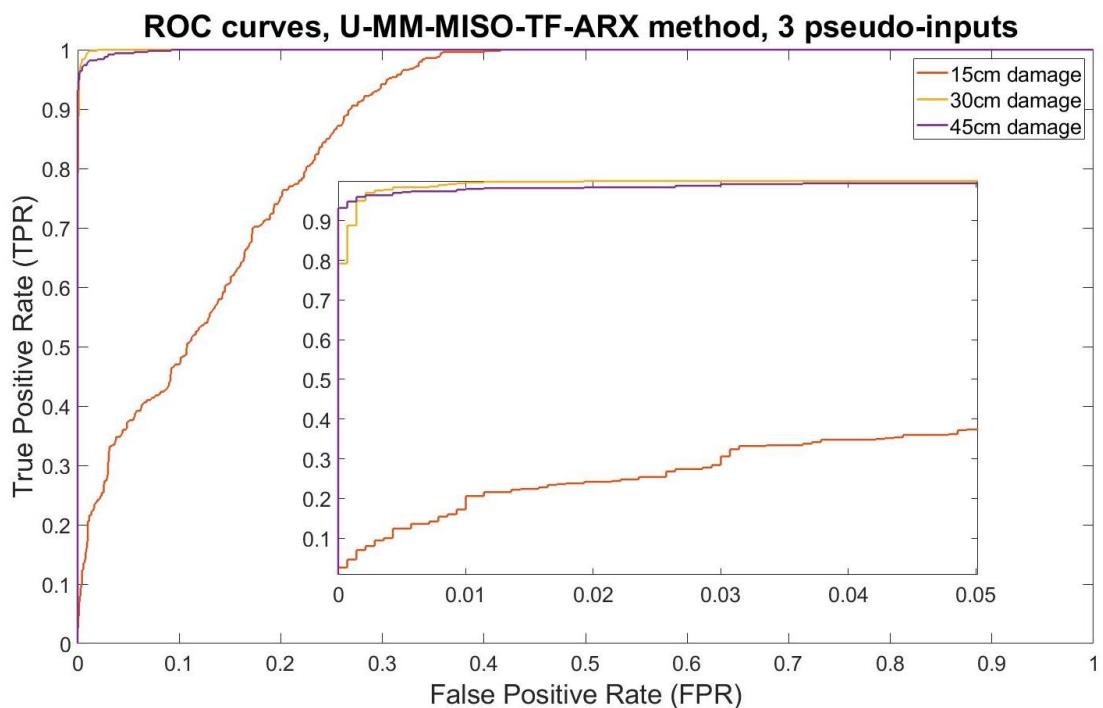
**Πίνακας 9.** Τελικές παράμετροι για την ανίχνευση των τριών σεναρίων βλάβης μέσω U-MM-MISO-TF-ARX, για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους.

Αριθμός Ψευδο-εισόδων	Μέθοδος	Συνολικός Αριθμός Παραμέτρων	Στατιστική ποσότητα ελέγχου
3	U-MM-MISO-TF-ARX	780	Kullback-Leibler απόκλιση
4	U-MM-MISO-TF-ARX	975	Kullback-Leibler απόκλιση
Αριθμός περιστροφών	10		
Διάσταση MM	10		
Αριθμός σημάτων εκάστοτε περιστροφής για την κατάσταση υγείας		Φάση Εκπαίδευσης: 100 σετ σημάτων Φάση Ελέγχου: 140 σετ σημάτων	
Αριθμός σημάτων εκάστοτε περιστροφής για τα τρία σενάρια βλάβης		Φάση Εκπαίδευσης: -- Φάση Ελέγχου: 50 σετ σημάτων	

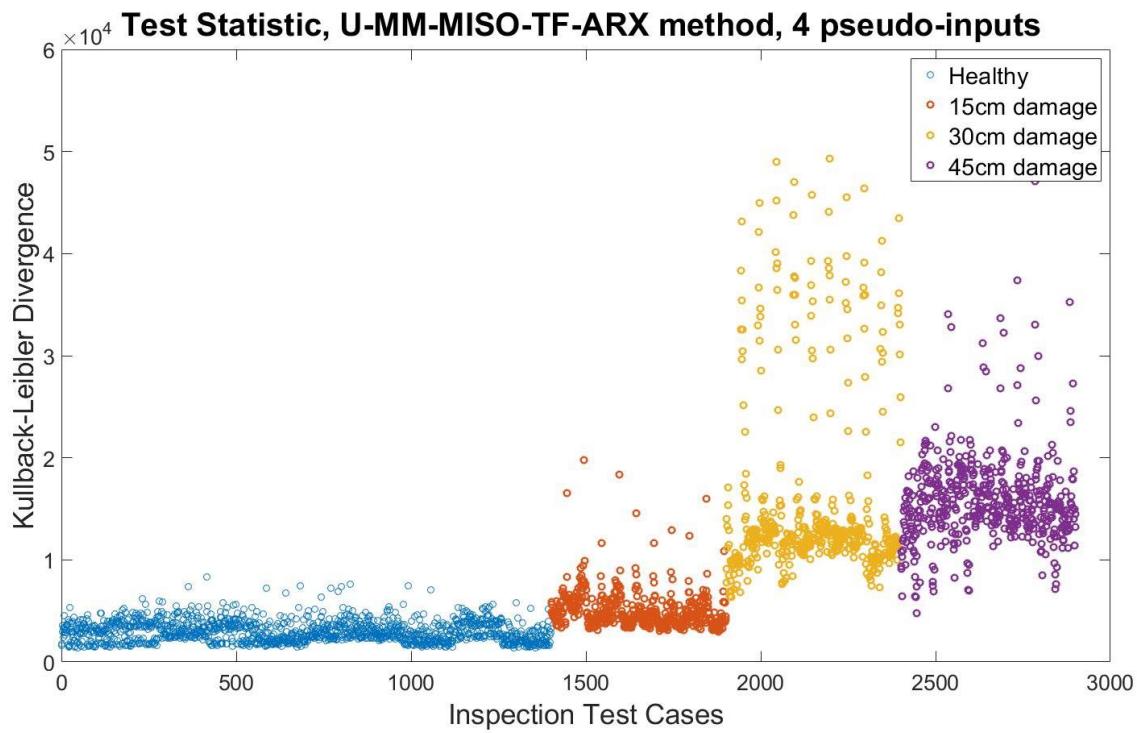
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου κρίνεται μέσω διαγράμματος διασποράς (scatter diagram) και καμπύλων ROC (Receiver Operating Characteristic). Στο διάγραμμα διασποράς απεικονίζονται, οι τιμές της ψευδο-στατικής ποσότητας της μεθόδου, ενώ οι καμπύλες ROC ([Fawcett, 2006](#)) είναι απόρροια των στατιστικών 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. Στις παρακάτω εικόνες ([Εικόνα 19](#), [Εικόνα 20](#), [Εικόνα 21](#), [Εικόνα 22](#)) παρουσιάζεται, ο διαχωρισμός των τεσσάρων καταστάσεων που επιτυγχάνεται από την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX μέσω στατιστικού τεστ και η απόδοση ανίχνευσης των τριών σεναρίων βλάβης, για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, αντίστοιχα.



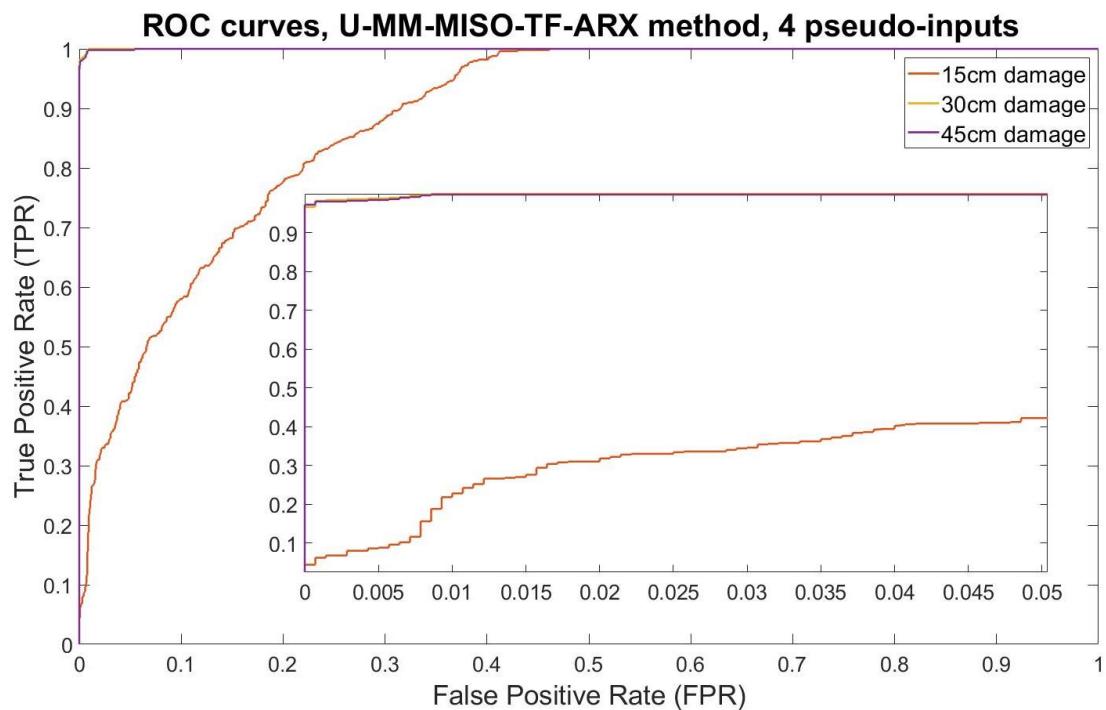
Εικόνα 19. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX για τρείς ψευδο-εισόδους.



Εικόνα 20. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX για τρείς ψευδο-εισόδους.

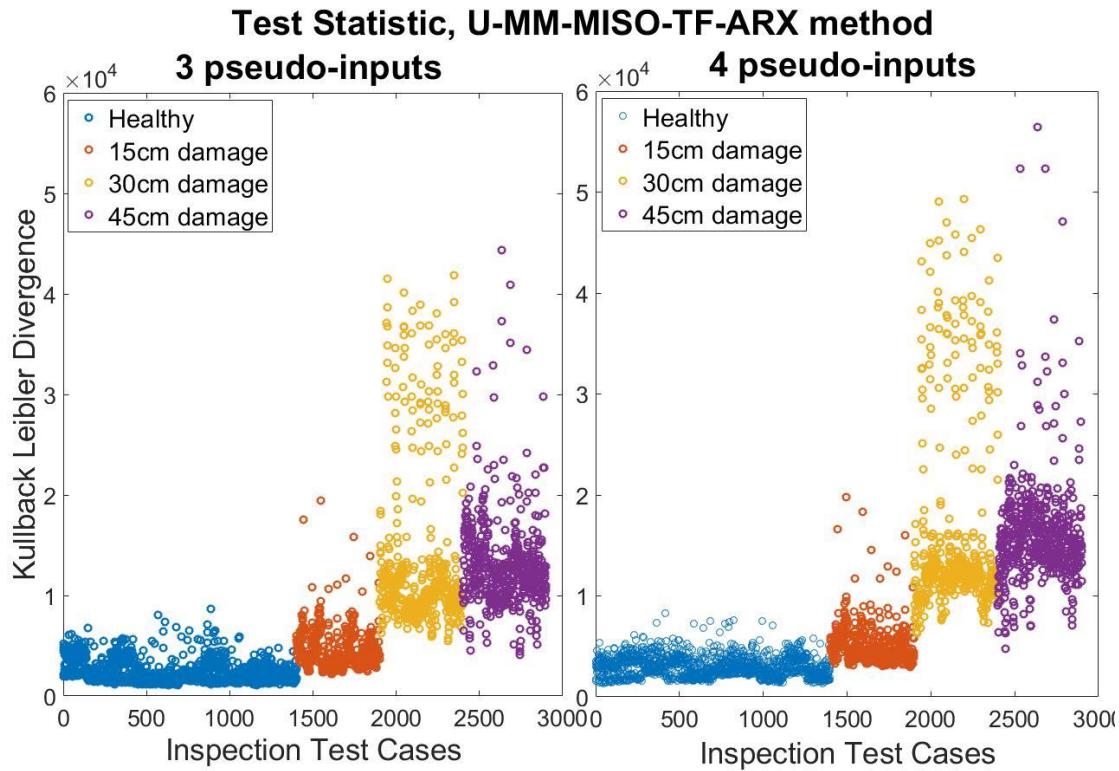


*Εικόνα 21. Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX σημάτων για τέσσερις ψευδο-εισόδους.*

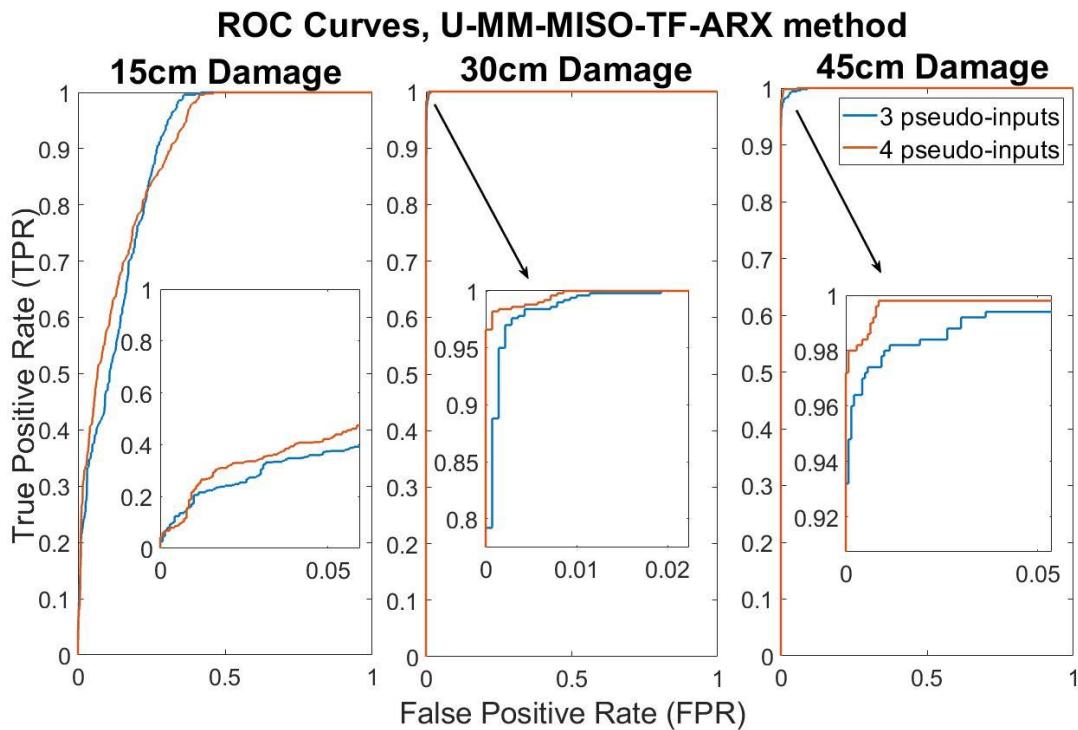


*Εικόνα 22. Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX για τρείς ψευδο-εισόδους.*

Στις Εικόνες 23 και 24 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα παραπάνω διαγράμματα διασποράς και οι καμπύλες ROC, αντίστοιχα.



**Εικόνα 23.** Διάγραμμα διασποράς με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX για τρείς και τέσσερις ψευδο-εισόδους, αριστερά και δεξιά της εικόνας αντίστοιχα.



**Εικόνα 24.** Καμπύλες ROC με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX για τα τρία σενάρια θλάβης, με τρείς και τέσσερις 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 συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μελέτης.

Αρχικά, όσον αφορά τα διαγράμματα διασποράς, οι βλάβες των 30 και 45 εκατοστών φαίνεται να διαχωρίζονται αρκετά ικανοποιητικά, τόσο για τρείς όσο και για τέσσερις ψευδο-εισόδους. Ωστόσο, ένα μεγάλο μέρος της μικρότερης ρωγμής των 15 εκατοστών φαίνεται να επικαλύπτεται από την κατάσταση υγείας.

Σχετικά με τις καμπύλες ROC, 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. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκεντρωτικός [Πίνακας 10](#), για τις αντίστοιχες βλάβες για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2 και 5%, για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, για τα εκάστοτε πλήθη ψευδο-εισόδων και την βλάβη των 30 εκατοστών επετεύχθη 100% ανίχνευση για ποσοστό ψευδοσυναγερμών μικρότερο του 2 και 5%, ενώ για την μεγαλύτερη βλάβη το ποσοστό σωστής ανίχνευσης είναι σχεδόν στο 100% TPR για τις αντίστοιχες περιπτώσεις λανθασμένης ανίχνευσης. Παρ' όλα αυτά η αδυναμία της μεθόδου διακρίνεται στην ανίχνευση της μικρότερης βλάβης. Η βλάβη των 15 εκατοστών ανίχνεύεται αναξιόπιστα για το εκάστοτε πλήθος ψευδο-εισόδων και ποσοστό ψευδο-συναγερμών 2 και 5%, ενώ σχετικά με την σύγκριση των δύο περιπτώσεων ψευδο-εισόδων η διαφορά απόδοσης ανίχνευσης φαίνεται να είναι μικρή για ίδιο ποσοστό FPR. Πιο συγκεκριμένα, για ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης 2 και 5%, οι τρείς ψευδο-είσοδοι παρουσιάζουν TPR 30 και 40%, αντίστοιχα, ενώ οι τέσσερις TPR 35 και 45%, αντίστοιχα.

Επί τη βάσει των ανωτέρω αποτελεσμάτων, ο σκοπός και στόχος της εργασίας για αξιόπιστη και αποτελεσματική ανίχνευση βλαβών, αντίστοιχα, επετεύχθη μόνο για τις βλάβες των 30cm και 45cm, καθότι η μέθοδος για την μικρότερη βλάβη των 15cm φάνηκε να μην είναι αποτελεσματική.

**Πίνακας 10.** Ποσοστά επιτυχημένης ανίχνευσης για 3 και 4 ψευδο-εισόδους με την μέθοδο U-MM-MISO-TF-ARX.

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	30% TPR	40% TPR
	30 cm	100% TPR	100% TPR
	45 cm	98% TPR	99% TPR
4	15 cm	<b>40% TPR</b>	<b>45% TPR</b>
	30 cm	<b>100% TPR</b>	<b>100% TPR</b>
	45 cm	<b>99.8% TPR</b>	<b>99.8% TPR</b>

### 7.3 Σύγκριση μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF-ARX με προγενέστερες εναλλακτικές στοχαστικές μεθόδους.

Στην παρούσα πειραματική διάταξη, οι εργασίες που προσπάθησαν να πραγματοποιήσουν ανίχνευση των τριών σεναρίων βλάβης χωρίς χρήση κρουστικής απόκρισης ενεργοποιητή, είναι των (Tsikouras, 2020), (Konis, 2022)<sub>A</sub>, (Konis, 2022)<sub>B</sub> και (Stamopoulos, 2022). Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και στις (Konis, 2022)<sub>A</sub>, (Konis, 2022)<sub>B</sub>, (Stamopoulos, 2022) πραγματοποιήθηκε ίδια προ-επεξεργασία σημάτων, ενώ στην (Tsikouras, 2020) εφαρμόστηκε διαίρεση με την τυπική απόκλιση πριν την απόρριψη της κρουστικής του ενεργοποιητή. Στον παρακάτω **Πίνακας 11** παρατίθεται αναλυτικά οι διαφορές των τριών εργασιών.

