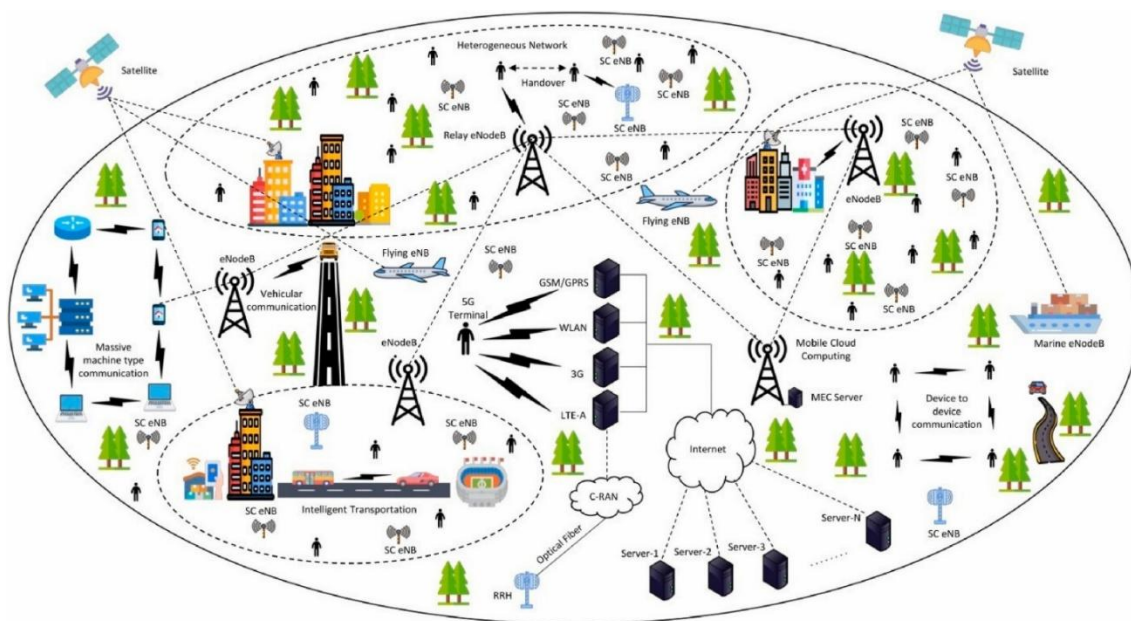


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη τεχνικών τυχαίας προσπέλασης grant-free
με μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση για επικοινωνίες
6ης γενιάς.»



Της φοιτήτριας
Παπιγκιώτη Λαμπρινής
Αρ. Μητρώου: 518110

Επιβλέπων
Ιωσηφίδης Αθανάσιος
Καθηγητής

Ημερομηνία 31/05/2026

Τίτλος Π.Ε. Μελέτη τεχνικών τυχαίας προσπέλασης grant-free με μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση για επικοινωνίες 6ης γενιάς.

Κωδικός Π.Ε. 24204

Ονοματεπώνυμο φοιτήτριας Παπικιώτη Λαμπρινή

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Αθανάσιος Ιωσηφίδης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 17/04/2024

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 31/05/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι η συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Παπικιώτη Λαμπρινής που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αφιερώνω την παρούσα εργασία σε όσους και όσες συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας καθώς και στους καθηγητές μου, για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφεραν. »

Πρόλογος

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος προέκυψε ύστερα από προσωπικό ενδιαφέρον για τις σύγχρονες τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών και ιδιαίτερα για τις τεχνικές που στοχεύουν στην αποτελεσματική υποστήριξη των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων των σύγχρονων δικτύων. Η μελέτη της μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) σε συνδυασμό με μηχανισμούς grant-free πρόσβασης αποτελεί ένα ιδιαίτερα επίκαιρο και ενδιαφέρον πεδίο, καθώς σχετίζεται άμεσα με βασικές προκλήσεις των δικτύων επόμενης γενιάς, όπως η υποστήριξη μεγάλου αριθμού χρηστών, η μείωση καθυστέρησης και η αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Μέσα από την μελέτη και την υλοποίηση του συστήματος, έγινε εμβάθυνση σε έννοιες που σχετίζονται με τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών και εφαρμόστηκαν στην πράξη γνώσεις, που έχουν αποκτηθεί, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η διαδικασία της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην καλύτερη κατανόηση θεωρητικών αρχών που διέπουν τα ασύρματα συστήματα, καθώς και των πρακτικών προκλήσεων που προέκυψαν από την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

Παράλληλα, η ενασχόληση με το συγκεκριμένο αντικείμενο συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη αναλυτικής και ερευνητικής σκέψης, καθώς και στην ενίσχυση δεξιοτήτων που σχετίζονται με την επίλυση τεχνικών προβλημάτων, την ανάλυση αποτελεσμάτων και τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Η εργασία αυτή αποτέλεσε μια σημαντική εμπειρία σε ένα πεδίο με έντονο ερευνητικό αλλά και τεχνολογικό, ενδιαφέρον, ενισχύοντας την μελλοντική μου πορεία στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία μελετά την απόδοση ενός συστήματος ανόδου (uplink), που βασίζεται σε μηχανισμό grant-free πρόσβασης με τη χρήση μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA), με στόχο την αποτελεσματική υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας και τη μείωση της καθυστέρησης στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Στο εξεταζόμενο σύστημα επιτρέπεται η ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών χρηστών χωρίς να απαιτείται προηγούμενη διαδικασία αδειοδότησης και εκχώρησης πόρων από τον σταθμό βάσης, μέσω της αξιοποίησης προκαθορισμένων επιπέδων σηματοθορυβικής σχέσης (Signal-to-Noise Ratio – SNR).

Για την αξιολόγηση της απόδοσης χρησιμοποιείται ο δείκτης Age of Information (AoI), ο οποίος αποτυπώνει την επικαιρότητα της πληροφορίας στον σταθμό βάσης και παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του συστήματος. Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB, στην οποία εξετάζεται η εκπομπή πληροφορίας των χρηστών προς τον σταθμό βάσης σε διαστήματα διαδοχικών πλαισίων (frames), κάθε ένα από τα οποί αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό χρονοθυρίδων (slot). Το κανάλι παρουσιάζει διαλείψεις Rayleigh fading, ενώ για την αποκωδικοποίηση των ταυτόχρονων μεταδόσεων στο πλαίσιο της μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης εφαρμόζεται διαδικασία διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation- SIC). Παράλληλα, για σκοπούς συγκριτικής αξιολόγησης, εξετάζεται και το σύστημα ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access - OMA).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσέγγιση grant-free NOMA επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές AoI και μεγαλύτερο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, αναδεικνύοντας την καταλληλότητά της για δίκτυα επόμενης γενιάς.

«Study of Grant-Free Random-Access Techniques With Non-Orthogonal Multiple Access for 6G Communications»

Lamprini Papigkioti

Abstract

This thesis studies the performance of an uplink system based on a grant-free access mechanism using Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), aiming to efficiently support massive connectivity and reduce latency in modern wireless communication networks. In the examined system, multiple users are allowed to transmit simultaneously without requiring a prior grant and resource allocation procedure from the base station, through the utilization of predefined Signal-to-Noise Ratio (SNR) levels.

For the performance evaluation, the Age of Information (AoI) metric is used, which reflects the freshness of the information at the base station and provides a comprehensive view of the system operation. The study is carried out through simulation in a MATLAB environment, where the transmission of information from the users to the base station is examined over consecutive frames, each consisting of a specific number of time slots. The channel experiences Rayleigh fading, while Successive Interference Cancellation (SIC) is applied for the decoding of simultaneous transmissions within the framework of non-orthogonal multiple access.

In parallel, for comparative evaluation purposes, the Orthogonal Multiple Access (OMA) system is also examined. The results demonstrate that the grant-free NOMA approach achieves lower AoI values and a higher number of successful updates, especially in high user-density environments, highlighting its suitability for next-generation networks..

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, Αθανάσιο Ιωσηφίδη, για την καθοδήγηση και τη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε σημαντική για την ολοκλήρωση της μελέτης. Επιπλέον, ευχαριστώ τους ανθρώπους του κοντινού μου περιβάλλοντος για τη στήριξη και την κατανόηση που έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες	xi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικό Πλαίσιο και Κίνητρα	1
1.2 Υφιστάμενη Έρευνα και Τεχνολογικές Προσεγγίσεις	1
1.3 Σκοπός και Στόχος της Εργασίας.....	2
1.4 Μεθοδολογία και Εργαλεία Υλοποίησης.....	2
1.5 Βασικά Αποτελέσματα.....	2
1.6 Δομή της Εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση (OMA)	6
2.3 Από το OMA στο NOMA	6
2.4 Βασικές Αρχές και Πλεονεκτήματα NOMA.....	7
2.5 NOMA σε Σύγχρονα Δίκτυα 5G.....	8
2.6 NOMA στο 6G.....	9
2.7 Σύνοψη Κεφαλαίου	10
Κεφάλαιο 3ο: Πρόσβαση Χωρίς Εκχώρηση Πόρων	11
3.1 Εισαγωγή στο Grant Free Transmission	11
3.2 Grant-Free vs Grant-Based Transmission	11
3.3 Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές της Μετάδοσης Grant-Free.....	12
3.4 Συνδυασμός Grant-Free και NOMA.....	14
3.5 Προκλήσεις και Μελλοντική Χρήση του Grant-Free σε Σύγχρονα Δίκτυα.....	16
3.6 Επίλογος.....	17
Κεφάλαιο 4ο: Περιγραφή του Συστήματος και Ανάλυση του Age of Information.....	19
4.1 Εισαγωγή και Στόχος Κεφαλαίου	19

4.2	Age of Information (AoI).....	19
4.3	Περιγραφή του Συστήματος Grant-Free Uplink	20
4.4	Προκαθορισμένα SNR Επίπεδα	21
4.5	Διαδικασία Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών (SIC)	21
4.6	Σχεδίαση Προκαθορισμένων Επιπέδων SNR (Design I και Design II).....	22
4.7	Συνολική Λειτουργία του Συστήματος και Σύνδεση με το AoI.....	23
4.8	Βασικός Στόχος Προσομοιώσεων και Κριτήρια Αξιολόγησης.....	24
4.9	Επίλογος.....	26
Κεφάλαιο 5ο: Επεξήγηση Κώδικα Προσομοίωσης.....		27
5.1	Εισαγωγή.....	27
5.2	Περιγραφή Προσομοίωσης	27
5.3	Βασικές Παράμετροι και Μεταβλητές Προσομοίωσης	28
5.4	Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου.....	31
5.5	Αναλυτική Περιγραφή Υλοποίησης MATLAB.....	38
5.6	Σύνοψη Κεφαλαίου	47
Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα		49
6.1	Εισαγωγή.....	49
6.2	Επίδραση του Αριθμού Επιπέδων SNR	49
6.3	Επίδραση της παραμέτρου <i>P_{max}</i>	51
6.4	Επίδραση του Ρυθμού Μετάδοσης.....	57
6.5	Σύγκριση OMA-NOMA ως προς <i>R</i>	59
6.6	Σύνοψη Κεφαλαίου	60
Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα.....		63
7.1	Γενικά Συμπεράσματα.....	63
7.2	Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....		67

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Εξέλιξη κινητών επικοινωνιών [17]	4
Σχήμα 2: Γενικό διάγραμμα ροής της προσομοίωσης του συστήματος NOMA/OMA grant-free.....	30
Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας NOMA και της εφαρμογής SIC.....	33
Σχήμα 4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας OMA.....	34
Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του Age of Information και των επιτυχημένων ενημερώσεων.....	36
Σχήμα 6: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού των προκαθορισμένων επιπέδων SNR.....	37
Σχήμα 7: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{max} = 0\text{dB}$ με χρήση Design I και διαφορετικό αριθμό επιπέδων SNR ($K=2$, $K=4$, $K=8$).....	46
Σχήμα 8: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{max} = 0\text{dB}$ με χρήση της σχεδίασης Design II και διαφορετικό αριθμό επιπέδων SNR ($K=2$, $K=4$, $K=8$).....	47
Σχήμα 9: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 0\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K=2$, $K=4$	49
Σχήμα 10: Ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{max} = 0\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 4$	53
Σχήμα 11: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 5\text{ dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$	54
Σχήμα 12: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 20\text{ dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$	55
Σχήμα 13: Ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{max} = 20\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 4$	55
Σχήμα 14: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 30\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$	56
Σχήμα 15: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για διαφορετικές τιμές του ρυθμού μετάδοσης ($R = 0.5$ και $R = 1$) με χρήση της σχεδίασης Design I.....	57
Σχήμα 16: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για διαφορετικές τιμές του ρυθμού μετάδοσης ($R = 0.5$ και $R = 1$) με χρήση της σχεδίασης Design II.....	58
Σχήμα 17: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης για τα σχήματα OMA, NOMA Design I και NOMA Design II.....	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Αριθμητικά Δεδομένα Προσομοίωσης.....	28
Πίνακας 6.1: P_K (dB) για $R = 1$ και $R = 0.5$	59

Συντομογραφίες

Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
1G	First Generation of Mobile Communications
2G	Second Generation of Mobile Communications
3G	Third Generation of Mobile Communications
4G	Fourth Generation of Mobile Communications
5G	Fifth Generation of Mobile Communications
6G	Sixth Generation of Mobile Communications
OMA	Orthogonal Multiple Access
NOMA	NON-Orthogonal Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
SIC	Successive Interference Cancellation
IoT	Internet of Things
mMTC	massive Machine Type Communications
eMBB	enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra- Reliable- Latency Communications
IP	Internet Protocol
AI	Artificial Intelligence
RB	Resource Block
UL	Uplink
DL	Downlink
SR	Scheduling Request
gNB	Next Generation
AoI	Age of Information
SNR	Signal-to-Noise Ratio
CSI	Channel State Information

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Η παρούσα ενότητα εισάγει το αντικείμενο της εργασίας και το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές τεχνολογίες που σχετίζονται με το εξεταζόμενο σύστημα, οι προκλήσεις που προκύπτουν στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, καθώς και οι στόχοι και η μεθοδολογία της εργασίας. Τέλος, δίνεται η δομή της εργασίας και περιγράφονται τα επιμέρους κεφάλαια που ακολουθούν.

1.1 Γενικό Πλαίσιο και Κίνητρα

Η συνεχής εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών και η μετάβαση προς τα δίκτυα πέμπτης και έκτης γενιάς (5G/6G) έχουν προκαλέσει αυξημένες απαιτήσεις για υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας [1], [2]. Στο πλαίσιο αυτό, συστήματα όπως massive machine-type communications (mMTC) και εφαρμογές όπως το Internet of Things (IoT) απαιτούν την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συσκευών, οι οποίες συχνά μεταδίδουν μικρά πακέτα δεδομένων [3].

Οι παραδοσιακές τεχνικές ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access - OMA), αν και απλές και ευρέως χρησιμοποιούμενες, παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς την αποδοτική εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων, καθώς επιτρέπουν την εξυπηρέτηση ενός μόνο χρήστη ανά χρονικό φασματικό πόρο [4]. Το γεγονός αυτό, τις καθιστά ανεπαρκείς για περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών.

Για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών, η μη-ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA) έχει προταθεί ως μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Το NOMA επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών χρηστών, αξιοποιώντας τεχνικές ανίχνευσης όπως η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC), βελτιώνοντας αισθητά τη φασματική αποδοτικότητα [5], [6], [7].

1.2 Υφιστάμενη Έρευνα και Τεχνολογικές Προσεγγίσεις

Η ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων ετών είναι επικεντρωμένη στην ανάπτυξη, αλλά και στην ανάλυση, τεχνικών NOMA, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ιδιαίτερα σε σενάρια μαζικής συνδεσιμότητας [3], [8], [9]. Παράλληλα, η ανάγκη για μείωση καθυστέρησης μετάδοσης της πληροφορίας οδήγησε στην ανάπτυξη μηχανισμών grant-free πρόσβασης, στην οποία οι χρήστες μεταδίδουν χωρίς να υπάρχει προηγούμενη διαδικασία προγραμματισμού και εκχώρησης πόρων από τον σταθμό βάσης [10], [11].

Ο συνδυασμός των τεχνικών NOMA και grant-free αποτελεί αποδοτική λύση για δίκτυα επόμενης γενιάς, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με περιορισμένη καθυστέρηση [12]. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν προταθεί διάφορες σχεδιαστικές προσεγγίσεις, όπως η χρήση προκαθορισμένων επιπέδων SNR για την υλοποίηση της πολλαπλής πρόσβασης, ενώ υπάρχουν δύο βασικές εναλλακτικές τεχνικές καθορισμού των επιπέδων SNR.

Παράλληλα, η αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων αυτών απαιτεί τη χρήση κατάλληλων μετρικών. Ο δείκτης Age of Information, ο οποίος έχει εισαχθεί ως μια αποτελεσματική λύση, αποτυπώνει τη χρονική επικαιρότητα της πληροφορίας [13].

1.3 Σκοπός και Στόχος της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η μελέτη ενός συστήματος ανόδου βασισμένο σε NOMA-assisted grant-free πρόσβαση και η αξιολόγηση της απόδοσης του μέσω του δείκτη Age of Information. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού αυτού σε περιβάλλοντα μαζικής συνδεσιμότητας, καθώς και η σύγκριση του με τα παραδοσιακά συστήματα OMA.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- a) Ανάλυση της λειτουργίας ενός NOMA-assisted grant-free συστήματος.
- b) Μελέτη της επίδρασης βασικών παραμέτρων, όπως ο αριθμός χρηστών και τα επίπεδα SNR.
- c) Σύγκριση της απόδοσης μεταξύ NOMA και OMA.
- d) Αξιολόγηση της απόδοσης μέσω του δείκτη AoI

1.4 Μεθοδολογία και Εργαλεία Υλοποίησης

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, ακολουθείται μια συνδυαστική προσέγγιση θεωρητικής ανάλυσης αλλά και προσομοίωσης. Το εξεταζόμενο σύστημα μοντελοποιείται θεωρητικά και στη συνέχεια υλοποιείται σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για προσομοίωση συστημάτων επικοινωνίας.

Η προσομοίωση βασίζεται σε δομή frame-slot, όπου ο χρόνος διαχωρίζεται σε frames και το κάθε frame σε επιμέρους χρονικές θυρίδες. Μέσω της διαδικασίας αυτής αναπαρίσταται η συμπεριφορά των χρηστών, η διαδικασία μετάδοσης και η εξέλιξη του Age of Information.

1.5 Βασικά Αποτελέσματα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της παραμέτρου Age of Information στην αξιολόγηση σύγχρονων συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης, καθώς και τη δυνατότητα των τεχνικών μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης να βελτιώσουν την επικαιρότητα της πληροφορίας υπό κατάλληλες συνθήκες. Μέσα από την ανάλυση και προσομοιωτική αξιολόγηση του εξεταζόμενου συστήματος προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση βασικών παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση του συστήματος, τα οποία αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Με βάση αυτά διαπιστώθηκε ότι η τεχνική NOMA υπερέχει της OMA και ότι η απόδοση των μεθόδων καθορισμού των επιπέδων SNR εξαρτάται από την παραμετροποίηση και τον αριθμό χρηστών του συστήματος.

1.6 Δομή της Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε επιμέρους κεφάλαια ως εξής:

- e) Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των ασύρματων επικοινωνιών και των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης.
- f) Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνολογία μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) και οι βασικές λειτουργίες της.
- g) Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται το εξεταζόμενο σύστημα NOMA-assisted grant-free και η έννοια του Age of Information.
- h) Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η υλοποίηση του συστήματος σε περιβάλλον MATLAB και η ανάλυση του αλγορίθμου προσομοίωσης.

- i) Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και πραγματοποιείται ο σχολιασμός της απόδοσης του συστήματος, με έμφαση στη σύγκριση των τεχνικών NOMA και OMA.
- j) Στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και παρουσιάζονται πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2ο: Συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης

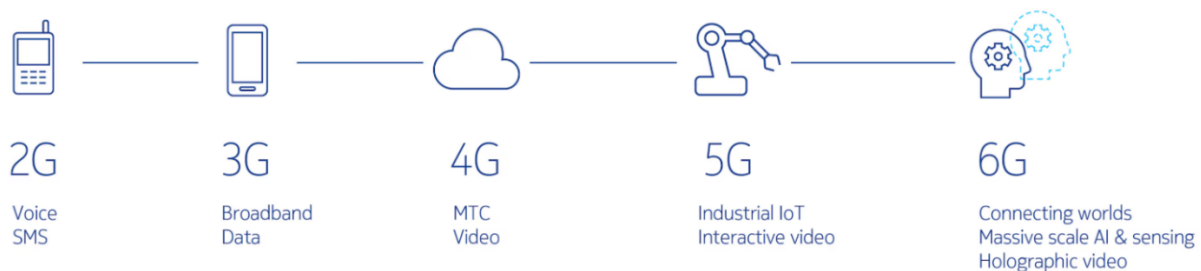
2.1 Εισαγωγή

Ήδη από την δεκαετία του 1970, παρουσιάστηκε η επιτακτική ανάγκη να καταφέρνουν να επικοινωνούν πολλοί χρήστες, οι οποίοι μοιράζονται κοινούς ασύρματους πόρους, μεταξύ τους. Τα μέσα που χρησιμοποιούνταν για να καλυφθεί αυτή η ανάγκη, όπως τα δορυφορικά συστήματα ή τα κινητά τηλέφωνα, έδιναν λύση μόνο στην περίπτωση που ένας χρήστης μετέδιδε κάθε χρονική στιγμή και όχι όλοι οι χρήστες ταυτόχρονα [4]. Η ανάγκη να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Techniques), οι οποίες έχουν σκοπό να επιτρέπουν τη σωστή διαίρεση του ίδιου φάσματος για να το μοιράζονται πολλοί χρήστες, με όσο το δυνατόν λιγότερες συγκρούσεις και παρεμβολές [4].

Η πρώτη γενιά (1G) αναπτύχθηκε περίπου στις αρχές της δεκαετίας του 1980 βασισμένη στην τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Η βασική αρχή της τεχνικής αυτής είναι ο κάθε χρήστης να καταλαμβάνει ένα συγκεκριμένο κανάλι καθ' όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας, κάτι που προκαλεί πολύ περιορισμένη φασματική αποδοτικότητα [1], [14].

Συνεχίζοντας με τη δεύτερη γενιά (2G) μεταφερόμαστε στο πρώτο ψηφιακό κυψελωτό δίκτυο. Παρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και βασίστηκε στο TDMA /FDMA (Time Division Multiple Access / Frequency Division Multiple Access). Αυτό που επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή είναι ο διαχωρισμός σε κανάλια συχνότητας και το κάθε κανάλι σε οκτώ χρονοθυρίδες [1]. Η τρίτη γενιά (3G) αποτέλεσε άλμα, σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, προσφέροντας υψηλό ρυθμό δεδομένων [4]. Βασίστηκε στο Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) και διέυρυνε το εύρος ζώνης στα 5 MHz συνεισφέροντας στην αύξηση της χωρητικότητας και του ρυθμού δεδομένων.

Με την ανάπτυξη της τέταρτης γενιάς (4G) παρατηρήθηκε μια σημαντική αλλαγή μιας και πλέον μιλάμε για δίκτυα IP με σκοπό την διάθεση υψηλού ρυθμού και μειωμένης καθυστέρησης [1], [15], [16]. Τη σημερινή εποχή (5G και υπό ανάπτυξη 6G) υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην όσο το δυνατόν καλύτερη μετάβαση σε πιο αποδοτικές μη-ορθογωνικές τεχνικές, αφήνοντας πίσω τα απλά ορθογωνικά συστήματα, που επικρατούσαν έως τώρα. Καθώς η αύξηση των απαιτήσεων είναι εμφανής, γίνεται κατανοητό ότι το OMA δεν μπορεί πλέον να καλύψει τις ανάγκες των σύγχρονων δικτύων [5], [8], [17].



Σχήμα 1: Εξέλιξη κινητών επικοινωνιών [17].

2.2 Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση (OMA)

Η Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση (Orthogonal Multiple Access – OMA) αποτελεί βασική κατηγορία των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στα πρώτα κυψελωτά ψηφιακά συστήματα μέχρι και στα πιο σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας. Η βασική αρχή της ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης είναι να μπορούν οι χρήστες να εξυπηρετηθούν χωρίς να παρεμβάλλονται μεταξύ τους με καλή απόδοση και πιο αξιόπιστη μετάδοση [4], [7].

Η λειτουργία του OMA είναι η εξής: χωρίζει τους πόρους (χρόνο, συχνότητα, χώρο) σε ορθογώνια τμήματα, μη επικαλυπτόμενα, με σκοπό να καταλογίζονται σε έναν χρήστη αποκλειστικά. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τεχνική αυτή είναι να εξαλειφθούν οι παρεμβολές από τα σήματα του κάθε χρήστη. Αυτό επίσης βοηθά τον δέκτη στην αποκωδικοποίηση του σήματος χωρίς να χρειάζεται κάποια περίπλοκη τεχνική ακύρωσης παρεμβολής (όπως η Διαδοχική Ακύρωση Παρεμβολής-Successive Interference Cancellation, SIC) [5], [6].

Παρόλο που η τεχνική αυτή, με τα πλεονεκτήματά της, έχει λύσει προβλήματα που υπήρχαν σε παλιότερες τεχνικές δεν παύει να έχει και κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι κάνουν την εμφάνισή τους όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία. Κάποιοι από αυτούς θα αναφερθούν παρακάτω:

- Δυσκολία υποστήριξης πολλών χρηστών. Όταν πρέπει να συνδεθούν ταυτόχρονα πάρα πολλές συσκευές, όπως σε εφαρμογές του Internet of Things (IoT), δεν είναι εφικτό να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες μαζί. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι απλός: ο αριθμός των χρηστών που θα καταφέρουν να μεταδώσουν ταυτόχρονα είναι εξαρτώμενος από τον αριθμό των πόρων [3], [6].
- Μειωμένη απόδοση σε πυκνά δίκτυα. Κάθε χρήστης δεσμεύει έναν πόρο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη συμφόρηση στο σύστημα και να μην μπορούν να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες [5], [8].
- Περιορισμένη φασματική απόδοση. Η συχνότητα και ο χρόνος στην ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση αντιστοιχούν σε έναν και μόνο χρήστη. Αυτό λειτουργεί ως περιορισμός, διότι δεν εκμεταλλεύεται όλη η χωρητικότητα του συστήματος ούτε όλες οι δυνατότητες του καναλιού [18].

2.3 Από το OMA στο NOMA

Για τα συστήματα 2G, 3G και 4G η Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση αποτέλεσε αφετηρία και προσέδωσε σταθερότητα και αποφυγή παρεμβολών ανάμεσα στους χρήστες αλλά αυτό δεν είναι πλέον αρκετό. Η ορθογωνικότητα, που ήταν ο βασικός λόγος που χρησιμοποιήθηκε στα αρχικά δίκτυα, είναι τώρα ο λόγος που αποτελεί πλέον περιορισμό [1], [5]. Τη μεγαλύτερη ανάγκη για εξέλιξη έφερε η έλευση του 5G [15], [16].

Το 5G καλείται να ανταποκριθεί σε τεράστιο αριθμό χρηστών με όσο μεγαλύτερο ρυθμό γίνεται, με λιγότερη καθυστέρηση και περισσότερη αξιοπιστία. Για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν στο OMA παρουσιάστηκε η Μη-Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access-NOMA). Η τεχνική αυτή είναι εξ ολοκλήρου διαφορετική από το OMA.

Η κύρια διαφορά τους είναι ότι το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους πόρους στον ίδιο χώρο και χρόνο και στην ίδια συχνότητα [5], [6]. Ο διαχωρισμός των χρηστών πραγματοποιείται μέσω διαφορετικών επιπέδων ισχύος, ενώ η αποκωδικοποίηση των ταυτόχρονων

μεταδόσεων επιτυγχάνεται με τη χρήση της διαδικασίας διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC) [18]. Η μετάβαση από τη μια τεχνική στην άλλη μας δίνει λύση σε πολλά προβλήματα.

2.4 Βασικές Αρχές και Πλεονεκτήματα NOMA

Οι σύγχρονες ανάγκες των δικτύων 5G και 6G προσπαθούν να καθιερώσουν τη Μη-Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση ως μια καθοριστική τεχνολογία στον τομέα αυτόν, ξεπερνώντας τους περιορισμούς του OMA το οποίο κυριαρχούσε έως τώρα [5], [8], [9]. Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν οι βασικές αρχές του NOMA σε power domain αλλά και σε code domain όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με τα ορθογωνικά συστήματα [7]. Οι δύο βασικές αυτές προσεγγίσεις θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.4.1 Power-Domain NOMA

Στην τεχνική αυτή πολλοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο Resource Block (RB) [6], [7]. Για να μπορεί ο σταθμός βάσης να τους ξεχωρίσει δίνει στον καθένα μια διαφορετική ισχύ μετάδοσης. Την υψηλότερη ισχύ τη λαμβάνει ο χρήστης με το πιο αδύναμο κανάλι. Ο χρήστης με το πιο δυνατό κανάλι λαμβάνει τη χαμηλότερη ισχύ [6] και για να ξεχωρίζει από το σήμα των άλλων χρησιμοποιεί Successive Interference Cancellation (SIC), δηλαδή μια τεχνική αποκωδικοποίησης ώστε να διαχωρίζεται το σήμα των χρηστών όταν εκπέμπουν ταυτόχρονα [5], [7].

