



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**Προσομοίωση της ανερχόμενης ζεύξης κυψέλης WCDMA με  
βάση την SIMSCRIPT II.5**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΔΑΜΟΥ-ΤΖΑΝΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ του ΣΤΕΡΓΙΟΥ**

ΦΟΙΤΗΤΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΟΣΧΟΛΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2011**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>2</b>
<b>Ευρετήριο Εικόνων .....</b>	<b>3</b>
<b>Ευρετήριο Πινάκων .....</b>	<b>3</b>
<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>4</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τεχνολογία WCDMA .....</b>	<b>5</b>
1.1 Βασικές έννοιες .....	5
1.2 Πολλαπλή κυψελοειδής πρόσβαση σε σύστημα WCDMA .....	6
1.3 Έλεγχος Ισχύος (Power Control) .....	7
1.3.1 Έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόγχου.....	8
1.3.2 Έλεγχος ισχύος κλειστού βρόγχου .....	9
1.3.3 Έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόγχου .....	9
1.4 Μεταπομπές σε συστήματα WCDMA (Handovers).....	10
1.4.1 Ήπιες μεταπομπές (Soft Handovers) .....	10
1.4.2 Ηπιότερες μεταπομπές (Softer Handovers) .....	10
1.5 Κατηγορίες παρεμβολών σε δίκτυα WCDMA .....	11
1.6 Έλεγχος αποδοχής κλήσης (Call Admission Control) .....	12
1.7 Συντελεστής δραστηριότητας & παράγοντας φορτίου .....	13
1.7.1 Συντελεστής δραστηριότητας (Activity Factor) .....	13
1.7.2 Παράγοντας φορτίου (Load Factor) .....	13
<b>Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στην προσομοίωση και στη SIMSCRIPT II.5 14</b>	<b>14</b>
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία περί προσομοίωσης.....	14
2.1.1 Γενικές έννοιες προσομοίωσης.....	14
2.1.2 Είδη μοντέλων προσομοίωσης.....	14
2.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσομοίωσης.....	15
2.2 Περιγραφή χρησιμότητας της γλώσσας SIMSCRIPT .....	16
2.3 Δομή προγράμματος SIMSCRIPT II.5 .....	17
2.4 Στοιχεία προγραμματισμού της SIMSCRIPT II.5 .....	18
2.4.1 Διαδικασία (PROCESS) .....	18
2.4.2 Πόρος (RESOURCE) .....	20
2.4.3 Αντικείμενα (ENTITIES) .....	21
2.4.4 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών .....	23
2.4.5 Διάφορες άλλες εντολές ελέγχου.....	24
<b>Κεφάλαιο 3: Το μοντέλο προσομοίωσης των Staehle-Mäder .....</b>	<b>25</b>
3.1 Περιγραφή του μοντέλου των Staehle-Mäder.....	25
3.2 Δήλωση των μεταβλητών στο PREAMBLE (Πρόλογος).....	27
3.3 Εισαγωγή στοιχείων και δέσμευση πινάκων στη MAIN .....	31
3.3.1 Ανάγνωση των στοιχείων εισόδου από εξωτερικό αρχείο .....	31
3.3.2 Δέσμευση χώρου για τους δηλωμένους πίνακες.....	32
3.3.3 Αρχικοποίηση και υπολογισμός τιμών των μεταβλητών.....	32
3.4 Διαδικασία γεννήτριας κλήσεων .....	33
3.5 Διαδικασία εξυπηρέτησης κλήσεων.....	34
3.5.1 Υπολογισμός αρχικών παραμέτρων .....	34
3.5.2 Προσδιορισμός ενεργών και παθητικών κλήσεων .....	34
3.5.3 Αποδοχή ή απόρριψη κλήσεων από το σύστημα.....	35
3.6 Εμφάνιση αποτελεσμάτων στη διαδικασία MAIN .....	36
3.6.1 Εμφάνιση παραμέτρων προσομοίωσης του μοντέλου.....	36

3.6.2	Πιθανότητες αποκλεισμού για κάθε κατηγορία κίνησης.....	37
3.6.3	Εύρεση ποσοστού κατειλημμένων πόρων του συστήματος.....	37
3.6.4	Εμφάνιση ποσοστού ενεργών/παθητικών κλήσεων ανά κατάσταση.....	38
<b>Κεφάλαιο 4: Αριθμητικά αποτελέσματα.....</b>		<b>39</b>
4.1	Παράδειγμα #1 .....	40
4.3	Παράδειγμα #3 .....	42
4.4	Παράδειγμα #4 .....	43
4.5	Παράδειγμα #5 .....	44
4.6	Παράδειγμα #6 .....	45
4.7	Παράδειγμα #7 .....	46
4.8	Παράδειγμα #8 .....	47
4.9	Παράδειγμα #9 .....	48
4.10	Παράδειγμα #10 .....	49
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>50</b>