Πίνακας 11. Διαφορές της παρούσας Διπλωματικής εργασίας με (Tsikouras, 2020), (Konis, 2022)<sub>A</sub>, (Konis, 2022)<sub>B</sub> και (Stamopoulos, 2022).

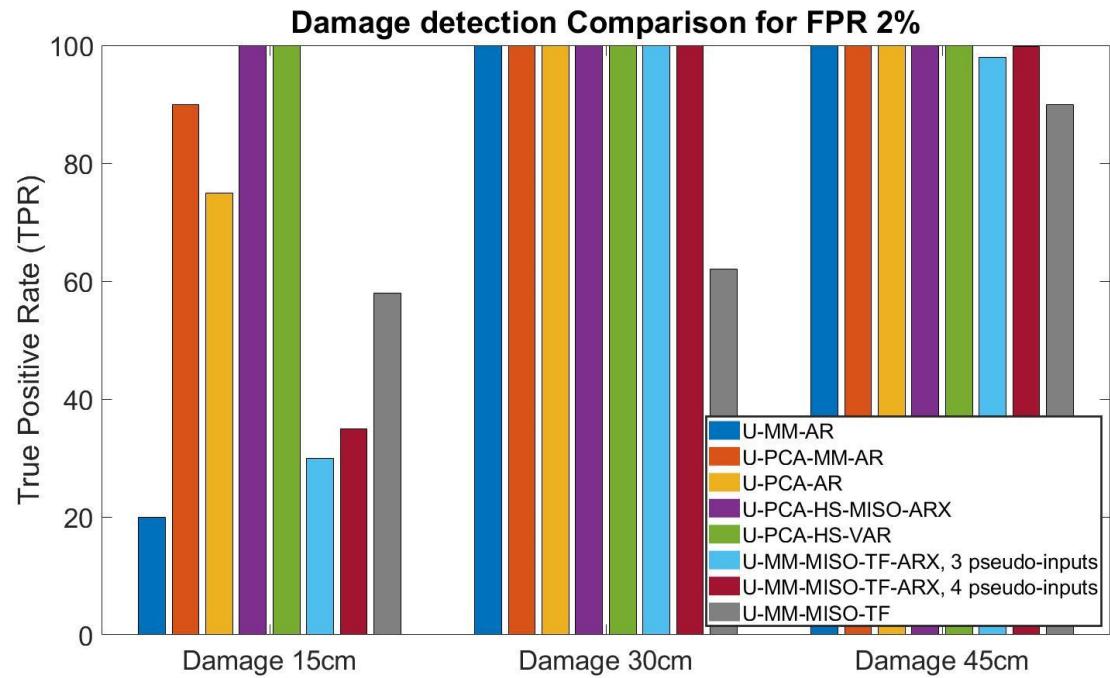
Διαφορές	(Tsikouras, 2020)	(Konis, 2022) <sub>B</sub> (Διπλωματική Εργασία)	Παρούσα Διπλωματική Εργασία
		(Konis, 2022) <sub>A</sub> (Σπουδαστική Εργασία)	(Stamopoulos, 2022) (Σπουδαστική Εργασία)
Προ-Επεξεργασία Σημάτων	Βήμα 1. Αφαίρεση με μέση τιμή και διαίρεση με τυπική απόκλιση	Βήμα 1. Απομόνωση κρουστικής απόκρισης	Βήμα 1. Απομόνωση κρουστικής απόκρισης
	Βήμα 2. Απομόνωση κρουστικής απόκρισης	Βήμα 2. Φιλτράρισμα	Βήμα 2. Φιλτράρισμα
	Βήμα 3. Φιλτράρισμα	Βήμα 3. Επαναδειγματοληψία	Βήμα 3. Επαναδειγματοληψία
	Βήμα 4. Επαναδειγματοληψία	Βήμα 4. Αφαίρεση με μέση τιμή και διαίρεση με τυπική απόκλιση	Βήμα 4. Αφαίρεση με μέση τιμή και διαίρεση με τυπική απόκλιση
Αισθητήρια	1	4 και 5 (Διπλωματική Εργασία)	4 και 5 (Διπλωματική Εργασία)
		3 και 4 (Σπουδαστική Εργασία)	3 έως και 12 (Σπουδαστική Εργασία)
Αρχικός Αριθμός Σημάτων	250	350	250
Τελικός Αριθμός Σημάτων	250	250	240

Στον παρακάτω Πίνακα 12, παρουσιάζονται αναλυτικά οι μεθοδολογίες των προαναφερθέντων εργασιών με τα αντίστοιχα ποσοστά αληθούς ανίχνευσης για ποσοστό ψευδοσυναγερμών 2%. Παρατηρείται πως, όλες οι παραμετρικές μέθοδοι παρουσίασαν επιτυχή ανίχνευση των δύο μεγαλύτερων ρωγμών πλήν της μη παραμετρικής. Ωστόσο, η U-MM-MISO-TF (Stamopoulos, 2022) παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα ανίχνευσης για την μικρότερη βλάβη συγκριτικά με τις μεθοδολογίες της παρούσης και της U-MM-AR (Tsikouras, 2020), χωρίς όμως τα αποτελέσματα να κρίνονται ικανοποιητικά. Όσον αφορά τις παραμετρικές μεθόδους U-PCA-HS-MISO-ARX, (Konis, 2022)<sub>B</sub>, και U-PCA-HS-VAR, (Konis, 2022)<sub>A</sub>, παρουσίασαν εξαιρετικά αποτελέσματα ανίχνευσης για την τεχνητή βλάβη των 15 εκατοστών, με την U-PCA-MM-AR να επιτυγχάνει 90% TPR, ενώ η απόδοση ανίχνευσης των μεθοδολογιών MM και PCA κρίνεται αναποτελεσματική. Συνολικά, η μεθοδολογία των Hyper-Spheres (HS) με χρήση PCA υπερτερεί συγκριτικά των MM, αλλά και από τον συνδυασμό MM και PCA.

**Πίνακας 12.** Μεθοδολογίες εργασιών που εφαρμόστηκαν με τα ποσοστά επιτυχημένης ανίχνευσης για ποσοστό ψευδοσυναγερμών μικρότερο του 2%.

Εργασίες	Μεθοδολογίες	Ποσοστά αληθούς ανίχνευσης για FPR 2%		
		Ρωγμή 15cm	Ρωγμή 30cm	Ρωγμή 45cm
(Tsikouras, 2020)	U-MM-AR	<20% TPR	100% TPR	100% TPR
	U-PCA-MM-AR	>90% TPR	100% TPR	100% TPR
	U-PCA-AR	<80% TPR	100% TPR	100% TPR
(Konis, 2022) <sub>B</sub>	U-PCA-HS-MISO-ARX (3 ψευδο-είσοδοι)	100% TPR	100% TPR	100% TPR
(Konis, 2022) <sub>A</sub>	U-PCA-HS-VAR (3 αισθητήρια)	100% TPR	100% TPR	100% TPR
	U-PCA-HS-VAR (4 αισθητήρια)	100% TPR	100% TPR	100% TPR
Παρούσα Διπλωματική Εργασία	U-MM-MISO-TF-ARX (3 ψευδο-είσοδοι)	30% TPR	100% TPR	98% TPR
	U-MM-MISO-TF-ARX (4 ψευδο-είσοδοι)	35% TPR	100% TPR	99.8% TPR
(Stamopoulos, 2022)	U-MM-MISO-TF	58% TPR	62% TPR	90% TPR

Στην παρακάτω Εικόνα 25, παρουσιάζονται σε μορφή bar diagrams τα αποτελέσματα των παραμετρικών μεθόδων του παραπάνω Πίνακα 12.



Εικόνα 25. Σύγκριση μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν στο ίδιο πρόβλημα χωρίς χρήση ενεργοποιητή για ποσοστό ψευδο-συναγερμών 2%.

## 8. Τελικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στο τελευταίο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και επιτεύγματα της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ως εξής:

1. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας U-MM-MISO-TF-ARX για τρείς και τέσσερις έδειξαν πως οι δύο μεγαλύτερες εκ των τριών βλαβών ανιχνεύονται αποτελεσματικά.
2. Η μέθοδος U-MM-MISO-TF-ARX των τριών και τεσσάρων ψευδο-εισόδων επηρεάζεται σημαντικά από την εισαχθείσα αβεβαιότητα όσον αφορά την ανίχνευση βλάβης των 15 εκατοστών.
3. Η επίδραση των τεσσάρων ψευδο-εισόδων στην απόδοση ανίχνευσης των τριών σεναρίων βλάβης είναι αμελητέα συγκριτικά των τριών.
4. Δυσκολία μοντελοποίησης με MISO-TF-ARX.
5. Περίπου το 40% των συνολικών διαθέσιμων υγιών σημάτων επαρκούν στην φάση εκπαίδευσης για υψηλή απόδοση ανίχνευσης των δύο μεγαλύτερων βλαβών, ενώ σε προηγούμενες εργασίες ([Bull, Ulriksen, & Tcherniak, 2018](#)), ([Tsikouras, 2020](#)) χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί μεγάλο πλήθος αυτών (80%).

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 καταστάσεις, παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

1. Εφαρμογή των 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.
2. Ανάπτυξη μεθοδολογίας Συναρτησιακών Μοντέλων (Functionally Pooled) για τις καταστάσεις λειτουργίας ακινησίας, 32 και 43 RPM.
3. Χρήση κατάλληλων μεθόδων μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων με σκοπό την ανίχνευση των τριών σεναρίων βλάβη.

## 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, 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, 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*, 309–330. Springer International Publishing.
- Doliński, Ł., Krawczuk, M., & Źak, A. (2018). Detection of Delamination in Laminate Wind Turbine Blades Using One-Dimensional Wavelet Analysis of Modal Responses. *Shock and Vibration*, 2018, 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, 303–315.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27, 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, 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 2018*.
- González, A. G., & Fassois, S. D. (2014). Excitation and vibration response based damage diagnosis in wind turbine blades: an exploratory study.
- 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, 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*.
- Joyce, J. M. (2011). Kullback-Leibler Divergence. *International Encyclopedia of Statistical Science*, 720–722. Springer International Publishing.
- Konis, P. (2022)<sub>A</sub>. Damage Detection on an Operating Wind Turbine Blade via Vector Stochastic Models and the Hypersphere Method. 4th Year Project (Spoudastiki Ergasia), University of Patras, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, Patras.
- Konis, P. (2022)<sub>B</sub>. Damage Detection on an Operating Wind Turbine Blade through the use of Multiple Pseudo-Input Models and the Hypersphere Method. Diploma Thesis, University of Patras, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, Patras.
- Ljung, L. (1999). System Identification: Theory For The User. *PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ*, 28, 540.
- 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, 107766.

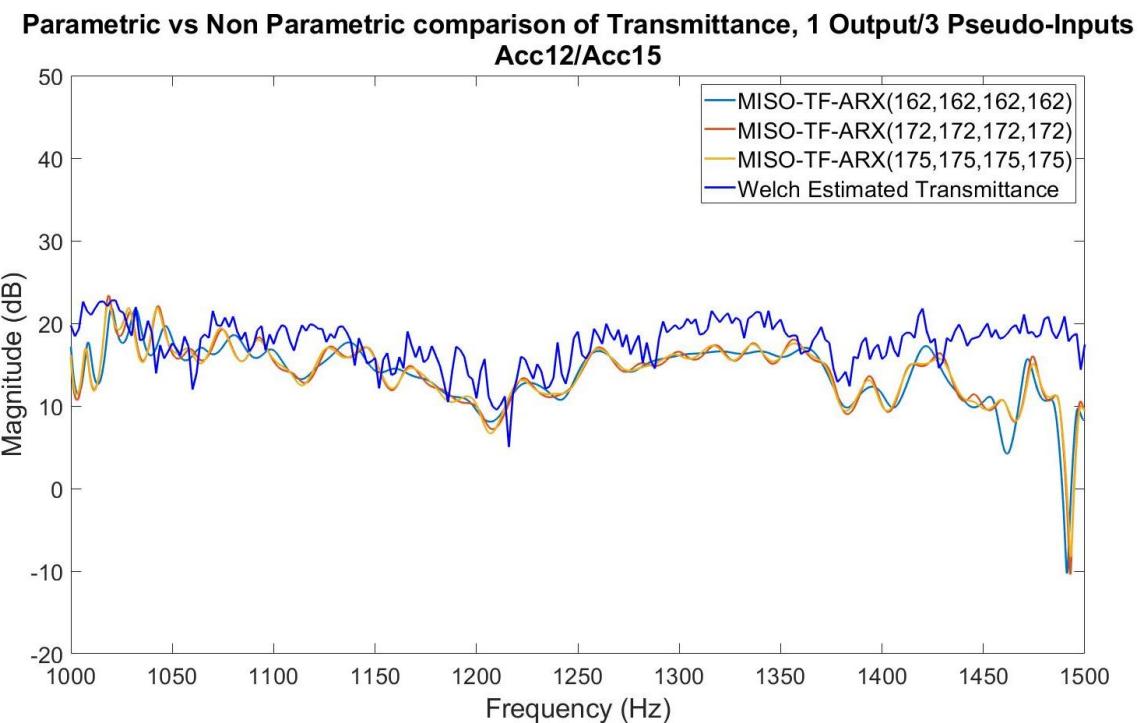
- Nielsen, J. S., Tcherniak, D., & Ulriksen, M. D. (2021). A case study on risk-based maintenance of wind turbine blades with structural health monitoring. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17, 302–318.
- Ou, Y., Chatzi, E. N., Dertimanis, V. K., & Spiridonakos, M. D. (2016). Vibration-based experimental damage detection of a small-scale wind turbine blade. *Structural Health Monitoring*, 16, 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*, 405–414. Springer International Publishing.
- Panagiotopoulos, A., Dmitri, T., & Spiliotis, F. 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*.
- Qadri, B. A., Ulriksen, M. D., Damkilde, L., & Tcherniak, D. (2020). Cointegration for detecting structural blade damage in an operating wind turbine: An experimental study. *Dynamics of Civil Structures*, 2, 173–180. Springer International Publishing.
- Roberts, C., Cava, D. G., & Avendaño-Valencia, L. D. (2021). Understanding the Influence of Environmental and Operational Variability on Wind Turbine Blade Monitoring. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 109–118. Springer International Publishing.
- Stamopoulos, C. (2022). Optimum Selection of Sensors' location and Damage Detection on an Operating Wind Turbine via vibration signals and non-parametric Multiple Models Method. 4th Year Project (Spoudastiki Ergasia), University of Patras, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering, Patras.
- Sun, S., Wang, T., & Chu, F. (2022). In-situ condition monitoring of wind turbine blades: A critical and systematic review of techniques, challenges, and futures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112326.
- Sun, S., Wang, T., Yang, H., & Chu, F. (2022). Condition monitoring of wind turbine blades based on self-supervised health representation learning: A conducive technique to effective and reliable utilization of wind energy. *Applied Energy*, 313, 118882.
- 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, 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*. 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, 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, 149–171.

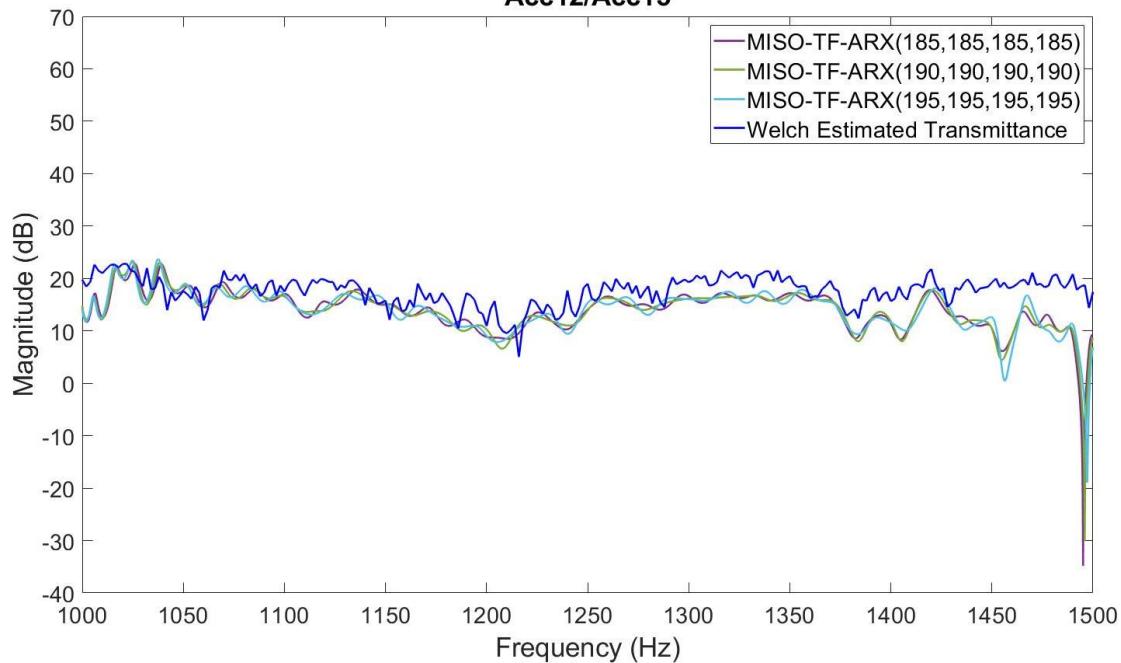
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πρόσθετα Αποτελέσματα

Η μη ικανοποιητική μοντελοποίηση γίνεται εντονότερη όσον αφορά τις ψευδο-εισόδους με εντονότερα μη γραμμικά χαρακτηριστικά, αισθητήρια 9, 6, και 7, όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες ( [Εικόνα 26](#) έως και την [Εικόνα 51](#) ).