Η βασική αρχή του SIC είναι να αποκωδικοποιείται από τον δέκτη πρώτα το σήμα με την μεγαλύτερη ισχύ και να το αφαιρεί από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα. Στην συνέχεια αποκωδικοποιεί το δικό του σήμα με λιγότερες παρεμβολές. Αυτή η τεχνική είναι η πιο διαδεδομένη στα 5G δίκτυα και η λογική της είναι απλή [7]. Στην ουσία όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα και η διαφορά τους είναι ότι χρησιμοποιούν διαφορετικά επίπεδα ισχύος [6], [7].

2.4.2 Code-Domain NOMA

Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Οι χρήστες για να ξεχωρίσουν δεν χρησιμοποιούν την ισχύ αλλά μοιράζονται το ίδιο χρονικό και συχνοτικό εύρος, χρησιμοποιώντας τον κώδικα με τον οποίο έχει διαμορφωθεί το σήμα τους. Παραδείγματα αυτής της τεχνικής είναι: SCMA (Sparse Code Multiple Access), PDMA (Pattern Division Multiple Access) και MUSA [8], [18]. Με τον τρόπο αυτό παρόλο που χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα ξεχωρίζουν [8].

Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε μη-ορθογωνική πρόσβαση, δηλαδή παρέχεται ταυτόχρονη σύνδεση σε πολλούς χρήστες [5], [8].

2.4.3 Πλεονεκτήματα NOMA

Το NOMA, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων του σε χωρητικότητα, φασματική αποδοτικότητα και λειτουργικότητα έχει καθιερωθεί στις σύγχρονες τεχνολογίες [5], [7], [8]. Παρακάτω θα αναλυθούν κάποια από τα πλεονεκτήματα του.

➤ Αύξηση Φασματικής Αποδοτικότητας.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι ότι μπορούν πολλοί χρήστες να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα τον ίδιο πόρο οδηγώντας έτσι στην αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας. Η μεγάλη σημασία του πλεονεκτήματος αυτού γίνεται αισθητή σε πυκνά δίκτυα [7], [8].

➤ Υποστήριξη Massive Connectivity (IoT και mMTC)

Το NOMA μπορεί να υποστηρίξει grant-free πρόσβαση, χαμηλό overhead και overloading, τα οποία το κάνουν απαραίτητη επιλογή για εφαρμογές όπως αισθητήρες, smart grids κ.λπ και επίσης στα σύγχρονα δίκτυα μπορεί να υποστηρίξει πλήθος IoT συσκευών [3], [6], [10]. Το OMA δεν μπορεί να είναι αποδοτικό σε ένα τέτοιο περιβάλλον και γι' αυτό απορρίπτεται [6].

➤ Βελτίωση Απόδοσης

Η διαφορά που βλέπουμε εδώ σε σχέση με άλλες τεχνολογίες είναι σημαντική. Πριν το NOMA στα περισσότερα δίκτυα όσο πιο μακριά από το σταθμό βάσης βρίσκονται (cell-edge) τόσο χαμηλότερο σήμα και απόδοση είχαμε ενώ τώρα οι χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά λαμβάνουν τη μεγαλύτερη ισχύ και οι ισχυρότεροι χρήστες μπορούν να αφαιρέσουν τις παρεμβολές μέσω SIC [6], [7].

➤ Μείωση καθυστέρησης

Δεν χρειάζεται κάθε χρήστης τον χρόνο του ώστε να εκπέμπει αποκλειστικά σε ένα slot αντιθέτως μπορούν περισσότεροι από ένας να εκπέμπουν μαζί. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η καθυστέρηση, επιτρέπεται η άμεση πρόσβαση και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο [7], [8], [10].

➤ Καλύτερη Εκμετάλλευση Καναλιού

Το NOMA αυξάνει τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου διότι χρησιμοποιεί ως πλεονέκτημα ότι κάθε χρήστης έχει διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Ο ισχυρός χρήστης λαμβάνει μικρή ισχύ ο αδύναμος χρήστης μεγάλη ισχύ και έτσι έχει κέρδος [7], [8].

➤ Βελτίωση Ενεργειακής απόδοσης

Όταν υπάρχει σωστή κατανομή της ισχύος υπάρχει και συνολική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, καθώς και αύξηση της διάρκειας ζωής των IoT συσκευών [3], [6].

2.5 NOMA σε Σύγχρονα Δίκτυα 5G

Η μετάβαση στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) και ο σχεδιασμός του μελλοντικού δικτύου 6G συνέπεσε χρονικά με την ανάπτυξη του NOMA. Τα δίκτυα αυτά απαιτούν πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών, μεγαλύτερη αξιοπιστία, εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλές ταχύτητες [1], [2]. Το NOMA έχει προταθεί ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, η οποία μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αυτές, αφού επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται τον ίδιο πόρο [5], [6].

2.5.1 UPLINK και DOWNLINK στα 5G Δίκτυα

Το Uplink (UL) και το Downlink (DL) είναι δύο βασικές κατευθύνσεις επικοινωνίας [8]. Το Uplink αναφέρεται στη μετάδοση των δεδομένων από τις κινητές συσκευές προς τον σταθμό βάσης. Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί την τεχνική SIC για να μπορεί να διαχωρίζει τα σήματα, αφού οι χρήστες μεταδίδουν ανεξάρτητα [6], [7].

Στην περίπτωση του Downlink συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή η μετάδοση γίνεται από τον σταθμό βάσης προς τις συνδεδεμένες συσκευές [7]. Αυτό αποτελεί τη συνήθη μορφή επικοινωνίας στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Οι απαιτήσεις των νέων δικτύων είναι τελείως διαφορετικές από αυτές που υπήρχαν στις έως τώρα τεχνολογίες. Το 5G πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει έναν πολύ μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών (mMTC), έναν υψηλό ρυθμό μετάδοσης (eMBB) και όσο μικρότερες καθυστερήσεις γίνονται παρέχοντας υψηλή αξιοπιστία (URLLC) [2], [3], [10]. Όπως έχει γίνει κατανοητό, το OMA είναι αδύνατον να ανταπεξέλθει σε κάτι τέτοιο, όμως η δυνατότητα του NOMA να χρησιμοποιούνται ξανά και ξανά από πολλούς χρήστες οι ίδιοι πόροι ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αυτές [8].

2.5.2 NOMA και mMTC και URLLC

Μια από τις πιο απαιτητικές κατηγορίες του 5G είναι το mMTC. Σε τεχνολογίες όπως έξυπνες πόλεις, βιομηχανίες, περιβαλλοντική παρακολούθηση κ.λπ., το NOMA μπορεί να παρέχει μαζική συνδεσιμότητα συσκευών, περιορισμό του πρόσθετου φόρτου λόγω σηματοδότησης (signaling overhead) και μεγάλο αριθμό χρηστών αναλογικά με τους διαθέσιμους πόρους [3], [6].

Το URLLC επιτάσσει χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλή αξιοπιστία για την όσο το δυνατόν καλύτερη κατανομή των πόρων γίνεται. Γι' αυτό και είναι βέλτιστη λύση για συστήματα ασφαλείας, αυτόνομα οχήματα ή ρομποτική. Το NOMA αυτό που προσφέρει στην προκειμένη περίπτωση είναι να επιτρέπει σχετικά μεγάλη ευελιξία στους χρήστες, μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης και υψηλή επιτυχία μετάδοσης [10].

2.5.3 NOMA σε mmWave και THz Δίκτυα

Οι συχνότητες mmWave και THz ενισχύουν κατά πολύ τις ταχύτητες που επιβάλλουν οι νέες τεχνολογίες διότι προσφέρουν πολύ μεγάλο εύρος. Η ανάγκη που έρχεται να καλύψει το NOMA αυξάνοντας τη φασματική αποδοτικότητα και την αξιοπιστία είναι η περιορισμένη εμβέλεια, η οποία παρατηρείται σε αστικά περιβάλλοντα [19].

Τα THz είναι οι συχνότητες που το εύρος τους κυμαίνεται στο 0.1-10 THz και είναι μια καλή επιλογή γιατί το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι κολλοσιαίο. Εντούτοις, υπάρχουν αξιόλογες προκλήσεις κάποιες από αυτές είναι οι εξής: μικρή εμβέλεια, ευαισθησία σε πιθανά εμπόδια και απώλειες στην προσπάθεια διάδοσης [3], [19].

Αυτό που θα προσπαθήσει να κάνει το NOMA για την επίλυση των ανωτέρω προκλήσεων είναι να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα πολλούς χρήστες, να διαφυλάσσει υψηλή φασματική απόδοση και να μειώσει τις παρεμβολές μέσω του SIC [7], [19].

2.6 NOMA στο 6G

Το NOMA, που θεωρήθηκε σημαντική τεχνική για την επιτυχημένη ανάπτυξη του 5G αλλά τελικά δεν επιλέχτηκε από τους κατασκευαστές, αναμένεται να έχει κομβική σημασία στην υπό ανάπτυξη έκτη γενιά των κινητών επικοινωνιών [3], [8]. Από εδώ και στο εξής μέσω του 6G θα έρθουν μεγάλες αλλαγές στον τρόπο που λειτουργούν έως τώρα τα ασύρματα δίκτυα [2], [3]. Οι απαιτήσεις του είναι πολλές και θα βασίζεται σε ένα ενοποιημένο σύστημα επικοινωνίας. Το 6G προβλέπεται ότι θα υποστηρίξει:

- a) Συνδέσεις εκατομμυρίων συσκευών
- b) AI τεχνολογίες
- c) Ρυθμούς που αγγίζουν Tbps
- d) Καθυστερήσεις <0.1 ms [2], [3]

Στο περιβάλλον αυτό θα υπάρχει τεράστια κίνηση δεδομένων και μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας. Το NOMA για να μπορέσει να γίνει όσο πιο αποδοτικό γίνεται δεν θα λειτουργεί μόνο ως code-domain ή power-domain τεχνική αλλά σκοπός είναι να ενταχθεί ως μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης ελεγχόμενος απολύτως απο τεχνητή νοημοσύνη. Αύτη θα είναι η κύρια διαφορά του με το 5G και θα του προσφέρει ευελιξία [3], [8].

2.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε συνοπτικά η εξέλιξη των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης ξεκινώντας από τις γενιές 1G, 2G, 3G και 4G. Επίσης, αναλύθηκαν τα ορθογωνικά συστήματα και η Μη Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση (NOMA), μια τεχνική η οποία αποτελεί το βασικό στοιχείο των σύγχρονων δικτύων 5G και 6G. Παρουσιάστηκε το μοντέλο Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (OMA), στο οποίο κάθε χρήστης καταλαμβάνει αποκλειστικά έναν πόρο περιορίζοντας την ταυτόχρονη σύνδεση πολλών συσκευών.

Στη συνέχεια έγινε αναφορά στις βασικές αρχές του NOMA και πως με την τεχνική αυτή καταφέρνουν πολλοί χρήστες να μοιράζονται κοινούς πόρους σε επίπεδο συχνότητας, χώρου και χρόνου και η διαφορά στην αξιοποίηση σε επίπεδο κώδικα (Code-Domain NOMA) ή σε επίπεδο ισχύος (Power-Domain NOMA). Αναφορά επίσης έγινε στη βασική λειτουργία του Successive Interference Cancellation (SIC) και πως αυτό επιτυγχάνει τον διαχωρισμό των σημάτων, αποτελώντας βασικό πυρήνα στην επιτυχημένη λειτουργία του συστήματος NOMA.

Εν συνεχεία έγινε μια πιο εκτενής ανάλυση πάνω στα πλεονεκτήματα του συστήματος NOMA και πως αυτά συντελούν στο να αυξηθεί η φασματική απόδοση, στη μείωση καθυστέρησης, στην καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων του καναλιού, στη δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης πλήθους συσκευών (massive connectivity) και την βελτίωση της απόδοσης. Παράλληλα συζητήθηκε ο ρόλος του NOMA στην πέμπτη γενιά δικτύων και σε σημαντικές υπηρεσίες όπως mMTC, URLLC και σε συχνότητες mmWave και THz με σκοπό την καλύτερη λειτουργία αυτών συνδυαστικά με την τεχνική NOMA.

Τελικώς, παρουσιάστηκε ο ρόλος του NOMA στο ανερχόμενο δίκτυο 6G. Μια μελέτη που σκοπό έχει να το εντάξει ως βασικό του μηχανισμό για να μπορέσει να επιλύσει θέματα όπως αυξημένες ταχύτητες, μεγάλο όγκο συσκευών, τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και αύξηση χωρητικότητας. Η λειτουργία του NOMA θα είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη των νέων ασύρματων δικτύων και θα παίζει καθοριστικό ρόλο στην επίλυση προηγούμενων προβλημάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Πρόσβαση Χωρίς Εκχώρηση Πόρων

3.1 Εισαγωγή στο Grant Free Transmission

Λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ασύρματων επικοινωνιών καθίσταται αναγκαίο να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι πρόσβασης στο δίκτυο, οι οποίες να μπορούν να υποστηρίξουν τις συνεχώς αναπτυσσόμενες ανάγκες που προκύπτουν στα σύγχρονα δίκτυα [1], [8]. Μέχρι τώρα η επικοινωνία επιτυγχανόταν κατ' αποκλειστικότητα με grant-based Transmission (GB Transmission) πρόσβαση, έχοντας δηλαδή ο σταθμός βάσης τον πλήρη έλεγχο στην διαχείριση των πόρων [7], [10]. Πλέον, έχουμε οδηγηθεί στην μετάδοση grant-free (Grant-Free Transmission) για να αντιμετωπιστούν ανάγκες όπως η μειωμένη καθυστέρηση, το τεράστιο πλήθος των χρηστών και η αξιοπιστία ιδίως σε υπηρεσίες όπως mMTC ή URLLC [3], [10].

Η αρχή της μετάδοσης grant-free είναι απλή. Κάθε χρήστης ή συσκευή μπορεί να χρησιμοποιεί τους πόρους χωρίς να περιμένει την έγκριση του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται δραστικά η καθυστέρηση και το signaling overhead, διότι δεν χρειάζεται ο κάθε χρήστης να περιμένει για επικοινωνία με το δίκτυο [3], [10].

Γενικά, η μετάδοση grant-free είναι ένας σημαντικός μηχανισμός στα 5G και 6G δίκτυα, αφού παρέχει χαμηλή καθυστέρηση, δυνατότητα σύνδεσης πολλών συσκευών και υψηλή ευελιξία [2], [3].

3.2 Grant-Free vs Grant-Based Transmission

Από τα παλαιότερα δίκτυα μέχρι το σήμερα και τα αρχικά στάδια του 5G η μέθοδος πρόσβασης, η οποία ήταν διαδεδομένη, ήταν η grant-based μετάδοση. Στη διαδικασία αυτή για την κατανομή των πόρων αποκλειστικά υπεύθυνος είναι ο σταθμός βάσης (gNB) και παρέχει πλεονεκτήματα όπως ικανοποιητική αξιοπιστία και οργάνωση [7]. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί όπως αδυναμία σε περιβάλλοντα με μεγάλη κινητικότητα ή δυσκολία ανταπόκρισης σε πολύ χαμηλές καθυστερήσεις [3], [10]. Αυτά συντέλεσαν στην ανάπτυξη του grant-free transmission, μιας τεχνολογίας, η οποία επιτρέπει σε κάθε συσκευή να μεταδίδει χωρίς άδεια [7], [8], [10].

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών τεχνικών, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και θα ερευνηθούν συνθήκες για τις οποίες είναι πιο αποδοτικές.

3.2.1 Λειτουργία του Grant-Based Transmission

Στο grant-based μοντέλο, για να έχουμε μετάδοση δεδομένων από μια συσκευή πρέπει να ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία [7], [8]. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- i. Αποστολή αιτήματος προγραμματισμού Scheduling Request (SR). Ο σταθμός βάσης ενημερώνεται από τον κάθε χρήστη ότι έχει δεδομένα να μεταδώσει [11].
- ii. Αναμονή για άδεια που δίνει ο σταθμός βάσης (UL Grant). Ανάλογα με την διαθεσιμότητα των πόρων ο σταθμός αποστέλλει μια άδεια. Η άδεια αυτή ορίζει το πότε θα γίνει η μετάδοση [7], [8], [10].
- iii. Μετάδοση δεδομένων. Μετά την παραλαβή της άδειας ο χρήστης μπορεί να αποστείλει δεδομένα [8].

Με τη διαδικασία αυτή προκαλείται σημαντική υπερφόρτωση (signaling overhead) με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η κινητικότητα του καναλιού. Όσο περισσότερους χρήστες έχουμε τόσο ενισχύεται η καθυστέρηση. Εκτός αυτού, η τόσο μεγάλη υπερφόρτωση αυξάνει κατά πολύ και την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας των συσκευών [11].

Ωστόσο, σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερό έλεγχο καναλιού ή μεγάλη αξιοπιστία, το grant-based παραμένει κατάλληλο, διότι τα συστήματα αυτά απαιτούν συνεχή μετάδοση δεδομένων [7], [10].

3.2.2 Λειτουργία του Grant-Free Transmission

Η βασική διαφορά στο grant-free μοντέλο είναι η εξής: κάθε συσκευή μεταδίδει απευθείας χωρίς να ενημερώνει ότι έχει πακέτο να μεταδώσει και χωρίς να περιμένει κάποια άδεια από το σταθμό βάσης [10], [11]. Μέσω του grant-free επιτυγχάνεται:

- Μείωση καθυστέρησης, επειδή παρακάμπτονται τα στάδια αναμονής για άδεια [10].
- Εξοικονόμηση ενέργειας, αφού ο χρήστης δεν έχει την ανάγκη να παραμένει ενεργός για να περιμένει άδεια από τον σταθμό βάσης [11].
- Αύξηση χωρητικότητας, γιατί συνδέονται χιλιάδες συσκευές και στέλνουν πακέτα [3], [10].

Το grant-free αποτελεί βασικό εργαλείο για εφαρμογές URLLC, οι οποίες απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία [10], [11]. Δεν έρχεται να αντικαταστήσει πλήρως το grant-based, αλλά να λειτουργήσει συμπληρωματικά. Αναλόγως με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής θα γίνεται και η κατάλληλη επιλογή [8].

3.2.3 Πότε Προτιμάται η Κάθε Μέθοδος

Το Grant-Based προτιμάται για καταστάσεις όπου έχουμε:

- Σταθερή δραστηριότητα χρηστών
- Προβλέψιμη δραστηριότητα χρηστών
- Υψηλού εύρους ζώνης υπηρεσίες
- Μεγάλες ροές δεδομένων [7], [8]

Το Grant-Free ενδείκνυται για:

- Μικρά πακέτα δεδομένων
- Ακανόνιστη δραστηριότητα
- Πάρα πολλούς χρήστες (mMTC)
- Εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης [3], [10], [11]

Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες, το grant-free επιτυγχάνει περίπου 20 φορές μικρότερη καθυστέρηση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου σε σχέση με το grant-based [10], [11].

3.3 Πλεονεκτήματα και Εφαρμογές της Μετάδοσης Grant-Free

Η μετάδοση αυτή αποτελεί πλέον έναν βασικό πυλώνα για τη λειτουργία των νέων ασύρματων δικτύων. Τόσο στα δίκτυα 5G όσο και στα 6G επίκειται να έχει μεγάλο ρόλο [2], [3]. Εν αντιθέσει, με το συμβατικό μοντέλο grant-based και την βασική αρχή λειτουργίας του, ότι δηλαδή χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη διαδικασία αδειοδότησης, το grant-free μοντέλο παρέχει την δυνατότητα πιο άμεσης πρόσβασης συντελώντας στην ελάττωση της κατανάλωσης ενέργειας και των καθυστερήσεων [10],

[11]. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν καθιερώσει την τεχνική αυτή σε εφαρμογές που χρειαζόμαστε μεγάλη αξιοπιστία, ευελιξία και ταυτόχρονη συνδεσιμότητα [3], [10].

Ακολούθως, θα αναφερθούν τα πλεονεκτήματα της τεχνικής grant-free αλλά και κάποιες βασικές κατηγορίες όπου η χρήση του καθίσταται απαραίτητη [8], [11].

3.3.1 Μείωση Ενεργειακής Κατανάλωσης

Η μετάδοση grant-free μειώνει την ποσότητα ενέργειας που απαιτεί μια συσκευή για να παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο [3], [11]. Σε αντίθεση με το grant-based, το οποίο απαιτεί συνεχώς άδεια και απαντήσεις για να γίνεται η μετάδοση, το grant-free δίνει στις συσκευές τη δυνατότητα να ενεργοποιούνται μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα και στη συνέχεια μένει σε αδράνεια. Αυτό ελαχιστοποιεί τον χρόνο και συνεπώς την κατανάλωση ενέργειας [3], [11]. Τα χαρακτηριστικό αυτό είναι σημαντικό για εφαρμογές που τοποθετούνται σε δύσβατα σημεία ή απαιτούν μακροχρόνια χρήση χωρίς συντήρηση [3].

3.3.2 Μείωση Καθυστερήσης (Low Latency)

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της πρόσβασης χωρίς εκχώρηση πόρων είναι η μείωση της καθυστέρησης [10], [11]. Στη μετάδοση grant-based οι χρήστες έχουν μια σειρά βημάτων που πρέπει να ακολουθούν για να μεταδώσουν με αποτέλεσμα αυτό να επιφέρει καθυστερήσεις, που αγγίζουν μερικά ms, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει υπερφόρτωση δικτύου [11]. Για να ξεπεραστεί αυτό, κυρίως σε υπηρεσίες URLLC, καταλυτική είναι η ιδιότητα του grant-free να μεταδίδει άμεσα χωρίς αναμονές. Στις υπηρεσίες URLLC η καθυστέρηση πρέπει να μην ξεπερνά το φράγμα του 1ms [10]. Στην προκειμένη περίπτωση, ο συνδυασμός του grant-free με το NOMA μπορεί να επιφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αλλά αυτό είναι κάτι που θα αναλυθεί στην συνέχεια [6], [10].

3.3.3 Εξάλειψη Επίφορτου Σηματοδοσίας (Signaling Overhead)

Με το signaling overhead, δηλαδή την επιπλέον πληροφορία ελέγχου που απαιτείται για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών, σε δίκτυα με πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών έχουμε μεγάλη κατανάλωση πόρων [10], [11]. Για τον λόγο αυτό σε τέτοια περιβάλλοντα εισάγεται η grant-free μετάδοση, με σκοπό να επιτευχθεί βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων, λιγότερες συγκρούσεις και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας [3], [11]. Η ελάττωση του signaling overhead ορίζει το grant-free ως μια τεχνική ιδανική για mMTC, στα οποία πρέπει να αποστέλλονται γρήγορα πολλά μικρά πακέτα [3], [10].

3.3.4 Πρόσβαση Μεγάλου Όγκου Χρηστών

Η συνεχής ανάπτυξη του IoT, κάνει απολύτως αναγκαία την χρήση τεχνολογιών, που να μπορούν να στηρίξουν μαζική πρόσβαση [2], [3], [6]. Το grant-based δεν μπορεί να διαχειριστεί κάτι τέτοιο διότι είναι περιορισμένος ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να λάβουν άδεια σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή [7], [11]. Αντιθέτως, το grant-free παρέχει τη δυνατότητα σε πολλούς χρήστες να κάνουν ταυτόχρονα προσπάθεια μετάδοσης και έχει καλή λειτουργία σε ό,τι αφορά μικρά πακέτα [6], [10].

3.3.5 Παραδείγματα σε Πραγματικές Εφαρμογές

Μερικοί τύποι εφαρμογών, τους οποίους το grant-free transmission υποστηρίζει ιδανικά, είναι οι εξής: αισθητήρες φυσικών φαινομένων, συστήματα ενέργειας, αισθητήρες ασφαλείας ακόμα και βιομηχανικοί αισθητήρες [3], [10], [11]. Περιβάλλοντα δηλαδή, που απαιτούν ταχύτητα αντίδρασης και μηδενικές καθυστερήσεις [10].

Πολύ σημαντικές, κυρίως για το 6G, είναι οι συχνότητες mmWave και THz [3], [19]. Οι συχνότητες αυτές έχουν ευαισθησία σε εμπόδια, περιορισμένη εμβέλεια και σχετικά μεγάλες απώλειες διάδοσης [19]. Η τεχνική grant-free, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το NOMA, μπορεί να γίνει πολύ βοηθητική στη μείωση καθυστερήσεων, στην αύξηση χωρητικότητας και στη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος [6], [7], [19].

3.4 Συνδυασμός Grant-Free και NOMA

Ο συνδυασμός της τεχνικής Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) με τη μετάδοση grant-free απαρτίζει έναν από τους σημαντικότερους άξονες στην εξέλιξη των σύγχρονων ασύρματων δικτύων [3], [5], [10]. Η ταυτόχρονη αξιοποίηση των δύο τεχνολογιών και ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων του καθενός έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός νέου συστήματος, το οποίο θα οδηγήσει στην επίλυση υφισταμένων προβλημάτων, όπως είναι η μείωση καθυστέρησης, η αύξηση αποδοτικότητας, η διαχείριση πολλών συσκευών, όσα δηλαδή προαναφέραμε ως προβλήματα στις προηγούμενες ενότητες [10].

Η ενότητα αυτή έχει ως στόχο να αναλύσει γιατί ο συνδυασμός NOMA και grant-free είναι αποτελεσματικός αλλά και πως λειτουργεί στην πράξη [7], [10].

3.4.1 Συνδυασμός NOMA και Grant-Free στην Πράξη

Η grant-free μετάδοση παρέχει τη δυνατότητα να μεταφέρονται τα δεδομένα άμεσα χωρίς προγραμματισμό αλλά αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις [10]. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητη η εισαγωγή του NOMA, το οποίο επιτρέπει στον κάθε χρήστη να μοιράζεται τους πόρους χωρίς ορθογωνικό διαχωρισμό [5], [8].

Η λογική που ακολουθείται είναι απλή. Οι χρήστες μεταδίδουν χωρίς να χρειάζονται άδεια από τον σταθμό βάσης προς αυτούς (grant-free) [10]. Οι συσκευές στέλνουν δεδομένα μόνο την στιγμή που αυτά χρειάζονται. Πολλοί χρήστες μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα στον ίδιο πόρο (resource block) χωρίς να οδηγούμαστε σε πολλές συγκρούσεις [3], [7].

Ανάλογα με το είδος της τεχνικής NOMA που έχουμε, μπορούν να γίνουν με επιτυχία ταυτόχρονες μεταδόσεις με λιγότερες παρεμβολές και συγκρούσεις. Έχει μελετηθεί πώς ο συνδυασμός τους μπορεί να αυξήσει τις επιτυχημένες μεταδόσεις ακόμα και σε συνθήκες overloading [8], [12]. Ο διαχωρισμός ανάλογα με το είδος του NOMA γίνεται είτε σε επίπεδο ισχύος (Power-Domain NOMA) είτε σε επίπεδο κώδικα (Code-Domain NOMA) [7], [8].

3.4.2 Πλεονεκτήματα του Συνδυασμού

Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού των δύο αυτών τεχνικών είναι κομβικά και κάποια από αυτά θα αναφερθούν στη συνέχεια.

- Μείωση συγκρούσεων σε mMTC περιβάλλοντα. Η ταυτόχρονη μετάδοση από αρκετούς χρήστες, σε περιβάλλον grant-free, μπορεί να δημιουργήσει συγκρούσεις. Με τον συνδυασμό με την τεχνική NOMA αυξάνεται η πιθανότητα ανάκτησης χαμένων πακέτων ή δεν οδηγούμαστε απαραίτητα σε απώλεια δεδομένων όταν υπάρχουν συγκρούσεις. Αυτό αποτελεί κομβικό πλεονέκτημα για εφαρμογές IoT [3], [6].
- Υψηλή φασματική αποδοτικότητα. Στην τεχνική NOMA, γίνεται επιτρεπτό να μοιράζονται τους διαθέσιμους πόρους πολλοί χρήστες και συχνά περισσότεροι από τους διαθέσιμους πόρους. Σε συνδυασμό με το grant-free, οδηγούμαστε στον πολλαπλασιασμό της φασματικής αποδοτικότητας, δηλαδή στην αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου [7], [8].
- Βελτίωση Αξιοπιστίας. Κυρίως σε υπηρεσίες URLLC, όπου χρειαζόμαστε άμεση μετάδοση και δυνατότητα ανάκτησης του σήματος, οι δύο τεχνικές αυτές που μελετάμε έρχονται να δώσουν λύση ακριβώς σε αυτό το πρόβλημα. Η αφομοίωση των τεχνικών αυτών μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του καναλιού και να μειώσει τις καθυστερήσεις [10], [11].
- Σταθερή λειτουργία του δικτύου σε περιβάλλοντα μη προβλέψιμης κίνησης. Σε καταστάσεις μαζικής επικοινωνίας, τύπου mMTC, οι συνδεδεμένες συσκευές παρουσιάζουν απρόβλεπτη κίνηση πακέτων, διότι δεν μεταδίδουν με βάση κάποιο προκαθορισμένο μοτίβο. Γι' αυτές τις συνθήκες πολύ βοηθητικό είναι το μοντέλο grant-free, καθώς επιτρέπει στους χρήστες να μεταδίδουν χωρίς άδεια συντελώντας στην μείωση καθυστερήσεων [10]. Παράλληλα, το NOMA έχει σχεδιαστεί να εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό συσκευών ακόμα και αν εκπέμπουν ταυτόχρονα. Αυτό εξασφαλίζει: σταθερή λειτουργία δικτύων ανεξαρτήτως φόρτου και υψηλά ποσοστά επιτυχούς μετάδοσης [6], [8].