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1:	Η εξάπλωση των GSM και CDMA παγκοσμίως .....	7
Εικόνα 1.2:	Πρόβλημα near-far στην άνω ζεύξη.....	8
Εικόνα 1.3:	Ήπια μεταπομπή.....	10
Εικόνα 1.4:	Διακυψελική Παρεμβολή σε άνω και κάτω ζεύξη.....	11

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1:	Γεννήτριες τυχαίων αριθμών (Διακριτών τιμών).....	23
Πίνακας 2.2:	Γεννήτριες τυχαίων αριθμών (Συνεχών τιμών).....	23
Πίνακας 4.1:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 1 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	40
Πίνακας 4.2:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 1 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	40
Πίνακας 4.3:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 2 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	41
Πίνακας 4.4:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 2 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	41
Πίνακας 4.5:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 3 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	42
Πίνακας 4.6:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 3 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	42
Πίνακας 4.7:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 4 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	43
Πίνακας 4.8:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 4 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	43
Πίνακας 4.9:	Τιμές του φορτίου κίνησης για το 5 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	44
Πίνακας 4.10:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 5 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	44
Πίνακας 4.11:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 5 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	44
Πίνακας 4.12:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 6 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	45
Πίνακας 4.13:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 6 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	45
Πίνακας 4.14:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 7 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	46
Πίνακας 4.15:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 7 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	46
Πίνακας 4.16:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 8 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	47
Πίνακας 4.17:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 8 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	47
Πίνακας 4.18:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 9 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	48
Πίνακας 4.19:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 9 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	48
Πίνακας 4.20:	Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 10 <sup>ο</sup> παράδειγμα .....	49
Πίνακας 4.21:	Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 10 <sup>ο</sup> παράδειγμα.....	49

## Εισαγωγή

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετώνται οι απώλειες κλήσεων στην άνω ζεύξη (uplink) ενός συστήματος WCDMA. Για το σκοπό αυτό, προσομοιώνουμε ένα σύστημα WCDMA το οποίο εξυπηρετεί διαφορετικές κατηγορίες κίνησης ως ένα σύστημα απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης. Η προσομοίωση του παραπάνω συστήματος γίνεται μέσω της γλώσσας προσομοίωσης SIMSCRIPT (έκδοση II.5). Η ακρίβεια των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων που προκύπτουν από το μοντέλο της προσομοίωσης πιστοποιείται μέσω των αντίστοιχων αναλυτικών τιμών που παρουσιάζονται στην εργασία των Staehle, Mäder. Η παρούσα πτυχιακή εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια:

- Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας WCDMA.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της γλώσσας προσομοίωσης SIMSCRIPT, καθώς και διάφορες λεπτομέρειες όσον αφορά στην καθεαυτή διαδικασία της προσομοίωσης με τις πολλαπλές εκτελέσεις.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή/παρουσίαση του κώδικα της προσομοίωσης ενός συστήματος WCDMA που εξυπηρετεί πολυδιάστατη τυχαία κίνηση.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αριθμητικά παραδείγματα του μοντέλου προσομοίωσης και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της πιθανότητας απώλειας κλήσεων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου των Staehle, Mäder.

Η παρούσα πτυχιακή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ». Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα λέκτορα κ. Ιωάννη Μοσχολιό, καθώς και την κ. Αγγελική Λουμπαρδία για την άψογη συνεργασία μας σε όλα τα επίπεδα από την έναρξη μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τεχνολογία WCDMA

## 1.1 Βασικές έννοιες

Το πρότυπο WCDMA έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια, συνεπώς εδώ θα αναλύσουμε τις βασικότερες έννοιες και τους κανόνες που διέπουν τη λειτουργία του προτύπου αυτού [1].