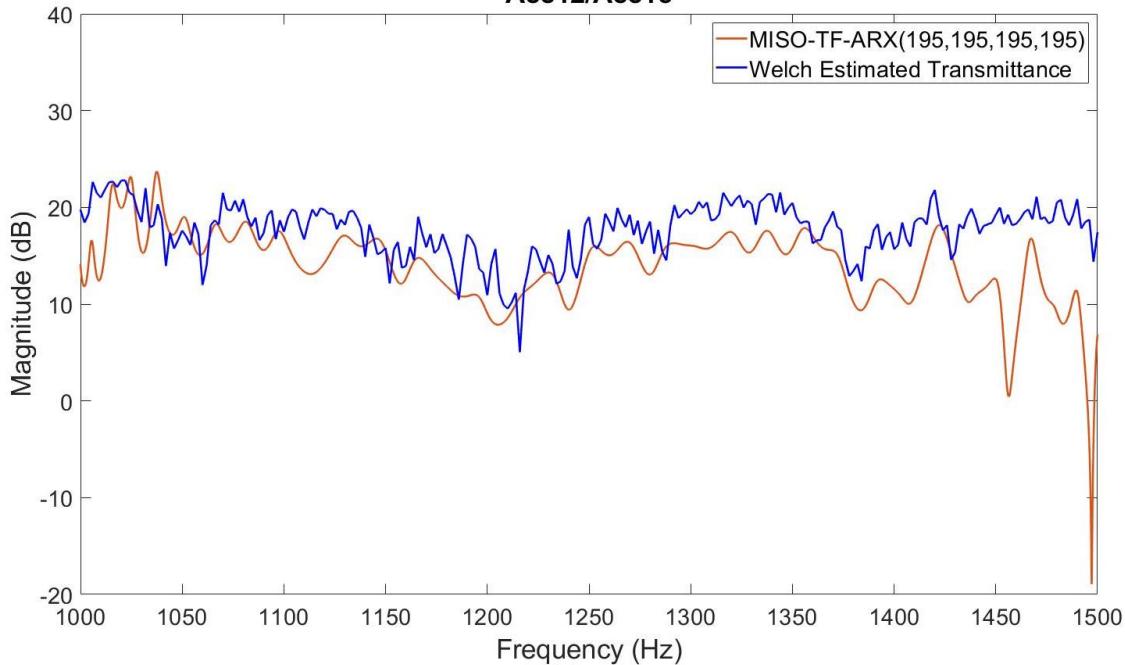
**Εικόνα 26.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc15**



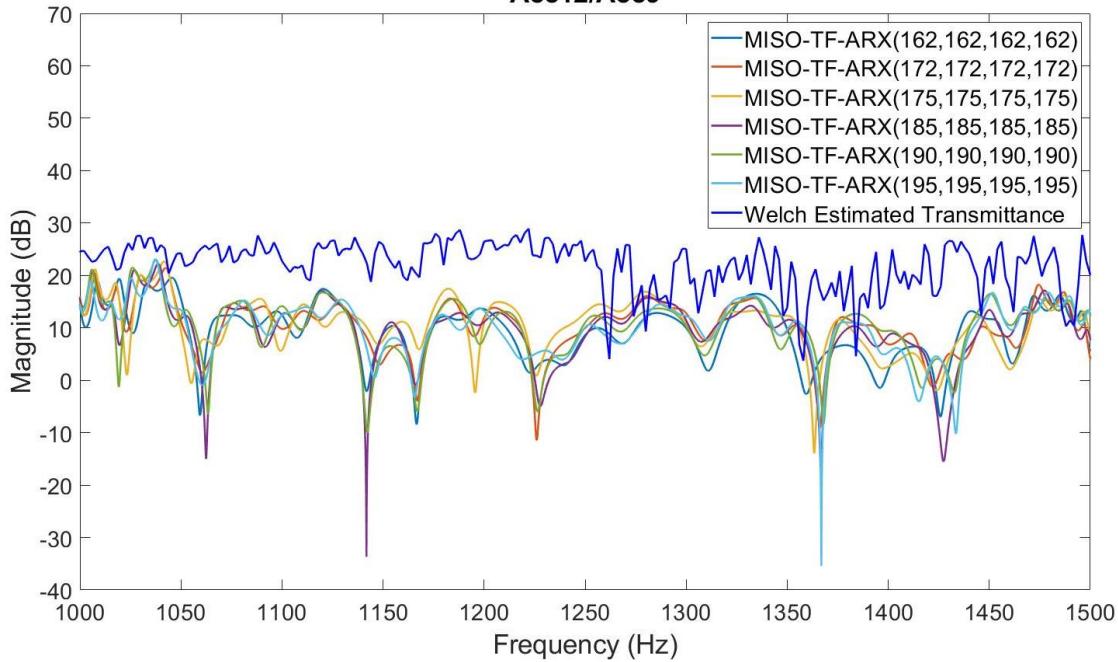
**Εικόνα 27.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Input  
Acc12/Acc15**



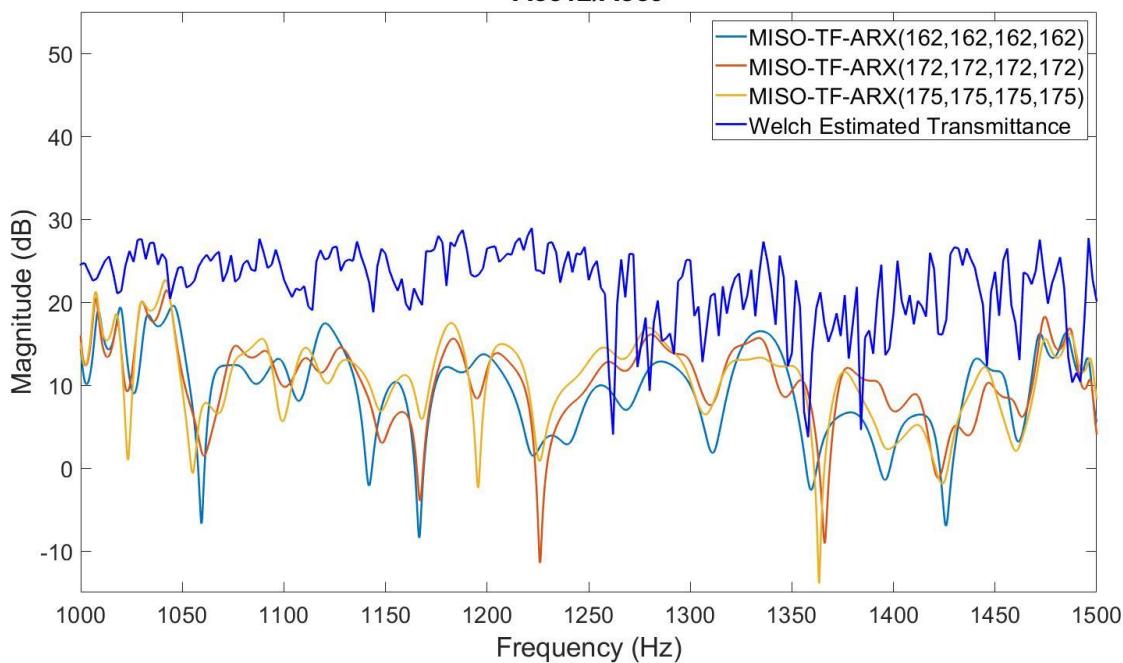
**Εικόνα 28.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc9**



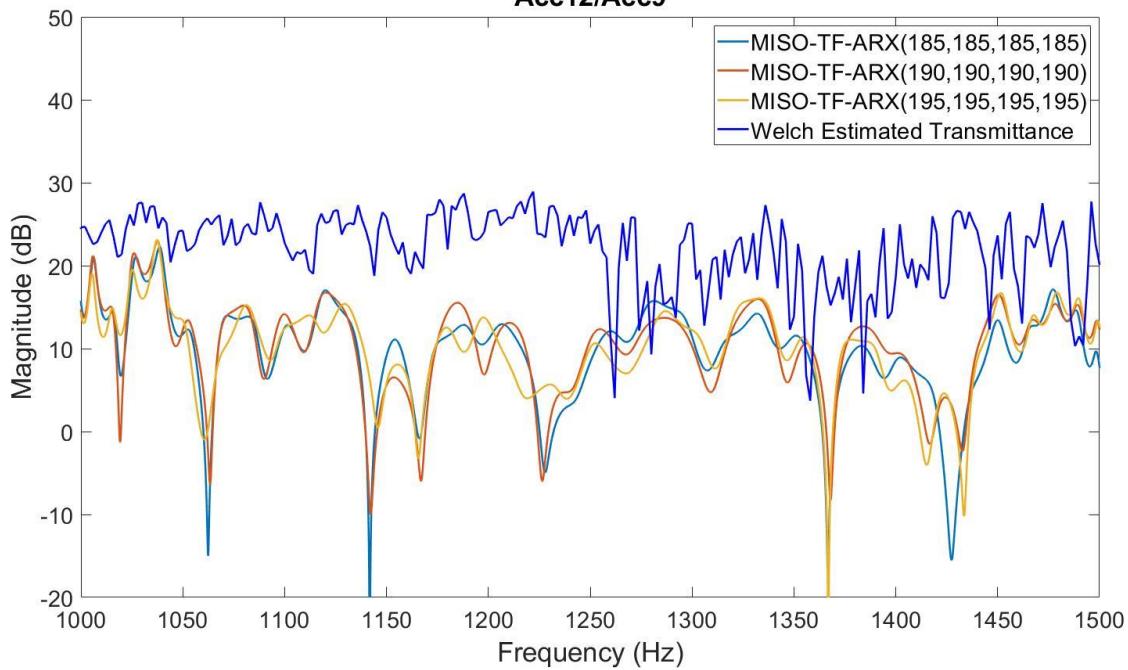
**Εικόνα 29.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances υποψήφιων τάξεων και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc9**



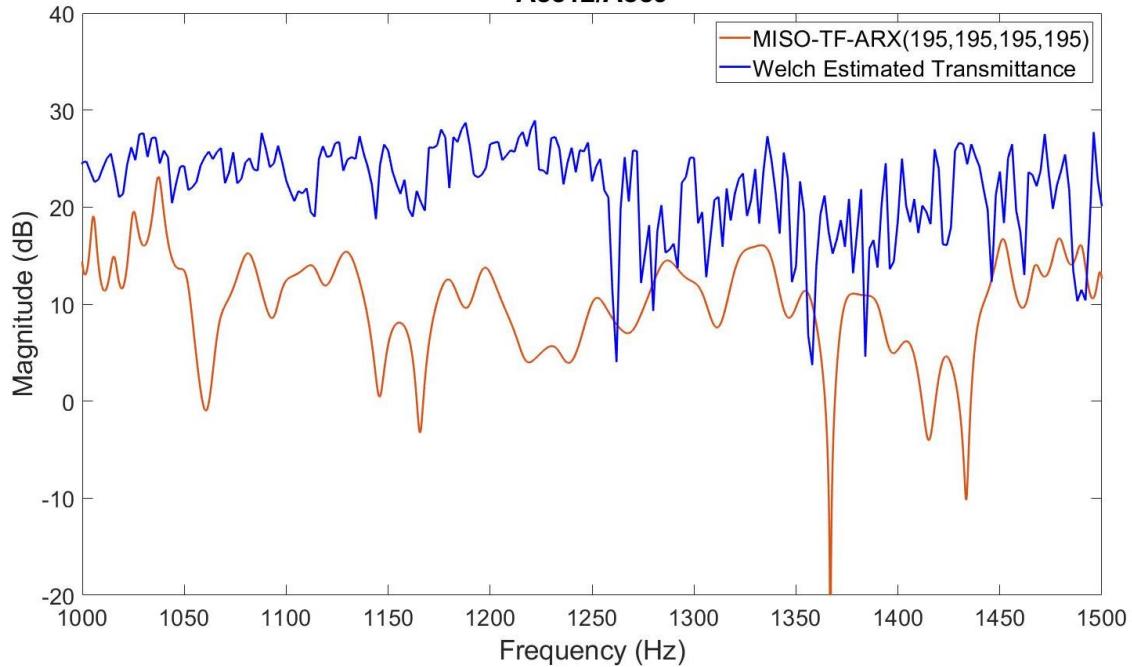
**Εικόνα 30.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc9**



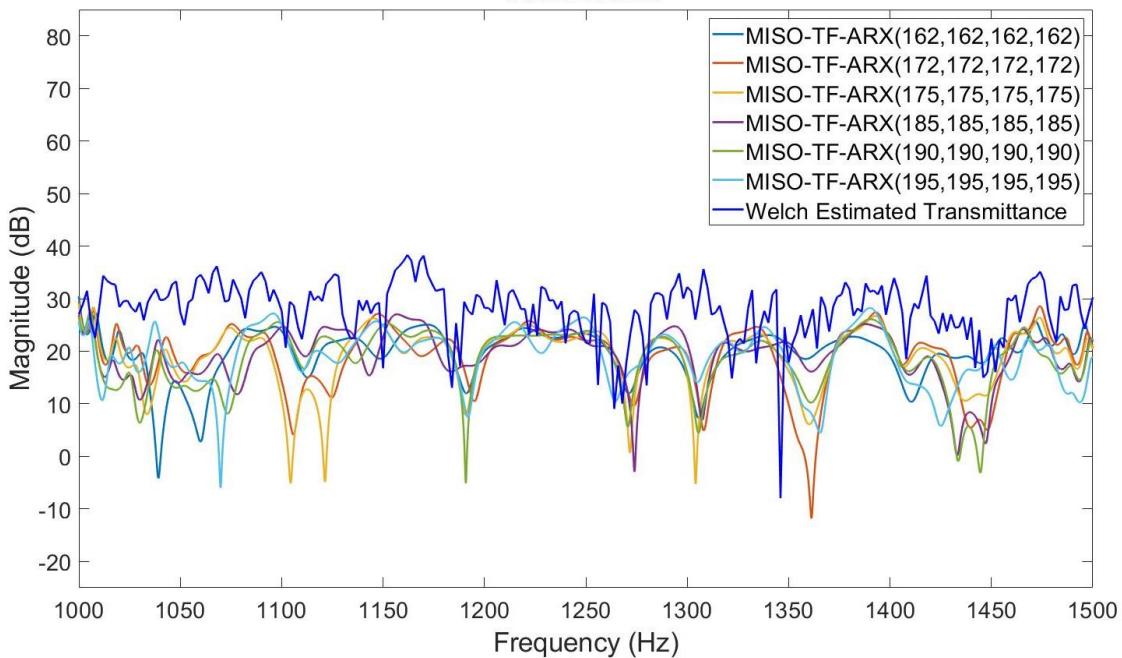
*Εικόνα 31. Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τριών ψευδο-εισόδων.*

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc9**



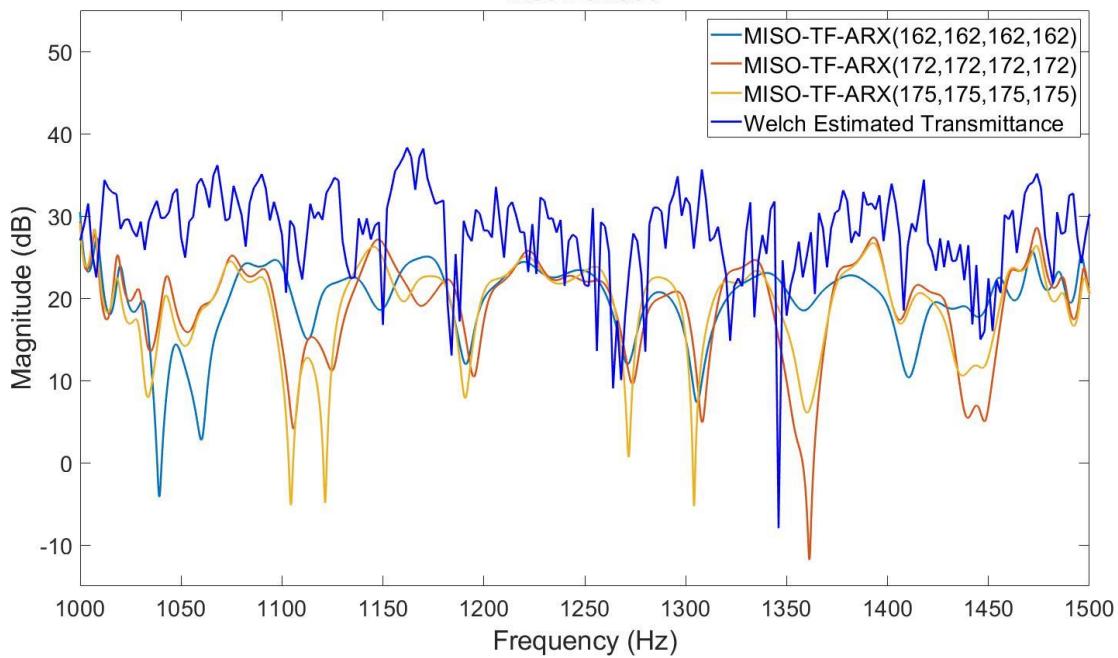
*Εικόνα 32. Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τριών ψευδο-εισόδων.*

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



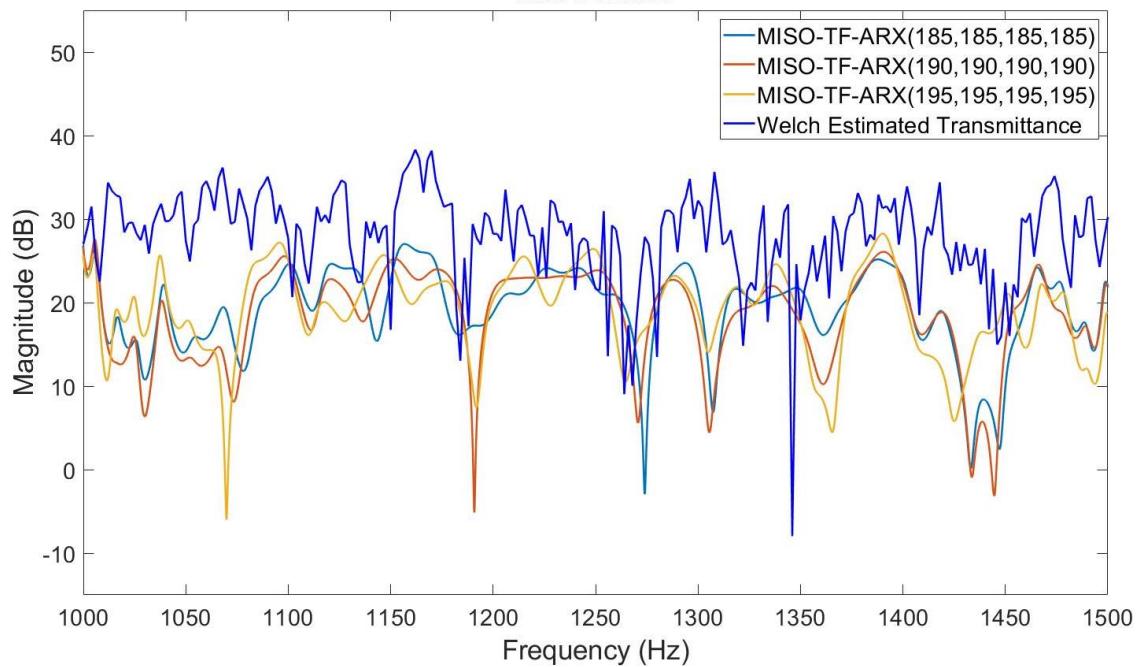
**Εικόνα 33.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances υποψήφιων τάξεων και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



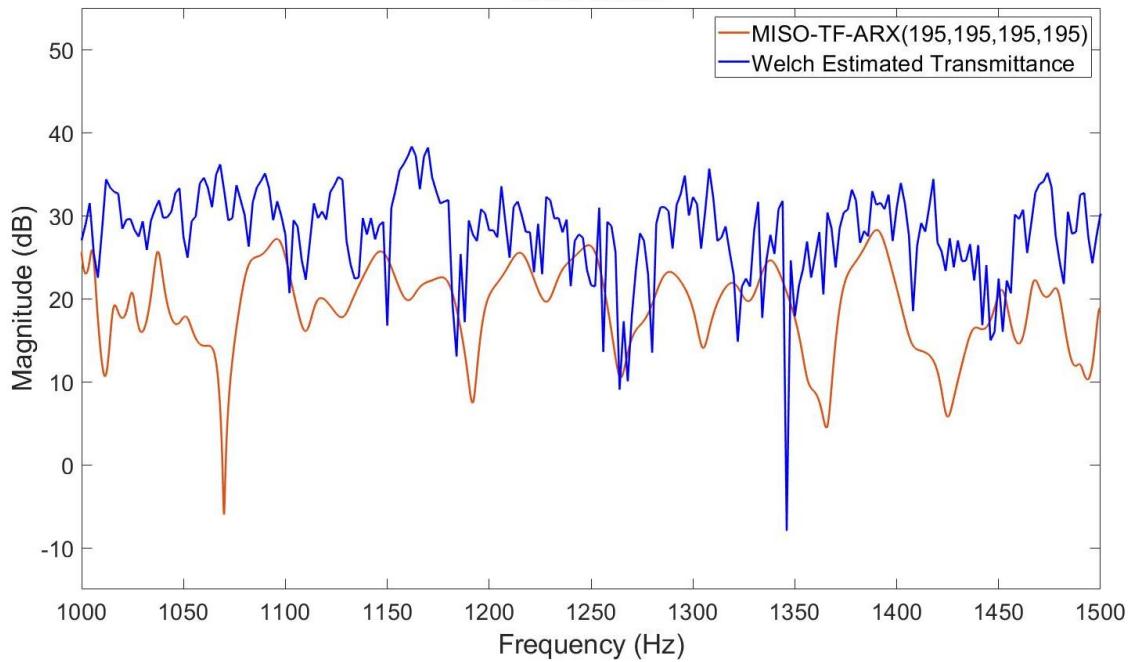
**Εικόνα 34.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