3.4.3 Εφαρμογές Grant-Free και NOMA

Ο συνδυασμός των δύο εφαρμόζεται σε πραγματικές εφαρμογές και σε διάφορους τομείς, κάποιοι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Βιομηχανία 4.0 (Industrial IoT).* Για να εξυπηρετηθεί πληθώρα συσκευών ταυτοχρόνως και με αξιοπιστία ένας σημαντικός τρόπος είναι ο συνδυασμός του NOMA με το grant-free. Πρέπει να επιτευχθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερη καθυστέρηση γίνεται, να παρέχεται άμεση πρόσβαση αλλά και να υποστηρίζεται πλήθος συσκευών, διότι πραγματικές εφαρμογές όπως αισθητήρες ασφαλείας και γραμμές παραγωγής το απαιτούν [3], [10].
- Έξυπνες πόλεις.* Επιβάλλεται μαζική συνδεσιμότητα αλλά και μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας, διότι γίνεται συνεχής συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, συστήματα παρακολούθησης και έξυπνους μετρητές, αποτελώντας ιδανική περίπτωση για τις τεχνικές που μελετάμε [3], [10].
- Αισθητήρες.* Η αμεσότητα του grant-free αλλά και η δυνατότητα του NOMA να διαχωρίζει πολλά σήματα αποτελεί μεγάλη λύση σε αισθητήρες, όπως για παράδειγμα αισθητήρες φωτιάς ή σεισμών, περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται άμεση μετάδοση [3], [6].
- Αυτόνομα οχήματα.* Το URLLC, το οποίο απαιτεί υψηλή αξιοπιστία και ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, ενισχύεται μέσω του συνδυασμού NOMA και grant-free [10], [11].

3.5 Προκλήσεις και Μελλοντική Χρήση του Grant-Free σε Σύγχρονα Δίκτυα

Παρά τα πλεονεκτήματα που υπάρχουν, ο συνδυασμός των δύο έχει και κάποιες προκλήσεις [10], [11]. Παρόλο που το 6G βρίσκεται σε θεωρητικό επίπεδο, η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων θέτει στο επίκεντρο του την grant-free μετάδοση αλλά και το NOMA.

Σχετικά με το 6G, είναι βασικό να αναφερθεί ότι τα νέα δίκτυα στοχεύουν σε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες, σχεδόν μηδενικές καθυστερήσεις αλλά και ενοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης σε κάθε επίπεδο του δικτύου [2], [3]. Παρακάτω, αναλύονται οι δυσκολίες, που πρέπει να ξεπεραστούν για την εξέλιξη αλλά και την πλήρη αξιοποίηση της πρόσβασης grant-free.

3.5.1 Προκλήσεις στο MAC Επίπεδο

Το επίπεδο MAC (Medium Access Control) αποφασίζει από ποιον κόμβο του δικτύου θα στέλνονται δεδομένα και πότε. Στα δίκτυα 6G, πρέπει να υποστηρίζεται ένας πολύ υψηλός αριθμός χρηστών [2], [3]. Ο περιορισμός που παρατηρείται εδώ είναι ότι ο σταθμός βάσης δεν μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων πόσοι χρήστες θα επιχειρήσουν μετάδοση.

Η συνθήκη αυτή μπορεί να προκαλέσει σφάλματα αλλά και αυξημένη πολυπλοκότητα [3], [10]. Είναι απαραίτητο η μετάδοση grant-free να μπορέσει να διασφαλίσει ότι οι παρεμβολές θα αντιμετωπίζονται, η απόδοση του δικτύου δεν θα πέσει και οι συγκρούσεις δεν θα είναι πολλές [10], [11].

3.5.2 Προκλήσεις στο Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό (Physical) επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των δεδομένων ανάμεσα σε δύο συσκευές. Η μετάβαση σε συχνότητες THz και mmWave φέρνει νέες απαιτήσεις στο φυσικό επίπεδο [3], [19]. Οι συχνότητες αυτές είναι ευαίσθητες σε εμπόδια και απώλειες κατά τη διάδοση. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον ο συνδυασμός αυτών των συχνοτήτων με την μετάδοση grant-free ενδεχομένως να επιφέρει παρεμβολές και δυσκολία στην ανίχνευση του σήματος. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζεται και στο NOMA [7], [19].

Επίσης, ένα ακόμη πρόβλημα είναι ότι οι χρήστες δεν εκπέμπουν συγχρονισμένα αλλά η εκπομπή γίνεται τυχαία και ακανόνιστα. Όταν πρέπει να έχουμε ακρίβεια, όπως στα δίκτυα 6G, αυτή η απουσία συγχρονισμού μπορεί να προκαλέσει αποτυχίες αποκωδικοποίησης και λάθη στην εκτίμηση του καναλιού [10], [11]. Στο grant-free δεν υπάρχει προγραμματισμός και αυτό δυσκολεύει την ανίχνευση των σημάτων [11].

3.5.3 Ζητήματα Ασφαλείας

Η μετάδοση grant-free δεν απαιτεί διαδικασίες ταυτοποίησης κατά την εκπομπή χρηστών και αυτό μπορεί να επιτρέψει σε άλλες συσκευές να προκαλέσουν παρεμβολές ή να διακόψουν υπηρεσίες URLLC [10]. Το γεγονός ότι οι χρήστες μεταδίδουν χωρίς συγχρονισμό τους κάνει ευάλωτους σε επιθέσεις. Το 6G θα πρέπει να εισάγει νέα μοντέλα ασφαλείας [2], [3].

3.5.4 Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης

Η τεχνητή νοημοσύνη θα αποτελεί ένα νέο κομμάτι του δικτύου 6G [2], [3]. Η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να προβλέπει πότε οι συσκευές θα μεταδώσουν με σκοπό τη μείωση συγκρούσεων. Επίσης, μέσω του AI θα μπορεί να γίνεται καλύτερη κατανομή της ισχύος αλλά και να

ρυθμίζονται καλύτερα παράμετροι όπως το SIC [3], [10]. Το 6G, θα εισάγει μηχανισμούς ώστε να ανιχνεύονται λάθη και να διορθώνονται χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση [3], [10].

3.6 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αρχικά το μοντέλο μετάδοσης με εκχώρηση πόρων (Grant-Based Transmission) και η λειτουργία του. Αναλύθηκε το πως ο σταθμός βάσης διατηρεί τον πλήρη έλεγχο σχετικά με την κατανομή των πόρων μέσω μιας διαδικασίας αιτημάτων για την μετάδοση των δεδομένων. Αναφέρθηκε η αξιοπιστία που παρέχει η τεχνική αυτή και η οργάνωση σχετικά με το πως μεταδίδει ο κάθε χρήστης, χαρακτηριστικά που την καθιστούν κατάλληλη για υπηρεσίες σε περιβάλλοντα αυξημένου ρυθμού κίνησης δεδομένων. Συνδυαστικά, τονίστηκαν οι βασικοί περιορισμοί σχετικά με την υψηλή καθυστέρηση, το signaling overhead και τον περιορισμό εξυπηρέτησης μεγάλου όγκου χρηστών και συσκευών, κυρίως σε περιβάλλοντα με μεγάλη κινητικότητα.

Εν συνεχεία, έγινε εστίαση στη μετάδοση χωρίς εκχώρηση πόρων (Grant-Free Transmission) και στο κατά πόσο αυτή κρίνεται αναγκαία στα σύγχρονα δίκτυα. Η μετάδοση αυτή ως στόχο έχει την αντιμετώπιση των περιορισμών που υπήρχαν στο προηγούμενο μοντέλο.

Το πλεονέκτημα του grant-free να μην χρειάζεται άδεια για να μεταδώσει μείωσε δραματικά την καθυστέρηση. Έγινε σύγκριση στα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε μεθόδου και στις συνθήκες για τις οποίες είναι κατάλληλη η καθεμία, με περισσότερη έμφαση στα πλεονεκτήματα της grant-free μετάδοσης, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι σκοπός δεν είναι η μια τεχνολογία να αναρρέσει την άλλη αλλά να λειτουργήσουν συμπληρωματικά για να καλύψει η μια τις αδυναμίες της άλλης.

Μετά την αναφορά κάποιων βασικών πλεονεκτημάτων της μετάδοσης χωρίς εκχώρηση πόρων, έγινε αναφορά στις υπηρεσίες URLLC, mMTC, IoT, οι οποίες χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή για να αυξήσουν την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία τους.

Παράλληλα, εξετάστηκε ο συνδυασμός της grant-free μετάδοσης με την τεχνική Non Orthogonal Multiple Access (NOMA), ένας συνδυασμός που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά δίκτυα με σκοπό την σύνδεση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, στην μείωση συγκρούσεων, και στην αυξημένη αποδοτικότητα. Στο NOMA έγινε αναφορά στον διαχωρισμό στο πεδίο της ισχύος αλλά και στο πεδίο του κώδικα.

Επίσης, παρουσιάστηκαν κάποιες εφαρμογές ενδεικτικές των δύο τεχνικών όπως οι έξυπνες πόλεις, η Βιομηχανία 4.0 και τα συστήματα αισθητήρων. Αναλύθηκαν ορισμένες προκλήσεις που προκύπτουν από την χρήση του grant-free στο 6G στο επίπεδο MAC, στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer) αλλά και σε ζητήματα ασφάλειας. Τέλος, έγινε αναφορά στην ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης, με σκοπό να καλύψει τα κενά που αφήνουν οι προηγούμενες γενιές δικτύων.

Συνοπτικά, το κεφάλαιο αυτό πρόβαλε τον συνδυασμό των τεχνικών grant-free και grant-based, με περισσότερο βάρος στην πρώτη τεχνική και στον συνδυασμό της με το NOMA.

Κεφάλαιο 4ο: Περιγραφή του Συστήματος και Ανάλυση του Age of Information

4.1 Εισαγωγή και Στόχος Κεφαλαίου

Σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό χρηστών και μαζική συνδεσιμότητα η μετάδοση grant-free συνιστά κύριο μηχανισμό. Η grant-based μετάδοση, που έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά δεν μπορεί να αποτελέσει βασικό θεμέλιο των νέων τεχνολογιών, διότι λόγω της διαδικασίας αδειοδότησης που πρέπει να ακολουθηθεί, οδηγεί σε μεγάλες καθυστερήσεις, πόσο μάλλον όταν έχουμε μεγάλο αριθμό χρηστών [10], [11]. Ο κύριος λόγος που έχει στραφεί η βιβλιογραφία στην πρόσβαση grant-free είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, μιας και οι χρήστες μπορούν να μεταδώσουν χωρίς να απαιτείται προηγούμενη επικοινωνία με τον σταθμό βάσης [12].

Ιδιαίτερα αποτελεσματική έχει αναδειχθεί η θεωρητική προσέγγιση του συνδυασμού των τεχνικών grant-free και NOMA [6], [12]. Σε ένα σύστημα NOMA-Assisted grant-free επιτρέπεται η εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για να γίνει η διάκριση των χρηστών γίνεται εκμετάλλευση των διαφορετικών επιπέδων ισχύος, που λαμβάνει ο καθένας, ή του λαμβανόμενου σήματος ως προς το θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR) [7], [12]. Ο σταθμός βάσης για την επίτευξη της αποκωδικοποίησης των σημάτων, τα οποία λαμβάνονται ταυτόχρονα, εφαρμόζει διαδοχική ακύρωση παρεμβολών [7], [12].

Για την αξιολόγηση της επικαιρότητας των ενημερώσεων που λαμβάνει ο κάθε σταθμός βάσης υιοθετείται το Age of Information (AoI) [13]. Σκοπός είναι να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ των χρηστών αλλά και να μην επηρεαστούν οι ενημερώσεις που λαμβάνει ο σταθμός βάσης [12], [13].

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να αναλυθεί πλήρως το σύστημα NOMA-Assisted grant-free δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην περιγραφή του συστήματος, στην σύγκριση του OMA και του NOMA στον μηχανισμό grant-free, στην διαδικασία SIC αλλά και τα προκαθορισμένα επίπεδα SNR και τέλος στην σύνδεση όλων αυτών με το Age of Information.

4.2 Age of Information (AoI)

Το Age Of Information (AoI), ορίζεται ως ο δείκτης απόδοσης που μετράει τον χρόνο που πέρασε από τότε που δημιουργήθηκε η τελευταία ενημέρωση που γνωρίζει ο δέκτης, όχι απλώς τον χρόνο καθυστέρησης (latency) [12], [13]. Το AoI δεν ενδιαφέρεται για το πότε γίνεται παράδοση ενός συγκεκριμένου πακέτου, αλλά για το πότε υπάρχει η τελευταία επιτυχής ενημέρωση που λήφθηκε. Η λογική αυτή που ακολουθεί το καθιστά κατάλληλο για συστήματα με συχνές και μικρές ενημερώσεις όπως το grant-free [13].

4.2.1 Στιγμιαίο και Μέσο AoI

Για το στιγμιαίο Age of Information, έστω $\Delta(t)$ η τιμή του AoI ενός χρήστη τη χρονική στιγμή t . Το μέγεθος αυτό εκφράζει τον χρόνο που έχει περάσει από τη δημιουργία της τελευταίας πληροφορίας που έχει παραληφθεί επιτυχώς από τον σταθμό βάσης και ορίζεται ως [12], [13]:

$$\Delta(t) = t - u(t) \quad (4.1)$$

όπου $u(t)$, είναι η χρονική στιγμή δημιουργίας της πιο πρόσφατης ενημέρωσης που έχει ληφθεί επιτυχώς από τον σταθμό βάσης έως τη χρονική στιγμή t .

Στο παρόν κεφάλαιο, όπου μελετάμε το χρονικό μοντέλο frame-slot, το AoI αυξάνεται ανά μια μονάδα χρόνου σε κάθε χρονική θυρίδα που δεν πραγματοποιείται επιτυχής ενημέρωση. Όταν ολοκληρωθεί πλήρως μια μετάδοση, το AoI επανέρχεται σε χαμηλή τιμή (όχι απαραίτητα μηδενική σε όλα τα μοντέλα). [12].

Σχετικά με το μέσο AoI, χρησιμοποιείται για τον χρονικό μέσο όρο της στιγμιαίας τιμής του AoI. Αξιολογεί την συνολική απόδοση και αυτό το καθιστά πιο αυστηρή παράμετρο, διότι δύο συστήματα με τον ίδιο αριθμό επιτυχιών μπορούν να έχουν διαφορετικό μέσο AoI [12], [13].

4.2.2 AoI σε Grant-Free και NOMA Συστήματα

Η ενημέρωση ενός χρήστη μπορεί να αποτύχει λόγω ανεπαρκούς λόγου σήματος-παρεμβολής θορύβου, λόγω σύγκρουσης με άλλους χρήστες ή διότι ο χρήστης δεν επιχειρήσει να μεταδώσει σε συγκεκριμένη χρονική θυρίδα [12], [13]. Αυτές είναι καταστάσεις που μπορούν να συμβούν σε ένα σύστημα grant-free και να προκαλέσουν την αύξηση του AoI.

Σε ένα σύστημα NOMA grant-free υπάρχουν ταυτόχρονες και πολλές ενημερώσεις και αυτό καθιερώνει αναγκαίο το AoI, μιας και μπορεί να μας δώσει μια σαφή εικόνα των αποτελεσμάτων ειδικά σε περιπτώσεις που χρειαζόμαστε να συγκρίνουμε το NOMA με το OMA σε grant-free περιβάλλοντα αλλά και να αποτυπωθούν τα κέρδη που προκύπτουν από τη χρήση του SIC [12], [13].

4.3 Περιγραφή του Συστήματος Grant-Free Uplink

Στο εξεταζόμενο σύστημα επικοινωνίας εφαρμόζεται grant-free uplink μετάδοση με NOMA-assisted τυχαία πρόσβαση [6], [12]. Το ασύρματο uplink σύστημα αποτελείται από χρήστες M και έναν κοινό σταθμό βάσης. Κάθε χρήστης επιχειρεί να μεταδώσει χωρίς άδεια και χωρίς ανάθεση πόρων, με λειτουργία grant-free. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του signaling overhead [12]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την ανάλυση του AoI σε grant-free περιβάλλοντα και η λειτουργία του βασίζεται στο εξής: στην αρχή του κάθε frame ο κάθε χρήστης έχει πάντα μια διαθέσιμη ενημέρωση προς μετάδοση [13].

Τα κανάλια μεταξύ τους θεωρούνται ανεξάρτητα και χρησιμοποιούν ένα μοντέλο εξασθένησης καναλιού, Rayleigh Fading, και μιγαδική Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή [12]. Για επιτυχή μετάδοση χρησιμοποιείται Channel State Information (CSI), δηλαδή ο κάθε χρήστης διαθέτει γνώση μόνο για την δική του στιγμιαία κατάσταση στο κανάλι. Για την εκπομπή χρησιμοποιείται ένα επιτρεπτό Maximum Transmit Power P_{max} . Αν η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο P_{max} η μετάδοση του χρήστη στο συγκεκριμένο time slot δεν είναι εφικτή [12].

Ο διαχωρισμός του χρόνου γίνεται σε frames. Το κάθε frame αποτελείται από N χρονικές θυρίδες, οι οποίες έχουν ίδια διάρκεια. Στην αρχή κάθε frame όλοι οι χρήστες διαθέτουν μια ενημέρωση προς μετάδοση. Στη συνέχεια, σε κάθε χρονική θυρίδα, οι χρήστες που δεν έχουν ακόμα επιτυχή ενημέρωση αποφασίζουν αν θα επιχειρήσουν μετάδοση με πιθανότητα P_{TX} [12], [13]. Η τιμή P_{TX} επηρεάζει τον ρυθμό των επιτυχημένων ενημερώσεων και αυτό συνεπάγεται και αλλαγές στο AoI.

4.3.1 Πιθανότητα Απόπειρας Μετάδοσης στο NOMA

Στο NOMA, για την επιλογή της πιθανότητας απόπειρας μετάδοσης χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$P_{TX} = \min \left\{ \frac{K}{M}, 1 \right\} \quad (4.2)$$

όπου K είναι ο αριθμός των προκαθορισμένων επιπέδων SNR. Το σύστημα μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει έως K χρήστες μέσω SIC [12].

4.3.2 Το OMA ως Σύστημα Αναφοράς

Το OMA χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς για να γίνει η σύγκριση του με το προτεινόμενο NOMA-assisted σύστημα. Στο OMA, όλοι οι χρήστες μοιράζονται τους ίδιους πόρους και σε κάθε χρονική θυρίδα μπορεί να εξυπηρετηθεί με επιτυχία ένας χρήστης λόγω ορθογωνικότητας. Κάθε προσπάθεια για μετάδοση περισσότερων χρηστών καταλήγει σε αποτυχία [5], [12]. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά απλή καθώς δεν απαιτείται καμία διαδικασία ακύρωσης παρεμβολών αλλά συνοδεύεται από τον περιορισμό να μην μπορεί να υπάρχει πάνω από μια επιτυχημένη ενημέρωση σε μια χρονική θυρίδα [12].

Στην μετάδοση αυτή η πιθανότητα απόπειρας μετάδοσης ορίζεται ως:

$$P_{TXOMA} = \frac{1}{Ma} \quad (4.3)$$

όπου Ma είναι οι ενεργοί χρήστες. Κάθε χρήστης επιχειρεί μετάδοση με πιθανότητα μετάδοσης αντιστρόφως ανάλογη με σκοπό ο αριθμός απόπειρων ανά slot να είναι 1 [12]. Αυτό αποτελεί το βασικό σημείο διαφοροποίησης του σε σχέση με το NOMA και προκαλεί διαφορά στο AoI καθώς το αυξάνει.

4.4 Προκαθορισμένα SNR Επίπεδα

Οι χρήστες για να πραγματοποιήσουν μετάδοση επιλέγουν τυχαία ένα από τα K επίπεδα SNR με ίση πιθανότητα. Τα επίπεδα αυτά είναι γνωστά πριν την έναρξη επικοινωνίας ανάμεσα σε χρήστες και σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης προκαθορίζει αυτά τα K επίπεδα και συμβολίζονται [12]:

$$P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_K \quad (4.4)$$

Όταν ένας χρήστης επιλέξει τυχαία ένα επίπεδο P_k , η εκπεμπόμενη ισχύς του προσαρμόζεται με τρόπο τέτοιο ώστε το λαμβανόμενο SNR στον σταθμό βάσης να ισούται με P_k [12]. Επειδή, υπάρχει ο περιορισμός μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος P_{max} , η επιλογή αυτή είναι υλοποιήσιμη μόνο εφόσον ισχύει [12]:

$$\frac{P_k}{|h|^2} \leq P_{max} \quad (4.5)$$

όπου h το κέρδος του καναλιού Rayleigh.

4.5 Διαδικασία Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών (SIC)

Στο σύστημα NOMA-assisted grant-free, στην ίδια χρονική θυρίδα έχουν τη δυνατότητα να μεταδώσουν περισσότεροι από ένας χρήστες με την προϋπόθεση ότι επιλέγουν διαφορετικά προκαθορισμένα SNR επίπεδα. Αυτό συμβαίνει ώστε στον σταθμό βάσης το λαμβανόμενο σήμα να αποτελεί υπέρθεση των επιμέρους σημάτων των ενεργών χρηστών. Για τον επιτυχή διαχωρισμό του κάθε σήματος, αντί για ορθογωνική κατανομή πόρων, χρησιμοποιείται Διαδοχική Ακύρωση Παρεμβολών (Successive Interference Cancellation-SIC), δηλαδή διαχωρισμός στα επίπεδα ισχύος [12].

Έστω ότι σε μία χρονική θυρίδα ενεργοποιείται ένα σύνολο χρηστών με προκαθορισμένα επίπεδα από το σύνολο $\{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ με διάταξη όπως στην (4.4) [12]. Η αποκωδικοποίηση στο σταθμό βάσης γίνεται κατά φθίνουσα σειρά επιπέδων SNR ξεκινώντας από το υψηλότερο επίπεδο. Στην αποκωδικοποίηση του επιπέδου P_k , τα χαμηλότερα επίπεδα (P_j , με $j > k$) θεωρούνται παρεμβολή, διότι δεν έχουν αφαιρεθεί ακόμα από το λαμβανόμενο σήμα [12].

Σύμφωνα με το μοντέλο του συστήματος, ο ρυθμός μετάδοσης για το επίπεδο P_k δίνεται από [12]:

$$\log_2 \left(1 + \frac{P_k}{\sum_{j=k+1}^K P_j} \right) \quad (4.6)$$

Η μετάδοση στο επίπεδο P_k θεωρείται επιτυχής όταν ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\log_2 \left(1 + \frac{P_k}{\sum_{j=k+1}^K P_j} \right) \geq R \quad (4.7)$$

όπου R είναι ο προκαθορισμένος στόχος ρυθμού του συστήματος [12].

Αν και εφόσον η συνθήκη ικανοποιείται, γίνεται η αποκωδικοποίηση του αντίστοιχου χρήστη και το σήμα του αφαιρείται από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα. Στη συνέχεια, η διαδικασία συνεχίζεται για το επόμενο χαμηλότερο επίπεδο SNR. Η διαδικασία διακόπτεται αν σε κάποιο στάδιο η συνθήκη δεν ικανοποιηθεί και οι υπόλοιποι χρήστες δεν θα αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς [12].

Στο NOMA-assisted σύστημα η σύγκρουση προκύπτει όταν δύο ή περισσότεροι χρήστες επιλέξουν στην ίδια χρονική θυρίδα το ίδιο προκαθορισμένο επίπεδο SNR. Στην προκειμένη περίπτωση, οι χρήστες δεν μπορούν να διαχωριστούν μέσω SIC. Σε αντίθεση με το OMA, όπου σύγκρουση συμβαίνει όταν περισσότεροι από ένας χρήστης εκπέμπουν στο ίδιο slot [5], [12].

Ο αριθμός χρηστών M και τα διαθέσιμα επίπεδα K είναι υπεύθυνα για την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων συγκρούσεων. Όσο το K αυξάνεται τόσο μειώνεται η πιθανότητα επιλογής του ίδιου επιπέδου από περισσότερους χρήστες. Αυτό βελτιώνει την συνολική απόδοση του συστήματος [12].

4.6 Σχεδίαση Προκαθορισμένων Επιπέδων SNR (Design I και Design II)

Στο NOMA-assisted grant-free σύστημα, η διαδικασία SIC εξαρτάται άμεσα από την ορθή επιλογή των προκαθορισμένων επιπέδων SNR. Η σχεδίαση των επιπέδων $P_1, P_2, \dots, P_K$ πρέπει να διασφαλίζει ότι κάθε επίπεδο μπορεί να αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς χωρίς παρεμβολή από τα χαμηλότερα επίπεδα, σύμφωνα με τη συνθήκη ρυθμού που ορίστηκε προηγουμένως. Σύμφωνα με το άρθρο [12], προτείνονται δύο διαφορετικές στρατηγικές σχεδίασης των επιπέδων SNR: το Design I και το Design II.

4.6.1 Design I – Συντηρητική Σχεδίαση

Στο Design I, τα επίπεδα SNR σχεδιάζονται με βάση το χειρότερο σενάριο παρεμβολής. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι σε κάθε χαμηλότερο επίπεδο μπορεί να υπάρχουν έως και $M - 1$ παρεμβάλλοντες χρήστες [12]. Η σχεδίαση ξεκινά από το χαμηλότερο επίπεδο

$$P_K = 2^R - 1 \quad (4.8)$$

Τα επίπεδα P_k υπολογίζονται έτσι ώστε να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$$\log_2 \left(1 + \frac{P_k}{1 + (M-1)P_{k+1}} \right) = R \quad (4.9)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$P_k = (2R-1)(1 + (M-1)P_{k+1}) \quad (4.10)$$

Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει ότι κάθε επίπεδο μπορεί να αποκωδικοποιηθεί ακόμη και στο χειρότερο σενάριο παρεμβολής. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το k παρατηρείται σημαντική αύξηση των απαιτούμενων επιπέδων SNR, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει περιορισμούς λόγω του P_{MAX} [12].

4.6.2 Design II –Πιο Ευέλικτη Σχεδίαση

Σε σχέση με το Design I, στο Design II παρατηρούμε μία λιγότερο αυστηρή σχεδίαση στο επίπεδο των παρεμβολών. Θεωρείται ότι σε κάθε επίπεδο παρεμβολής υπάρχει το πολύ ένας χρήστης ανά χαμηλότερο επίπεδο SNR [12]. Η σχέση καθορίζεται από την εξίσωση (4.8) και έχουμε :

για $k = K-1, \dots, 1$:

$$\log_2 \left(1 + \frac{P_k}{1 + P_{k+1}} \right) = R \quad (4.11)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$P_k = (2R-1)(1 + P_{k+1}) \quad (4.12)$$

Στο Design II, απαιτούνται χαμηλότερα επίπεδα SNR και αυτό αυξάνει την πιθανότητα εφικτής μετάδοσης. Βέβαια, επειδή δεν λαμβάνει υπόψη το χειρότερο πιθανό σενάριο παρεμβολής, το σύστημα καθίσταται περισσότερο ευαίσθητο σε συγκρούσεις [12].

4.6.3 Σύγκριση των Δύο Σχεδιάσεων

Συνοπτικά, το Design I παρουσιάζεται πιο ανθεκτικό σε περιπτώσεις μαζικού αριθμού ταυτόχρονων μεταδόσεων, επειδή διασφαλίζει επιτυχή αποκωδικοποίηση ακόμα και σε αυξημένο αριθμό παρεμβολών. Ωστόσο, απαιτεί μεγαλύτερα επίπεδα SNR, τα οποία ενδέχεται να μην είναι εφικτά λόγω του περιορισμού της μέγιστης ισχύος εκπομπής [12].

Αντιθέτως, το Design II, επιτυγχάνει μεγαλύτερη πιθανότητα μετάδοσης λόγω των χαμηλότερων επιπέδων SNR αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε συγκρούσεις.

Η επιλογή ανάμεσα στις δύο αυτές σχεδιάσεις επηρεάζει άμεσα τον επιτυχημένο αριθμό ενημερώσεων ανά χρονική θυρίδα, άρα κατά συνέπεια το Age of Information του συστήματος [12], [13].

4.7 Συνολική Λειτουργία του Συστήματος και Σύνδεση με το AoI

Έχοντας καθορίσει τον μηχανισμό grant-free, τη διαδικασία SIC και τη σχεδίαση των προκαθορισμένων επιπέδων SNR καθίσταται πλέον δυνατή η συνολική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος και η σύνδεση του με το Age of Information [12], [13].

Στην αρχή του κάθε frame, κάθε χρήστης διαθέτει μία νέα ενημέρωση προς μετάδοση. Το frame αποτελείται από N χρονικές θυρίδες (slots), μέσα στις οποίες οι χρήστες που δεν έχουν ακόμα

επιτυχημένη ενημέρωση αποφασίζουν στοχαστικά αν θα επιχειρήσουν μετάδοση, σύμφωνα με την πιθανότητα απόπειρας P_{TX} [12].