Η τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) βρίσκει εφαρμογή στα (ψηφιακά) δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3ης γενιάς, δηλ. στο UMTS στην Ευρώπη και στο cdma2000 στην Αμερική. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WCDMA είναι ότι ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές που αναπόφευκτα δημιουργούνται μεταξύ των ταυτόχρονων εκπομπών. Ένα παράδειγμα, για την κατανόηση της λειτουργίας του προτύπου, είναι το εξής:

Έστω ότι οι χρήστες είναι μια ομάδα εφήβων σε ένα δωμάτιο και ο σκοπός είναι η διαβίβαση ενός μηνύματος από κάθε έφηβο σε έναν μοναδικό ενήλικα που παρεβρίσκεται στο ίδιο δωμάτιο. Μια απλοϊκή λύση θα ήταν να πείσουμε τους εφήβους να μιλήσουν ένας ένας αλλά αυτή η διαδικασία θα μας κόστιζε σε χρόνο, ο οποίος ως γνωστόν είναι πολύτιμος. Αυτό που κάνει το WCDMA είναι ότι αναθέτει στον κάθε έφηβο να μιλά με μια διαφορετική γλώσσα. Ο παραλήπτης ενός συγκεκριμένου μηνύματος αρκεί να εστιάσει την προσοχή του στην αντίστοιχη γλώσσα και οι ομιλίες των υπολοίπων εφήβων δεν θα ενοχλούν αφού θα είναι σε άλλη γλώσσα και θα ηχούν ως ασυναρτησίες.

Για μια πιο αναλυτική περιγραφή του προτύπου θα πρέπει να εμβαθύνουμε σε έννοιες όπως οι τεχνικές πολλαπλής κυψελοειδούς πρόσβασης, ο έλεγχος ισχύος (Power Control) στην άνω και κάτω ζεύξη, η μεταπομπή (handover) μιας κλήσης από μια τηλεπικοινωνιακή κυψέλη σε μια άλλη, οι κατηγορίες παρεμβολών σε δίκτυα WCDMA, ο έλεγχος αποδοχής (Admission Control) μιας εισερχόμενης κλήσης, ο συντελεστής δραστηριότητας (Activity Factor) καθώς και ο παράγοντας φορτίου (Load Factor).

## 1.2 Πολλαπλή κυψελοειδής πρόσβαση σε σύστημα WCDMA

Στο πρότυπο WCDMA η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται είναι η CDMA [2]. Με την τεχνική CDMA κάθε κλήση αποκτά έναν μοναδικό κωδικό που διασπείρεται σε όλες τις διαθέσιμες συχνότητες (φασματική εξάπλωση, Spread Spectrum). Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα όλοι οι χρήστες να εκπέμπουν ταυτόχρονα και σε όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης (available bandwidth). Τα δίκτυα CDMA πρωτοχρησιμοποιήθηκαν το 1996 από το σύστημα IS-95 αλλά θεωρούνται η τεχνική του μέλλοντος καθώς η IMT-2000 έθεσε το WCDMA ως την τεχνική που χρησιμοποιείται για τα δίκτυα 3ης γενιάς. Η μόνη διαφορά που έχει η τεχνική WCDMA, είναι ότι ενώ το CDMA χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 1.25 MHz, το WCDMA έχει εύρος ζώνης 5 MHz. Αυτό γίνεται για να μπορούν τα συστήματα WCDMA να εξυπηρετούν απαιτητικότερες εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Το άμεσο όφελος που έχουμε από τη χρήση της τεχνικής WCDMA είναι ότι κάθε εισερχόμενη κλήση χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα την υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης και ως επί το πλείστον καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας και υλοποίηση απαιτητικότερων εφαρμογών.

Τα χαρακτηριστικά που έχει η WCDMA τεχνική την καθιστούν ιδανική για περιπτώσεις όπου ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών ποικίλει στο χρόνο (όπως δηλαδή συμβαίνει στην πραγματικότητα). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές τεχνικές φασματικής εξάπλωσης, όπως [3]:

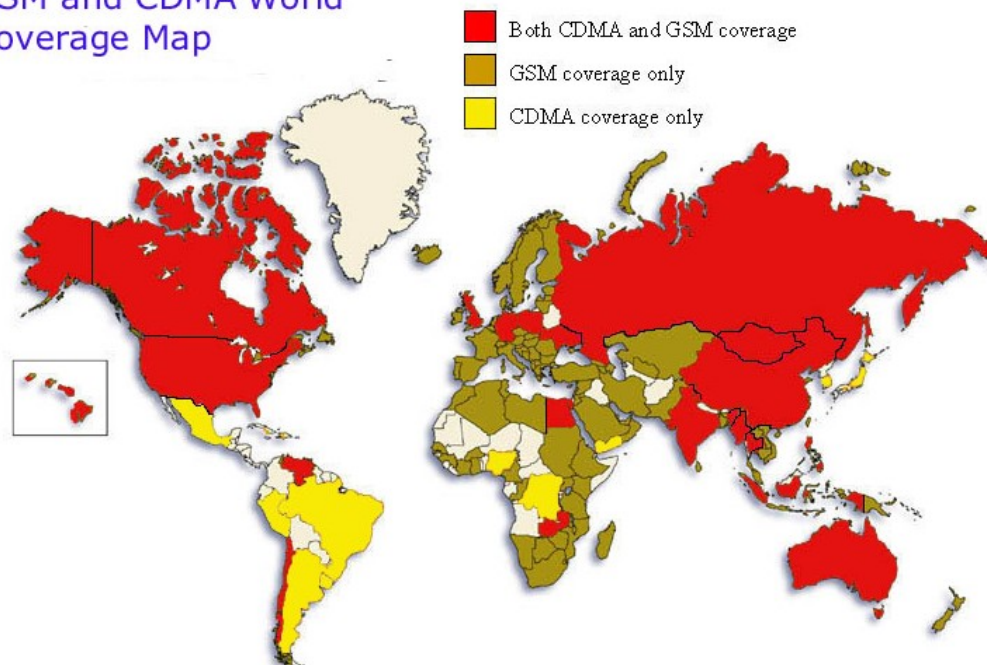
- Direct sequence spread spectrum (DSSS). Στην περίπτωση αυτή το σήμα κωδικοποιείται με ένα ορθογώνιο κώδικα μεγαλύτερου ρυθμού πριν σταλθεί, ο οποίος είναι γνωστός μόνο στον πομπό και τον δέκτη για να μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα. Στη συνέχεια το κωδικοποιημένο σήμα διαμορφώνει την carrier συχνότητα.
- Frequency-Hopping spread spectrum (FH-SS). Στην περίπτωση αυτή το σήμα που μεταδίδεται αλλάζει συχνότητα ανά τακτά χρονικά διαστήματα με έναν αλγόριθμο που τον γνωρίζει μόνο ο πομπός και ο δέκτης.
- Time-hopping spread spectrum (TH-SS). Είναι μια ακόμη τεχνολογία που δεν χρησιμοποιείται όσο οι δύο πρώτες. Βασίζεται στην τεχνική της ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της συχνότητας φορέα με βάση μια ψευδοτυχαία ακολουθία.
- Υβριδικές τεχνικές που είναι συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών.

Η τεχνική Direct Sequence είναι αυτή που έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται κυρίως από τα συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς (DS-CDMA). Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ένα σύνολο σημάτων τα οποία μεταξύ τους είναι ορθογώνια. Τα σήματα αυτά ονομάζονται ορθογωνικοί κώδικες ή απλώς κώδικες. Πολλαπλασιάζοντας το σήμα κάθε χρήστη με διαφορετικό ορθογωνικό κώδικα, κωδικοποιείται σε ένα άλλο που μόνο ο γνώστης του κώδικα μπορεί να αποκωδικοποιήσει. Ο δέκτης μπορεί να εξαγάγει το αρχικό σήμα κάνοντας χρήση του ορθογωνικού κώδικα που γνωρίζει.

Στα συστήματα CDMA όλοι οι χρήστες μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα και να κάνουν χρήση όλου του εύρους ζώνης. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως στην τεχνική CDMA όλοι οι χρήστες μοιράζονται το ίδιο διάστημα συχνοτήτων

χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ορθογωνικούς κώδικες. Στην ιδανική περίπτωση όπου όλοι οι κώδικες μεταξύ τους είναι ορθογώνιοι, ένας νέος χρήστης μπορεί να γίνει δεκτός εφόσον μπορεί να του ανατεθεί κάποιος ορθογωνικός κώδικας ενώ ο μέγιστος αριθμός χρηστών ισούται με την τιμή των συνολικά διαθέσιμων ορθογωνικών κωδικών. Στην πραγματικότητα όμως, οι κώδικες δεν είναι απολύτως ορθογώνιοι μεταξύ τους με αποτέλεσμα κάθε χρήστης να προσθέτει μία μικρή παρεμβολή στους υπόλοιπους χρήστες. Ένας νέος χρήστης θα γίνει δεκτός εφόσον το επίπεδο των παρεμβολών δεν ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο. Δηλαδή πρόκειται για συστήματα που περιορίζονται από τις παρεμβολές (Interference Limited). Η απώλεια του νέου χρήστη λόγω παρεμβολών ονομάζεται ήπιος αποκλεισμός (Soft Blocking). Ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα ένα σύστημα CDMA δεν είναι σταθερή ποσότητα (όπως στα συστήματα FDMA, TDMA). Κατά συνέπεια ούτε η χωρητικότητα του συστήματος είναι. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται μεταβαλλόμενη χωρητικότητα (Soft Capacity).