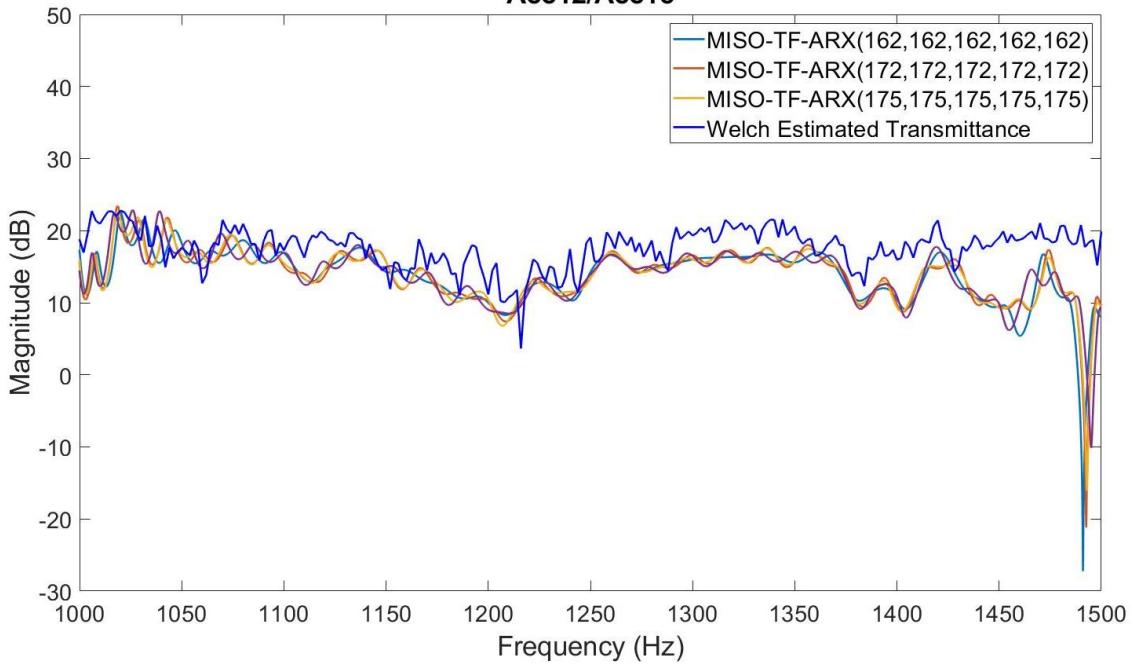
**Εικόνα 35.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/3 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



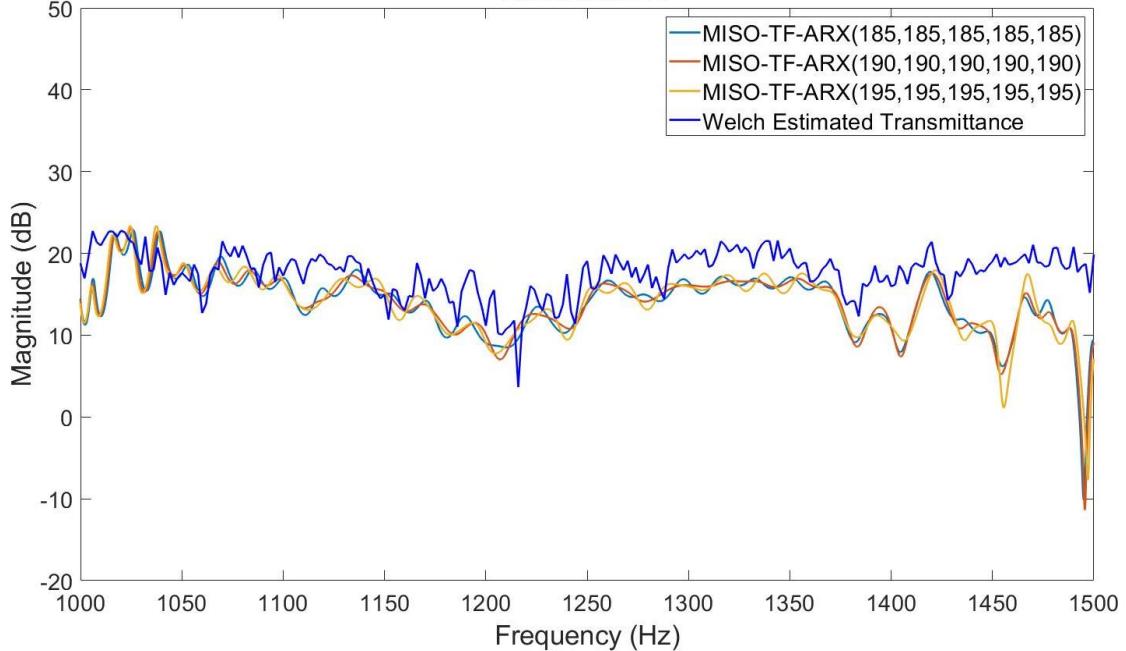
**Εικόνα 36.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τριών ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc15**

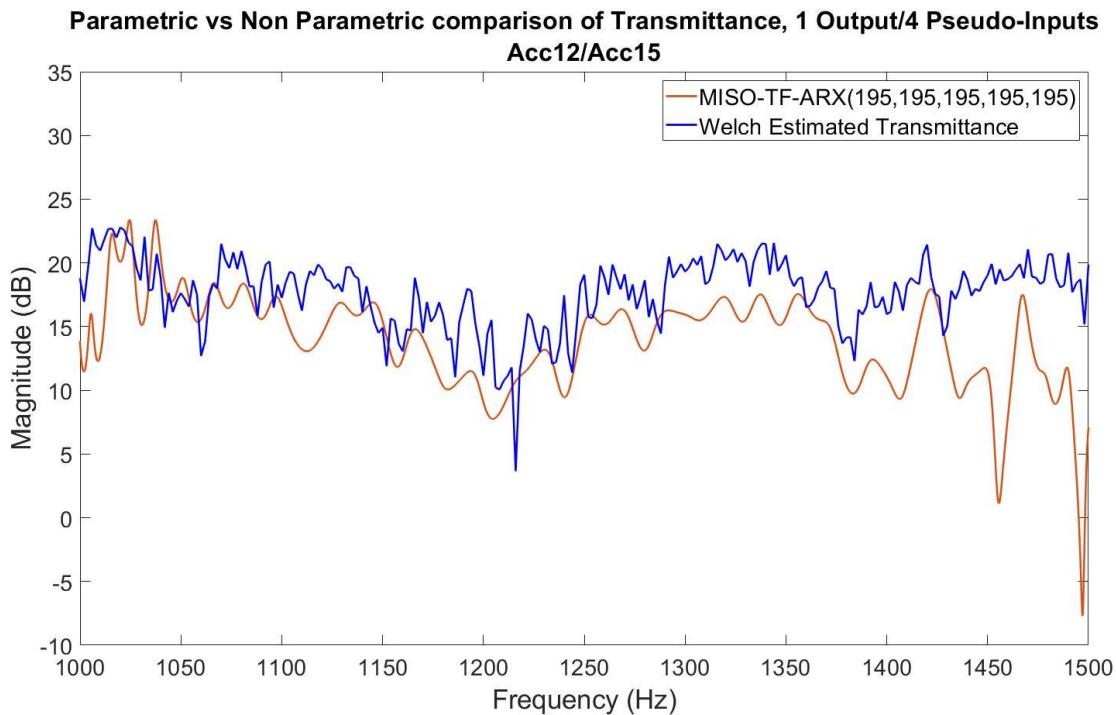


**Εικόνα 37.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

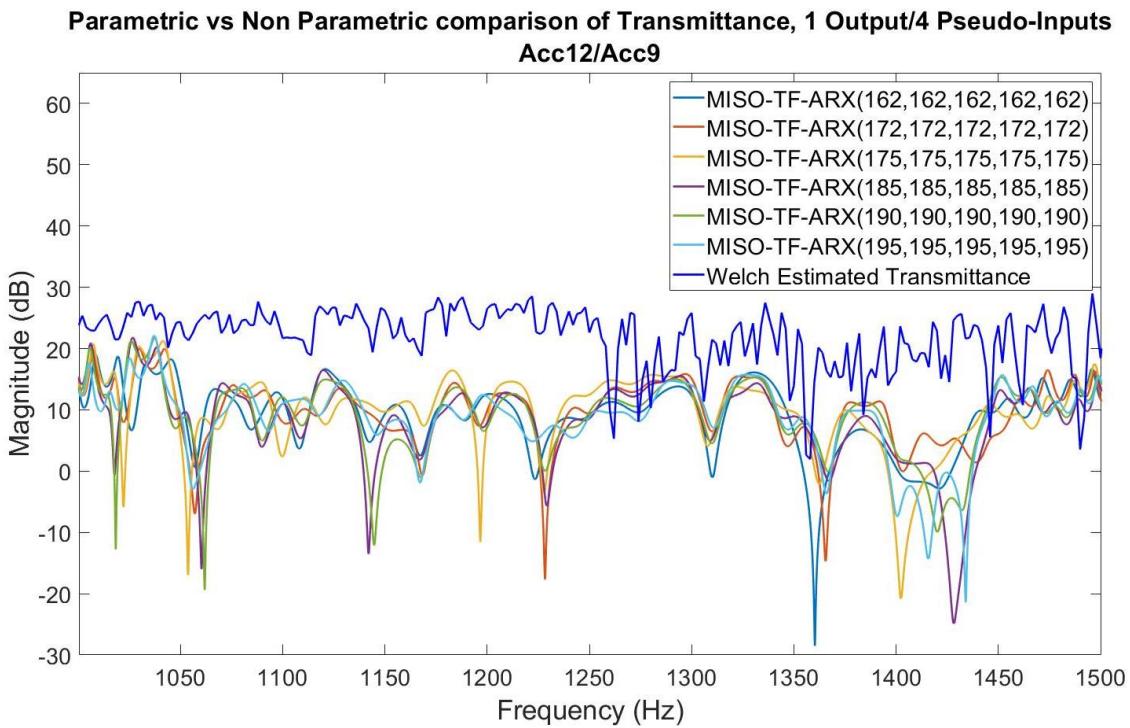
**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc15**



**Εικόνα 38.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.



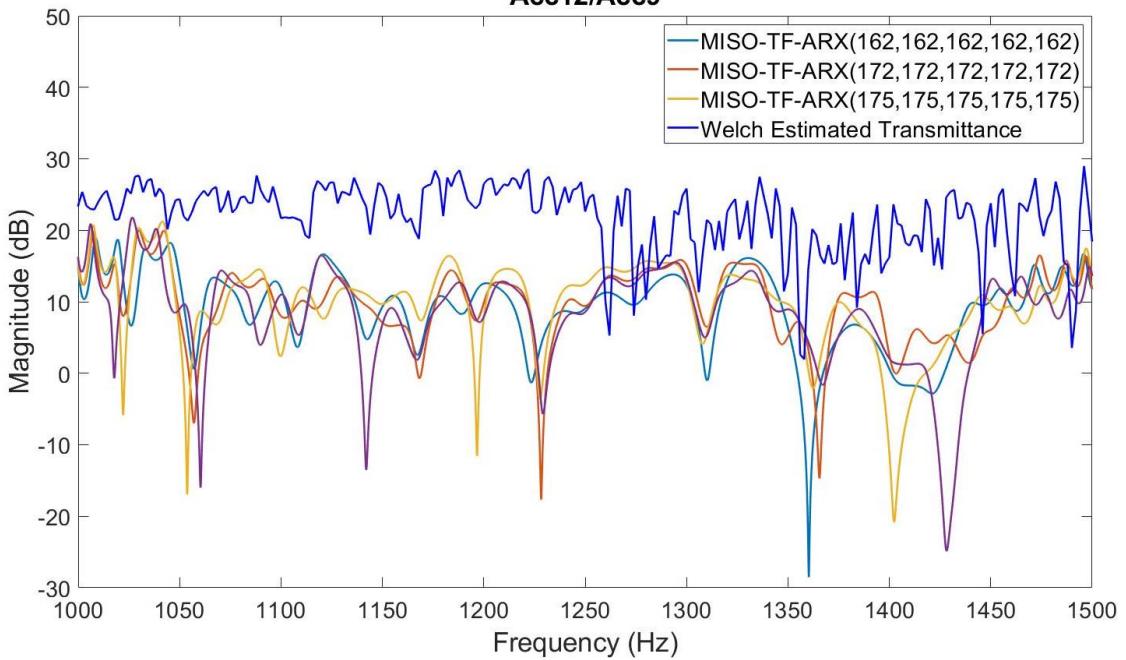
**Εικόνα 39.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc15 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.



**Εικόνα 40.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances υποψήφιων τάξεων και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

### Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs

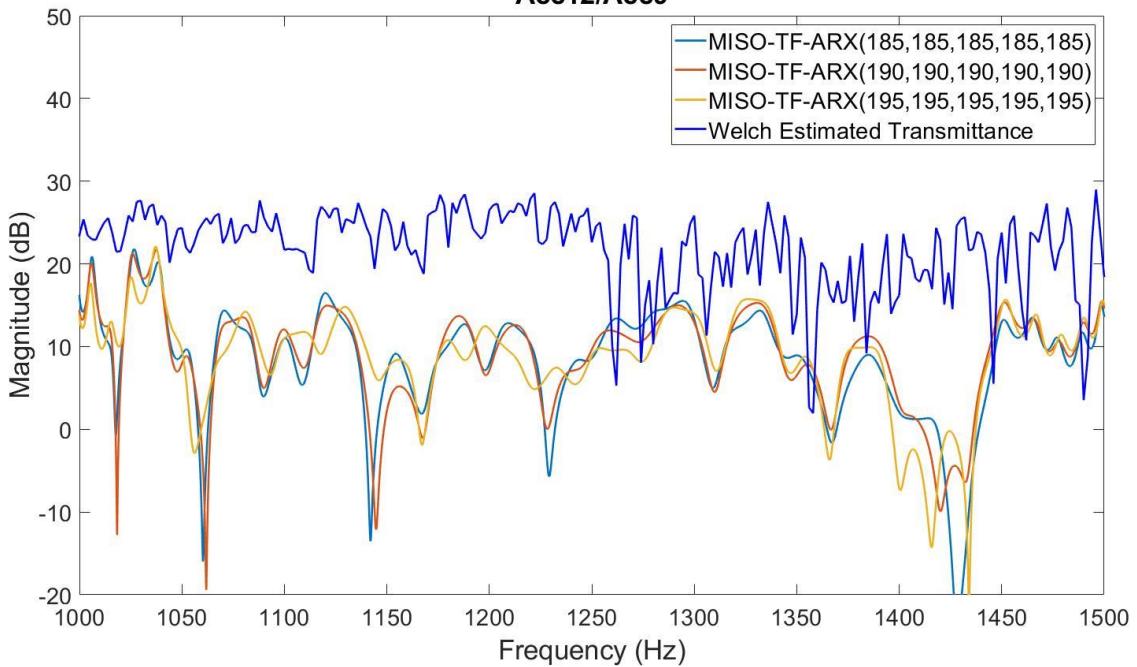
Acc12/Acc9



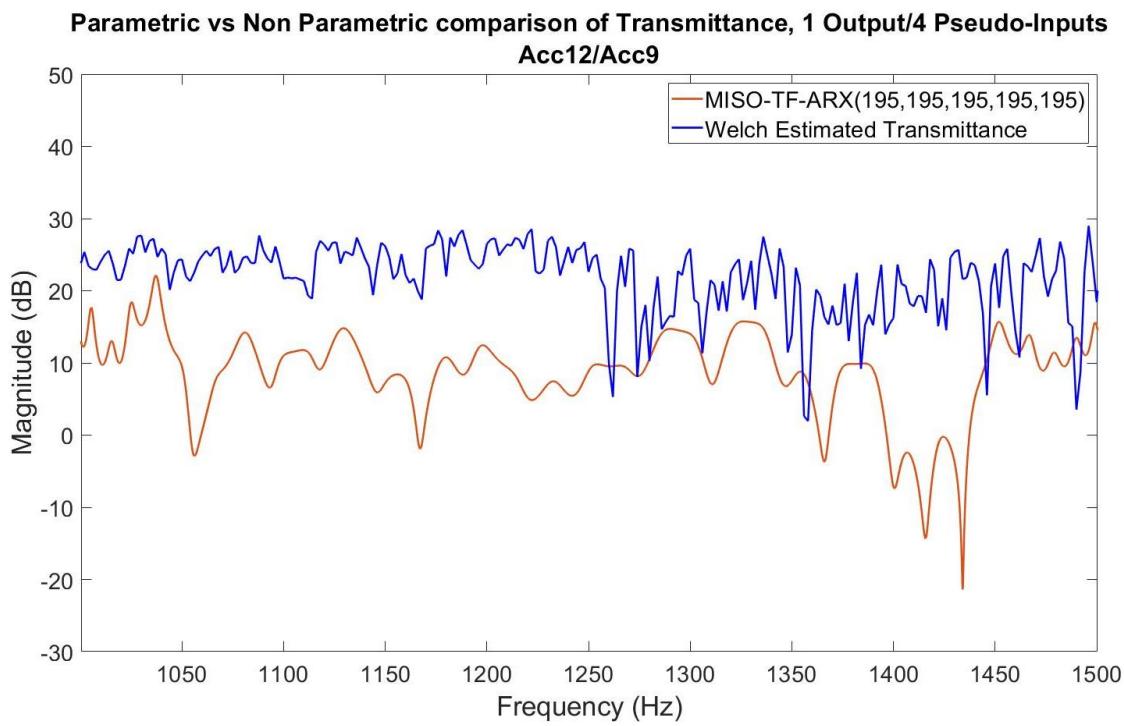
**Εικόνα 41.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

### Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs

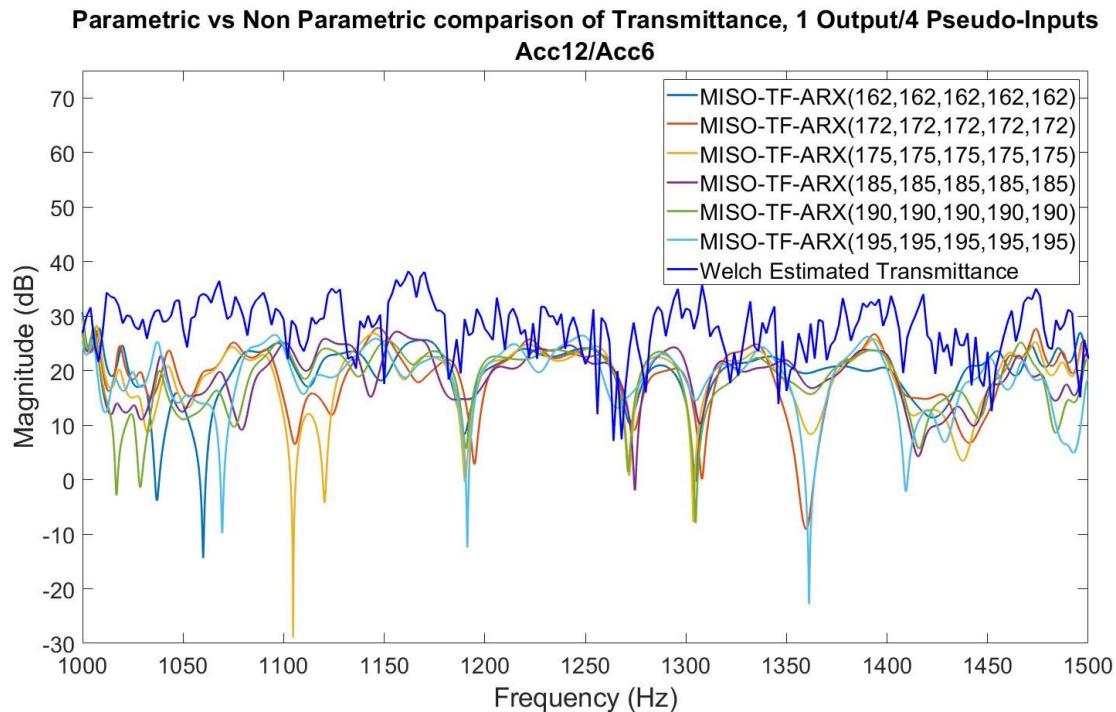
Acc12/Acc9



**Εικόνα 42.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

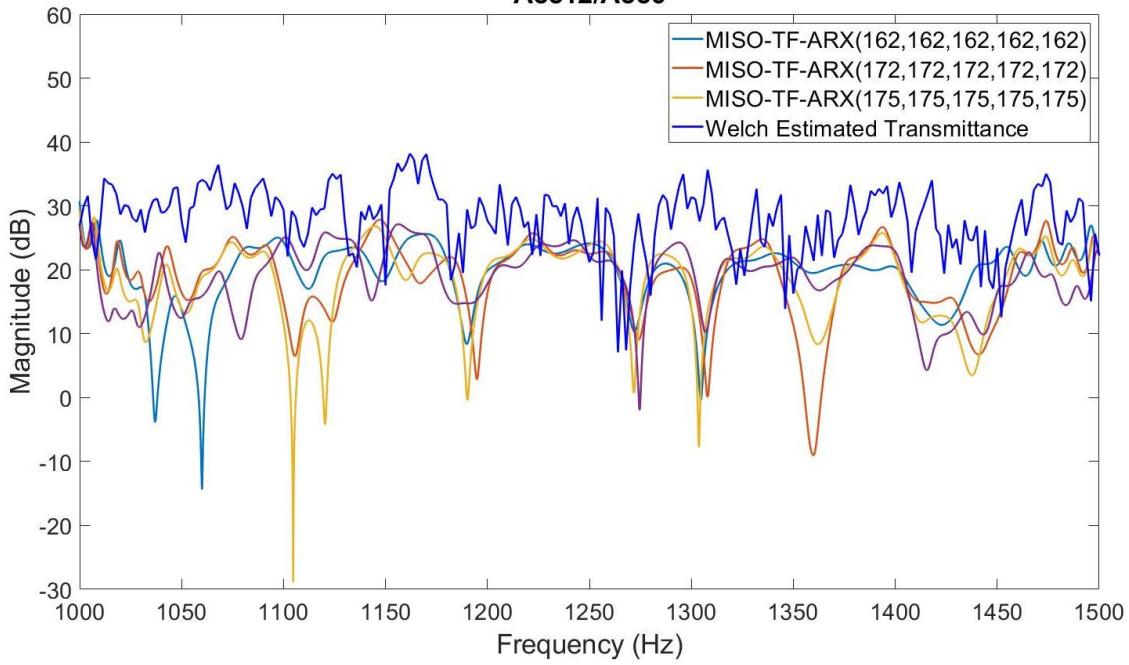


**Εικόνα 43.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc9 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.



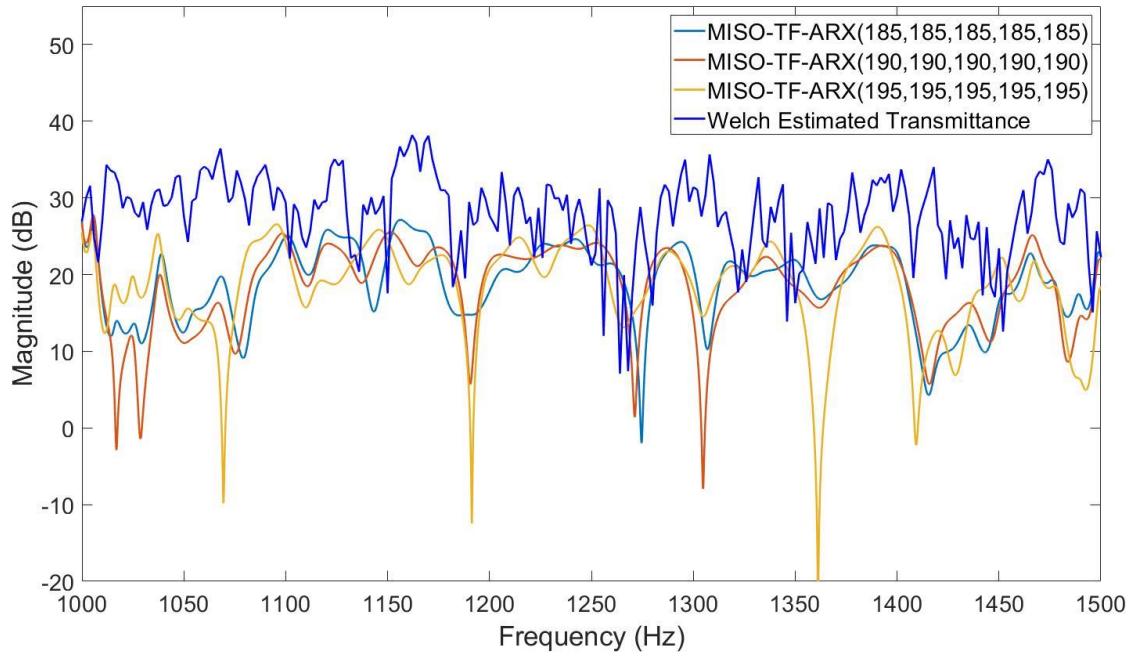
**Εικόνα 44.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



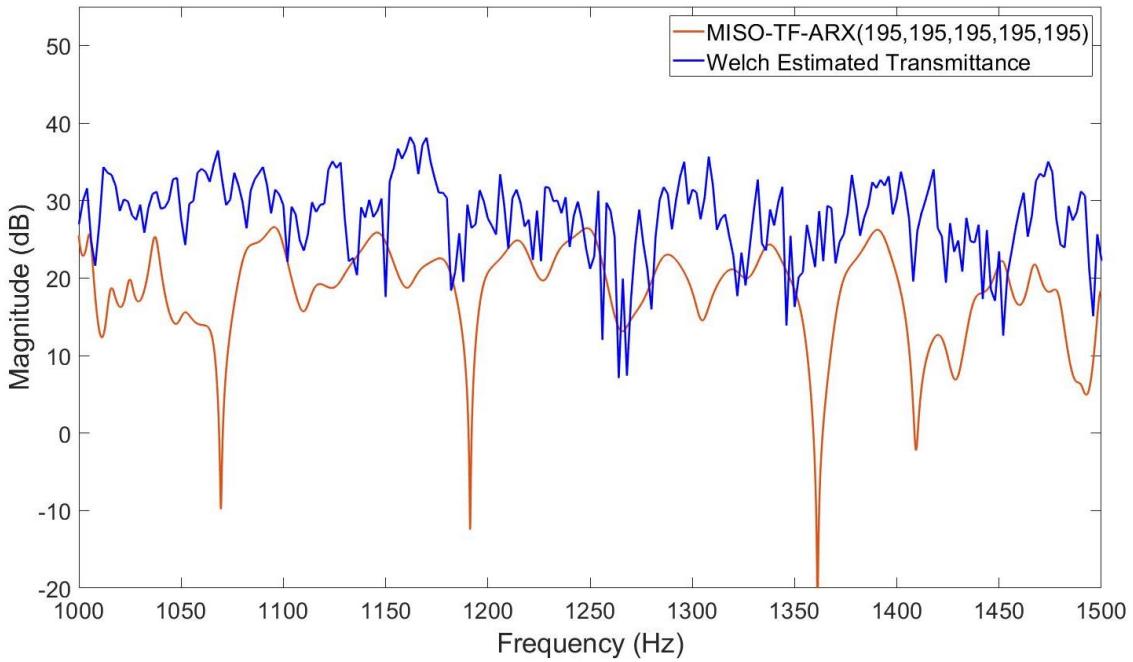
**Εικόνα 45.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



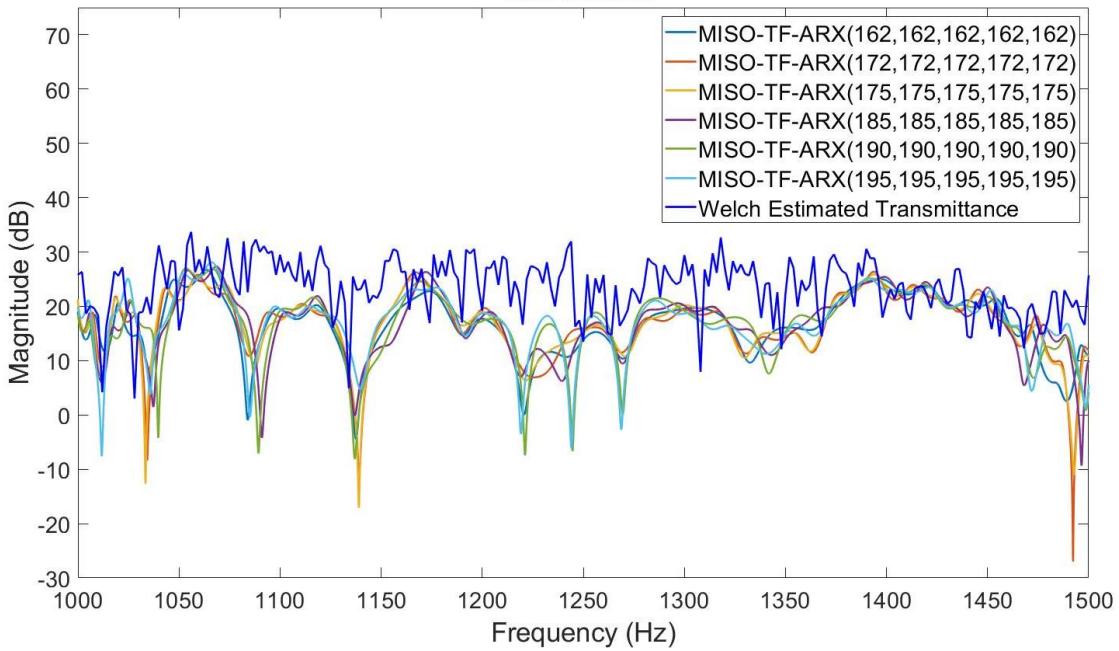
**Εικόνα 46.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc6**



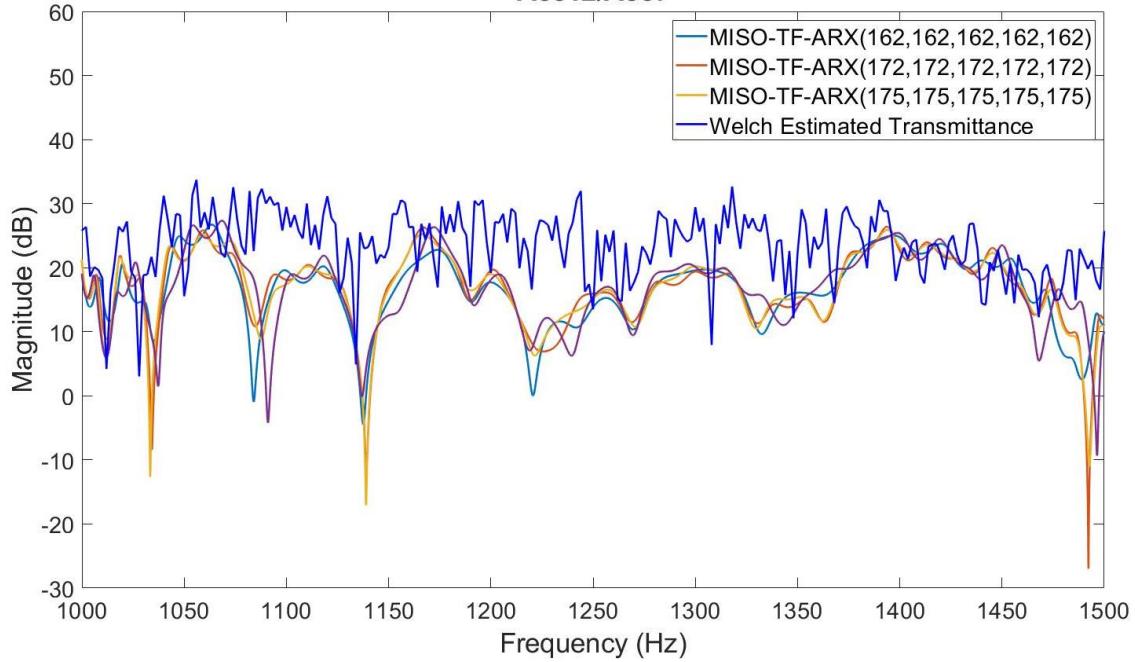
**Εικόνα 47.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc6 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc7**



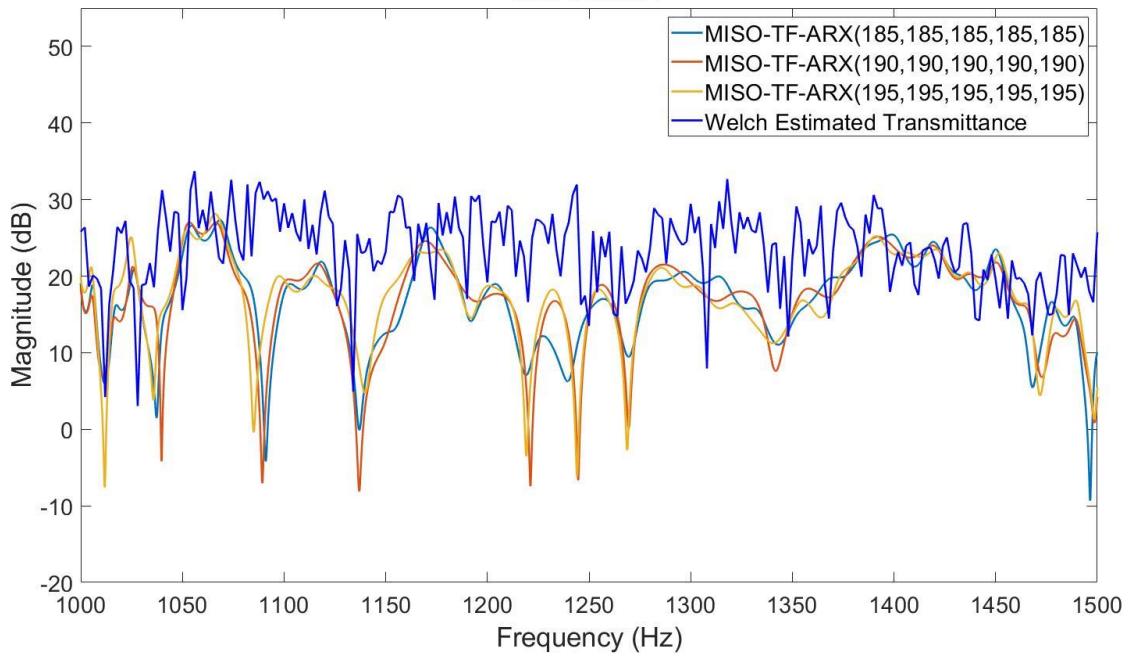
**Εικόνα 48.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances υποψήφιων τάξεων και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc7 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc7**



**Εικόνα 49.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 162, 172 και 175 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc7 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

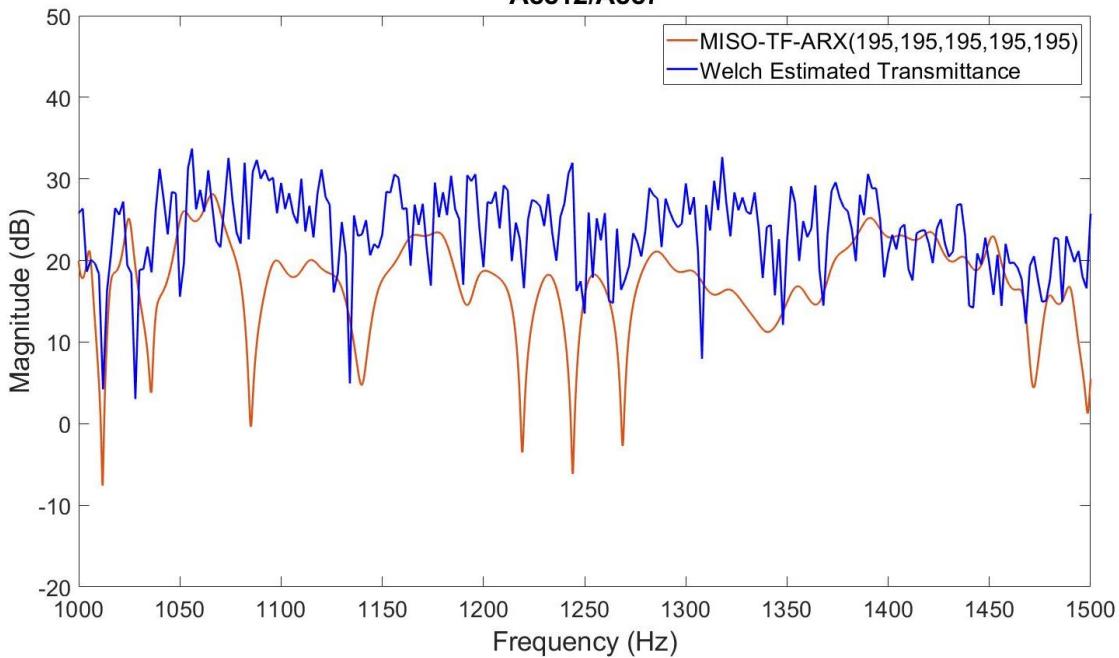
**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs  
Acc12/Acc7**



**Εικόνα 50.** Σύγκλιση παραμετρικών Transmittances τάξεων 185, 190 και 195 και σύγκριση αυτών με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc7 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