Για να θεωρηθεί επιτυχής η ενημέρωση ενός χρήστη, θα πρέπει να ικανοποιούνται διαδοχικά ορισμένες συνθήκες. Κατ' αρχάς, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει να μεταδώσει στην αντίστοιχη χρονική θυρίδα. Στη συνέχεια, η απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύς πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό μέγιστης ισχύος της εξισώσεως (4.5) ώστε η μετάδοση να είναι εφικτή. Αν η συνθήκη αυτή δεν ισχύει, ο χρήστης δεν μπορεί να μεταδώσει στο συγκεκριμένο slot [12].

Εφόσον η μετάδοση είναι εφικτή, διερευνάται αν υπάρχει σύγκρουση στο ίδιο επίπεδο SNR. Σε σύστημα NOMA-assisted, δεν μπορούν μέσω SIC δύο χρήστες που επιλέγουν το ίδιο προκαθορισμένο επίπεδο στην ίδια χρονική θυρίδα, να διαχωριστούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποτυχία αποκωδικοποίησης στο συγκεκριμένο επίπεδο [12].

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει σύγκρουση, ο σταθμός εφαρμόζει τη διαδικασία SIC, ξεκινώντας από το υψηλότερο επίπεδο SNR και προχωρώντας προς τα χαμηλότερα. Η αποκωδικοποίηση θεωρείται επιτυχής όταν ικανοποιείται η συνθήκη (4.7): όπου R είναι ο προκαθορισμένος στόχος ρυθμού μετάδοσης. Αν δεν ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη, η διαδικασία διακόπτεται και οι υπόλοιποι χρήστες της ίδιας χρονικής θυρίδας δεν μπορούν να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς [12].

Η εξέλιξη του Age of Information, εξαρτάται από την επιτυχία ή την αποτυχία των ενημερώσεων. Όταν ο σταθμός βάσης παραλαμβάνει επιτυχώς μια ενημέρωση, το AoI του συγκεκριμένου χρήστη μηδενίζεται. Αντίθετα, όταν η μετάδοση αποτυγχάνει, το AoI συνεχίζει να αυξάνεται κατά μία μονάδα χρόνου σε κάθε χρονική θυρίδα [12].

Αυτή η συμπεριφορά επηρεάζεται από βασικές παραμέτρους του συστήματος. Η αύξηση του αριθμού επιπέδων K μειώνει την πιθανότητα επιλογής του ίδιου SNR από πολλούς χρήστες, επιτρέποντας μεγαλύτερο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων ανά slot. Αντίστοιχα, αν αυξηθεί ο αριθμός χρηστών M , υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης και αυξημένων παρεμβολών, γεγονός που αυξάνει και το AoI [12]. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την επιτυχία ενός χρήστη στο SNR επίπεδο είναι ο περιορισμός της μέγιστης ισχύος P_{max} . Επίσης, η επιλογή ανάμεσα στις δύο σχεδιάσεις επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Η βασική διαφορά με το OMA, και το βασικό πλεονέκτημα για τη μείωση του AoI, είναι ότι σε κάθε χρονική θυρίδα το NOMA επιτρέπει έως και K επιτυχημένες ενημερώσεις ανά slot [12], [13].

Συνολικά, η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ πιθανότητας μετάδοσης, την σχεδίαση των επιπέδων SNR, την επιτυχημένη λειτουργία του SIC και του περιορισμού ισχύος. Η ορθή επιλογή των παραμέτρων αυτών είναι υπεύθυνη για την συνολική απόδοση του συστήματος και για την τιμή, στην οποία θα κυμαίνεται το AoI [12], [13]. Το βασικό αυτό πλαίσιο αποτελεί βάση για την αξιολόγηση της απόδοσης μέσω προσομοιώσεων.

4.8 Βασικός Στόχος Προσομοιώσεων και Κριτήρια Αξιολόγησης

Βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης ενός NOMA-assisted grant-free συστήματος ως προς το Age of Information, καθώς και η σύγκριση του με το σύστημα OMA, το οποίο χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς [12].

Το βασικό ερώτημα που εξετάζεται είναι κατά πόσο η χρήση του NOMA σε συνδυασμό με grant-free πρόσβαση μπορεί να συμβάλλει σε χαμηλότερες τιμές AoI και μεγαλύτερο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων σε σχέση με το OMA [12], [13]. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του NOMA είναι η

δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος [6], [7].

4.8.1 Το AoI ως Βασικός Παράγοντας

Ο σημαντικότερος δείκτης που μελετάται είναι το μέσο AoI (Mean AoI), το οποίο χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της χρονικής φρεσκάδας της πληροφορίας που διαθέτει ο σταθμός βάσης [12].

Το AoI δεν εξετάζει μόνο τον συνολικό χρόνο που έχει περάσει από την δημιουργία ενός πακέτου, αλλά και τον συνολικό χρόνο που έχει περάσει από την τελευταία ενημέρωση που έχει παραληφθεί. Αυτή είναι και η βασική διαφορά από την κλασική καθυστέρηση μετάδοσης. Για τον συγκεκριμένο λόγο, αποτελεί τον πιο ρεαλιστικό αλλά και αυστηρό δείκτη απόδοσης σε συστήματα, όπου έχουμε πολύ συχνές ενημερώσεις [13].

Η μείωση του Mean AoI σημαίνει ότι στον σταθμό βάσης λαμβάνονται πιο πρόσφατες και έγκυρες ενημερώσεις, γεγονός που αποτελεί βασικό στόχο σε σύγχρονες εφαρμογές [13].

4.8.2 Αριθμός Επιτυχημένων Ενημερώσεων

Η δεύτερη βασική παράμετρος αξιολόγησης είναι ο συνολικός αριθμός επιτυχημένων ενημερώσεων (successful updates), δηλαδή ο αριθμός των επιτυχημένων λαμβανόμενων πακέτων από τον σταθμό βάσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης [12].

Η συγκεκριμένη παράμετρος συνδέεται άμεσα με το AoI, καθώς όταν έχουμε επιτυχή ενημέρωση έχουμε και μηδενισμό του AoI του αντίστοιχου χρήστη. Όσο μεγαλύτερο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων έχουμε τόσο συχνότερα ανανεώνεται και η πληροφορία στο σταθμό βάσης άρα τόσο καλύτερη είναι η συνολική απόδοση του συστήματος.

Ο λόγος που χρησιμοποιούνται συνδυαστικά είναι ο εξής: δύο διαφορετικά συστήματα μπορεί να παρουσιάζουν παρόμοιο αριθμό επιτυχημένων μεταδόσεων αλλά το μέσο AoI τους να διαφέρει αρκετά [12].

4.8.3 Επίδραση Βασικών Παραμέτρων του Συστήματος

Η βασική παράμετρος του συστήματος είναι ο αριθμός χρηστών M . Η αύξηση του προκαλεί μεγαλύτερη πιθανότητα ταυτόχρονων μεταδόσεων, αυξημένες συγκρούσεις και αυξημένες παρεμβολές [12], [13]. Καθώς το M αυξάνεται, το OMA παρουσιάζει επιδείνωση λόγω του περιορισμού μίας επιτυχούς μετάδοσης σε κάθε slot [12]. Αντιθέτως, στο NOMA η απόδοση παραμένει καλύτερη λόγω της δυνατότητας πολλαπλών επιτυχημένων αποκωδικοποιήσεων.

Επίσης, μεγάλη είναι η επίδραση του αριθμού επιπέδων SNR K . Ο αριθμός αυτός καθορίζει τον αριθμό των χρηστών, που μπορούν ταυτόχρονα να αποκωδικοποιηθούν. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός K , τόσο αυξάνεται και η συνολική απόδοση του συστήματος και παράλληλα μειώνεται η πιθανότητα συγκρούσεων [12].

Άλλη μια σημαντική παράμετρος του συστήματος είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς P_{max} . Η παράμετρος αυτή επηρεάζει τη δυνατότητα επιτυχούς μετάδοσης, μιας και σε δυσμενείς συνθήκες καναλιού οι χρήστες ενδέχεται να μην μπορούν να πετύχουν το απαιτούμενο επίπεδο SNR. Με τον τρόπο αυτό οδηγούμαστε σε αύξηση του AoI και σε μείωση των επιτυχημένων πακέτων ενημέρωσης

[12], [13]. Τέλος, εξίσου σημαντική είναι και η επιλογή ανάμεσα στις δύο στρατηγικές σχεδίασης, οι οποίες επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος [12].

4.8.4 Αναμενόμενη Συμπεριφορά του Συστήματος και Στόχος των Προσομοιώσεων

Θεωρητικά αναμένεται πως το NOMA-assisted grant-free σύστημα θα παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή στο μέσο AoI αλλά και μεγαλύτερο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων σε σχέση με το OMA, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα που υπάρχει μεγάλος αριθμός χρηστών [12], [13].

Το βασικό πλεονέκτημα που αξιοποιείται είναι η εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στην ίδια χρονική θυρίδα, γεγονός που επιτρέπει τη συχνότερη ανανέωση της πληροφορίας άρα και μικρότερες τιμές AoI [6], [7].

Απεναντίας, στο OMA η ύπαρξη μιας επιτυχούς μετάδοσης ανά slot οδηγεί σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις και σε αύξηση του AoI, κυρίως όταν υπάρχει πλήθος χρηστών [12]. Η θεωρητική αυτή ανάλυση αποτελεί πυλώνα για το επόμενο κεφάλαιο των προσομοιώσεων. Η υλοποίηση του μοντέλου θα γίνει σε περιβάλλον MATLAB, με την περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης και την ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Μέσα από τα διαγράμματα OMA και NOMA θα προκύψει η αξιολόγηση στην πράξη των παραμέτρων του συστήματος και θα επιβεβαιωθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη θεωρητική μελέτη.

4.9 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η πλήρης θεωρητική ανάλυση του εξεταζόμενου NOMA-assisted grant-free συστήματος, με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας του και της επίδρασης του ως προς το Age of Information. Επίκεντρο της μελέτης υπήρξαν περιβάλλοντα μαζικής συνδεσιμότητας, στα οποία η ανάγκη για άμεση μετάδοση της πληροφορίας κρίνεται αναγκαία.

Αρχικά, παρουσιάστηκε στο μοντέλο η δομή frame-slot, μέσω της οποίας οι χρήστες επιχειρούν να μεταδώσουν χωρίς προηγούμενη διαδικασία αδειοδότησης. Έγινε ανάλυση της πιθανότητας μετάδοσης χωρίς την χρήση προηγούμενης διαδικασίας αξιολόγησης. Τόσο για το OMA, όσο και για το NOMA παρουσιάστηκε η πιθανότητα απόπειρας μετάδοσης, με το πρώτο να χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς για τη σύγκριση της απόδοσης. Στη συνέχεια, αναλύθηκε η έννοια των προκαθορισμένων επιπέδων SNR, αλλά και η σημασία τους στη λειτουργία του συστήματος.

Επίσης, έμφαση δόθηκε στη διαδικασία ακύρωσης παρεμβολών, μία βασική διαδικασία αποκωδικοποίησης στο NOMA, η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών στην ίδια χρονική θυρίδα. Βασικά ζητήματα όπως η μαθηματική συνθήκη επιτυχούς αποκωδικοποίησης και η έννοια της σύγκρουσης σε επίπεδο SNR αναλύθηκαν επίσης. Επιπλέον, αναλύθηκαν δύο στρατηγικές σχεδίασης των επιπέδων Design I, Design II.

Συνολικά, μελετήθηκαν τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος, με κύρια παράμετρο το μέσο Age of Information και τον συνολικό αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων. Μέσα από αυτό, καθίσταται δυνατή η σύγκριση των δύο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποδοτικότητα του μοντέλου. Η θεωρητική αυτή ανάλυση αποτελεί βάση για το επόμενο κεφάλαιο, στο οποίο θα γίνει υλοποίηση σε περιβάλλον MATLAB, η περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 5ο: Επεξήγηση Κώδικα Προσομοίωσης

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η θεωρητική ανάλυση του εξεταζόμενου συστήματος και αναλύθηκαν οι βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του. Στο παρόν κεφάλαιο, η θεωρητική αυτή προσέγγιση μεταφέρεται σε περιβάλλον προσομοίωσης MATLAB με σκοπό την υπολογιστική μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος και την αξιολόγηση της απόδοσης του [12], [13].

Η προσομοίωση μας προσφέρει την παρακολούθηση της λειτουργίας του αλγορίθμου για διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης αλλά και διαφορετικό αριθμό χρηστών. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης του προτεινόμενου συστήματος με ένα συμβατικό σύστημα αναφοράς OMA [12]. Μέσω της διαδικασίας αυτής, αξιολογείται ο συνολικός αριθμός επιτυχημένων ενημερώσεων και οι τιμές του AoI, τα οποία αποτελούν βασικές παραμέτρους της εργασίας [13].

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συνολική λογική της προσομοίωσης, οι βασικές παράμετροι, το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου και η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του κώδικα ώστε να αποτυπωθεί πλήρως η μετάβαση από την θεωρία στην πράξη.

5.2 Περιγραφή Προσομοίωσης

Για την υλοποίηση του συστήματος έχει χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον του MATLAB. Η λογική βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη προσομοίωση μεγάλου αριθμού frames, με σκοπό πιο την αξιόπιστη αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος [12].

Αρχικοποιούνται οι βασικοί παράμετροι του συστήματος, όπως ο αριθμός των χρηστών, ο αριθμός των επιπέδων SNR, ο αριθμός των slots ανά frame, ο ρυθμός μετάδοσης, η διάρκεια κάθε χρονικής θυρίδας αλλά και ο περιορισμός της μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος. Παράλληλα, υπολογίζονται τα προκαθορισμένα επίπεδα SNR που χρησιμοποιούνται, σύμφωνα με το Design I [12].

Το σύστημα εξετάζει διαδοχικά για κάθε frame όλες τις χρονικές θυρίδες και για κάθε χρήστη ελέγχει αν υπάρχει ήδη επιτυχής ενημέρωση στο συγκεκριμένο frame. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει, τότε ο χρήστης αποφασίζει στοχαστικά αν θα επιχειρήσει μετάδοση. Για να το αποφασίσει αυτό, λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα απόπειρας που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο σύστημα [12], [13].

Στο NOMA, κάθε χρήστης που επιλέγει να μεταδώσει αντιστοιχίζεται τυχαία σε ένα από τα διαθέσιμα επίπεδα SNR και ελέγχεται αν η απαιτούμενη ισχύς του είναι επιτρεπτή με βάση τον περιορισμό P_{max} που υπάρχει. Αν αυτή η συνθήκη είναι ορθή, ο συγκεκριμένος χρήστης θεωρείται ενεργός στο συγκεκριμένο slot και συμμετέχει στη διαδικασία αποκωδικοποίησης [12].

Εν συνεχεία, εφαρμόζεται η διαδικασία SIC στον σταθμό βάσης. Η ταξινόμηση των χρηστών γίνεται με βάση το επίπεδο ισχύος και η αποκωδικοποίηση τους από το ισχυρότερο προς το ασθενέστερο σήμα. Αν παρατηρηθεί σύγκρουση στο ίδιο επίπεδο SNR ή αν δεν ικανοποιηθεί η συνθήκη αποκωδικοποίησης, η διαδικασία σταματάει και η μετάδοση για τους αντίστοιχους χρήστες κρίνεται αποτυχημένη [12].

Για το OMA, ακολουθείται αντιστοίχη διαδικασία με βασική και σημαντική διαφορά ότι σε κάθε χρονική θυρίδα δεν μπορεί να υπάρξει παραπάνω από μία επιτυχή μετάδοση. Σε περίπτωση που

παραπάνω από ένας χρήστες επιχειρήσουν ταυτόχρονα να μεταδώσουν, το slot αυτομάτως θεωρείται αποτυχημένο [12].

Αφού καταλήξουμε στην ολοκλήρωση του κάθε slot, πραγματοποιείται η ενημέρωση του στιγμιαίου Age of Information του κάθε χρήστη. Σε κάθε επιτυχή μετάδοση το AoI μηδενίζεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση αυξάνεται κατά μια μονάδα χρόνου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε όλα τα frames, επιτρέποντας τον υπολογισμό της συνολικής χρονικής συμπεριφοράς του συστήματος [13].

Στο τέλος όλων των επαναλήψεων υπολογίζεται το μέσο AoI για το NOMA και το OMA αλλά και ο συνολικός αριθμός επιτυχημένων ενημερώσεων για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται για τη γραφική απεικόνιση και τη σύγκριση των δύο τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης. Αυτό προσφέρει ασφαλή συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος [12], [13].

5.3 Βασικές Παράμετροι και Μεταβλητές Προσομοίωσης

Η ορθή λειτουργία της προσομοίωσης εξαρτάται από ένα σύνολο μεταβλητών και παραμέτρων, οι οποίες περιγράφουν τη δομή αλλά και τη λειτουργία του συστήματος.

Αρχικά ορίζεται η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς μέσω της παραμέτρου P_{maxdB} που λαμβάνει κάποια τιμή, η οποία μετατρέπεται σε γραμμική μορφή μέσω της σχέσης:

$$P_{max} = 10^{0.1 \times P_{maxdB}}. \quad (5.1)$$

έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής [12]. Αυτή είναι μια παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική, μιας και καθορίζει αν ένας χρήστης μπορεί να επιτύχει το επιλεγμένο επίπεδο SNR και συνεπώς το αν θα πραγματοποιηθεί η μετάδοση. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η παράμετρος P_{max} εκφράζεται σε dB, όχι ως απόλυτη ισχύς εκπομπής σε dBm, αλλά ως όριο που σχετίζεται με το επιτρεπτό επίπεδο SNR για επιτυχή μετάδοση. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η παράμετρος αυτή δεν αναφέρεται σε φυσική απόλυτη ισχύ, αλλά σε ένα θεωρητικό όριο ισχύος του μοντέλου, το οποίο σχετίζεται με την επίτευξη του απαιτούμενου SNR στον σταθμό βάσης.

Με K συμβολίζεται ο αριθμός των προκαθορισμένων επιπέδων SNR και στην παρούσα προσομοίωση επιλέγεται να είναι ίσο είτε με 2 είτε με 4 είτε με 8. Η τιμή αυτή καθορίζει το μέγιστο αριθμό χρηστών, που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα σε μία χρονική θυρίδα [12]. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχουμε στο K , τόσο αυξημένη είναι η δυνατότητα πολλαπλών επιτυχημένων αποκωδικοποιήσεων. Αυτό βέβαια αυξάνει και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Στη συνέχεια έχουμε την παράμετρο N , η οποία εκφράζει τον αριθμό των slots ανά frame και ορίζεται ίση με 10. Αυτό σημαίνει ότι το κάθε frame αποτελείται από δέκα διαδοχικές χρονικές θυρίδες μέσα στις οποίες πραγματοποιούνται οι απόπειρες μετάδοσης. Με τον τρόπο αυτό παρακολουθείται η εξέλιξη του AoI σε χρονικό επίπεδο [12].

Ο ρυθμός μετάδοσης, που συμβολίζεται με R , λαμβάνει την τιμή 1bit/s/Hz ή την τιμή 0.5 bit/s/Hz. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στον έλεγχο της επιτυχούς αποκωδικοποίησης κατά τη διαδικασία SIC. Για να θεωρηθεί επιτυχής η μετάδοση πρέπει ο επιτευχθείς ρυθμός να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον προκαθορισμένο στόχο [12].

Για την διάρκεια της κάθε χρονικής θυρίδας χρησιμοποιείται η παράμετρος T , η οποία στην προκειμένη ορίζεται ίση με 1 ms. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στον τελικό υπολογισμό του μέσου Age

of Information, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να αποδίδονται σε πραγματική χρονική κλίμακα και όχι σε αριθμό slots [12].

Ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων της προσομοίωσης καθορίζεται από την μεταβλητή *NumofFrames*, η οποία λαμβάνει την τιμή 20.000. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των frames τόσο μειώνεται η επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αξιοπιστία στα τελικά αποτελέσματα.

Αξιόλογης σημασίας είναι η μεταβλητή *M*, η οποία αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό χρηστών του συστήματος. Αντί να χρησιμοποιούμε μια σταθερή τιμή για το *M*, η προσομοίωση γίνεται για διαφορετικά σενάρια χρηστών:

$$M = [1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]. \quad (5.2)$$

ώστε να μελετηθεί η επίδραση της αύξησης των χρηστών στην απόδοση του συστήματος [12]. Η σύγκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το πλεονέκτημα του NOMA εμφανίζεται σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών.

Για το NOMA, η πιθανότητα απόπειρας μετάδοσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης [12]:

$$P_{TX} = \min\left(\frac{K}{M}, 1\right). \quad (5.3)$$

Η πιθανότητα αυτή προσαρμόζει τον μέσο αριθμό ταυτόχρονων μεταδόσεων ανάλογα με το πλήθος των χρηστών που έχουμε. Η επιλογή αυτή μειώνει την πιθανότητα συγκρούσεων και επιτρέπει πιο αποδοτική λειτουργία της διαδικασίας SIC [12].

Ο πίνακας P_k χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των προκαθορισμένων επιπέδων SNR. Στον παρόντα κώδικα εφαρμόζεται και το Design I και το Design II, με πιο βασικό το Design I, όπου τα επίπεδα ισχύος υπολογίζονται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται επιτυχής αποκωδικοποίηση ακόμα και υπό παρεμβολές από χαμηλότερα επίπεδα ισχύος. Η επιλογή αυτή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την συνολική απόδοση του συστήματος.

Πίνακας 5.1 Βασικές παράμετροι προσομοίωσης

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
P_{maxdB}	Μέγιστη ισχύς εκπομπής (dB)	Μεταβλητή (0, 10, 20, 30)
K	Αριθμός επιπέδων SNR	2 ή 4 ή 8
N	Slots ανά frame	10 ή 20
R	Ρυθμός μετάδοσης	1 bits/s/Hz ή 0.5 bit/s/Hz
T	Διάρκεια slot	1 ms
<i>NumofFrames</i>	Αριθμός frames προσομοίωσης	20000
<i>M</i>	Αριθμός χρηστών	[1,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50]

Η σωστή επιλογή των παραμέτρων αυτών επηρεάζει τόσο την διαδικασία μετάδοσης όσο και την τελική τιμή του μέσου AoI [12], [13]. Οι τιμές των παραμέτρων επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταιριάζουν στο frame του 5G.

Οι βασικές παράμετροι της προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1

5.3.1 Μεταβλητές Παρακολούθησης του AoI

Στην παρούσα προσομοίωση, για να αποτυπωθεί η εξέλιξη του Age of Information, χρησιμοποιούνται ειδικοί πίνακες που καταγράφουν τη στιγμιαία τιμή του AoI για κάθε χρήστη και για κάθε χρονική θυρίδα.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι πίνακες OMAUserInstAoI και NOMAUserInstAoI, οι οποίοι αποθηκεύουν την τιμή του AoI για κάθε χρήστη σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Οι πίνακες αυτοί έχουν διαστάσεις που εξαρτώνται από τον συνολικό αριθμό των slots ($NumofFrames \times N$) και τον αριθμό των χρηστών.

Σε περίπτωση που ένας χρήστης επιτύχει μετάδοση, η τιμή του AoI μηδενίζεται. Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή αυξάνεται κατά μια μονάδα χρόνου, σύμφωνα με τον ορισμό του Age of Information [12].

5.3.2 Καταγραφή Επιτυχημένων Μεταδόσεων

Για την καταγραφή των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες πραγματοποιούνται επιτυχείς μεταδόσεις, χρησιμοποιούνται οι πίνακες OMAUserInstSuc και NOMAUserInstSuc. Οι πίνακες αυτοί είναι δυαδικοί και λαμβάνουν τιμή 1 στη χρονική στιγμή όπου ένας χρήστης ολοκληρώνει επιτυχώς μια μετάδοση, ενώ σε όλες τις άλλες χρονικές στιγμές λαμβάνουν την τιμή 0.

Η καταγραφή αυτή είναι απαραίτητη, διότι επιτρέπει τον εντοπισμό των χρονικών στιγμών επιτυχούς ενημέρωσης για κάθε χρήστη. Τις πληροφορίες αυτές τις χρησιμοποιούμε στη συνέχεια για να υπολογιστούν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών επιτυχημένων μεταδόσεων, τα οποία διαστήματα συνδέονται άμεσα με το Age of Information [12].

5.3.3 Υπολογισμός Χρονικών Διαστημάτων

Με βάση τις χρονικές στιγμές επιτυχούς μετάδοσης, υπολογίζονται τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών ενημερώσεων για κάθε χρήστη. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι πίνακες OAoIs και NAOIs, οι οποίοι αποθηκεύουν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών επιτυχημένων μεταδόσεων για τα συστήματα OMA και NOMA.

Τα διαστήματα αυτά υπολογίζονται ως η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών επιτυχίας:

$$\Delta_{t_i} = t_i - t_{i-1}. \quad (5.4)$$

όπου t_i είναι η χρονική στιγμή της i -οστής επιτυχούς μετάδοσης [12].

Μέσω του υπολογισμού αυτού γίνεται μια ακριβή εκτίμηση της χρονικής απόστασης μεταξύ των ενημερώσεων.

5.3.4 Μετρητές Απόδοσης του Συστήματος

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, δημιουργήθηκαν οι μεταβλητές που καταγράφουν τον αριθμό των επιτυχημένων μεταδόσεων. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές `TotalSuccessfulOMA` και `TotalSuccessfulNOMA` εκφράζουν τον συνολικό αριθμό επιτυχημένων μεταδόσεων για κάθε χρήστη.

Επίσης, υπολογίζονται οι μεταβλητές `MeanOSuccess` και `MeanNSuccess`, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τον μέσο αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων ανά χρήστη και ανά frame. Αποτελούν σημαντικό δείκτη απόδοσης του συστήματος, διότι σχετίζονται με την συχνότητα ανανέωσης της πληροφορίας στο σταθμό βάσης [12].

5.4 Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα ροής της προσομοίωσης. Το γενικό διάγραμμα αποτυπώνει τη συνολική λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος NOMA-assisted grant-free μετάδοσης καθώς και του συστήματος αναφοράς OMA.

Σκοπός του διαγράμματος είναι η συνοπτική παρουσίαση των βασικών σταδίων της προσομοίωσης, από την αρχικοποίηση των παραμέτρων μέχρι τον τελικό υπολογισμό των επιτυχημένων ενημερώσεων και του Age of Information.

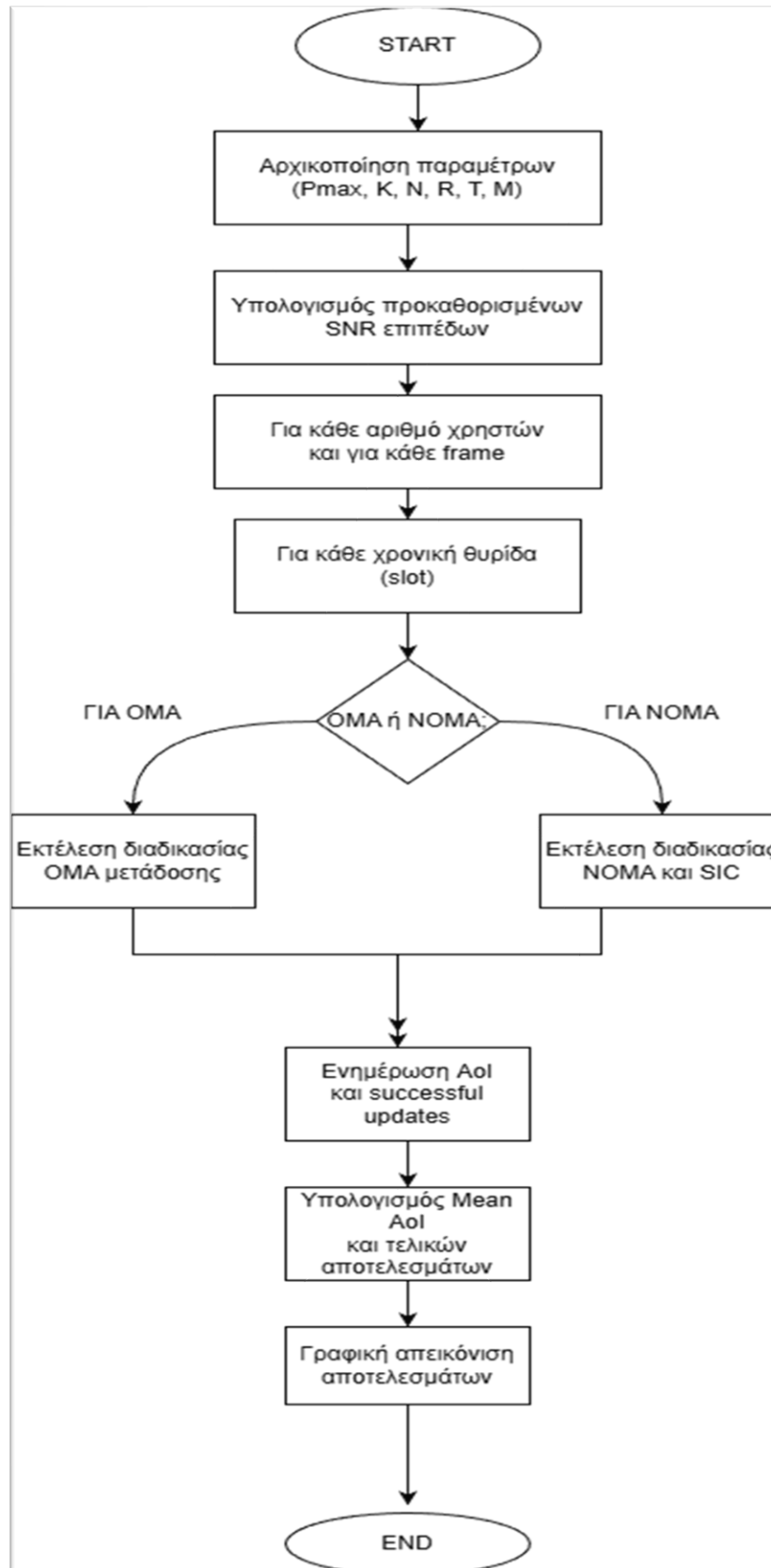
5.4.1 Γενικό Διάγραμμα Ροής Συστήματος

Αρχικά, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος, όπως ο αριθμός χρηστών, τα προκαθορισμένα επίπεδα SNR, ο αριθμός των slots ανά frame και η μέγιστη επιτρεπόμενη εκπομπή ισχύος. Στη συνέχεια, το σύστημα εκτελεί επαναληπτικά την διαδικασία προσομοίωσης για διαφορετικά σενάρια χρηστών και για μεγάλο αριθμό frames.