### GSM and CDMA World Coverage Map



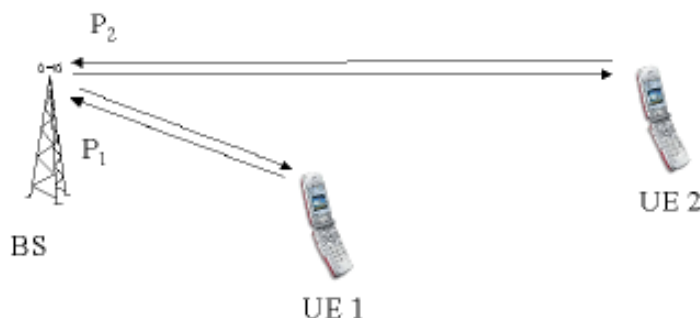
Εικόνα 1.1: Η εξάπλωση των GSM και CDMA παγκοσμίως [4]

## 1.3 Έλεγχος Ισχύος (Power Control)

Ο αποδοτικός έλεγχος ισχύος (power control) είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση των WCDMA συστημάτων [5]. Είναι απαραίτητος για την αντιμετώπιση των φαινομένων εξασθένησης σήματος και παρεμβολής. Ωστόσο, είναι αποδοτικός μόνο σε ορισμένους τύπους καναλιών ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται. Η λανθασμένη χρήση του μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό επίπεδο σπατάλης ισχύος. Ο έλεγχος ισχύος χρειάζεται τόσο στην άνω ζεύξη (uplink) όσο και στην κάτω ζεύξη (downlink).

Ο γρήγορος έλεγχος ισχύος (fast power control) είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για το WCDMA, ιδιαίτερα στην άνω ζεύξη. Χωρίς αυτόν ένας χρήστης με μεγάλη ισχύ θα μπορούσε να μπλοκάρει μία ολόκληρη κυψέλη. Συγκεκριμένα,

υπάρχει η πιθανότητα η υπερβολική ισχύς να οδηγήσει σε υψηλά επίπεδα θορύβου. Το λεγόμενο near-far πρόβλημα στην άνω ζεύξη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.2: Πρόβλημα near-far στην άνω ζεύξη [5]

Εάν ο χρήστης UE1 εκπέμπει με μεγάλη ισχύ τότε μπορεί να περιορίσει το σήμα από τον UE2 και η περιοχή κάλυψης του τελευταίου να μειωθεί δραματικά. Η βέλτιστη στρατηγική του ελέγχου ισχύος είναι ο σταθμός βάσης να λαμβάνει το ίδιο ποσό ισχύος / bit από κάθε UE ανεξάρτητα από τη θέση του ώστε να μειωθούν τα επίπεδα θορύβου και να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα της κυψέλης.

Στην περίπτωση της κάτω ζεύξης δεν υφίσταται το near-far πρόβλημα. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή όλοι οι χρήστες διαμοιράζονται την ισχύ εκπομπής του πομπού, η οποία, όμως είναι περιορισμένη. Κατά συνέπεια, όταν ένας χρήστης καταναλώνει μεγάλη ισχύ τότε απομένει λιγότερη ποσότητα ισχύος για τους υπόλοιπους χρήστες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της χωρητικότητας της κυψέλης. Είναι κατανοητό ότι στην κάτω ζεύξη ο έλεγχος ισχύος δε χρειάζεται για να αντιμετωπίσει το near-far πρόβλημα, αλλά για να διατηρήσει την κατανάλωση ισχύος σε ένα επίπεδο που να διασφαλίζονται οι ανάγκες των χρηστών.

Για τον έλεγχο ισχύος στο σύστημα υπάρχουν οι 3 εξής μέθοδοι:

- Ο έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόγχου (Open-loop power control)
- Ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόγχου (Closed-loop power control)
- Ο έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόγχου (Outer-loop power control)

### 1.3.1 Έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόγχου

Ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος του ανοιχτού βρόγχου επιχειρεί να κάνει εκτίμηση των απωλειών διαδρομής (path loss) στην κάτω ζεύξη, μέσω ενός σήματος (beacon signal) υποθέτοντας ότι η τιμή του είναι ίση με αυτή στην άνω ζεύξη. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι ανακριβής αφού το φαινόμενο της γρήγορης εξασθένησης του σήματος (fast fading) διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στην άνω και κάτω ζεύξη, λόγω της μεγάλης διαφοράς συχνοτήτων στις δύο ζεύξεις στον WCDMA FDD τρόπο λειτουργίας. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο για να παράγει μια πρόχειρη αρχική εκτίμηση ισχύος στον κινητό σταθμό στην αρχή της σύνδεσης.