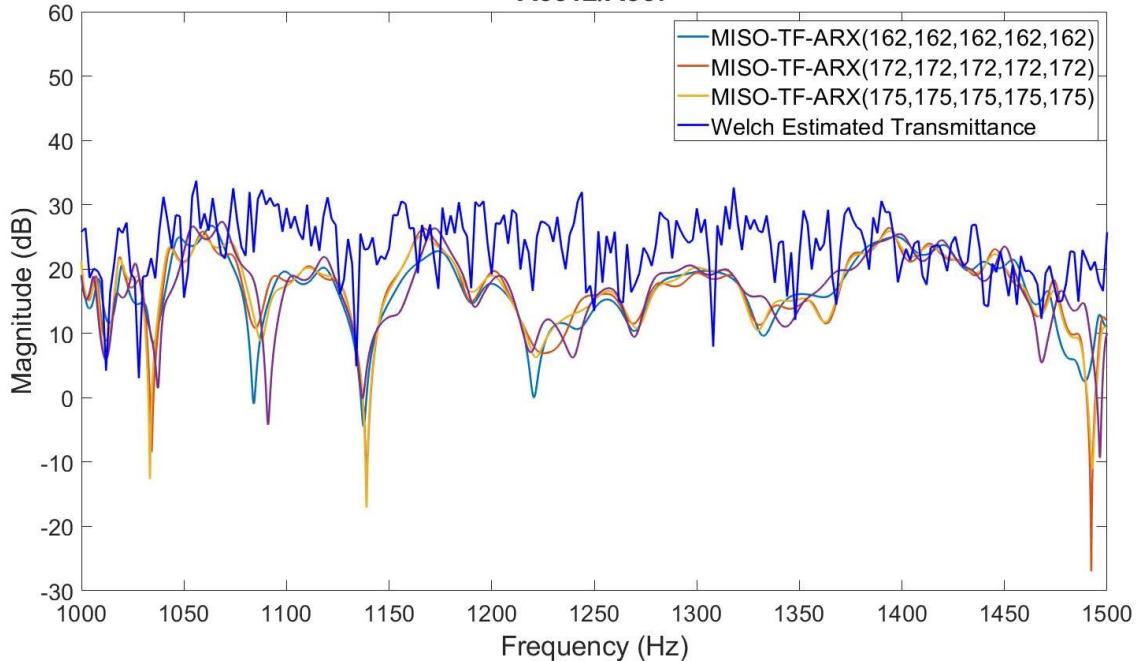
**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs**

**Acc12/Acc7**



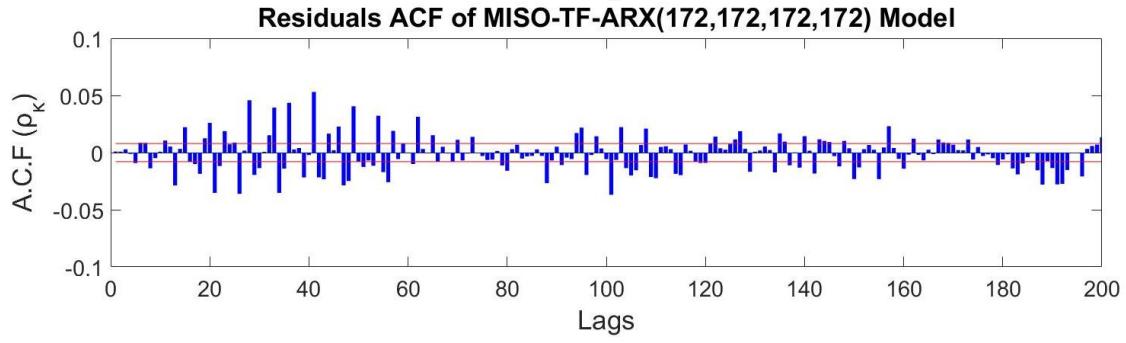
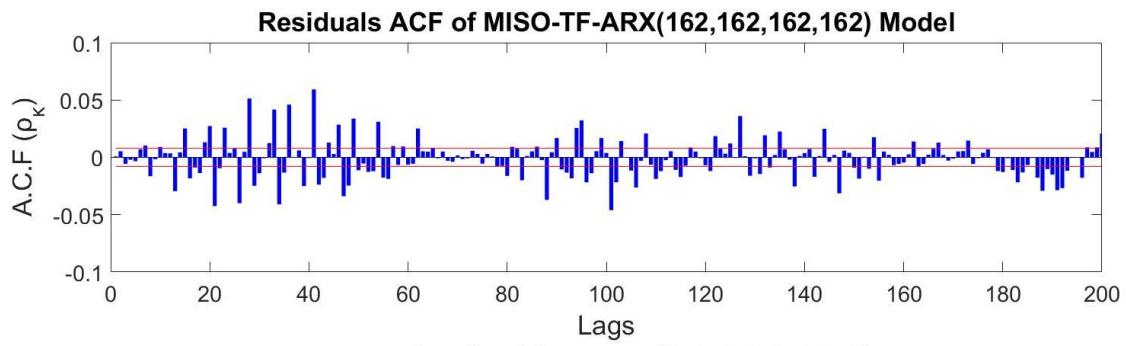
**Parametric vs Non Parametric comparison of Transmittance, 1 Output/4 Pseudo-Inputs**

**Acc12/Acc7**

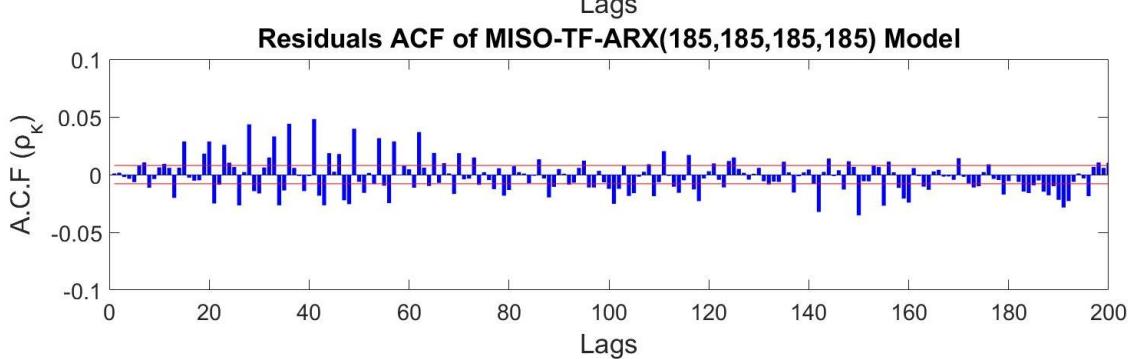
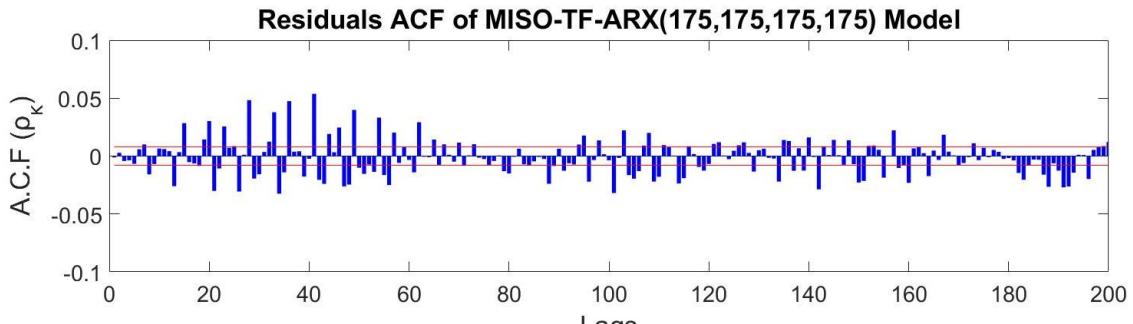


**Εικόνα 51.** Σύγκριση παραμετρικού Transmittance τάξης 195 με το μη παραμετρικό Transmittance κατά εκτίμηση Welch, για Acc12/Acc7 των τεσσάρων ψευδο-εισόδων.

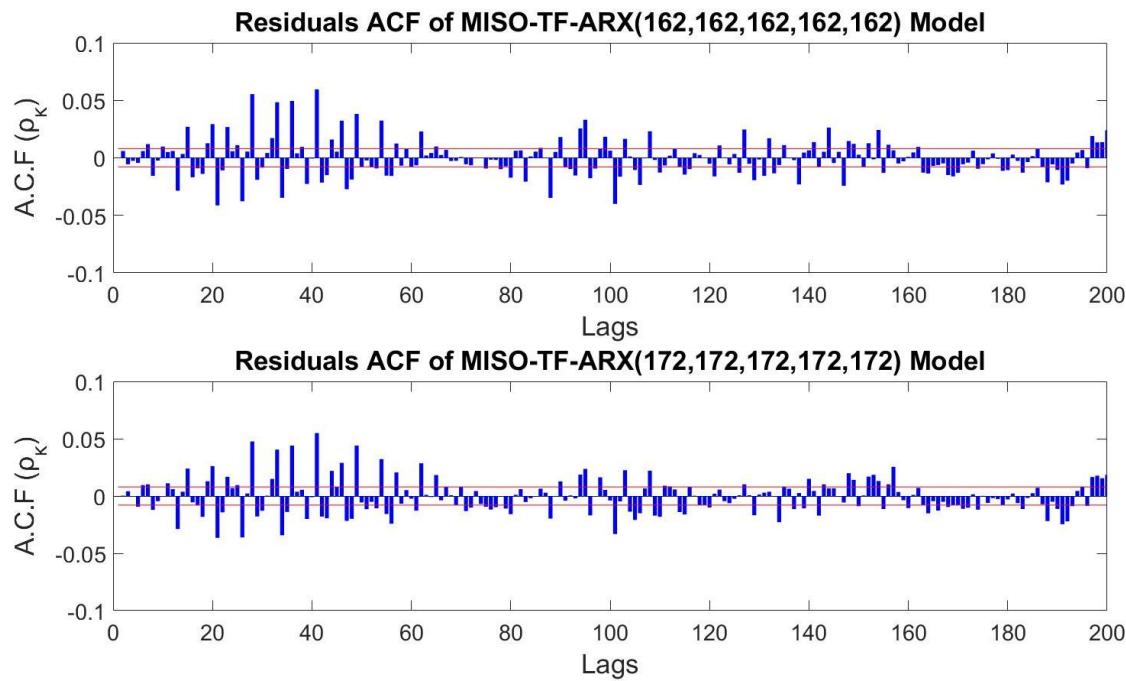
Στις παρακάτω εικόνες ( [Εικόνα 52](#), [Εικόνα 53](#), [Εικόνα 54](#), [Εικόνα 55](#) ) δίνονται η ACF των υπολοίπων για τις υποψήφιες τάξεις και αριθμών ψευδο-εισόδων 3 και 4, αντίστοιχα.



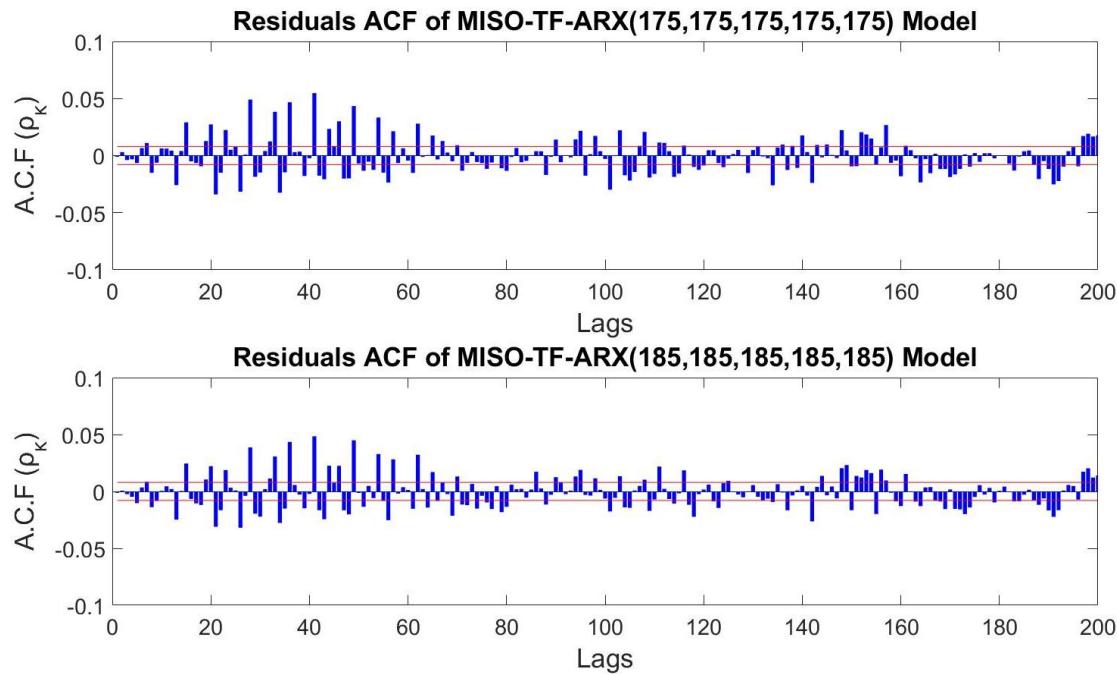
**Εικόνα 52.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172).



**Εικόνα 53.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185).

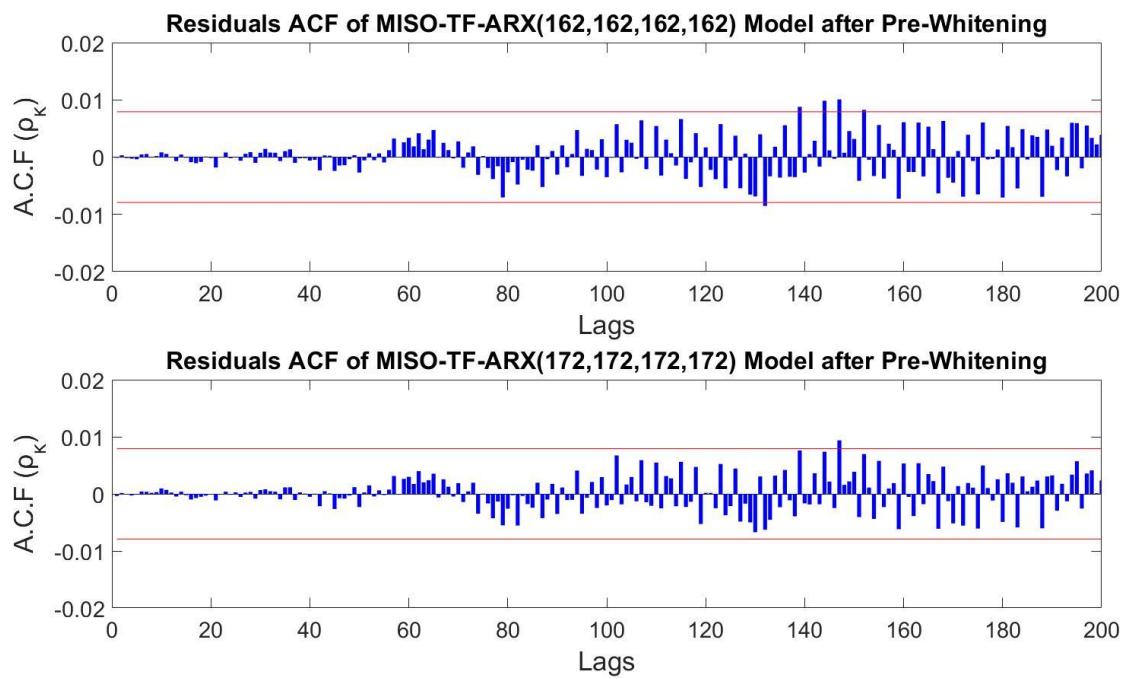


**Εικόνα 54.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172).

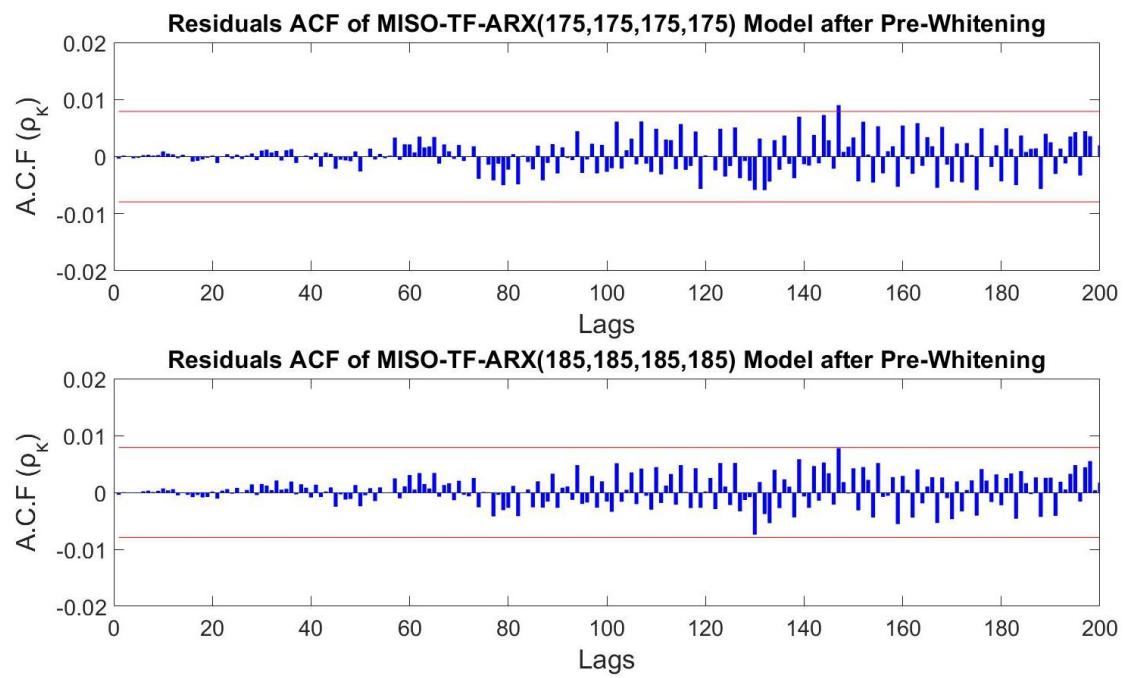


**Εικόνα 55.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης Υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185).

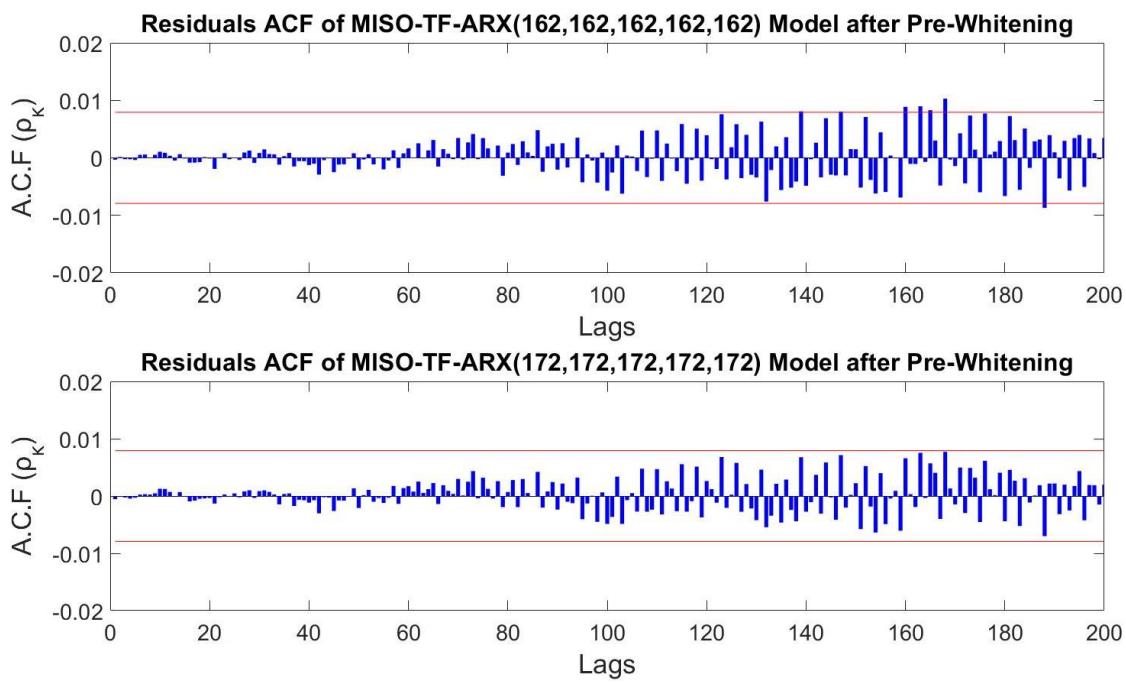
Παρακάτω δίνονται η ACF των υπολοίπων μετά την διαδικασία του Pre-Whitening για τις υποψήφιες τάξεις για τρείς (Εικόνα 56, Εικόνα 57) και τέσσερις ψευδο-εισόδους (Εικόνα 58, Εικόνα 59).