Σε κάθε χρονική θυρίδα εξετάζεται αν οι χρήστες επιχειρούν μετάδοση και αναλόγως εφαρμόζεται είτε η διαδικασία OMA είτε η διαδικασία NOMA με SIC. Μετά την ολοκλήρωση κάθε slot πραγματοποιείται ενημέρωση του Age of Information και αποθήκευση των επιτυχημένων μεταδόσεων.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων υπολογίζονται οι μέσες τιμές AoI και δημιουργούνται τα τελικά διαγράμματα αποτελεσμάτων.

Το γενικό διάγραμμα ροής που εμφανίζεται στη συνέχεια (Σχήμα 2) παρουσιάζει τη βασική λειτουργία της προσομοίωσης χωρίς να εισέρχεται σε λεπτομέρειες επιμέρους τεχνικών. Η ανάλυση των διαδικασιών NOMA, OMA και του υπολογισμού του Age of Information παρουσιάζεται αναλυτικότερα στις επιμέρους υποενότητες μέσω επιμέρους διαγραμμάτων ροής.



Σχήμα 2: Γενικό διάγραμμα ροής της προσομοίωσης του συστήματος NOMA/OMA grant-free.

5.4.2 Διάγραμμα Ροής Διαδικασίας NOMA και OMA

Η διαδικασία NOMA αποτελεί το βασικό τμήμα της προσομοίωσης, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στην ίδια χρονική θυρίδα μέσω μη ορθογωνικής πρόσβασης. Στο εξεταζόμενο σύστημα, κάθε χρήστης που δεν έχει ήδη επιτυχημένη ενημέρωση στο τρέχον frame αποφασίζει στοχαστικά αν θα επιχειρήσει μετάδοση σύμφωνα με την πιθανότητα μετάδοσης P_{TX} .

Σε περίπτωση που ο χρήστης επιχειρεί μετάδοση, επιλέγει τυχαία ένα από τα διαθέσιμα προκαθορισμένα επίπεδα SNR. Στη συνέχεια ελέγχεται αν η απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύς ικανοποιεί τον περιορισμό μέγιστης ισχύος. Όσοι χρήστες ικανοποιούν την συνθήκη θεωρούνται ενεργοί χρήστες και συμμετέχουν στην διαδικασία αποκωδικοποίησης.

Ο σταθμός βάσης εφαρμόζει την διαδικασία Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών, κατά την οποία τα σήματα αποκωδικοποιούνται διαδοχικά από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο επίπεδο ισχύος. Αν κατά την διαδικασία εμφανιστεί σύγκρουση στο ίδιο επίπεδο SNR ή αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη αποκωδικοποίησης, η διαδικασία διακόπτεται και οι αντίστοιχες μεταδόσεις θεωρούνται αποτυχημένες.

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας NOMA παρουσιάζει τα βασικά στάδια μη ορθογωνικής μετάδοσης και της διαδικασίας SIC. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται άμεσα από τη σωστή επιλογή των επιπέδων SNR, την αποφυγή συγκρούσεων αλλά και την επιτυχημένη αποκωδικοποίηση των χρηστών μέσω SIC. Με την διαδικασία αυτή επιτρέπεται η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών στην ίδια χρονική θυρίδα, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του Age of Information. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ακριβώς αυτό το κομμάτι της διαδικασίας.

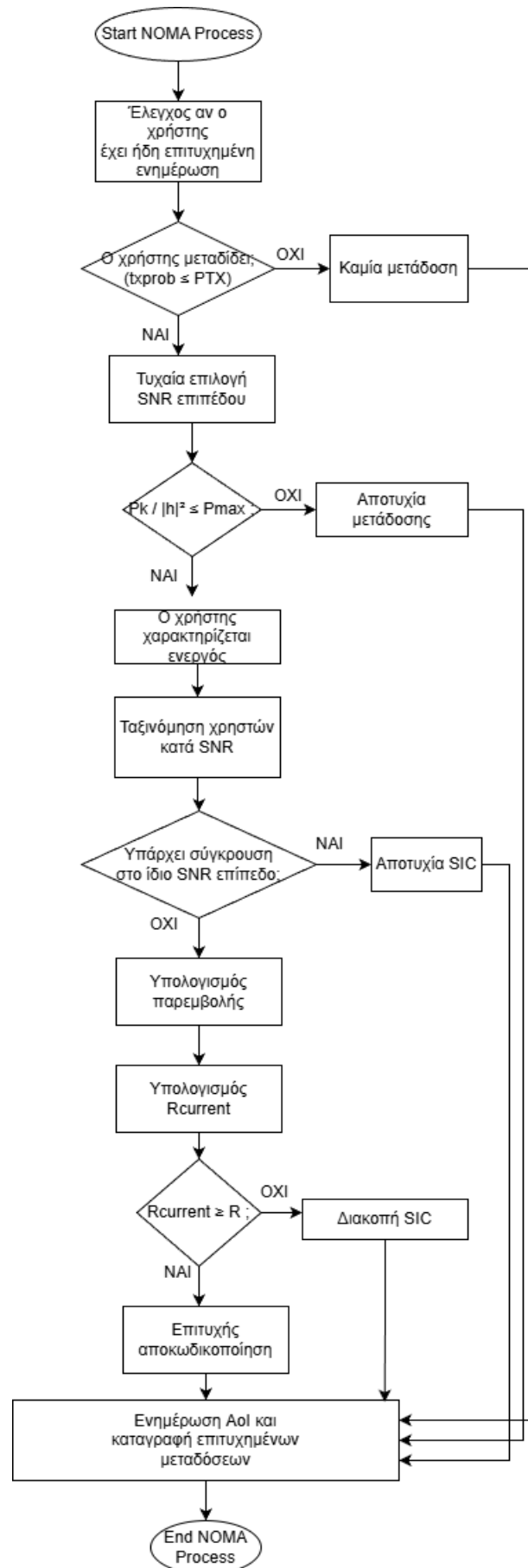
Η διαδικασία OMA χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως σύστημα αναφοράς για την αξιολόγηση της απόδοσης του βασικού συστήματος που μελετάται. Στην ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση επιτρέπεται μόνο μια επιτυχημένη μετάδοση ανά χρονική θυρίδα, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης αλλά περιορίζει τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Στην προσομοίωση, κάθε χρήστης που δεν έχει ήδη επιτυχημένη ενημέρωση στο τρέχον frame αποφασίζει στοχαστικά αν θα επιχειρήσει μετάδοση σύμφωνα με την πιθανότητα απόπειρας μετάδοσης. Στη συνέχεια ελέγχεται αν η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής ικανοποιεί τον περιορισμό μέγιστης ισχύος.

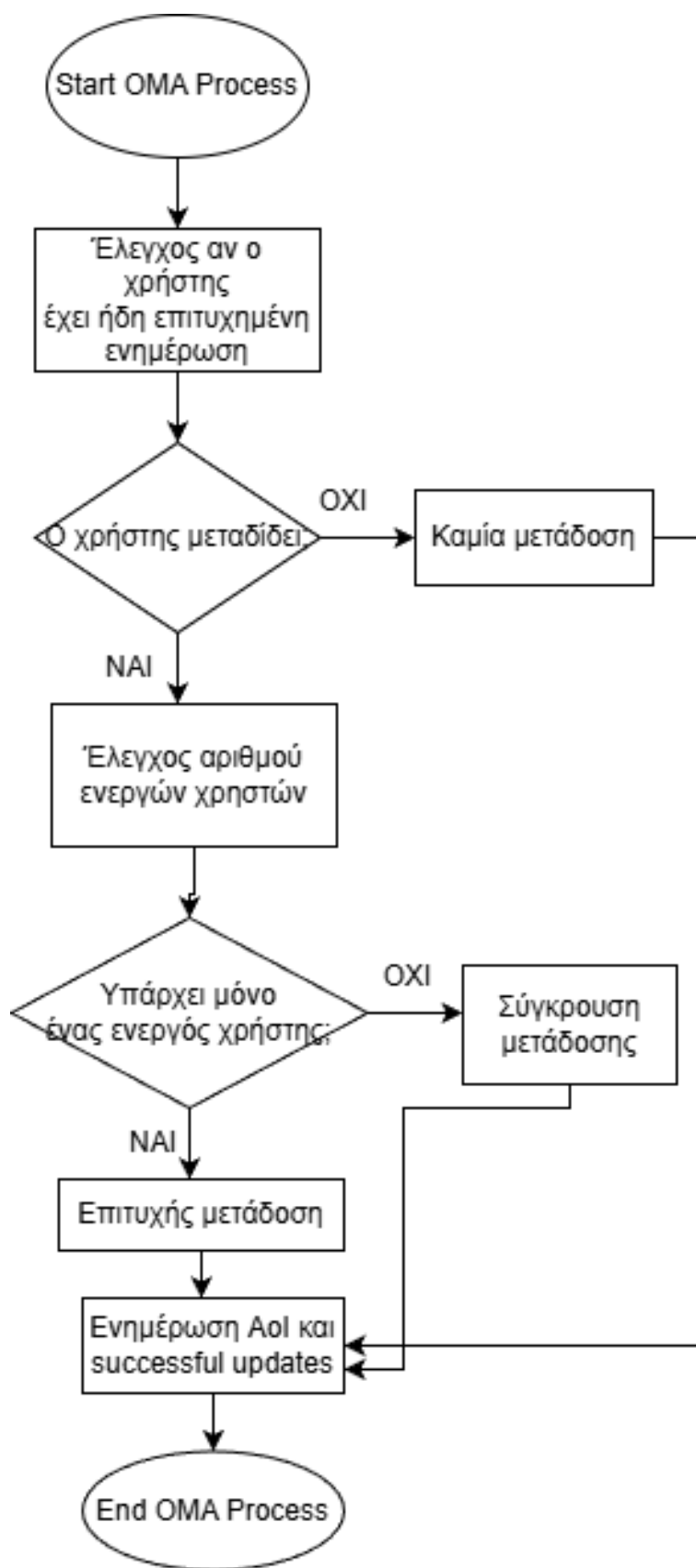
Η βασική αρχή του OMA είναι ότι σε κάθε slot μπορεί να υπάρξει μόνο μια επιτυχής μετάδοση. Σε περίπτωση που περισσότεροι από ένας χρήστες επιχειρήσουν ταυτόχρονα μετάδοση, δημιουργείται σύγκρουση και η χρονική θυρίδα θεωρείται αποτυχημένη. Αντίθετα, όταν υπάρχει μόνο ένας ενεργός χρήστης, η μετάδοση θεωρείται επιτυχής και ενημερώνεται το Age of Information.

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει σαφώς μικρότερη πολυπλοκότητα. Ωστόσο, ο περιορισμός μιας μόνο επιτυχημένης μετάδοσης ανά χρονική θυρίδα οδηγεί σε αυξημένες συγκρούσεις και μεγαλύτερες τιμές Age of Information, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό χρηστών.

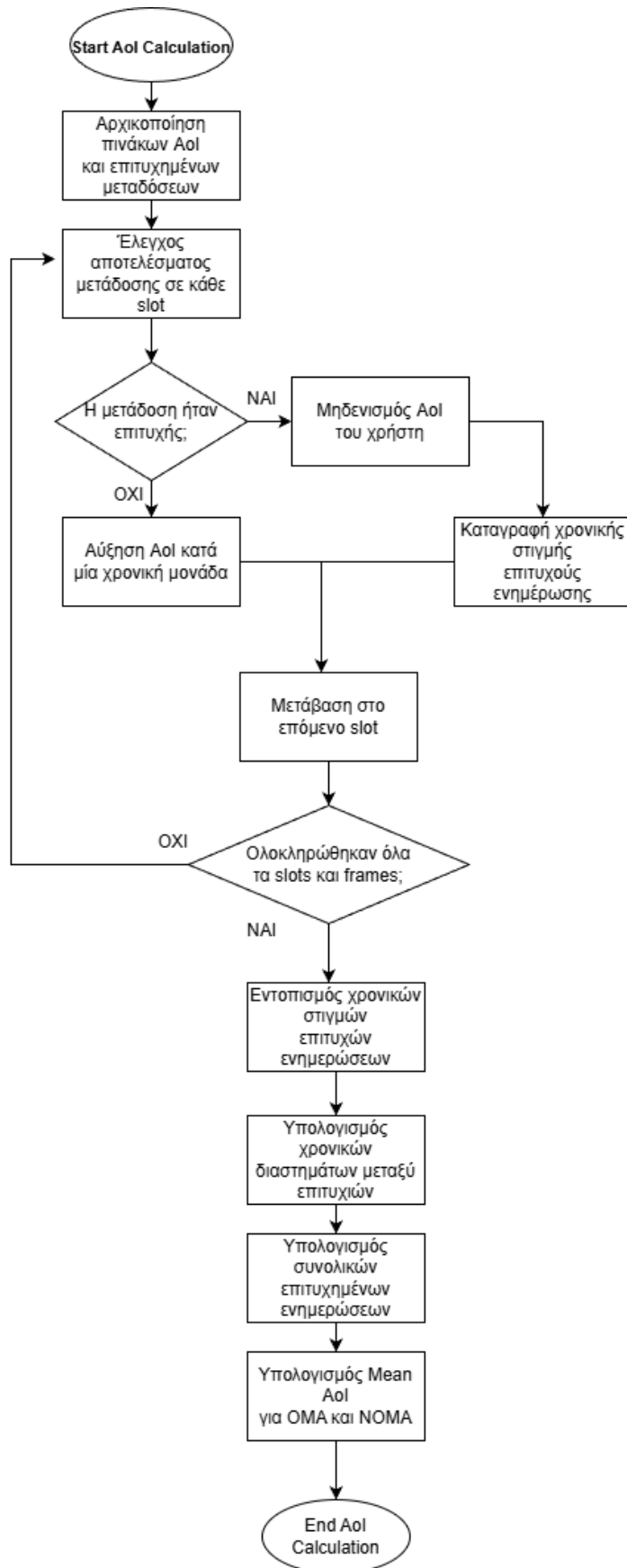
Στο Σχήμα 4 περιγράφεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας OMA.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας NOMA και της εφαρμογής SIC.



Σχήμα 4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας OMA



Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του Age of Information και των επιτυχημένων ενημερώσεων.

5.4.3 Διάγραμμα Ροής του AoI

Το βασικό στάδιο της αξιολόγησης της προσομοίωσης αποτελείται από τον υπολογισμό του Age of Information, καθώς μέσω αυτού αποτυπώνεται η χρονική φρεσκάδα της πληροφορίας που έχει λάβει ο σταθμός βάσης. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται τόσο για το σύστημα OMA όσο και για το σύστημα NOMA, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της απόδοσης των δύο τεχνικών.

Στην προσομοίωση, για κάθε χρήστη παρακολουθείται αν έχει πραγματοποιηθεί επιτυχής ενημέρωση σε κάθε χρονική θυρίδα. Σε περίπτωση που η μετάδοση είναι επιτυχής, τότε το AoI του αντίστοιχου χρήστη μηδενίζεται ενώ παράλληλα καταγράφεται η χρονική στιγμή της επιτυχούς ενημέρωσης. Αν η μετάδοση αποτύχει η δεν πραγματοποιηθεί μετάδοση, τότε το AoI αυξάνεται κατά μια χρονική μονάδα.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των frames, εντοπίζονται οι χρονικές στιγμές επιτυχών ενημερώσεων για κάθε χρήστη και υπολογίζονται τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών επιτυχημένων μεταδόσεων. Τα διαστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για τον τελικό υπολογισμό του μέσου AoI, καθώς και για την εξαγωγή των συνολικών επιτυχημένων ενημερώσεων.

Στο διάγραμμα ροής του υπολογισμού του AoI (Σχήμα 5) παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται η χρονική εξέλιξη της πληροφορίας του κάθε χρήστη. Η βασική λογική στηρίζεται στο εξής: όταν μια ενημέρωση παραληφθεί επιτυχώς από το σταθμό βάσης, το AoI του αντίστοιχου χρήστη μηδενίζεται και καταγράφεται η χρονική στιγμή αυτή. Αν δεν υπάρξει επιτυχής μετάδοση έχουμε αύξηση του AoI κατά μια μονάδα χρόνου.

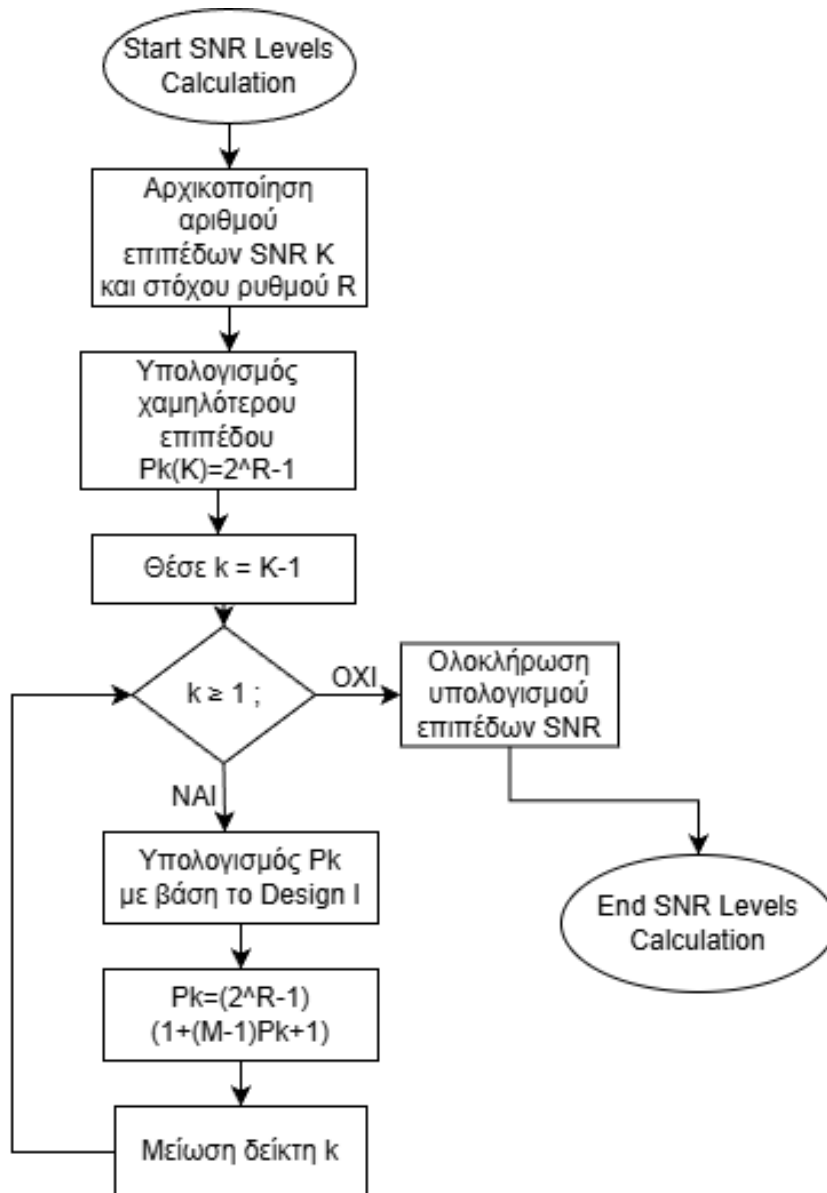
Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, οι χρονικές στιγμές επιτυχών ενημερώσεων χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν τα διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών επιτυχιών. Από τα διαστήματα αυτά προκύπτει το μέσο AoI για το σύστημα OMA και για το σύστημα NOMA. Με τον τρόπο αυτό, το διάγραμμα συνδέει άμεσα την επιτυχία ή την αποτυχία των μεταδόσεων με τη βασική αξιολόγηση της εργασίας.

Το εν λόγω διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.

5.4.4 Διάγραμμα Ροής Υπολογισμού Προκαθορισμένων Επιπέδων SNR

Η διαδικασία υπολογισμού των προκαθορισμένων επιπέδων SNR αποτελεί βασικό τμήμα του συστήματος, καθώς μέσω αυτής καθορίζονται τα επίπεδα ισχύος που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διαδικασία SIC. Η διαδικασία ξεκινά από το χαμηλότερο επίπεδο SNR, το οποίο υπολογίζεται με βάση το προκαθορισμένο R . Στη συνέχεια, τα υπόλοιπα επίπεδα υπολογίζονται από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο επίπεδο λαμβάνοντας υπόψη τις παρεμβολές από τα χαμηλότερα επίπεδα. Ο υπολογισμός των επιπέδων επηρεάζει άμεσα την απόδοση του SIC, την πιθανότητα επιτυχούς αποκωδικοποίησης και την συνολική τιμή του Age of Information.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6), παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των επιπέδων SNR με ένα από τα δύο Designs, το Design I. Η σωστή επιλογή των επιπέδων SNR είναι καθοριστική για την μείωση του Age of Information.



Σχήμα 6: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού των προκαθορισμένων επιπέδων SNR.

5.5 Αναλυτική Περιγραφή Υλοποίησης MATLAB

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα ροής που αποτυπώνουν τη συνολική λειτουργία της προσομοίωσης. Στην παρούσα ενότητα θα πραγματοποιηθεί αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης του συστήματος σε περιβάλλον MATLAB, με στόχο την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.

Ειδικότερα, αναλύεται η αρχικοποίηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος, η διαδικασία υπολογισμού των προκαθορισμένων επιπέδων SNR, η υλοποίηση των μηχανισμών OMA και NOMA, ο υπολογισμός του Age of Information και των τελικών μετρικών απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σύνδεση της θεωρητικής προσέγγισης με την υλοποίηση του μοντέλου. Ο κώδικας αναλύεται βήμα προς βήμα, διαχωρισμένος σε θεματικές ενότητες που αντιστοιχούν σε επιμέρους λειτουργικά υποσυστήματα. Κάθε block του κώδικα συνοδεύεται από επεξήγηση της λειτουργίας του και των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται.

Στο πρώτο τμήμα του κώδικα πραγματοποιείται η αρχικοποίηση του περιβάλλοντος MATLAB και των βασικών παραμέτρων της προσομοίωσης. Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στο αρχικό στάδιο του γενικού διαγράμματος ροής, όπου καθορίζονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος.

```
%%SYSTEM PARAMETRICS%
clear
clc
PmaxdB = 0; % 10, 20, 30
Pmax = 10^(0.1*PmaxdB);
% Pmax = 1; % = 30 dB SNR corresponding to max Tx power
K = 2; % power (SNR) levels
% K=4;
% K=8;
N = 10; % slots per frame
R = 1; % bits/s/Hz
% R=0.1
T = 1; % slot duration
NumofFrames = 20000;
M = [1,5:5:50];
```

Με τις εντολές `clear` και `clc` καθαρίζεται το περιβάλλον εκτέλεσης, ώστε η προσομοίωση να ξεκινά χωρίς αποθηκευμένες μεταβλητές ή προηγούμενα αποτελέσματα. Αυτό είναι σημαντικό, διότι ο κώδικας βασίζεται σε τυχαίες διαδικασίες και σε μεγάλους πίνακες αποθήκευσης, οπότε η ύπαρξη παλαιών τιμών θα μπορούσε να επηρεάσει την εκτέλεση.

Στη συνέχεια, ορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής μέσω της μεταβλητής P_{maxdB} . Επειδή η τιμή αυτή δίνεται σε dB, μετατρέπεται σε γραμμική μορφή με την εντολή: $P_{max} = 10^{(0.1 \times P_{maxdB})}$;

Η μεταβλητή P_{max} χρησιμοποιείται αργότερα για τον έλεγχο εφικτότητας της μετάδοσης. Κάθε φορά που ένας χρήστης επιλέγει ένα προκαθορισμένο επίπεδο SNR, ο χρήστης ελέγχει αν η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης μπορεί να υποστηριχθεί από τον περιορισμό P_{max} . Η μεταβλητή K καθορίζει τον αριθμό των διαθέσιμων προκαθορισμένων επιπέδων SNR. Στην παρούσα εκτέλεση ορίζεται ίση με 2 ή ίση με 4 ή με 8, άρα το σύστημα διαθέτει δύο ή τέσσερα ή οκτώ επίπεδα στα οποία μπορούν να αντιστοιχούν οι χρήστες. Η τιμή αυτή επηρεάζει άμεσα την πιθανότητα σύγκρουσης στο ίδιο επίπεδο όσο και την δυνατότητα πολλαπλών επιτυχημένων αποκωδικοποιήσεων μέσω SIC. Η μεταβλητή N ορίζει τον αριθμό των χρονικών θυρίδων ανά frame. Στην συγκεκριμένη περίπτωση κάθε frame αποτελείται από δέκα slots. Μέσα σε αυτά τα slots πραγματοποιούνται οι απόπειρες μετάδοσης των χρηστών, ενώ σε κάθε slot ενημερώνεται και η τιμή του AoI.

Ο ρυθμός μετάδοσης δίνεται από τη μεταβλητή R , η οποία έχει τιμή ίση με 1bit/s/Hz και σε κάποια παραδείγματα ίση με 0.5 bit/s/Hz. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των SNR επιπέδων και αργότερα στη συνθήκη επιτυχούς αποκωδικοποίησης. Η μεταβλητή εκφράζει τη διάρκεια κάθε χρονικής θυρίδας και παίζει ρόλο στον υπολογισμού του μέσου AoI. Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές του AoI δεν εκφράζονται ως αριθμός slots, αλλά μετατρέπονται σε χρονική κλίμακα.

Τέλος, η μεταβλητή `NumofFrames` καθορίζει τον συνολικό αριθμό των frames που θα εκτελεστούν. Στην περίπτωση αυτή, ισούται με 20000 και προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς μειώνει την επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων του καναλιού.

Το διάνυσμα M περιλαμβάνει τις διαφορετικές τιμές του αριθμού χρηστών που εξετάζονται στην προσομοίωση. Με τον τρόπο αυτό, ο κώδικας δεν αξιολογεί το σύστημα για μια μόνο τιμή χρηστών αλλά επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία για διαφορετικές τιμές του M . Έτσι, μελετάται η μεταβολή της απόδοσης του OMA και του NOMA όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών.

Μετά τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων του συστήματος, ο κώδικας εισέρχεται στη διαδικασία αρχικοποίησης των δομών δεδομένων που απαιτούνται για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο στάδιο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύονται οι ενδιάμεσες πληροφορίες και τα τελικά αποτελέσματα του αλγορίθμου.

```
%Initialization of Data Structures
for jjj = 1:length(M) % loop για arithmo users
    M_current = M(jjj);
    OAOIs = zeros(NumofFrames,M_current);
    NAOIs = zeros(NumofFrames,M_current);
    Ptx = min(K/M_current,1); % NOMA users

    Pk = zeros(1,K);

    UserFrames = zeros(NumofFrames,M_current);
    UserFramesOMA = zeros(NumofFrames,M_current);

    OMAUserInstAoI = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
    NOMAUserInstAoI = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);

    OMAUserInstSuc = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
    NOMAUserInstSuc = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
```

Η προσομοίωση εκτελείται για διαφορετικά σενάρια αριθμού χρηστών, όπως ήδη αναφέρθηκε πριν, μέσω του διανύσματος M . Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο εξωτερικός επαναληπτικός βρόχος: `for jjj = 1:length(M)` μέσω του οποίου κάθε τιμή του διανύσματος εξετάζεται ως ανεξάρτητο σενάριο λειτουργίας του συστήματος. Σε κάθε νέα επανάληψη, η μεταβλητή $M_current = M(jjj)$; αντιστοιχεί στον τρέχοντα αριθμό χρηστών που εξετάζεται.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση βασικών πινάκων αποθήκευσης. Οι πίνακες $OAOIs$ και $NAOIs$ είναι απαραίτητοι για την αποθήκευση των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των διαδοχικών ενημερώσεων για τα συστήματα OMA και NOMA αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένοι πίνακες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του μέσου AoI. Η πιθανότητα απόπειρας μετάδοσης του συστήματος NOMA υπολογίζεται μέσω της εντολής: `Ptx = min(K/M_current,1);`. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζει την πιθανότητα μετάδοσης ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών.