Στην περίπτωση που επιλέγεται ο TDD τρόπος λειτουργίας, τότε τόσο η άνω όσο και η κάτω ζεύξη χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες με αποτέλεσμα η εξασθένηση των σημάτων τους να συσχετίζεται άμεσα. Τότε ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος του ανοιχτού βρόγχου (open-loop power control) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά.



### 1.3.2 Έλεγχος ισχύος κλειστού βρόγχου

Η λύση για τον έλεγχο ισχύος στο WCDMA είναι ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος κλειστού βρόγχου στην άνω και την κάτω ζεύξη. Στην άνω ζεύξη όταν χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη τεχνική, ο σταθμός βάσης εκτελεί συχνές εκτιμήσεις του ληφθέντος *Signal-to-Interference Ratio (SIR)* και το συγκρίνει με μία αρχικά ορισμένη, επιθυμητή τιμή του *SIR (target SIR)*. Εάν το υπολογισθέν *SIR* είναι μεγαλύτερο από το *target SIR* τότε ο σταθμός βάσης επιβάλλει στο κινητό να μειώσει την ισχύ εκπομπής του. Αντιθέτως, αν είναι μικρότερο, ο σταθμός βάσης θα επιβάλλει στο κινητό να αυξήσει την ισχύ του. Αυτός ο υπολογισμός εκτελείται 1500 φορές το δευτερόλεπτο (1.5 KHz) για κάθε κινητό λειτουργώντας έτσι πολύ γρήγορα και προλαμβάνοντας όποια πιθανή αλλαγή στις συνθήκες του καναλιού και στις απώλειες διαδρομής (path loss) αντιμετωπίζοντας με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα της γρήγορης εξασθένησης του σήματος (fast fading).

Η ίδια τεχνική του ελέγχου ισχύος κλειστού βρόγχου (closed loop power control) χρησιμοποιείται και στην κάτω ζεύξη, όπου δεν υφίσταται το near-far πρόβλημα. Όλα τα σήματα στην κυψέλη προέρχονται από το μοναδικό σταθμό βάσης προς όλους τους χρήστες. Είναι όμως επιθυμητό να παρέχεται ένα οριακό ποσό επιπλέον ισχύος στους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης αφού αυτοί υφίστανται αυξημένη παρεμβολή/θόρυβο από γειτονικές κυψέλες.

### 1.3.3 Έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόγχου

Η τρίτη μέθοδος ελέγχου ισχύος, ο έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόγχου (outer loop power control), προσδιορίζει το *target SIR*, που αναφέρθηκε παραπάνω. Καθορίζει το στόχο για τον γρήγορο έλεγχο ισχύος (fast power control), ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ποιότητα σήματος. Το *target SIR* μπορεί να αλλάζει συνεχώς λόγω των διαφορετικών συνθηκών και των διαφορετικών παραμέτρων του εκάστοτε καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, το *SIR* εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητού και το φαινόμενο πολυδιαδρομών (multipath) του χρήστη. Για παράδειγμα ένα κινητό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα θα απαιτεί υψηλό *SIR* συγκριτικά με ένα ακίνητο. Όμως, για την εξυπηρέτηση και τον καθορισμό του *SIR* για τη χειρότερη περίπτωση, π.χ. για μεγάλες ταχύτητες, θα υπήρχε σπατάλη χωρητικότητας για τις συνδέσεις με χαμηλές ταχύτητες. Συνεπώς, η καλύτερη στρατηγική είναι η τιμή του *target SIR* να έχει την ελάχιστη τιμή που ικανοποιεί την επιθυμητή ποιότητα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία της ήπιας μεταπομπής (Soft Handover) προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα στον έλεγχο ισχύος, αφού πολλοί σταθμοί βάσης εκπέμπουν προς ένα κινητό ταυτόχρονα και στην ίδια συχνότητα με πιθανώς αλληλοσυγκρουόμενες εντολές ισχύος που λαμβάνονται από το εκάστοτε κινητό. Κατά τη διάρκεια της ηπιότερης μεταπομπής (softer handover) μόνο ένας βρόγχος ελέγχου ισχύος για κάθε σύνδεση είναι ενεργός, ενώ κατά την ήπια μεταπομπή (soft handover) δύο βρόγχοι ελέγχου ισχύος για κάθε σύνδεση είναι ενεργοί, ένα για κάθε σταθμό βάσης. Με τα φαινόμενα των μεταπομπών θα ασχοληθούμε στην επόμενη ενότητα.