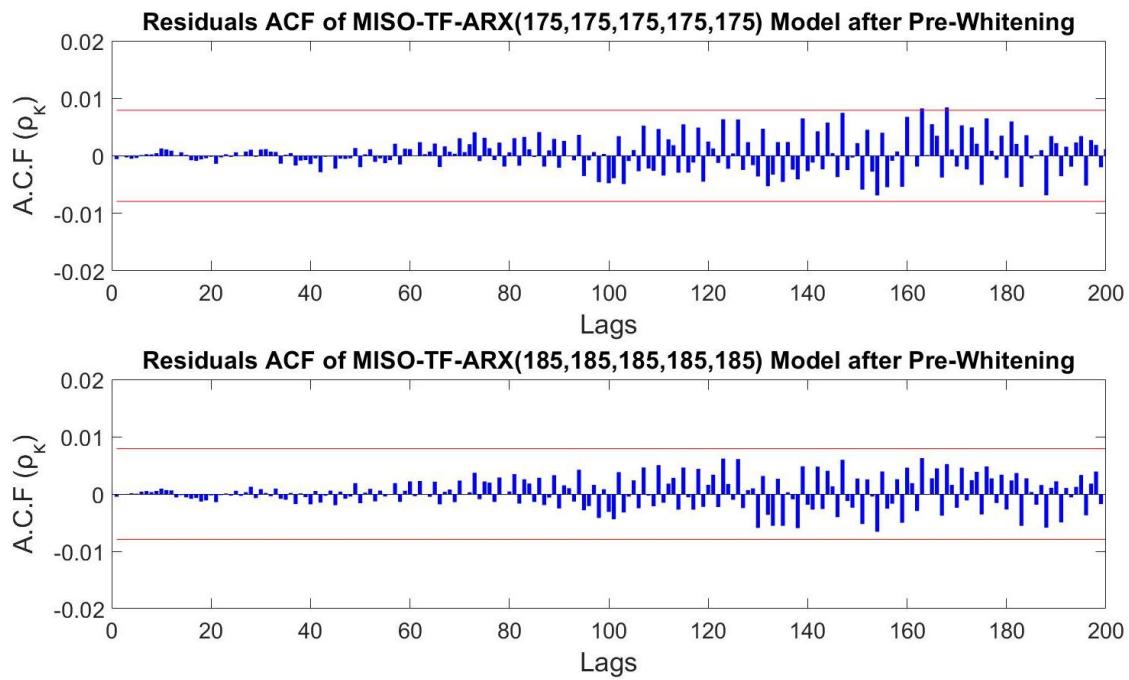
**Εικόνα 56.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172), μετά την το Pre-Whitening για 200 lags.



**Εικόνα 57.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185), μετά την το Pre-Whitening για 200 lags.

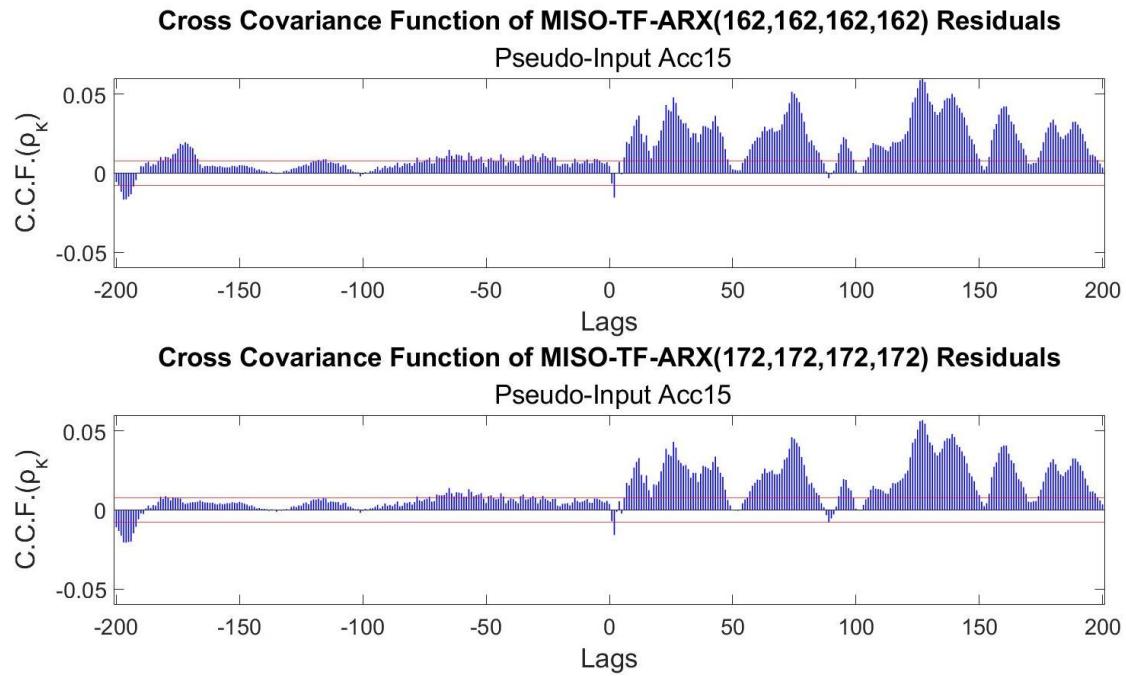


**Εικόνα 58.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172), μετά την την το Pre-Whitening για 200 lags.

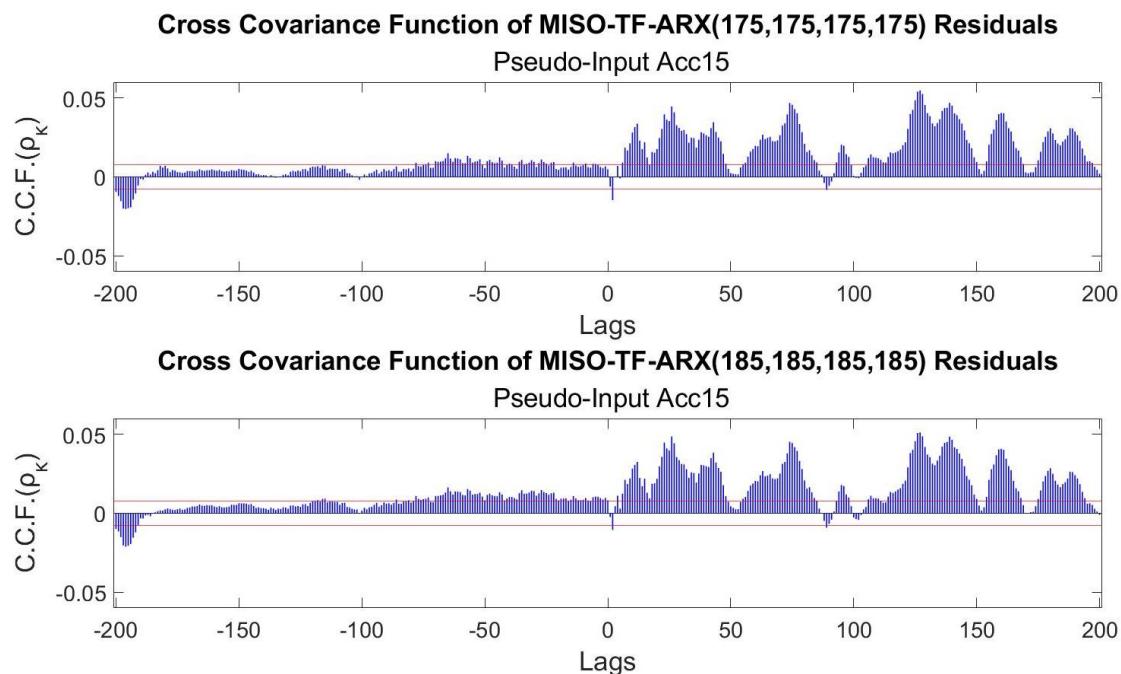


**Εικόνα 59.** Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης υπολοίπων παραμετρικών μοντέλων MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185), μετά την την το Pre-Whitening για 200 lags.

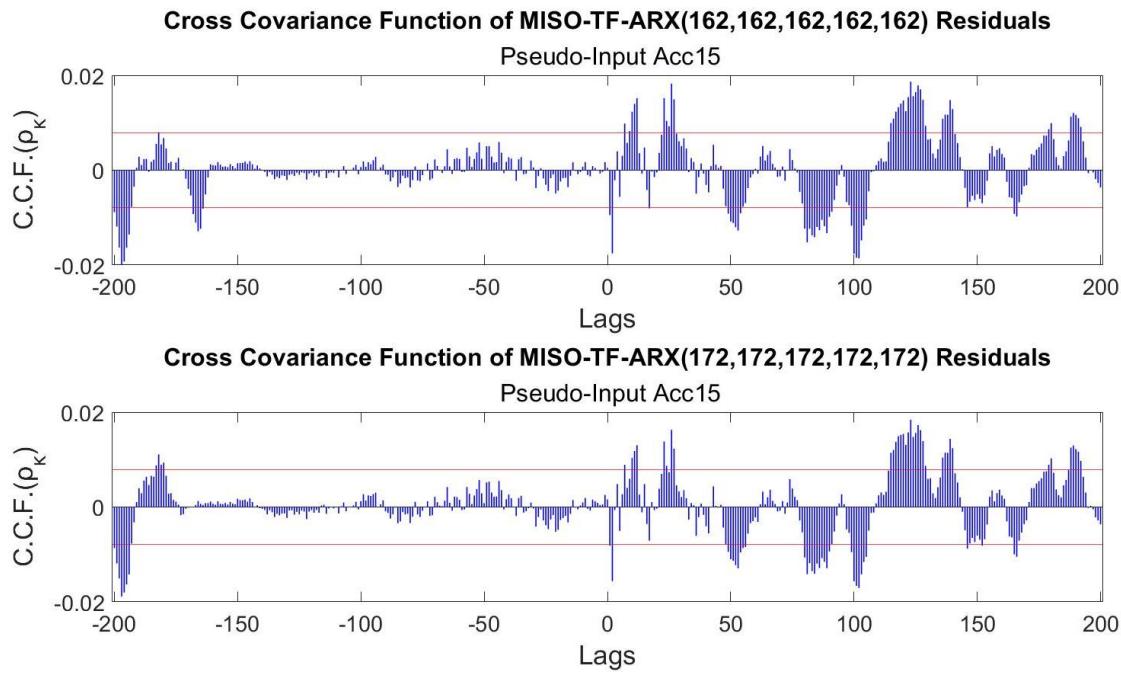
Παρακάτω δίνονται οι CCF των υπολοίπων με τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους και τις υποψήφιες τάξεις. Συνολικά, για τις εκάστοτε ψευδο-εισόδους και την αύξηση των τάξεων παρατηρείται θετική συσχέτιση υπολοίπων, ενώ για αρνητικά lags διακρίνεται η λευκότητά τους.



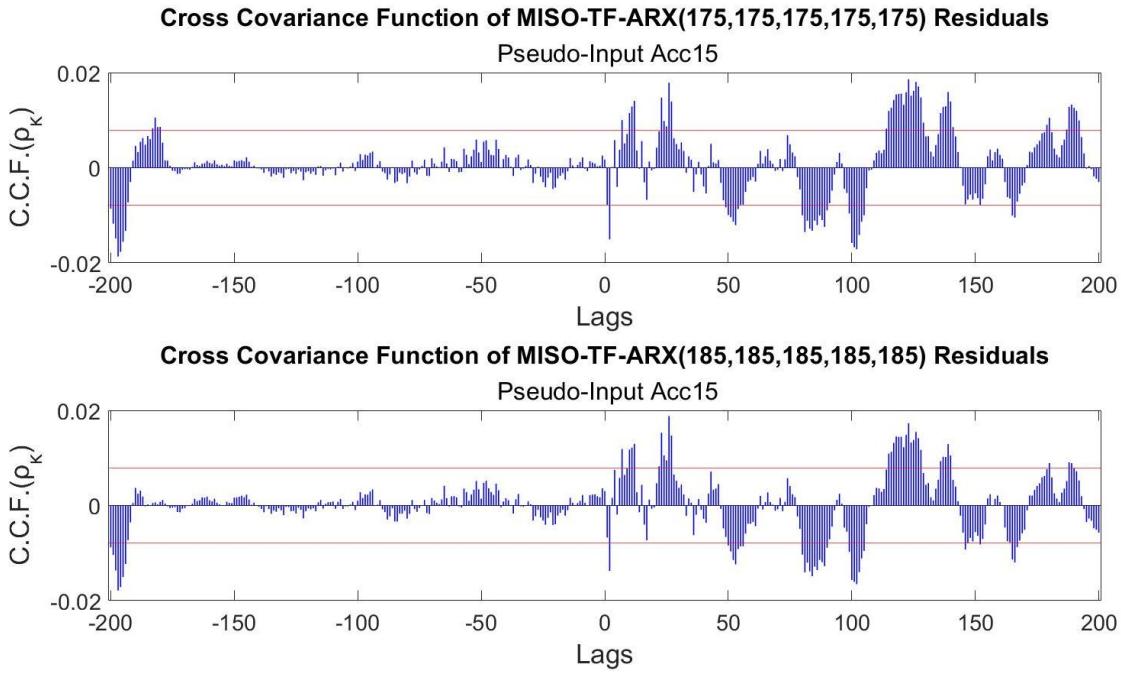
**Εικόνα 60.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).



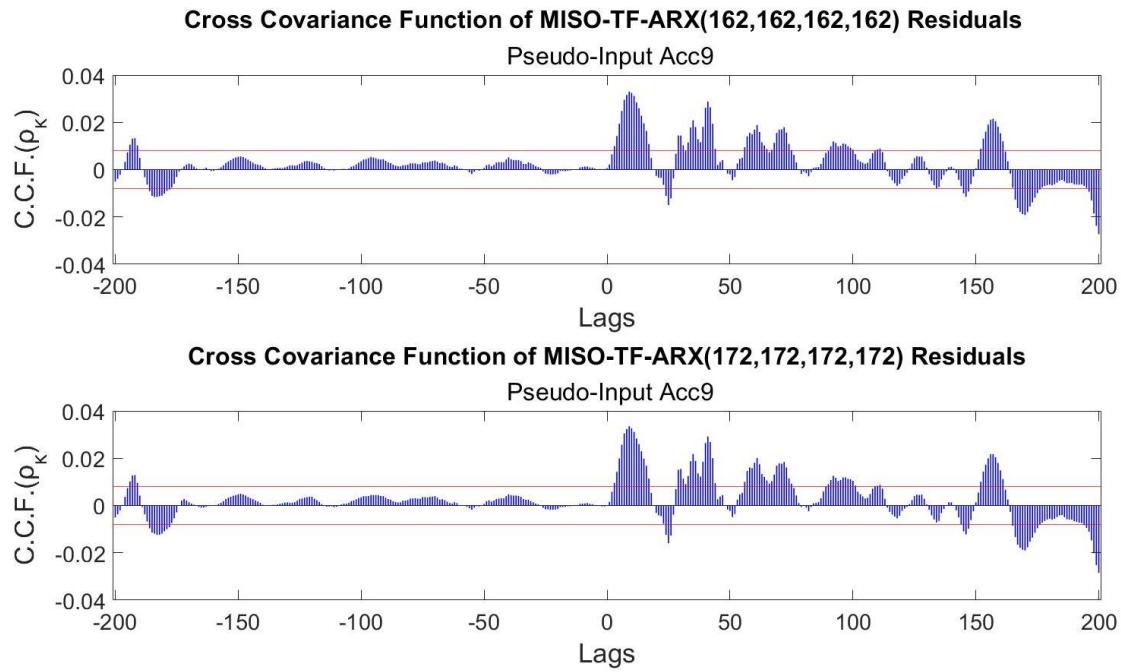
**Εικόνα 61.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).



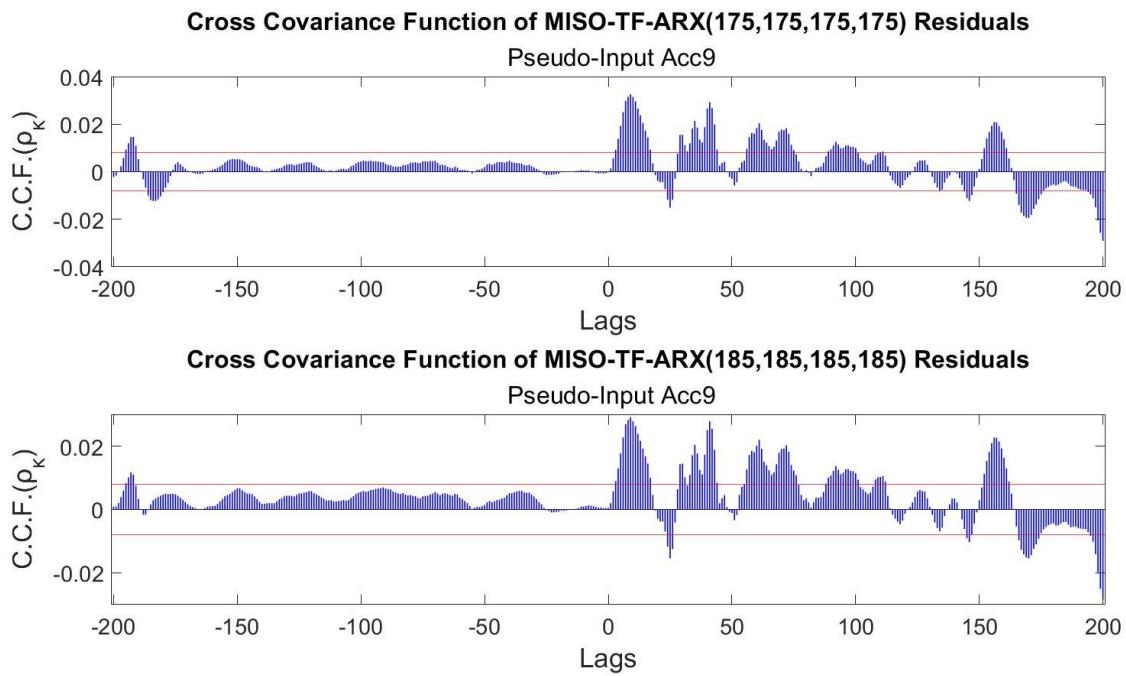
**Εικόνα 62.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).