Στη συνέχεια, αρχικοποιείται ο πίνακας $P_k = zeros(1,K)$; ο οποίος αποθηκεύει τα προκαθορισμένα επίπεδα ισχύος του συστήματος NOMA. Για την καταγραφή της κατάστασης κάθε χρήστη μέσα σε κάθε frame έχουμε τους πίνακες $UserFrames$ και $UserFramesOMA$. Μέσω αυτών, γνωρίζουμε αν ο χρήστης έχει ήδη πραγματοποιήσει επιτυχή ενημέρωση στο τρέχον frame.

Για να παρατηρούμε την στιγμιαία εξέλιξη του Age of Information έχουμε τους πίνακες $OMAUserInstAoI$ και $NOMAUserInstAoI$, οι οποίοι αποθηκεύουν την τιμή του AoI για κάθε χρήστη σε κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, οι πίνακες $OMAUserInstSuc$ και $NOMAUserInstSuc$ χρησιμοποιούνται

για την καταγραφή των επιτυχημένων ενημερώσεων. Μέσω των πινάκων αυτών, αποθηκεύονται οι χρονικές στιγμές στις οποίες ένας χρήστης ολοκλήρωσε μια επιτυχή μετάδοση.

Στο επόμενο τμήμα του κώδικα γίνεται ο υπολογισμός των προκαθορισμένων επιπέδων SNR, τα οποία χρησιμοποιούνται από το σύστημα NOMA κατά τη διαδικασία επιλογής επιπέδου ισχύος.

```
% Predefined SNR levels calculation
Pk = zeros(1,K);
Pk(K) = 2^R-1;
for kk = K-1:-1:1
    Pk(kk) = (2^R-1)*(1+(M_current-1)*Pk(kk+1)); %design I
    % Pk(kk) = (2^R-1)*(1+Pk(kk+1)); % design II
end
```

Αρχικά, ο πίνακας Pk έχει διαστάσεις 1 , K έτσι ώστε να αποθηκεύει τα επίπεδα SNR που είναι διαθέσιμα στο σύστημα. Ο υπολογισμός ξεκινά από το τελευταίο επίπεδο δηλαδή από το Pk(K), το οποίο ορίζεται ως $2^R - 1$. Στη συνέχεια, ο βρόχος for kk = K-1:-1:1 εκτελεί αντίστροφα από το επίπεδο K-1 μέχρι το επίπεδο 1. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε υψηλότερο επίπεδο SNR υπολογίζεται με βάση το αμέσως χαμηλότερο επίπεδο. Στην ενεργή γραμμή του κώδικα εφαρμόζεται το Design I:

$$P_k = (2^R - 1)(1 + (M - 1)P_{k+1}). \quad (5.5)$$

Με αυτόν τον τρόπο τα επίπεδα SNR δεν είναι σταθερά για όλα τα σενάρια, αλλά προσαρμόζονται ανάλογα με το πλήθος των χρηστών που συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Σε σχόλιο υπάρχει και το Design II, το οποίο ενεργοποιείται όταν θέλουμε να εξετάσουμε μια εναλλακτική σχεδίαση των προκαθορισμένων επιπέδων SNR. Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου τμήματος του κώδικα είναι ένας υπολογισμένος πίνακας, ο οποίος έχει τα διαθέσιμα επίπεδα SNR για το τρέχον σενάριο χρηστών. Ο συγκεκριμένος πίνακας, στη συνέχεια, δίνει την δυνατότητα στους NOMA χρήστες να επιλέγουν τυχαία ένα από τα διαθέσιμα επίπεδα κατά την προσπάθεια μετάδοσης.

Στο επόμενο κομμάτι αυτό ξεκινά η βασική διαδικασία της προσομοίωσης. Ο κώδικας εκτελείται κατ' επανάληψη για όλα τα frames και για όλα τα slots του κάθε frame.

```
%% Main Simulation Loop%%
for framenummer = 1:NumofFrames
    OMAUserInstAoI(2,:) = 1;
    NOMAUserInstAoI(2,:) = 1;
    for ii = 1:N
        InstTime = (framenummer-1)*N + ii;
        UsersOMA = zeros(4,M_current);
        Users = zeros(4,M_current);
```

Ο εξωτερικός βρόχος εκτελεί την προσομοίωση για τον συνολικό αριθμό των frames που έχουν οριστεί προηγουμένως. Το κάθε frame αποτελεί μια ανεξάρτητη χρονική περίοδο μέσα στην οποία οι χρήστες μπορούν να επιχειρήσουν μετάδοση. Στη συνέχεια αρχικοποιούνται οι τιμές του στιγμιαίου AoI για το OMA και το NOMA. Ο εσωτερικός βρόχος διατρέχει όλες τις θυρίδες του frame. Πολύ σημαντική είναι η μεταβλητή InstTime = (framenummer-1)*N + ii;, η οποία χρησιμοποιείται αργότερα για την καταγραφή των επιτυχημένων ενημερώσεων και την ενημέρωση του στιγμιαίου AoI. Οι πίνακες: UsersOMA = zeros(4,M_current);, Users = zeros(4,M_current); δημιουργούνται

με σκοπό την προσωρινή αποθήκευση των χαρακτηριστικών των χρηστών. Ο πρώτος πίνακας αφορά τη διαδικασία OMA και ο δεύτερος αφορά το NOMA. Οι δύο τεχνικές παρουσιάζονται παράλληλα. Το συγκεκριμένο block εξετάζει διαδοχικά κάθε frame και κάθε slot. Η συνέχεια του βασικού block είναι η εξής:

```

for kk = 1:M_current
    if UserFramesOMA(framenumber,kk) == 1
        OMAUserInstAoI(InstTime+1,kk) = 0;
    else
        OMAUserInstAoI(InstTime+1,kk) =
OMAUserInstAoI(InstTime,kk)+1;
    end
    if UserFrames(framenumber,kk) == 1
        NOMAUserInstAoI(InstTime+1,kk) =0;
    else
        NOMAUserInstAoI(InstTime+1,kk)
=NOMAUserInstAoI(InstTime,kk)+1;
    end
    Users(2,kk) = abs((randn + 1i*randn)/sqrt(2))^2;
    UsersOMA(2,kk) = Users(2,kk);
    if UserFrames(framenumber,kk) == 0
        txprob = rand;
        if txprob <= Ptx
            Users(1,kk) = Pk(randi(K));
            if Users(1,kk)/Users(2,kk) <= Pmax
                Users(3,kk) = 1;
            end
        end
    end
    SuccessfulOMA = sum(UserFramesOMA(framenumber,:));
    if UserFramesOMA(framenumber,kk) == 0
        txprob = rand;
        if txprob <= 1/(M_current-SuccessfulOMA)
            UsersOMA(1,kk) = Pk(end);
            if UsersOMA(1,kk)/UsersOMA(2,kk) <= Pmax/1.85
                UsersOMA(3,kk) = 1;
            end
        end
    end
end
end
end

```

Πραγματοποιείται η επεξεργασία κάθε χρήστη ξεχωριστά μέσα στο συγκεκριμένο slot. Στο block αυτό ενημερώνεται το στιγμιαίο AoI και εξετάζεται αν ο κάθε χρήστης αν θα επιχειρήσει μετάδοση. Ο βρόχος for $kk = 1:M_current$ διατρέχει όλους τους χρήστες. Αρχικά εξετάζει αν ο κάθε χρήστης έχει ήδη επιτυχημένη ενημέρωση στο συγκεκριμένο frame. Ο έλεγχος αυτός γίνεται ξεχωριστά για το OMA και το NOMA μέσω δύο πινάκων. Αν ένας χρήστης έχει ήδη επιτυχή ενημέρωση, τότε η τιμή του αντίστοιχου στιγμιαίου AoI μηδενίζεται, αντιθέτως αυξάνεται κατά μια μονάδα χρόνου.

Η εντολή $Users(2,kk) = \text{abs}((\text{randn} + 1i*\text{randn})/\text{sqrt}(2))^2$; μας δίνει το στιγμιαίο κέρδος του χρήστη, το οποίο λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής. Μέσω της τυχαίας μεταβλητής $txprob$ ο κάθε χρήστης αποφασίζει τυχαία αν θα μεταδώσει. Αν η μεταβλητή αυτή είναι $\leq P_{TX}$ τότε επιλέγει ένα από τα τυχαία προκαθορισμένα επίπεδα SNR.

Επίσης, πραγματοποιείται έλεγχος αν είναι εφικτή η μετάδοση, δηλαδή αν η απαιτούμενη ισχύς δεν υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ. Αν αυτά ισχύουν μέσω της εντολής $Users(3,kk) = 1$;

ο χρήστης θεωρείται ενεργός. Όταν έχουμε φτάσει σε αυτό το σημείο του κώδικα γνωρίζουμε ποιοι χρήστες επιχειρούν μετάδοση και με ποιο SNR.

Στη συνέχεια με παρόμοιο τρόπο πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία για το σύστημα OMA. Ορίζεται πάλι ο αριθμός των χρηστών που έχουν επιτυχημένη ενημέρωση μέσω της εντολής `SuccessfulOMA = sum(UserFramesOMA(framenumber,:));`. Σε αντίθεση με το NOMA, εδώ δεν μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Στη διαδικασία αυτή η απόπειρα πιθανότητας μετάδοσης καθορίζεται από την εντολή `txprob <= 1/(M_current-SuccessfulOMA)`, με σκοπό να διατηρηθεί περίπου μια απόπειρα μετάδοσης ανά χρονική θυρίδα. Εφόσον επιλέξει ο χρήστης να μεταδώσει του αντιστοιχίζεται ένα επίπεδο ισχύος (`UsersOMA(1,kk) = Pk(end);`). Συνολικά, για το OMA, όπως και για το NOMA, καθορίζει ποιοι χρήστες είναι υποψήφιοι για μετάδοση στην συγκεκριμένη χρονική θυρίδα και με τι πιθανότητα.

```
%% OMA
[TxUsersIndOMA,Ind] = find(UsersOMA(3,:)==1);
if length(TxUsersIndOMA) == 1
    UserFramesOMA(framenumber,Ind) = 1;
    OMAUserInstSuc(InstTime,Ind) = 1;
    % OMAUserInstAoI(InstTime+1,Ind) = 0;
end
```

Στο τμήμα αυτό γίνεται ο έλεγχος επιτυχίας για το σύστημα OMA. Έχει προηγηθεί η διαδικασία επιλογής των χρηστών που επιχειρούν μετάδοση και ο κώδικας τους εντοπίζει από τον πίνακα `UsersOMA`. Αφού έχουν εντοπιστεί οι χρήστες και έχουν περάσει τον έλεγχο ισχύος, η τρίτη γραμμή του πίνακα λαμβάνει την τιμή 1 για τους χρήστες που μπορούν να μεταδώσουν.

Μέσω της συνθήκης: `if length(TxUsersIndOMA) == 1` ελέγχεται αν υπάρχει ακριβώς ένας χρήστης στη συγκεκριμένη χρονική θυρίδα. Αν δεν υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης ή αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας, δεν καταγράφεται επιτυχία. Όταν υπάρχει ακριβώς ένας χρήστης, η επιτυχής ενημέρωση καταγράφεται με την εντολή: `UserFramesOMA(framenumber,Ind) = 1;`.

Παράλληλα, η επιτυχής μετάδοση καταγράφεται και στον πίνακα: `OMAUserInstSuc(InstTime,Ind) = 1;`, ο οποίος αποθηκεύει τη χρονική στιγμή στην οποία πραγματοποιήθηκε η επιτυχής ενημέρωση. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται αργότερα για τον υπολογισμό των χρονικών αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών επιτυχημένων ενημερώσεων.

Στο επόμενο κομμάτι του κώδικα υλοποιείται ο βασικός μηχανισμός λειτουργίας του NOMA, δηλαδή η διαδικασία αποκωδικοποίησης των ταυτόχρονων μεταδόσεων μέσω της τεχνικής `Successive Interference Cancellation`.

```
%% NOMA
TxUsersInd = find(Users(3,:)==1);
if ~isempty(TxUsersInd)
    TxUsers = Users(:,TxUsersInd);
    Pusers = TxUsers(1,:);
    [Psorted,InitialInd] = sort(Pusers,'descend');
    Rx = 1;
    for kk = 1:length(Psorted)-1
        if Psorted(kk) == Psorted(kk+1)
            Rx = 0; break;
        end
        Interf = sum(Psorted(kk+1:end));
```

```

Rcurrent = log2(1+Psorted(kk)/(1+Interf));
if Rcurrent >= R
    UserFrames(framenumber,TxUsersInd(InitialInd(kk))) =
1;
    NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(kk)))
= 1;
    NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(kk))) =0;
else
    Rx = 0;
end
end
if length(Psorted) == 1
    UserFrames(framenumber,TxUsersInd(InitialInd(1))) = 1;
    NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(1))) = 1;
    NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(1))) =
0;
elseif Rx~=0
    UserFrames(framenumber,TxUsersInd(InitialInd(kk+1))) = 1;
    NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(kk+1))) =
1;
    NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(kk+1)))
= 0;
end
end
end
end
end

```

Το συγκεκριμένο block αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο της προσομοίωσης. Για αρχή εντοπίζονται οι ενεργοί χρήστες στο συγκεκριμένο slot. Μέσω του πίνακα *Users* βλέπουμε τους χρήστες που αποφάσισαν να μεταδώσουν, το επίπεδο SNR που επέλεξαν και αν πέρασαν επιτυχώς από τον έλεγχο ισχύος. Αν δεν υπάρχει κανένας ενεργός χρήστης, η διαδικασία παραλείπεται.

Στη συνέχεια για τους ενεργούς χρήστες, γίνεται εξαγωγή των επιπέδων ισχύος μέσω της εντολής: *Pusers = TxUsers(1,:)*; και μετά ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά. Η ταξινόμηση είναι βασικό κομμάτι της διαδικασίας, διότι η διαδικασία SIC ξεκινά πάντοτε από τον ισχυρότερο προς τον ασθενέστερο χρήστη. Κάθε επιτυχώς αποκωδικοποιημένο σήμα αφαιρείται από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα. Με τη μεταβλητή *Rx = 1*; αν σε κάποιο σημείο αποτύχει η αποκωδικοποίηση, η μεταβλητή αυτή μεταβάλλεται με σκοπό την διακοπή της περαιτέρω διαδικασίας.

Ο βασικός βρόχος ξεκινάει με την εντολή: *for kk = 1:length(Psorted)-1*, ο οποίος εξετάζει τον κάθε χρήστη διαδοχικά ξεκινώντας όμως από τον ισχυρότερο. Πρώτα απ' όλα, γίνεται έλεγχος αν δύο ή περισσότεροι χρήστες έχουν επιλέξει το ίδιο επίπεδο SNR. Αν συμβαίνει αυτό έχουμε διακοπή της διαδικασίας, διότι δεν καθίσταται δυνατή η αποκωδικοποίηση των συγκεκριμένων χρηστών.

Αν δεν υπάρχει σύγκρουση, ξεκινά ο υπολογισμός της συνολικής παρεμβολής από το χαμηλότερο επίπεδο ισχύος: *Interf = sum(Psorted(kk+1:end))*; Και υπολογίζεται ο στιγμιαίος ρυθμός *Rcurrent*. Αν ο ρυθμός αυτός είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το αρχικό *R* έχουμε επιτυχή αποκωδικοποίηση του εκάστοτε χρήστη. Όταν συμβεί αυτό, ενημερώνονται τα αντίστοιχα arrays ώστε να καταγραφεί η επιτυχής ενημέρωση, η χρονική στιγμή και ο μηδενισμός του στιγμιαίου AoI.

Στο τελευταίο κομμάτι του συγκεκριμένου block, εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Η μια αφορά την περίπτωση όπου υπάρχει μόνο ένας ενεργός χρήστης, ο οποίος αποκωδικοποιείται άμεσα χωρίς να

χρειάζεται διαδικασία αποκωδικοποίησης και η άλλη αφορά την επιτυχή ολοκλήρωση, όπου καταγράφεται και για τον τελευταίο χρήστη που απομένει.

```
%% ypologismos, AoI
    OAOI = OMAUserInstAoI;
    NAOI = NOMAUserInstAoI;
    OMAUserInstAoI(1,:)=[];
    NOMAUserInstAoI(1,:)=[];
    OSucInstants = zeros;
    NSucInstants = zeros;
```

Στο παραπάνω σημείο πραγματοποιείται η προετοιμασία των δεδομένων που σχετίζονται με τον υπολογισμό του Age of Information. Οι πίνακες OMAUserInstAoI και NOMAUserInstAoI ενημερώνονται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και περιέχουν την χρονική εξέλιξη του στιγμιαίου AoI για κάθε χρήστη. Αφαιρείται η πρώτη γραμμή των πινάκων, διότι αντιστοιχίζεται στην αρχική κατάσταση του συστήματος πριν την πραγματική εξέλιξη της προσομοίωσης. Τέλος, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές OSucInstants, NSucInstants, με σκοπό στην συνέχεια του κώδικα να αποθηκεύσουν της χρονικές στιγμές, στις οποίες έχουμε επιτυχή ενημέρωση για τα δύο συστήματα.

Το τελευταίο κομμάτι του κώδικα που θα ακολουθήσει μας δίνει τα αποτελέσματα, τα οποία σκοπός μας είναι να πάρουμε και σχετίζεται με τον τελικό υπολογισμό των μετρικών απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση των δύο συστημάτων OMA και NOMA.

```
%%Performance Metrics Calculation%%

for kk = 1:M_current
    OSucInstants = find(OMAUserInstSuc(:,kk)==1);
    Os = [OSucInstants(1);diff(OSucInstants)];
    TotalSuccessfulOMA(kk) = length(Os);
    OAOIs(1:length(Os),kk) = Os;
end

for kk = 1:M_current
    NSucInstants = find(NOMAUserInstSuc(:,kk)==1);
    Ns = [NSucInstants(1);diff(NSucInstants)];
    TotalSuccessfulNOMA(kk) = length(Ns);
    NAOIs(1:length(Ns),kk) = Ns;
end

MeanOSuccess(jjj) = sum(TotalSuccessfulOMA)/(M_current*NumofFrames);
MeanNSuccess(jjj) = sum(TotalSuccessfulNOMA)/(M_current*NumofFrames);

Mean_OAOINew(jjj) = sum(sum(OAOIs))*T/sum(TotalSuccessfulOMA);
Mean_NAOINew(jjj) = sum(sum(NAOIs))*T/sum(TotalSuccessfulNOMA);
end

Mean_OAOI = Mean_OAOINew;
Mean_NAOI = Mean_NAOINew;
```

Αρχικά, η διαδικασία εφαρμόζεται για το σύστημα OMA. Για κάθε χρήστη kk εντοπίζονται όλες οι χρονικές στιγμές στις οποίες ο χρήστης έχει ολοκληρώσει επιτυχή μετάδοση μέσω της εντολής: find(OMAUserInstSuc(:,kk)==1);. Ο πίνακας OMAUserInstSuc υπάρχει για να μας δίνει την

συγκεκριμένη χρονική θέση στην οποία υπήρξε επιτυχής ενημέρωση. Στην ουσία, λειτουργεί δίνοντας μας την τιμή 1, στα σημεία των ενημερώσεων αυτών.

Η μεταβλητή `Os` αποθηκεύει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών επιτυχημένων ενημερώσεων. Για να μην γίνεται μπέρδεμα, η πρώτη επιτυχής χρονική στιγμή τοποθετείται ξεχωριστά, ενώ για τις υπόλοιπες χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `diff`. Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τις διαφορές μεταξύ συνεχόμενων επιτυχιών, έτσι ώστε ο κώδικας να καταφέρνει να εξετάζει όχι μόνο το πόσες επιτυχίες πραγματοποιήθηκαν αλλά και το πόσος χρόνος μεσολάβησε ανάμεσα από αυτές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον υπολογισμό του `AoI`, γιατί εξαρτάται από την συχνότητα με την οποία ανανεώνεται η ενημέρωση κάθε χρήστη.

Στη μεταβλητή `TotalSuccessfulOMA(kk)` αποθηκεύεται ο αριθμός των επιτυχημένων ενημερώσεων του κάθε χρήστη και τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα αποθηκεύονται στον πίνακα `OAoIs`.

Για το σύστημα `NOMA` ακολουθείται αντίστοιχη διαδικασία με τη χρήση των μεταβλητών `NOMAUserInstSuc`, `NSucInstants`, `Ns`, `TotalSuccessfulNOMA` και `NaoIs`. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η σύγκριση αυτών των δύο συστημάτων γίνεται με τον ίδιο τρόπο και τους ίδιους υπολογισμούς. Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπολογισμοί των επιτυχημένων ενημερώσεων για τα δύο συστήματα. Μέσω των μεταβλητών `MeanOSuccess`, `MeanNSuccess` διατηρούμε το συνολικό πλήθος επιτυχημένων ενημερώσεων παίρνοντας το γινόμενο του αριθμού χρηστών και του συνολικού αριθμού των frames. Το γινόμενο αυτό εκφράζει την μέση επιτυχία ανά χρήστη και ανά frame.

Για τον υπολογισμό του Age of Information για τα συστήματα `OMA` και `NOMA` υπάρχουν οι μεταβλητές `Mean_OAoINew` και `Mean_NAoINew`. Ο υπολογισμός του βασίζεται στο άθροισμα των χρονικών διαστημάτων που έχουν αποθηκευτεί στους πίνακες `OAoIs` και `NaoIs`, πολλαπλασιασμένα με τη διάρκεια `T` κάθε slot, κανονικοποιημένο ως προς τον συνολικό αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει το μέσο `AoI` που διαθέτει ο σταθμός βάσης για κάθε σύστημα. Με την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου block, ο κώδικας έχει εξάγει τις δύο βασικές κατηγορίες αποτελεσμάτων, δηλαδή τον αριθμό επιτυχημένων ενημερώσεων και την μέση τιμή του `AoI`.

Στο τελευταίο τμήμα του κώδικα πραγματοποιείται η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην προσομοίωση.

```
%%Graphical Representation of Results%%
figure;
plot(M,Mean_OAoINew,'-s','LineWidth',2);
hold on;
plot(M,Mean_NAoINew,'-o','LineWidth',2);
xlabel('Number of Users (M)');
ylabel('Age of Information');
legend('OMA','NOMA');
grid on;
title('AoI vs users ');
```

Σκοπός είναι να απεικονιστούν στο ίδιο γράφημα οι δύο καμπύλες, ώστε να είναι άμεση η μεταξὺ τους σύγκριση. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τον αριθμό χρηστών M , ενώ ο κατακόρυφος αντιστοιχεί στην τιμή του Age Of Information. Η χρήση υπομνήματος επιτρέπει τη διάκριση των δύο τεχνικών και το πλέγμα ως στόχο του έχει την διευκόλυνση της ανάγνωσης των δύο τιμών.

Το συγκεκριμένο τμήμα δεν αποτελεί κάποιο νέο κομμάτι υπολογισμού αλλά χρησιμοποιείται έτσι ώστε να αξιοποιηθούν οι τιμές που εξήχθησαν προηγουμένως. Η αναλυτική ερμηνεία των διαγραμμάτων και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται σε επόμενο κεφάλαιο.

5.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB, με στόχο την σύγκριση και την αξιολόγηση των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης OMA και NOMA ως προς το Age of Information.

Αρχικά, καθορίστηκαν οι βασικοί παράμετροι του συστήματος και το περιβάλλον προσομοίωσης. Παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα ροής, χωρισμένα σε τμήματα ανάλογα με τα τμήματα της προσομοίωσης, και οι διαδικασίες που αφορούν τη λειτουργία των συστημάτων μέχρι να καταλήξουμε στον τελικό υπολογισμό του Age of Information.

Επίσης, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αναλυτική περιγραφή της δομής του κώδικα. Στην αρχή παρουσιάστηκε η διαδικασία αρχικοποίησης των παραμέτρων, ο υπολογισμός των προκαθορισμένων επιπέδων SNR, η προσομοίωση της συμπεριφοράς των χρηστών στο επίπεδο κάθε χρονικής θυρίδας και ο τελικός υπολογισμός των μετρικών απόδοσης. Η συγκεκριμένη ανάλυση κατέστησε σαφή την αντιστοίχιση θεωρητικού μοντέλου και πρακτικής προσομοίωσης.

Μετά την ολοκλήρωση του παρόντος κεφαλαίου διαμορφώθηκε πλήρως το υπολογιστικό πλαίσιο της εργασίας, πάνω στο οποίο βασίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν. Τα αποτελέσματα αυτά θα συνοδεύονται με συγκριτική ανάλυση και σχολιασμό.

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση της προσομοίωσης του εξεταζόμενου συστήματος σε περιβάλλον MATLAB. Στόχος της ανάλυσης είναι η σύγκριση και η αξιολόγηση των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης Orthogonal Multiple Access (OMA) και Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) υπό διαφορετικά σενάρια. Πιο αναλυτικά, εξετάζεται η επίδραση του αριθμού των διαθέσιμων προκαθορισμένων επιπέδων SNR, της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύς εκπομπής και της διαφορετικής σχεδίασης των επιπέδων ισχύος στη συνολική απόδοση του συστήματος και στην τιμή του Age of Information.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για διαφορετικές συνθήκες ώστε να καταλήξουμε στην αξιολόγηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων που αποτυπώνουν την μεταβολή του AoI σε σχέση με τον αριθμό χρηστών για διαφορετικές περιπτώσεις και μεταβλητές. Μέσα από την ανάλυση θα γίνει προσπάθεια για εξαγωγή συμπερασμάτων, τα οποία αφορούν το κατά πόσο μπορεί το NOMA να βελτιώσει την απόδοση του AoI, καθώς και υπό ποιες συνθήκες λειτουργεί πιο αποδοτικά.

6.2 Επίδραση του Αριθμού Επιπέδων SNR

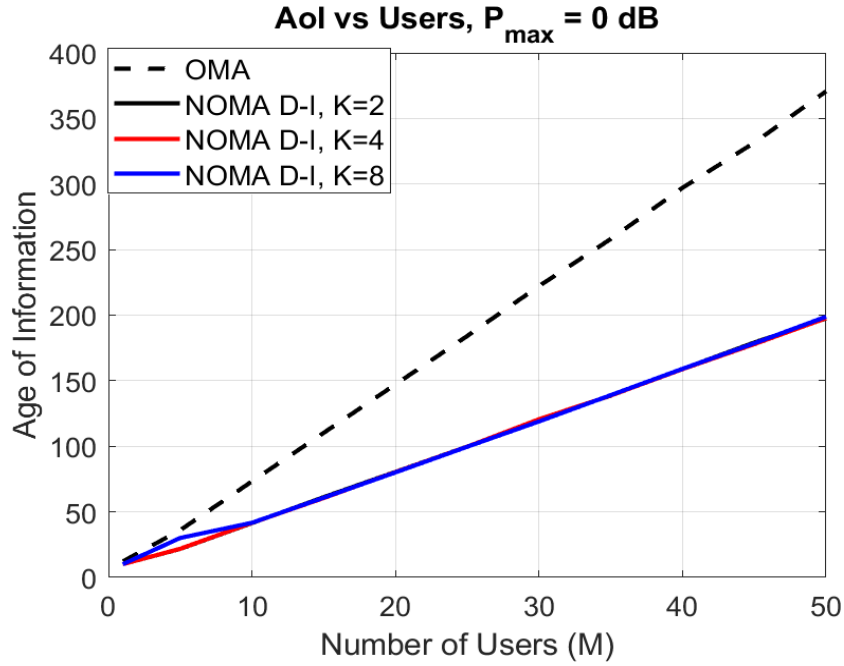
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση του αριθμού των διαθέσιμων προκαθορισμένων επιπέδων SNR στην απόδοση του συστήματος ως προς το Age of Information υπό συνθήκες αυστηρού περιορισμού της επιτρεπτής ισχύος μετάδοσης. Χρησιμοποιείται η περίπτωση του $P_{max} = 0 \text{ dB}$ και αξιολογείται η συμπεριφορά των δύο προτεινόμενων σχεδιάσεων Design I, Design II.

Θεωρητικά, αναμένεται βελτίωση της απόδοσης του NOMA με την αύξηση των διαθέσιμων επιπέδων ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι η ύπαρξη παραπάνω επιπέδων περιορίζει την πιθανότητα επιλογής του ίδιου επιπέδου από πολλούς χρήστες. Ωστόσο, αυτό που προκύπτει από τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν, υπό αυστηρούς ενεργειακούς περιορισμούς η παραπάνω συμπεριφορά δεν επιβεβαιώνεται στον ίδιο βαθμό και για τις δύο σχεδιάσεις.