## 1.4 Μεταπομπές σε συστήματα WCDMA (Handovers)

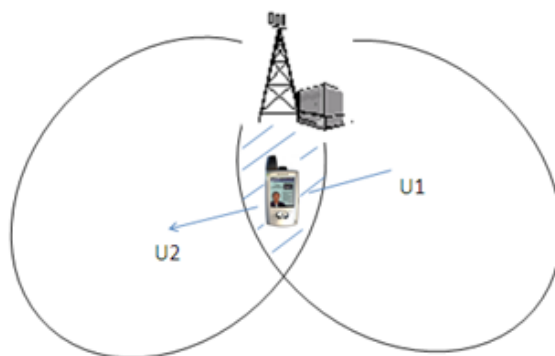
Όπως είναι γνωστό, τα κινητά τηλέφωνα μπορούν να διατηρούν τις συνδέσεις τους καθώς κινούνται από μία κυψέλη σε μία άλλη. Αυτή η διαδικασία η οποία διατηρεί την επικοινωνία, ενώ ο χρήστης κινείται, από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο, λέγεται μεταπομπή (handover). Οι μεταπομπές που συναντούμε στο WCDMA είναι κυρίως ήπιες (soft) και ηπιότερες (softer) [6].

### 1.4.1 Ήπιες μεταπομπές (Soft Handovers)

Κατά τη διάρκεια μιας ήπιας μεταπομπής (soft handover), το κινητό είναι συνδεδεμένο ταυτόχρονα σε περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης. Για την ακρίβεια, δέχεται τις μεταδόσεις δύο ή περισσότερων σταθμών βάσεων. Επειδή οι μεταδόσεις αυτές γίνονται στην ίδια συχνότητα, ένα κινητό τις αντιλαμβάνεται σαν αλληλοσυμπληρούμενα τμήματα της ίδιας πληροφορίας. Το μόνο που διαφέρει σε κάθε τμήμα είναι ο κώδικας διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε κάθε μετάδοση. Όταν η σύνδεση με έναν από τους σταθμούς βάσης δεν είναι απαραίτητη, η αντίστοιχη σύνδεση μπορεί να εγκαταλειφθεί.

Η διαδικασία της ήπιας μεταπομπής εκτελείται στα όρια μεταξύ των κυψελών. Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας, αφού η ένταση του σήματος που λαμβάνει το κινητό είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα λάμβανε αν χρησιμοποιούνταν μόνο ένας ασύρματος σύνδεσμος. Χωρίς τη χρήση της ήπιας μεταπομπής ο σταθμός βάσης θα έπρεπε να μεταδίδει με μεγαλύτερη ένταση προκειμένου να φτάσει το κινητό. Το γεγονός αυτό, θα προκαλούσε αύξηση της παρεμβολής.

Προκειμένου η χρήση των ήπιων μεταπομπών (soft handovers) να γίνεται με αποδοτικότητα, το δίκτυο διαθέτει ένα μηχανισμό ο οποίος κάνει τη διαχείριση των handovers. Για το σκοπό αυτό γίνονται μετρήσεις στις άνω ζεύξεις, ενώ για τις κάτω ζεύξεις τα αποτελέσματα λαμβάνονται από τα κινητά. Εμφάνιση της ήπιας μεταπομπής έχουμε στην εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Ήπια μεταπομπή [7]