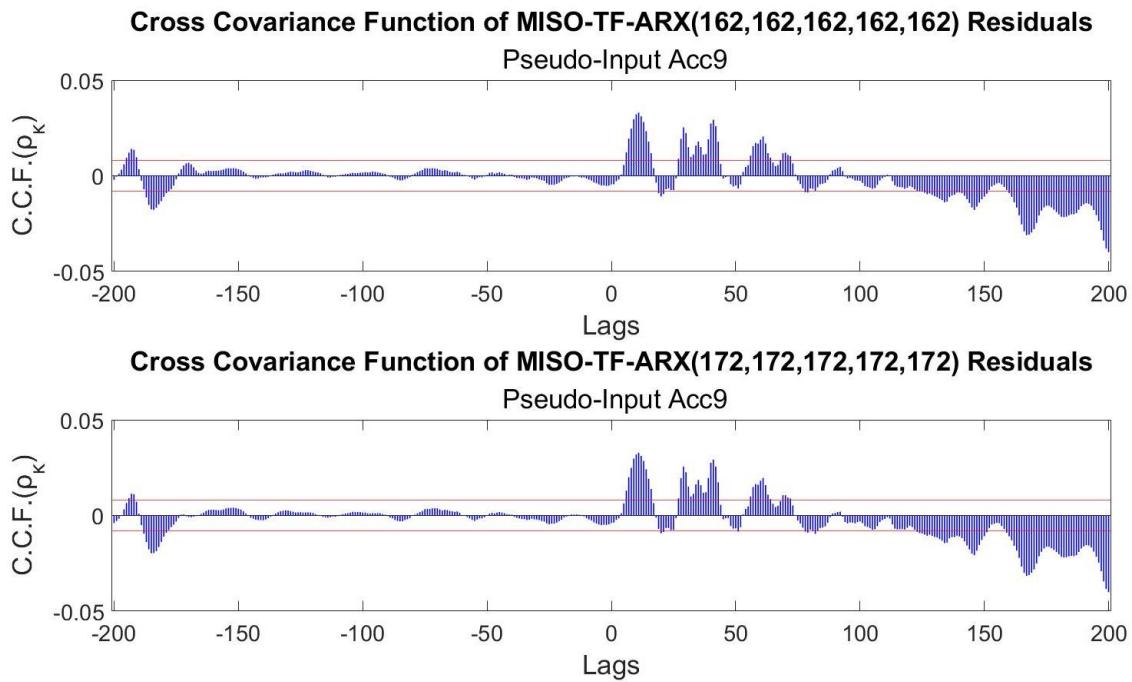
**Εικόνα 63.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 15 (Acc15).



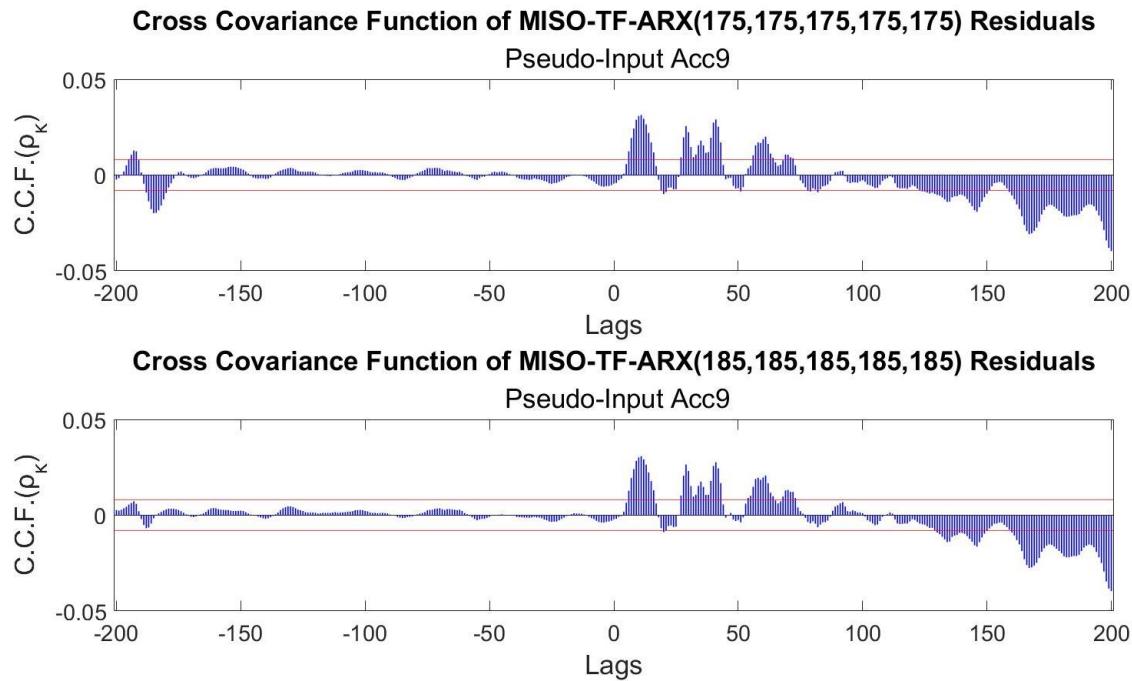
**Εικόνα 64.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 9 (Acc9).



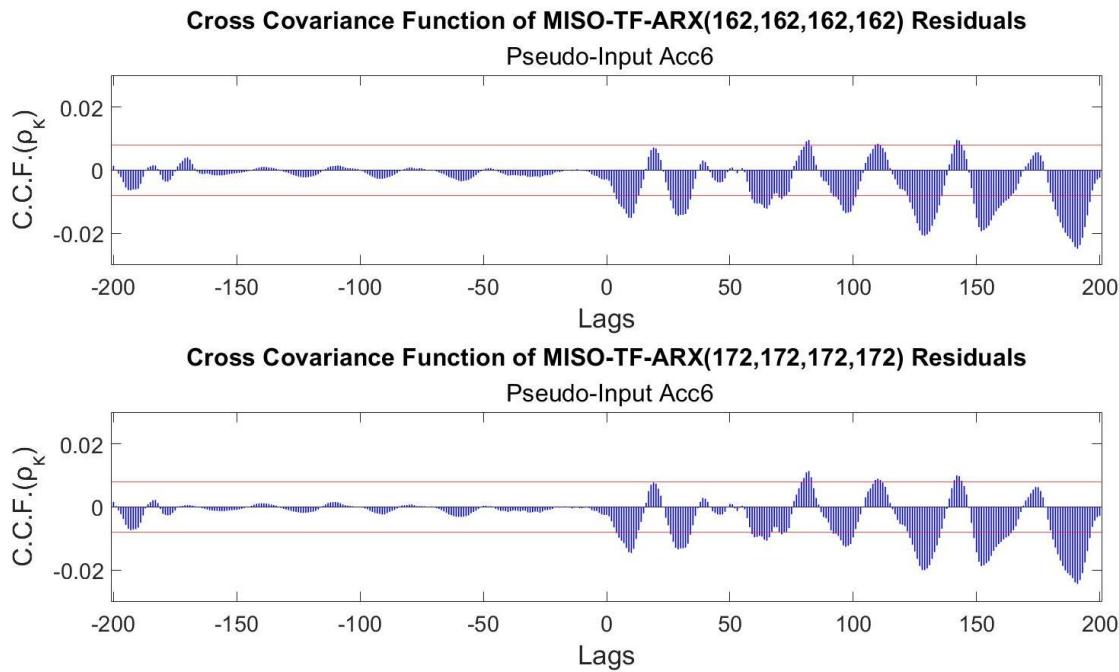
**Εικόνα 65.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 9 (Acc9).



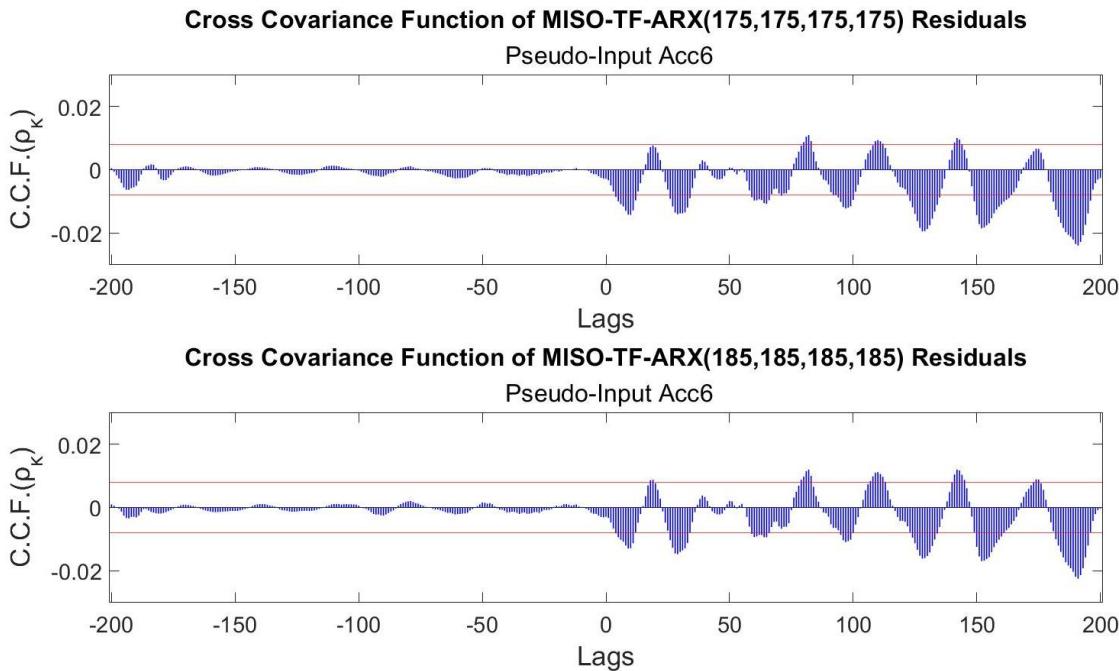
**Εικόνα 66.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 9 (Acc9).



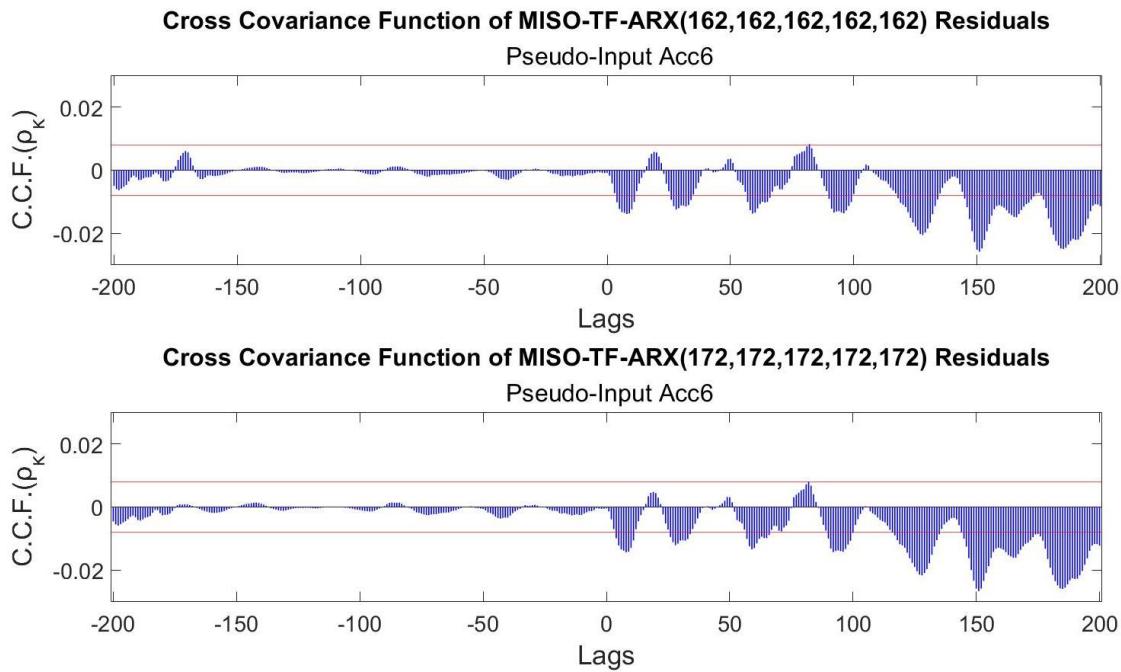
**Εικόνα 67.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 9 (Acc9).



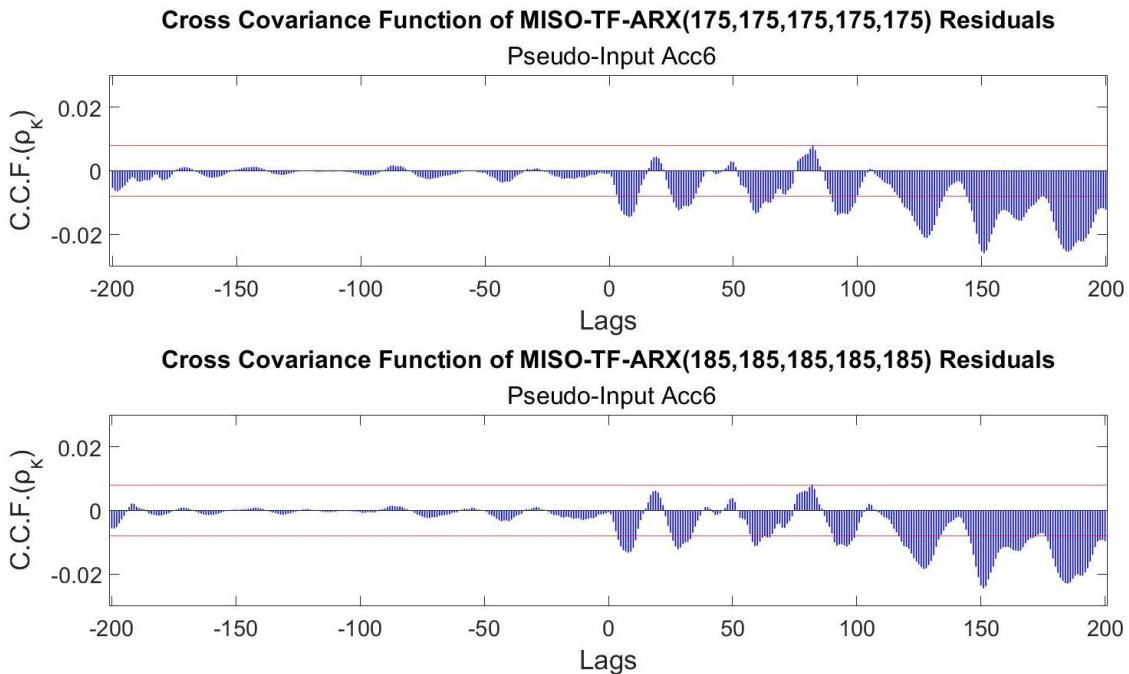
**Εικόνα 68.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 6 (Acc6).



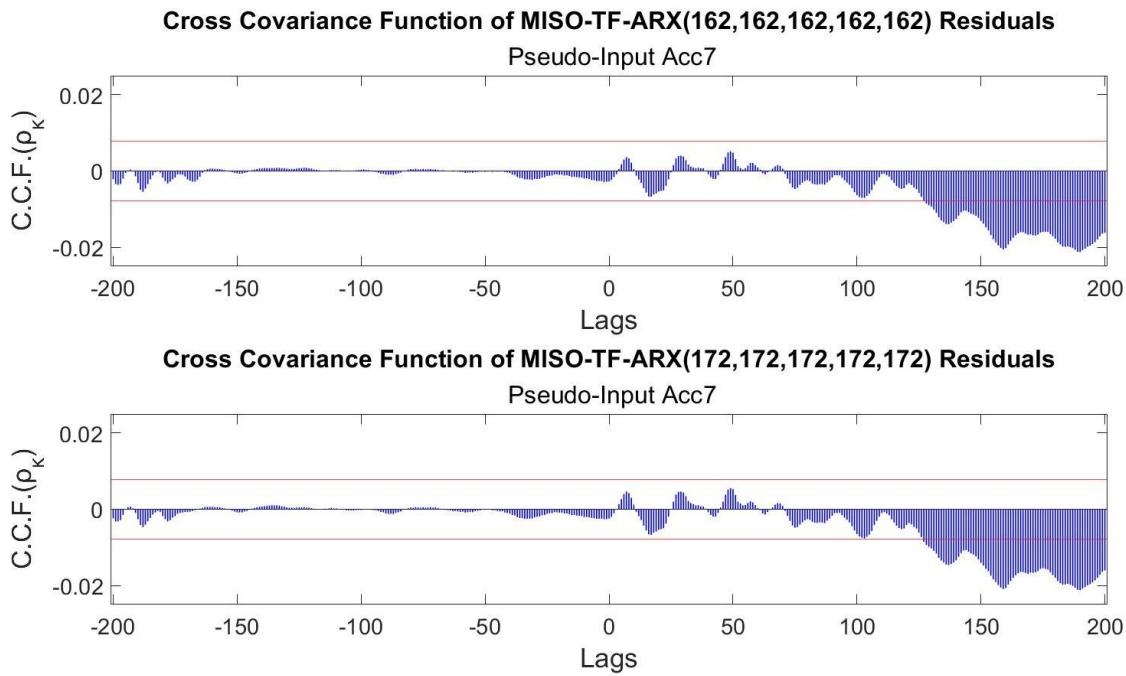
**Εικόνα 69.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 6 (Acc6).



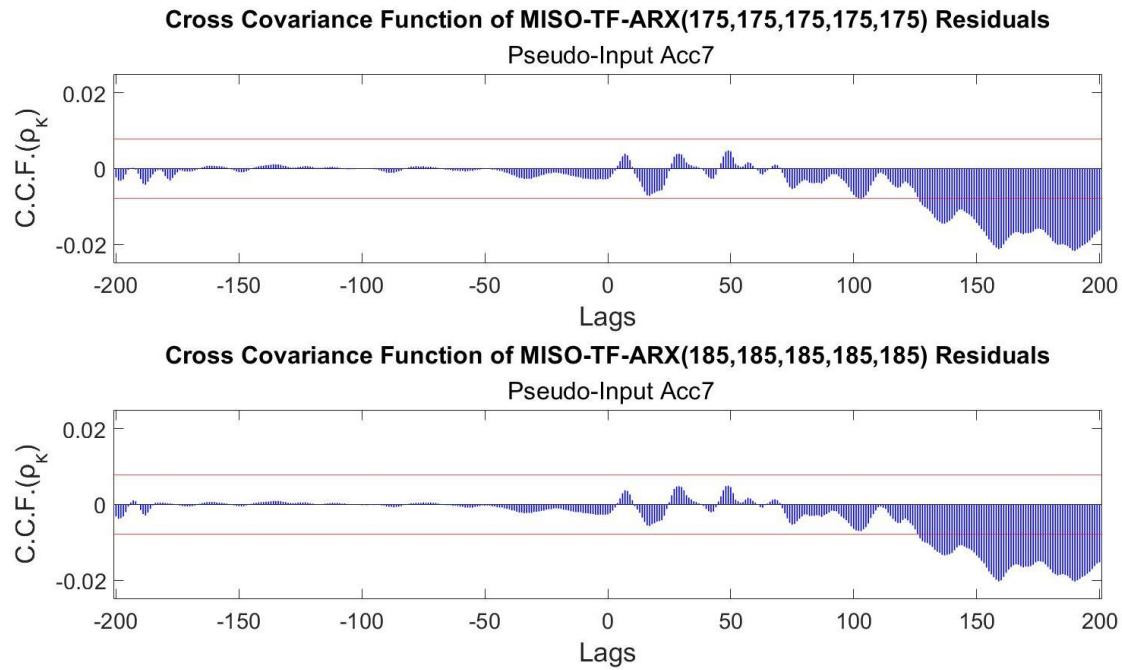
**Εικόνα 70.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 6 (Acc6).



**Εικόνα 71.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 6 (Acc6).



**Εικόνα 72.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(162, 162, 162, 162, 162) και MISO-TF-ARX(172, 172, 172, 172, 172) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 7 (Acc7).



**Εικόνα 73.** Συνάρτηση Διασταυρούμενης Συσχέτισης υπολοίπων για MISO-TF-ARX(175, 175, 175, 175, 175) και MISO-TF-ARX(185, 185, 185, 185, 185) από -200 έως 200 lags, με την ψευδο-είσοδο 7 (Acc7).