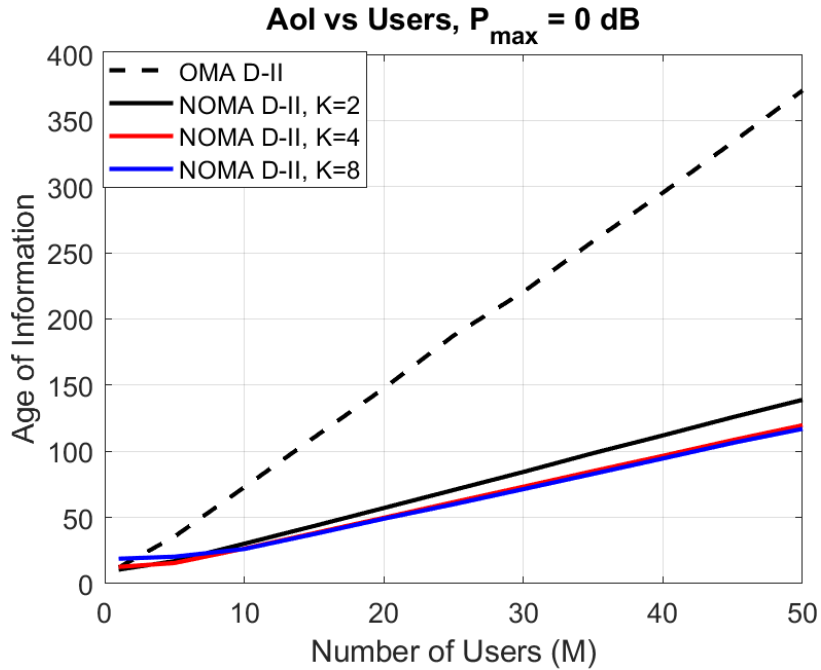
Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, οι βασικές παράμετροι του συστήματος διατηρούνται σταθερές ώστε να εξεταστεί η επίδραση των επιπέδων SNR. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός χρονικών θυρίδων ανά frame ισούται με $N = 10$, η διάρκεια της χρονικής θυρίδας ίση με $T = 1$, ο ρυθμός μετάδοσης ίσος με $R = 1 \text{ bits/s/Hz}$ και ο αριθμός των χρηστών κυμαίνεται στο εύρος $M = 1$ έως $M = 50$.

Για το σύστημα NOMA αξιολογούνται διαφορετικές τιμές του K ($K = 2, 4, 8$), ενώ το σύστημα OMA χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συστήματος όταν εφαρμόζεται το Design I.



Σχήμα 7: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{\max}=0\text{dB}$ με χρήση Design I και διαφορετικό αριθμό επιπέδων SNR ($K = 2, K = 4, K = 8$).



Σχήμα 8: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{\max} = 0\text{dB}$ με χρήση της σχεδίασης Design II και διαφορετικό αριθμό επιπέδων SNR ($K = 2, K = 4, K = 8$).

Παρατηρείται αρχικά, πως η αύξηση του αριθμού χρηστών οδηγεί σε αύξηση του Age of Information τόσο για το OMA όσο και για το NOMA. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, διότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα αποτυχημένων προσπαθειών μετάδοσης.

Παράλληλα, παρατηρείται πως το NOMA, σε όλο το εύρος τιμών του αριθμού χρηστών, έχει καλύτερη εικόνα από το OMA. Αυτό οφείλεται στην δυνατότητα του NOMA να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς χρήστες μέσω εφαρμογής SIC, σε αντίθεση με το OMA, όπου κάθε χρήστης εκπέμπει ανά μια χρονική στιγμή, με τις κατάλληλες προϋποθέσεις, αλλά ποτέ πάνω από ένας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση του αριθμού επιπέδων SNR στο σύστημα NOMA. Η αύξηση του K από 2 σε 4 και σε 8 δεν οδηγεί σε ουσιαστική διαφοροποίηση της απόδοσης, καθώς παρατηρείται ότι οι αντίστοιχες καμπύλες εμφανίζονται σχεδόν ταυτόσημες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι υπό τόσο αυστηρό περιορισμό ισχύος, ο αριθμός του K δεν αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα στην απόδοση του συστήματος.

Το επιτρεπόμενο όριο μετάδοσης ($P_{max} = 0dB$) είναι ιδιαίτερα περιοριστικό, με αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσοστό αριθμού χρηστών να μην πληροί την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης. Παρότι, στη θεωρία υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα επίπεδα ισχύος, ουσιαστικά στην πράξη δεν αξιοποιούνται πλήρως. Στη συνέχεια (Σχήμα 8), εξετάζεται η αντίστοιχη συμπεριφορά του συστήματος για το Design II με τις ίδιες παραμέτρους προσομοίωσης.

Σε αντίθεση με το Σχήμα 7, εδώ παρατηρείται μεγαλύτερη επίδραση του αριθμού επιπέδων SNR. Συγκεκριμένα, η μετάβαση από $K = 2$ σε $K = 4$ οδηγεί σε μείωση του Age of Information, όπως αναμενόταν.

Συγκεκριμένα, η μετάβαση από $K = 2$ σε $K = 4$ οδηγεί σε μείωση του Age of Information, όπως αναμενόταν. Η αύξηση του αριθμού επιπέδων SNR στο Design II, επιτρέπει καλύτερο διαχωρισμό των χρηστών στο επίπεδο ισχύος, μειώνοντας την πιθανότητα επιλογής του ίδιου επιπέδου άρα και την συνολική βελτίωση του Age of Information. Το γεγονός αυτό όμως, δεν συνεπάγεται ότι κάθε αύξηση του K μας οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα.

Παρατηρείται ότι η αύξηση του K στην τιμή 8 δεν οδηγεί σε επιπλέον βελτίωση, αλλά προσεγγίζει εκ νέου την τιμή $K = 2$. Μια ερμηνεία για το γεγονός αυτό είναι ότι, ενώ η αύξηση του K βελτιώνει σε θεωρητικό επίπεδο τον διαχωρισμό των χρηστών στο επίπεδο ισχύος, η υπερβολική αύξηση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες παρεμβολές και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα της διαδικασίας SIC. Συνεπάγεται πως, η αύξηση του K δεν σημαίνει πάντα αναλογική βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος.

Παρά την συγκεκριμένη συμπεριφορά για $K = 8$, η συνολική εικόνα του Σχήματος 8 διαφοροποιείται ουσιαστικά από το Σχήμα 7. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στη διαφορετική μαθηματική διαμόρφωση της συγκεκριμένης σχεδίασης, καθώς στο Design II τα προκαθορισμένα επίπεδα ισχύος δεν εξαρτώνται άμεσα από τον αριθμό χρηστών, γεγονός που οδηγεί σε πιο ήπια κλιμάκωση επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων SNR επιπέδων ακόμη και σε πιο αυστηρές συνθήκες.

6.3 Επίδραση της παραμέτρου P_{max}

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος εκπομπής P_{max} στην απόδοση του συστήματος ως προς το Age of Information. Για τον σκοπό αυτό, συγκρίνονται τα σχήματα OMA, NOMA Design I και NOMA Design II για δύο διαφορετικές τιμές του K ($K = 2, K = 4$), ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος μένουν σταθερές. Όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση έχουμε τις τιμές $N = 10, T = 1, R = 1$ bit/s/Hz και μεταβλητό M από 1 έως 50.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η αύξηση της παραμέτρου P_{max} αναμένεται να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος, καθώς επιτρέπει σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών να ικανοποιεί το απαιτούμενο ενεργειακό κριτήριο μετάδοσης. Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή δεν είναι απαραίτητα γραμμική, διότι η αυξημένη ταυτόχρονη δραστηριότητα των χρηστών μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη παρεμβολή.

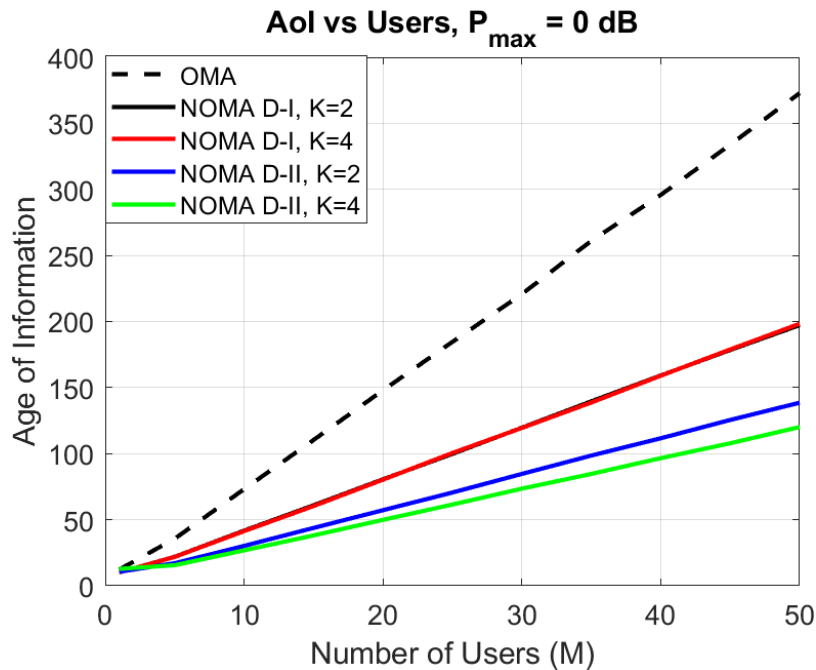
6.3.1 Περίπτωση $P_{max}=0\text{dB}$

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση ιδιαίτερα αυστηρού ενεργειακού περιορισμού, με $P_{max} = 0\text{dB}$ ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Σχήμα 9, στο οποίο παρατηρείται αρχικά ότι η αύξηση του αριθμού χρηστών οδηγεί σε αύξηση του Age of Information για όλα τα εξεταζόμενα ενδεχόμενα. Το σύστημα OMA εμφανίζει σταθερά τη χειρότερη απόδοση, με υψηλές τιμές AoI σε σχέση με όλα τα αντίστοιχα NOMA σχήματα. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, διότι το σύστημα παρουσιάζει έλλειψη δυνατότητας ταυτόχρονης μετάδοσης πολλών χρηστών.

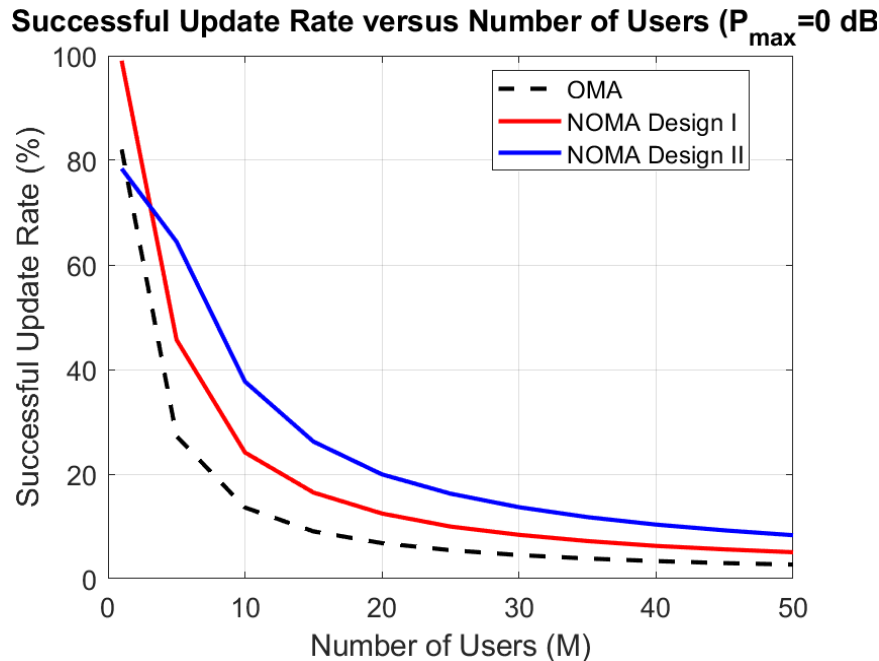
Για τα NOMA σχήματα, παρατηρείται ότι τόσο για το Design I όσο και για το Design II, η μετάβαση από $K = 2$ σε $K = 4$ δεν οδηγεί σε δραματική διαφοροποίηση της απόδοσης, γεγονός που υποδηλώνει, όπως είδαμε και στα προηγούμενα σχήματα, ότι υπό αυστηρό ενεργειακό περιορισμό δεν αποτελεί βασικό παράγοντα για την συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά συνδέεται άμεσα με την πολύ χαμηλή τιμή της παραμέτρου P_{max} , καθώς μεγάλο ποσοστό χρηστών μπορεί να μην πραγματοποιεί καν επιτυχή μετάδοση. Αυτό έχει ως συνέπεια η συνολική δραστηριότητα του συστήματος να παραμένει περιορισμένη.

Ωστόσο, στο Design II εμφανίζεται ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά ιδιαίτερα για μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο ότι αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί μια πιο σταθερή απόδοση ακόμα και υπό περιορισμένες συνθήκες.



Σχήμα 9: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 0\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2, K = 4$.

Η παραπάνω συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από το ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{\max} = 0$ dB, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 4$.

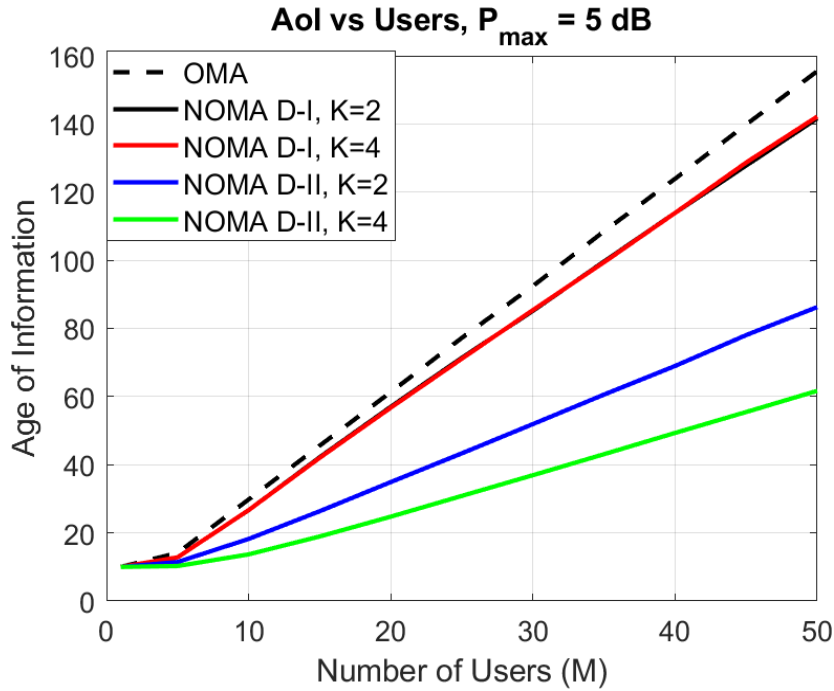
Στο Σχήμα 10 παρατηρείται ότι το ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων μειώνεται σημαντικά για όλες τις τεχνικές λόγω του αυστηρού περιορισμού στην εκπεμπόμενη ισχύ. Παράλληλα, για μεγαλύτερο αριθμό χρηστών το Design II επιτυγχάνει υψηλότερο ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων σε σχέση με το Design I, γεγονός που εξηγεί και τις χαμηλότερες τιμές AoI που παρατηρήθηκαν προηγουμένως. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος του Design II, οι οποίες επιτρέπουν σε περισσότερους χρήστες να πραγματοποιήσουν επιτυχημένη μετάδοση.

6.3.2 Περίπτωση $P_{\max}=5$ dB

Η μετάβαση στα 5 dB μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά του συστήματος υπό ηπιότερο ενεργειακό περιορισμό συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση των 0 dB. Η αύξηση της συγκεκριμένης παραμέτρου, ως στόχο έχει να επιτρέψει σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών να συμμετέχει επιτυχώς την διαδικασία μετάδοσης με σκοπό να καταστεί εμφανής η διαφοροποίηση ανάμεσα στις σχεδιάσεις.

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς και για τις επόμενες που ακολουθούν στην παρούσα υποενότητα, οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης παραμένουν σταθερές και ίσες με πριν, ώστε να εξεταστεί αποκλειστικά η επίδραση της μεταβολής της παραμέτρου $P_{\max}$ στην απόδοση του συστήματος.

Στο Σχήμα 11 παρατηρείται ότι η γενική συμπεριφορά του συστήματος παραμένει παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Το σύστημα OMA, εξακολουθεί να εμφανίζει χειρότερη απόδοση σε σύγκριση με όλες τις περιπτώσεις του NOMA. Η δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών επιτρέπει στο NOMA να διατηρεί χαμηλότερες τιμές ακόμα και όταν αυξάνεται ο αριθμός χρηστών.



Σχήμα 11: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 5 \text{ dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$.

Σε σύγκριση με την περίπτωση των 0dB, παρατηρείται συνολική βελτίωση της απόδοσης των NOMA σχημάτων, καθώς η αύξηση της παραμέτρου αυτής καθιστά λιγότερο αυστηρή την πιθανότητα μετάδοσης άρα μεγαλύτερος αριθμός χρηστών μπορεί να αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς. Παρατηρείται επίσης ότι η επίδραση των επιπέδων SNR γίνεται περισσότερο εμφανής, κυρίως στο Design II, το οποίο διατηρεί μεγαλύτερη ανθεκτικότητα ιδιαίτερα σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών.

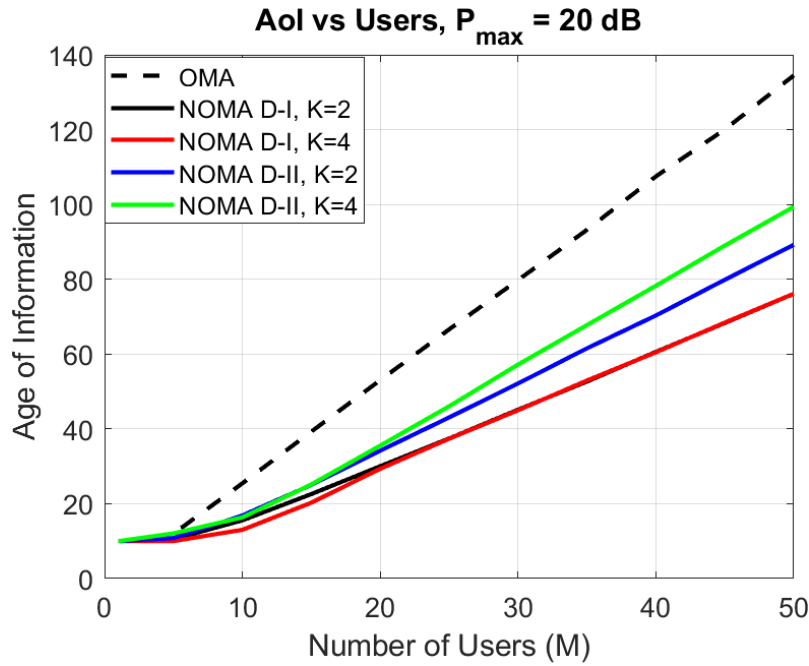
Ωστόσο, παρατηρείται ότι στο Design I η διαφορά μεταξύ OMA και NOMA δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα έντονη σε όλο το εύρος χρηστών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, παρότι το P_{max} έχει αυξηθεί σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, εξακολουθεί να παραμένει σχετικά περιοριστικό. Κατά συνέπεια, δεν είναι ακόμα δυνατή η πλήρης αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων επιπέδων ισχύος P_k , καθώς χρήστες που αντιστοιχίζονται σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος ενδέχεται να μην ικανοποιούν το ενεργειακό κριτήριο μετάδοσης.

6.3.3 Περίπτωση $P_{max}=20\text{dB}$

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης διατηρούνται σταθερές, ενώ μεταβάλλεται αποκλειστικά και μόνο η τιμή της παραμέτρου P_{max} , ώστε να εξεταστεί η επίδραση της απόδοσης του συστήματος υπό καλύτερες συνθήκες.

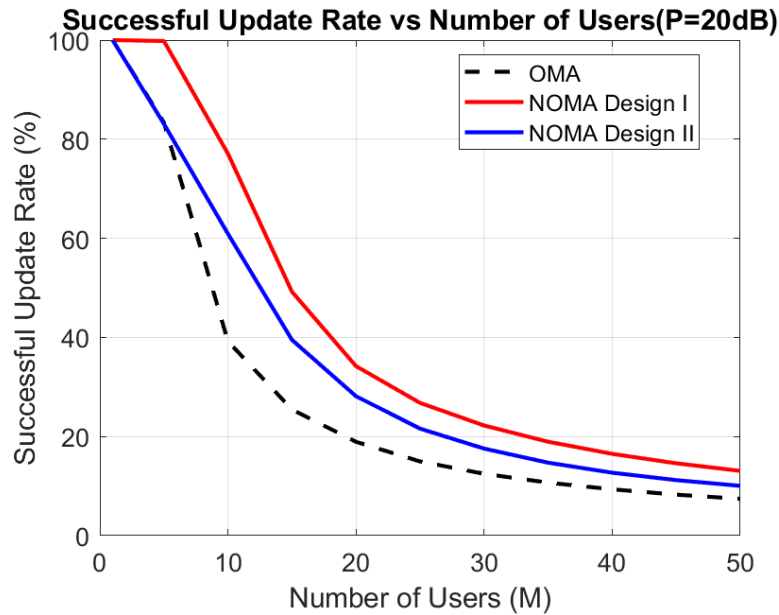
Στο Σχήμα 12 που ακολουθεί μελετάται η επίδραση της παραμέτρου P_{max} στο σύστημα όταν αυτή ισούται με την τιμή 20dB.

Σε αυτό το σχήμα η αύξηση της παραμέτρου μας δίνει μια βελτιωμένη εικόνα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Η διαφορά μεταξύ OMA και NOMA γίνεται πλέον πιο ξεκάθαρη. Τα NOMA σχήματα αξιοποιούν την δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης και αποκωδικοποίησης πολλών χρηστών, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερο AoI. Στο Design I, όπως και πριν, η μετάβαση από $K=2$ σε $K=4$ δεν προκαλεί μεγάλη διαφοροποίηση όπως συμβαίνει στο Design II.



Σχήμα 12: Μέση τιμή Age of Information για $P_{max} = 20 \text{ dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$.

Η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρούμε σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλότερου P_{max} είναι πως στο συγκεκριμένο σχήμα το Design I εμφανίζει καλύτερη απόδοση. Αυτό συμβαίνει διότι για υψηλότερη τιμή του P_{max} , ο περιορισμός ισχύος δεν αποτελεί πλέον τόσο έντονο εμπόδιο, δηλαδή όλα τα επίπεδα ισχύος μπορούν να αξιοποιηθούν με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Αντίθετα, το Design II, αν και είναι πιο ευέλικτο σε χαμηλότερες τιμές ισχύος, βασίζεται σε πιο ήπια κλιμάκωση των επιπέδων ισχύος. Το χαρακτηριστικό αυτό να μεν το καθιστά ευνοϊκό όταν έχουμε αυστηρό ενεργειακό όριο αλλά το πλεονέκτημα σε υψηλές τιμές μετατοπίζεται προς το Design I, στο οποίο τα επίπεδα ισχύος απέχουν περισσότερο μεταξύ τους. Εν κατακλείδι, στο συγκεκριμένο σχήμα η καταλληλότητα κάθε σχεδίασης εξαρτάται κυρίως από το επιτρεπόμενο όριο ισχύος. Η συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από το ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



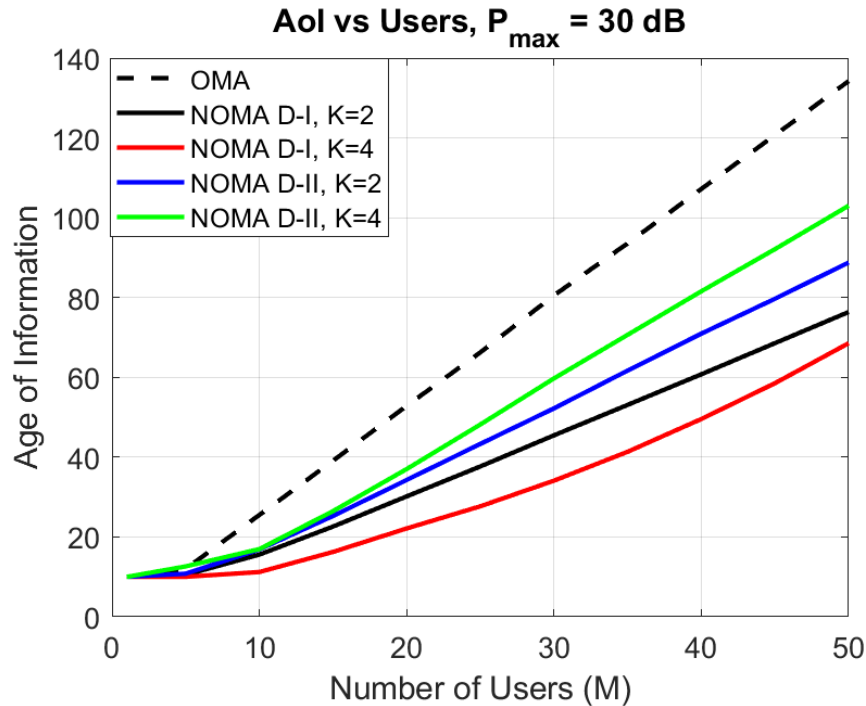
Σχήμα 13: Ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για $P_{max} = 20 \text{ dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 4$.

Το Σχήμα 13 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του AoI. Παρατηρείται ότι το Design I επιτυγχάνει το υψηλότερο ποσοστό επιτυχημένων ενημερώσεων, γεγονός που συνάδει με τις χαμηλότερες τιμές AoI που εμφανίζει σε σχέση με το Design II και το OMA.

6.3.4 Περίπτωση $P_{\max}=30\text{dB}$

Στην τελευταία περίπτωση της παρούσας υποενότητας εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος για $P_{\max} = 30\text{ dB}$ με σκοπό να αναδειχθεί με μεγαλύτερη σαφήνεια τόσο η διαφορά μεταξύ των δύο σχεδιάσεων όσο και η επίδραση των επιπέδων SNR. Η συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς οι διαφοροποιήσεις κάθε περίπτωσης έχουν προκύψει με ευνοϊκότερες συνθήκες.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις επιβεβαιώνεται πως η αύξηση του αριθμού χρηστών αυξάνει και την τιμή του Age of Information. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η διαφορά μεταξύ OMA και NOMA είναι πιο έντονη από κάθε άλλη περίπτωση. Παρατηρείται επίσης πολύ καθαρός διαχωρισμός μεταξύ των περιπτώσεων $K = 2$, $K = 4$ και στο Design I, στο οποίο έως τώρα δεν ήταν διακριτή η διαφορά. Τα περισσότερα επίπεδα ισχύος μειώνουν την πιθανότητα επιλογής του ίδιου επιπέδου και παράλληλα διευκολύνουν την διαδικασία αποκωδικοποίησης.



Σχήμα 14: Μέση τιμή Age of Information για $P_{\max} = 30\text{dB}$, για OMA και NOMA με χρήση των σχεδιάσεων Design I και Design II, για $K = 2$ και $K = 4$.

Επιπλέον, στο συγκεκριμένο σενάριο η διαφοροποίηση μεταξύ των σχεδιάσεων έχει μεγαλύτερες διαστάσεις με το Design I σε συνδυασμό με το $K = 4$ να παρουσιάζει συνολικά την καλύτερη απόδοση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συνεπές με την παρατήρηση της προηγούμενης περίπτωσης, καθώς για υψηλότερες τιμές του $P_{\max}$ ο ενεργειακός περιορισμός δεν αποτελεί πλέον κυρίαρχο παράγοντα.

6.4 Επίδραση του Ρυθμού Μετάδοσης

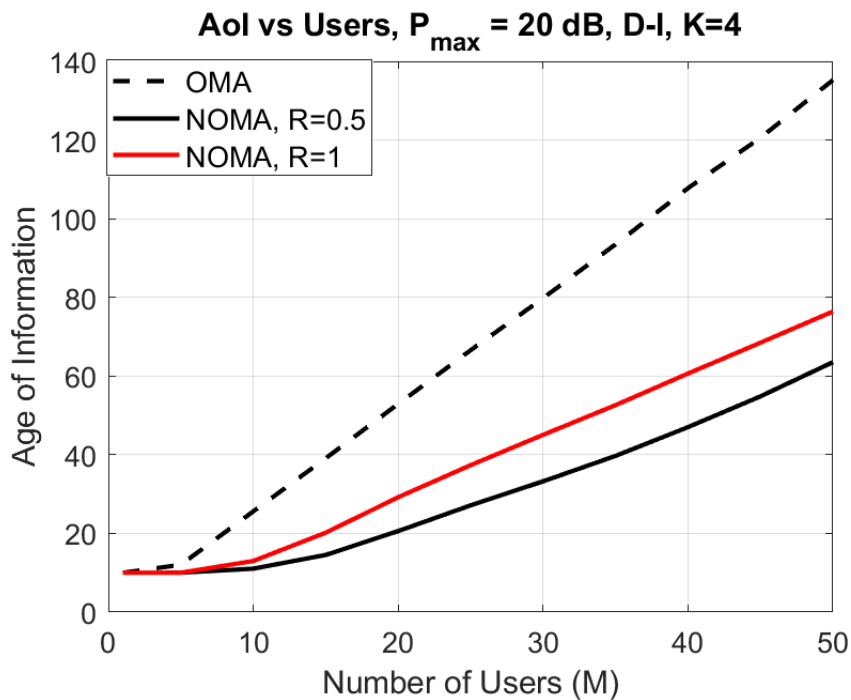
Στη συγκεκριμένη ενότητα εξετάζεται η επίδραση του ρυθμού μετάδοσης R στην απόδοση του συστήματος ως προς το Age of Information, με στόχο να αξιολογηθεί κατά πόσο η μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης επηρεάζει την συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης διατηρούνται σταθερές. Συγκεκριμένα έχουμε τις τιμές: διάρκεια χρονικής θυρίδας $T = 1$ χρονική μονάδα, αριθμός χρονικών θυρίδων ανά frame $N=10$, $K=4$, μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς $P_{max} = 20dB$ και αριθμός χρηστών M από 1 έως 50. Θεωρητικά, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης συνεπάγεται υψηλότερες απαιτήσεις για την επιτυχή αποκωδικοποίηση του σήματος. Ωστόσο, η πραγματική επίδραση εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας της κάθε σχεδίασης.

6.4.1 Επίδραση του R στο Design I

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η επίδραση του R στη σχεδίαση I. Η σύγκριση γίνεται για $R = 0.5$ και $R = 1$ bit/s/Hz.

Μελετώντας το Σχήμα 15, διαπιστώνεται πως στην περίπτωση που έχουμε $R = 0.5$ το σύστημα παρουσιάζει σταθερά καλύτερη απόδοση, συγκριτικά με την περίπτωση που έχουμε $R = 1$, εμφανίζοντας χαμηλότερες τιμές Age of Information στο εξεταζόμενο εύρος χρηστών.



Σχήμα 15: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για διαφορετικές τιμές του ρυθμού μετάδοσης ($R = 0.5$ και $R = 1$) με χρήση της σχεδίασης Design I.

Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης οδηγεί σε υψηλότερες απαιτήσεις για την επιτυχή μετάδοση. Αυτό σημαίνει ότι για $R = 1$ οι χρήστες χρειάζεται να ικανοποιήσουν υψηλότερα επίπεδα SNR, γεγονός που ίσως καθιστά δυσκολότερη την επιτυχή μετάδοση. Στο Design I, η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη, καθώς ο υπολογισμός των επιπέδων ισχύος επηρεάζεται και από τον αριθμό χρηστών του συστήματος. Έτσι, με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης

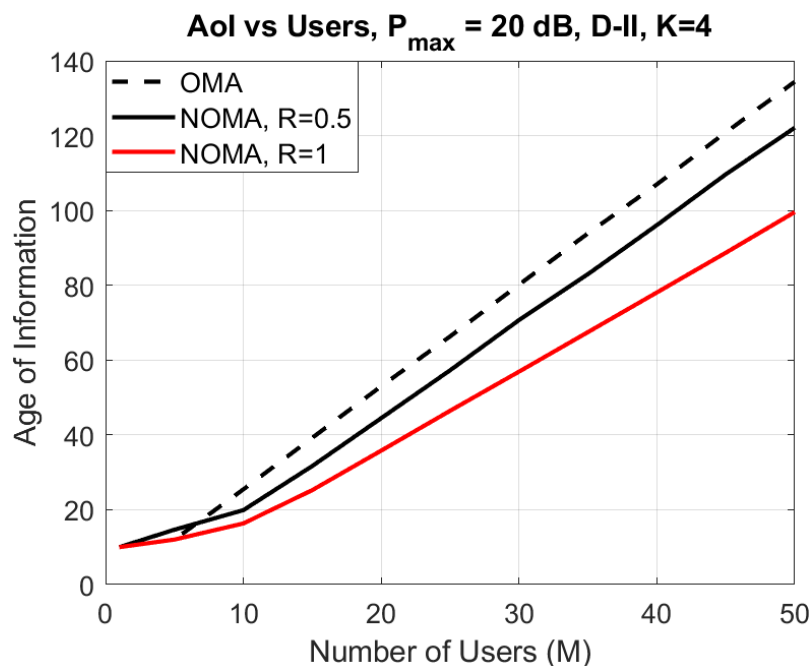
οδηγούμαστε σε υψηλότερες τιμές του Age of Information. Το OMA, όπως σε κάθε περίπτωση που μελετάμε, είναι σταθερά χειρότερο από κάθε περίπτωση NOMA.

6.4.2 Επίδραση του R στο Design II

Στο Σχήμα 16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του Design II για τις δύο εξεταζόμενες τιμές του ρυθμού μετάδοσης $R = 0.5$ και $R = 1$. Όπως σε κάθε περίπτωση έτσι και εδώ, πρώτα απ' όλα επιβεβαιώνεται πως η αύξηση του αριθμού χρηστών αυξάνει το AoI άσχετα με τις παραμέτρους που μελετάμε.

Αρχικά, σχετικά με το OMA δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση διότι παραμένει σταθερά χειρότερο. Σε αντίθεση με το Design I, εδώ παρατηρείται ότι η περίπτωση $R = 1$ παρουσιάζει καλύτερη συνολική απόδοση σε σχέση με την περίπτωση $R = 0.5$ εμφανίζοντας χαμηλότερες τιμές του AoI.

Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τον τρόπο διαμόρφωσης των προκαθορισμένων επιπέδων SNR στη σχεδίαση Design II. Για την περίπτωση $R = 0.5$, τα επίπεδα P_k που προκύπτουν είναι αρκετά χαμηλά και σχετικά κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ο διαχωρισμός των χρηστών στο πεδίο της ισχύος να μην είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός. Αυτό δυσκολεύει και την διαδικασία αποκωδικοποίησης επηρεάζοντας αρνητικά την συνολική απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 16: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του αριθμού χρηστών για διαφορετικές τιμές του ρυθμού μετάδοσης ($R = 0.5$ και $R = 1$) με χρήση της σχεδίασης Design II.

Αντίθετα, για την περίπτωση $R = 1$, τα επίπεδα SNR εμφανίζουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ τους, άρα γίνεται πιο σωστά ο διαχωρισμός των χρηστών στη διαδικασία αποκωδικοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζεται το παράδοξο ότι, παρά την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης να οδηγούμαστε σε καλύτερες τιμές του Age of Information.

Για να γίνει πιο κατανοητή η παραπάνω συμπεριφορά, στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τιμές των τεσσάρων επιπέδων ισχύος P_k που προκύπτουν για το Design II στις δύο εξεταζόμενες τιμές του ρυθμού μετάδοσης.

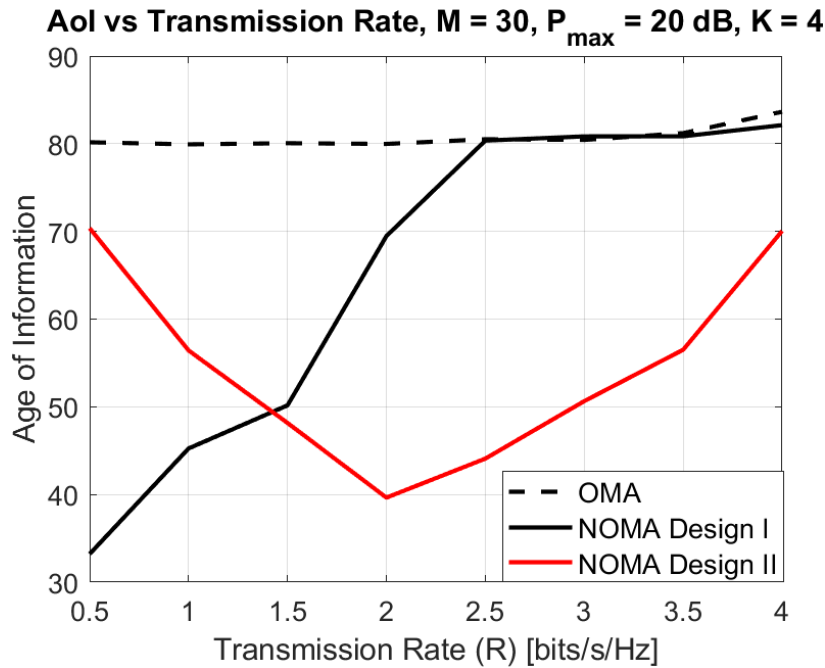
Πίνακας 6.1 P_K (dB) για $R = 1$ και $R = 0.5$

$R = 1$	$R = 0.5$
6.0206	-1.6349
4.7712	-1.8253
3.0103	-2.3226
0	-3.8278

Από τις τιμές του Πίνακα 6.1 παρατηρείται ότι για $R = 0.5$ τα επίπεδα ισχύος είναι σημαντικά χαμηλότερα σε σχέση με την περίπτωση $R = 1$. Επιπλέον, οι διαφορές μεταξύ διαδοχικών επιπέδων είναι μικρότερες, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερο αποτελεσματικό διαχωρισμό των χρηστών στο πεδίο της ισχύος.

6.5 Σύγκριση OMA-NOMA ως προς R

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται συνολική συγκριτική αξιολόγηση των σχημάτων OMA, NOMA Design I και NOMA Design II, με στόχο τη μελέτη της επίδρασης του ρυθμού μετάδοσης στη συνολική απόδοση του συστήματος ως προς την παράμετρο Age of Information. Οι παράμετροι της προσομοίωσης διατηρούνται σταθερές με τιμές $N = 10$, $T = 1$, $M = 30$, $K = 4$ και $P_{max} = 20dB$. Ο ρυθμός μετάδοσης μεταβάλλεται στο εύρος $R=0.5$ έως $R=4$ με βήμα 0.5, ώστε να αξιολογηθεί η συνολική επίδραση του.



Σχήμα 17: Μέση τιμή Age of Information ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης για τα σχήματα OMA, NOMA Design I και NOMA Design II.

Αρχικά παρατηρείται ότι το OMA εμφανίζει σχετικά σταθερή συμπεριφορά καθώς μεταβάλλεται ο ρυθμός μετάδοσης. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το OMA δεν βασίζεται σε

μηχανισμό διαχωρισμού χρηστών στο πεδίο ισχύος ούτε σε διαδικασία αποκωδικοποίησης. Η ελαφρά αύξηση που παρατηρείται στην υψηλότερη τιμή του R είναι διότι η μετάδοση γίνεται πιο απαιτητική με αποτέλεσμα να μειώνονται οι επιτυχημένες ενημερώσεις άρα να αυξάνεται ελαφρώς το AoI.

Για το NOMA Design I, παρατηρείται ότι η αύξηση του R οδηγεί σε σταδιακή αύξηση του Age of Information. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με την συμπεριφορά που προηγήθηκε προηγουμένως, καθώς η αύξηση του R συνεπάγεται υψηλότερες απαιτήσεις SNR άρα και αυξημένες απαιτήσεις ισχύος για επιτυχή μετάδοση. Δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη σχεδίαση τα επίπεδα ισχύος επηρεάζονται πιο έντονα από παραμέτρους του συστήματος, το AoI οδηγείται σε μεγαλύτερες τιμές.

Αντίθετα, το NOMA Design II παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Για χαμηλές τιμές του R το Age of Information ξεκινά από υψηλότερες τιμές, στη συνέχεια μειώνεται καθώς ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται και μετά από ένα σημείο έχει πάλι αυξητική τάση. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι για πολύ χαμηλές τιμές του R , τα προκαθορισμένα επίπεδα ισχύος που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα χαμηλά, καθιστώντας δύσκολο τον διαχωρισμό των χρηστών. Καθώς το R αυξάνεται, τα επίπεδα ισχύος γίνονται περισσότερο διακριτά, βελτιώνοντας την αποκωδικοποίηση του χρήστη και προσφέρουν ένα καλό AoI. Ωστόσο, όσο η τιμή του R περνάει σε αρκετά υψηλές τιμές οι αυξημένες απαιτήσεις αρχίζουν πλέον να υπερισχύουν, με αποτέλεσμα την εκ νέου επιδείνωση της απόδοσης.

Συνεπώς, το συγκεκριμένο διάγραμμα αναδεικνύει ότι η επίδραση του ρυθμού μετάδοσης δεν είναι ίδια για όλες τις σχεδιάσεις, αλλά εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο διαμόρφωσης των επιπέδων ισχύος και την λειτουργία κάθε συστήματος.

6.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση και αξιολόγηση της απόδοσης του εξεταζόμενου συστήματος ως προς την παράμετρο Age of Information με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των τεχνικών OMA και NOMA υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Αρχικά, εξετάστηκε η επίδραση του αριθμού επιπέδων SNR K στη συνολική απόδοση του συστήματος, μέσω της σύγκρισης των δύο εξεταζόμενων σχεδιάσεων NOMA Design I και NOMA Design II. Η ανάλυση αυτή ανέδειξε τη σημασία της παραμέτρου στο διαχωρισμό των χρηστών στο πεδίο της ισχύος, καθώς και τη διαφορετική συμπεριφορά των δύο σχεδιάσεων ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

Έπειτα, μελετήθηκε η επίδραση της παραμέτρου P_{max} , με σκοπό να εξεταστεί το σύστημα και σε καταστάσεις αυστηρού ενεργειακού περιορισμού αλλά και σε πιο ευνοϊκές καταστάσεις. Με τον τρόπο αυτό αναλύθηκε το κατά πόσο επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος στα διαφορετικά σχήματα πρόσβασης.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση του ρυθμού μετάδοσης R , τόσο για κάθε σχεδίαση NOMA ξεχωριστά όσο και μέσω της συνολικής συγκριτικής αξιολόγησης με το OMA. Μέσω της ανάλυσης αυτής έγινε κατανοητό το πως η μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο κάθε σχεδίαση, ανάλογα με τον τρόπο διαμόρφωσης των επιπέδων ισχύος και τον μηχανισμό λειτουργίας της κάθε περίπτωσης. Επιπλέον, μελετήθηκε και το ποσοστό επιτυχημένων μεταδόσεων, με στόχο τη διερεύνηση της σχέσης του με τη συμπεριφορά της μετρικής Age of Information υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Συνολικά, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και

αποτελούν τη βάση για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα

7.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόδοση ενός συστήματος άνω ζεύξης με μηχανισμό grant-free πρόσβασης και χρήση μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA), ως προς τη μετρική του Age of Information (AoI), με σκοπό την αξιολόγηση της ικανότητας διαφορετικών τεχνικών να διατηρούν την πληροφορία στο δέκτη όσο πιο πρόσφατη γίνεται. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, όπως βιομηχανικά συστήματα ή συστήματα Διαδικτύου των Πραγμάτων όπου οι απαιτήσεις είναι πλέον πολύ υψηλές.

Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη μεταξύ του συστήματος OMA (Orthogonal Multiple Access) και της τεχνικής NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), εξετάζοντας, για την περίπτωση NOMA, δύο διαφορετικές σχεδιάσεις κατανομής επιπέδων ισχύος (Design I, Design II) ή SNR αντίστοιχα τα οποία επιλέγουν οι χρήστες με τρόπο τυχαίο, έτσι ώστε να καθίσταται ικανή η διαδοχική ακύρωση παρεμβολής. Στο Design I, τα προκαθορισμένα επίπεδα ισχύος/SNR καθορίζονται με τρόπο ώστε να καθίσταται δυνατή η ανίχνευση του σήματος του χρήστη στην χειρότερη περίπτωση παρεμβολής, δηλαδή όταν όλοι οι υπόλοιποι χρήστες επιλέξουν το αμέσως επόμενο επίπεδο ισχύος. Στο Design II, τα προκαθορισμένα επίπεδα επιλέγονται έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ανίχνευση του χρήστη όταν ένας μόνο χρήστης επιλέξει το αμέσως επόμενο επίπεδο. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων σε περιβάλλον MATLAB, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης βασικών παραμέτρων του συστήματος, όπως ο αριθμός διαθέσιμων επιπέδων SNR, το μέγιστο επιτρεπτό όριο ισχύος και ο ρυθμός μετάδοσης.

Μέσα από την ανάλυση των διαγραμμάτων, προκύπτει πως το NOMA παρουσιάζει γενικά καλύτερη απόδοση ως προς τις τιμές του AoI σε σύγκριση με το OMA, καθώς η δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών οδηγεί σε συχνότερες επιτυχημένες ενημερώσεις της πληροφορίας. Ωστόσο, διαπιστώθηκε πως η συγκεκριμένη υπεροχή δεν είναι σταθερή για όλες τις περιπτώσεις, αλλά διαφέρει ανάλογα με τις παραμέτρους του συστήματος.

Η μελέτη της επίδρασης του αριθμού επιπέδων SNR έδειξε ότι η αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων επιπέδων μπορεί, έως ένα βαθμό, να βελτιώσει το διαχωρισμό των χρηστών και να οδηγήσει σε καλύτερη λειτουργία του μηχανισμού αποκωδικοποίησης. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη βελτίωση δεν είναι πάντα απόλυτα γραμμική, καθώς υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις που η περαιτέρω αύξηση του αριθμού επιπέδων δεν οδηγεί σε αντίστοιχη βελτίωση της απόδοσης.

Σχετικά με την επίδραση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου ισχύος, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι πρόκειται για μία από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους του συστήματος. Για χαμηλές τιμές της επιτρεπόμενης εκπεμπόμενης ισχύος, η απόδοση του συστήματος περιορίζεται σημαντικά, καθώς δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων επιπέδων ισχύος που έχουν μεταξύ τους πολύ μικρές διαφορές, δυσχεραίνοντας έτσι τη διαδοχική ακύρωση παρεμβολής. Όσο η τιμή της παραμέτρου αυξάνεται, παρατηρούνται καλύτερα αποτελέσματα και μεγάλη υπεροχή του NOMA έναντι του OMA.

Επίσης, παρατηρήθηκε πως το Design II εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά υπό αυστηρούς ενεργειακούς περιορισμούς ενώ για το Design I προκύπτει ακριβώς το αντίθετο. Τέλος, από την μελέτη της επίδρασης του ρυθμού μετάδοσης διαπιστώθηκε ότι η συμπεριφορά των δύο σχεδιάσεων διαφοροποιείται σημαντικά. Στην περίπτωση του Design I, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης οδηγεί σε επιδείνωση της απόδοσης λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ισχύος, ενώ στο Design II παρατηρήθηκε

διαφορετική συμπεριφορά, η οποία σχετίζεται με τον τρόπο διαμόρφωσης των επιπέδων ισχύος και την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού χρηστών.

Τέλος, η σύγκριση των δύο σχεδιάσεων NOMA έδειξε ότι η διαφορά τους οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η παρεμβολή κατά τον υπολογισμό των επιπέδων ισχύος. Το Design I, λόγω του μεγαλύτερου διαχωρισμού ισχύος μεταξύ των χρηστών, εμφανίζει καλύτερη απόδοση όταν η διαθέσιμη ισχύς είναι επαρκής και οι απαιτήσεις του συστήματος είναι αυξημένες. Αντίθετα, το Design II απαιτεί χαμηλότερα επίπεδα ισχύος και παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες αυστηρού ενεργειακού περιορισμού, όπου η ικανοποίηση του περιορισμού μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν ότι η τεχνική NOMA μπορεί να αποτελέσει μια ιδιαίτερα αποδοτική προσέγγιση για τη βελτίωση της επικαιρότητας της πληροφορίας σε σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών, υπό την προϋπόθεση κατάλληλης επιλογής του σχεδιασμού και των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος.

7.2 Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα

Παρότι η παρούσα εργασία επέτρεψε την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση των σχημάτων OMA και NOMA ως προς την παράμετρο του Age of Information, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω επέκτασης της μελέτης. Μια ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντική εργασία θα μπορούσε να είναι η αξιολόγηση του συστήματος για μεγαλύτερο αριθμό χρηστών ή για διαφορετικές διαμορφώσεις του δικτύου, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε πιο απαιτητικά σενάρια λειτουργίας. Επίσης, θα μπορούσε να εξεταστεί διαφοροποίηση στα επίπεδα ισχύος, τα οποία δεν θα είναι προκαθορισμένα αλλά θα προσαρμόζονται ανάλογα με τις συνθήκες του συστήματος, με στόχο της περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η επέκταση της παρούσας μελέτης σε πιο ρεαλιστικά περιβάλλοντα, όπου οι συνθήκες του καναλιού θα είναι πιο κοντά στις πραγματικές.

Συνολικά, οι παραπάνω κατευθύνσεις μπορούν να συμβάλουν στην κατανόηση και βελτιστοποίηση των τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης σε σύγχρονα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Osseiran *et al.*, “Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.
- [2] X. Youet al., “Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 64, pp. 1–74, Feb. 2021, Art. No. 110301.
- [3] A. Mohsan and Y. Li, “A comprehensive survey of NOMA for mMTC and 6G,” *IEEE Access*, 2022.
- [4] S. Verdú, “Multiple-access techniques in wireless communications: An overview,” *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*, 2014.
- [5] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015.
- [6] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K. Kwak, “Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2017.
- [7] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, “A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, 2017.
- [8] L. Dai, Z. Ding, Z. Wang, Z. Chen, and L. Hanzo, “A survey of non-orthogonal multiple access for 5G,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 2018.
- [9] M. Ali, H. Tabassum and E. Hossain, “Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016.
- [10] M. Elsayed and M. Erol-Kantarci, “AI-enabled low-latency and reliable NOMA for URLLC in 5G and beyond,” *IEEE Communications Magazine*, 2022.
- [11] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú, “Channel coding rate in the finite blocklength regime,” *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010.
- [12] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, “NOMA-assisted grant-free transmission: How to design pre-configured SNR levels?,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 412–416, Feb. 2024, doi: 10.1109/LWC.2023.3330785.
- [13] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, “Impact of NOMA on age of information: A grant-free transmission perspective,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, early access, Sep. 22, 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3313612.
- [14] Φ. Κωνσταντίνου, Α. Κανάτας και Γ. Πάντος, *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2013.
- [15] X. Lin and N. Lee, *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*, Springer Nature, 2021.

- [16] Y. Yang, J. Xu, C. Wang and G. Shi, *5G Wireless Systems: Simulation and Evaluation Techniques*, Springer Nature, 2018.
- [17] Nokia, “6G Explained,” [Online]. Available: <https://www.nokia.com>
- [18] Z. Ding, Y. Liu, J. Choi, Q. Sun, M. ElKashlan, and H. V. Poor, “Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks,” *IEEE Communications Magazine*, 2017.
- [19] Z. Xiao and L. Zhu, “Joint beamforming and NOMA for mmWave communications,” *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

```
%%SYSTEM PARAMETRICS%%
clear
clc
PmaxdB = 0; % 10, 20, 30
Pmax = 10^(0.1*PmaxdB);
% Pmax = 1; % = 30 dB SNR corresponding to max Tx power
K = 2; % power (SNR) levels
N = 10; % slots per frame
R = 1; % bits/s/Hz
T = 1; % slot duration
NumofFrames = 20000;

M = [1,5:5:50];
% M = 5;
% M = 1;

%%Initialization of Data Structures
for jjj = 1:length(M) % loop gia arithmo users
    M_current = M(jjj);
    OAoIs = zeros(NumofFrames,M_current);
    NAOIs = zeros(NumofFrames,M_current);
    Ptx = min(K/M_current,1); % NOMA users
    CorrectPackets = zeros(1,M_current);
    AoI = zeros(M_current,NumofFrames);

    Pk = zeros(1,K);
    % Prodefined SNR levels calculation
    Pk(K) = 2^R-1;
    for kk = K-1:-1:1
        Pk(kk) = (2^R-1)*(1+(M_current-1)*Pk(kk+1)); %design I
        % Pk(kk) = (2^R-1)*(1+Pk(kk+1)); % design II
    end

    UserFrames = zeros(NumofFrames,M_current);
    UserFramesOMA = zeros(NumofFrames,M_current);
    OMAUserInstAoI = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
    NOMAUserInstAoI = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
    OMAUserInstSuc = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);
    NOMAUserInstSuc = zeros(NumofFrames*N+1,M_current);

    for framenummer = 1:NumofFrames
        OMAUserInstAoI(2,:) = 1;
        NOMAUserInstAoI(2,:) = 1;
        for ii = 1:N
            InstTime = (framenummer-1)*N + ii;
            UsersOMA = zeros(4,M_current);
            Users = zeros(4,M_current);

            for kk = 1:M_current
                if UserFramesOMA(framenummer,kk) == 1
```

```

        OMAUserInstAoI(InstTime+1, kk) = 0;
    else
        OMAUserInstAoI(InstTime+1, kk) =
OMAUserInstAoI(InstTime, kk)+1;
    end
    if UserFrames(framenumber, kk) == 1
        NOMAUserInstAoI(InstTime+1, kk) = 0;
    else
        NOMAUserInstAoI(InstTime+1, kk) =
NOMAUserInstAoI(InstTime, kk)+1;
    end
    Users(2, kk) = abs((randn + 1i*randn)/sqrt(2))^2;
    UsersOMA(2, kk) = Users(2, kk);
    if UserFrames(framenumber, kk) == 0
        txprob = rand;
        if txprob <= Ptx
            Users(1, kk) = Pk(randi(K));
            if Users(1, kk)/Users(2, kk) <= Pmax
                Users(3, kk) = 1;
            end
        end
    end
    SuccessfulOMA = sum(UserFramesOMA(framenumber, :));
    if UserFramesOMA(framenumber, kk) == 0
        txprob = rand;
        if txprob <= 1/(M_current-SuccessfulOMA)
            UsersOMA(1, kk) = Pk(end);
            if UsersOMA(1, kk)/UsersOMA(2, kk) <= Pmax/1.85
                UsersOMA(3, kk) = 1;
            end
        end
    end
end
end

%% OMA
[TxUsersIndOMA, Ind] = find(UsersOMA(3, :)==1);
if length(TxUsersIndOMA) == 1
    UserFramesOMA(framenumber, Ind) = 1;
    OMAUserInstSuc(InstTime, Ind) = 1;
    % OMAUserInstAoI(InstTime+1, Ind) = 0;
end

%% NOMA
TxUsersInd = find(Users(3, :)==1);
if ~isempty(TxUsersInd)
    TxUsers = Users(:, TxUsersInd);
    Pusers = TxUsers(1, :);
    [Psorted, InitialInd] = sort(Pusers, 'descend');
    Rx = 1;
    for kk = 1:length(Psorted)-1
        if Psorted(kk) == Psorted(kk+1)
            Rx = 0; break;
        end
        Interf = sum(Psorted(kk+1:end));
        Rcurrent = log2(1+Psorted(kk)/(1+Interf));
        if Rcurrent >= R
            UserFrames(framenumber, TxUsersInd(InitialInd(kk))) =
1;

```



```

                                NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(kk)))
= 1;
NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(kk))) = 0;
                                else
                                    Rx = 0;
                                end
                                end
                                if length(Psorted) == 1
                                    UserFrames(framenumber,TxUsersInd(InitialInd(1))) = 1;
                                    NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(1))) = 1;
                                    NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(1))) =
0;
                                elseif Rx~=0
                                    UserFrames(framenumber,TxUsersInd(InitialInd(kk+1))) = 1;
                                    NOMAUserInstSuc(InstTime,TxUsersInd(InitialInd(kk+1))) =
1;
                                    NOMAUserInstAoI(InstTime+1,TxUsersInd(InitialInd(kk+1)))
= 0;
                                end
                                end
                                end
                                end

%% ypologismos, AoI
OAoI = OMAUserInstAoI;
NAoI = NOMAUserInstAoI;
OMAUserInstAoI(1,:)=[];
NOMAUserInstAoI(1,:)=[];
OSucInstants = zeros;

%%Performance Metrics Calculation%%
for kk = 1:M_current
    OSucInstants = find(OMAUserInstSuc(:,kk)==1);
    Os = [OSucInstants(1);diff(OSucInstants)];
    TotalSuccessfulOMA(kk) = length(Os);
    OAoIs(1:length(Os),kk) = Os;
end
NSucInstants = zeros;

for kk = 1:M_current
    NSucInstants = find(NOMAUserInstSuc(:,kk)==1);
    Ns = [NSucInstants(1);diff(NSucInstants)];
    TotalSuccessfulNOMA(kk) = length(Ns);
    NAoIs(1:length(Ns),kk) = Ns;
end

% Mean_OAoINew(jjj) = mean(sum(OAoIs)/(N*NumofFrames)*T);
% Mean_NAoINew(jjj) = mean(sum(NAoI)/(N*NumofFrames)*T);
MeanOSuccess(jjj) = sum(TotalSuccessfulOMA)/(M_current*NumofFrames);
MeanNSuccess(jjj) = sum(TotalSuccessfulNOMA)/(M_current*NumofFrames);
Mean_OAoINew(jjj) = sum(sum(OAoIs))*T/sum(TotalSuccessfulOMA);
Mean_NAoINew(jjj) = sum(sum(NAoIs))*T/sum(TotalSuccessfulNOMA);

end % telos loop gia M

```

```

%%Graphical Representation of Results%%
figure;
plot(M,Mean_OAoINew,'-s','LineWidth',2);
hold on;
plot(M,Mean_NAoINew,'-o','LineWidth',2);
xlabel('Number of Users (M)');
ylabel('Age of Information');
legend('OMA','NOMA');
grid on;
title('AoI vs users ');

figure;
plot(M,MeanOSuccess,'-s','LineWidth',2); % M orizontios axonas , Mean_OAoI
kathetos axonas
hold on;
plot(M,MeanNSuccess,'-o','LineWidth',2);
xlabel('Number of Users (M)'); % etiketa ston orizontio axona
ylabel('Message Success Probability');% etiketa ston katheto axona
legend('OMA','NOMA');
grid on;
title('Message Success Probability vs users ');

Mean_OAoI = Mean_OAoINew;
Mean_NAoI = Mean_NAoINew;

%save CodeDOK_P30_D2_K4.mat Mean_OAoI Mean_NAoI M
% disp('File saved successfully')

```