### 1.4.2 Ηπιότερες μεταπομπές (Softer Handovers)

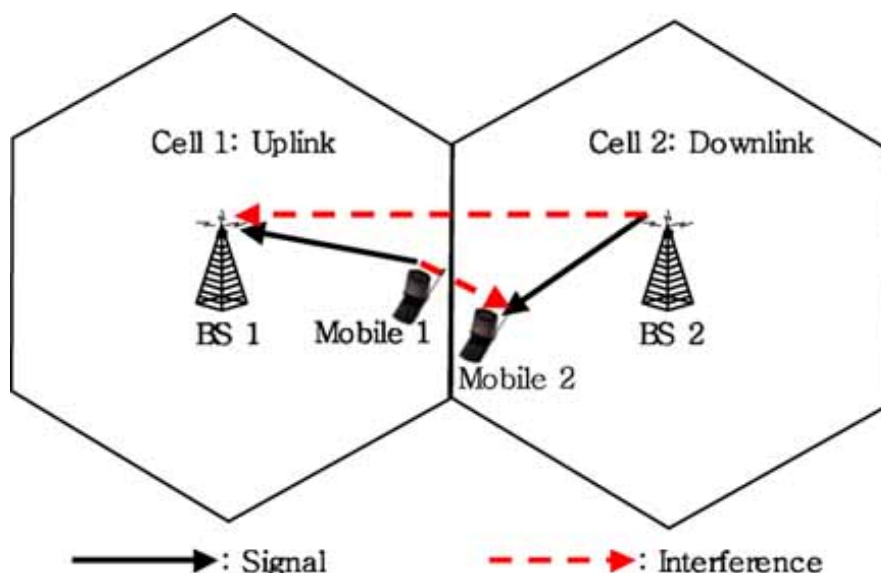
Η ηπιότερη μεταπομπή (softer handover) είναι μια μεταπομπή μεταξύ δύο τομέων της ίδιας κυψέλης. Από την πλευρά του κινητού, η ηπιότερη μεταπομπή (softer handover) είναι μία άλλη περίπτωση soft handover.

## 1.5 Κατηγορίες παρεμβολών σε δίκτυα WCDMA

Στην περίπτωση της κυψελοειδούς τηλεφωνίας όπου χρησιμοποιείται η τεχνική WCDMA, η ίδια φέρουσα συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις κυψέλες και ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας να είναι μονάδα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν δύο γειτονικές κυψέλες εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα η μία να δημιουργεί παρεμβολές στην λειτουργία της άλλης, τόσο στην άνω, όσο και στην κάτω ζεύξη (Εικόνα 1.4). Δηλαδή οι χρήστες που βρίσκονται σε μία κυψέλη αντιλαμβάνονται τις μεταδόσεις άλλων χρηστών που βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες και χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα σαν ευρυζωνική παρεμβολή. Το ίδιο συμβαίνει και με τους σταθμούς βάσης στην προσπάθειά τους να επικοινωνήσουν με τους χρήστες των κυψελών τους. Αυτή είναι η πρώτη κατηγορία παρεμβολών και ονομάζεται **διακυψελικές παρεμβολές (intercell interference)** [2].

Η δεύτερη κατηγορία παρεμβολών είναι οι **ενδοκυψελικές παρεμβολές (intracell interference)**, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι οι ορθογώνιοι κώδικες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα WCDMA δεν είναι πλήρως ορθογώνιοι μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρήστης να βλέπει ένα μέρος της ισχύος που προορίζεται για τους υπόλοιπους χρήστες της κυψέλης σαν παρεμβολή. Για να ποσοτικοποιήσουμε τις παρεμβολές αυτές εισάγουμε την ποσότητα 'α' που ονομάζεται παράγοντας ορθογωνικότητας και μας δείχνει σε τι ποσοστό δεν είναι ορθογώνιοι οι κώδικες. Οπότε όταν παίρνει τιμή  $\alpha = 0$  τότε δεν έχουμε ενδοκυψελικές παρεμβολές, ενώ για  $\alpha = 1$  κάθε χρήστης βλέπει ολόκληρη την ισχύ των υπολοίπων σημάτων σαν παρεμβολή, που είναι και το χειρότερο σενάριο.

Τέλος, μια ακόμα κατηγορία παρεμβολών μπορεί να θεωρηθεί και ο θερμικός θόρυβος  $N_0$  που υπάρχει σε όλα τα συστήματα τηλεπικοινωνιών και δημιουργεί παραμορφώσεις και κατόπιν δυσκολία αναγνώρισης των μεταδιδόμενων σημάτων.



Εικόνα 1.4: Διακυψελική Παρεμβολή σε άνω και κάτω ζεύξη [8]

## 1.6 Έλεγχος αποδοχής κλήσης (Call Admission Control)

Ακόμα μια σημαντικότερη παράμετρος των συστημάτων WCDMA είναι ο έλεγχος αποδοχής των εισερχομένων κλήσεων. Δηλαδή με ποια κριτήρια θα λαμβάνεται η απόφαση από το σύστημα για την εξυπηρέτηση ή τον αποκλεισμό μιας εισερχόμενης κλήσης. Στην περίπτωση της άνω ζεύξης, η αποδοχή μιας νέας κλήσης αντιστοιχεί σε αύξηση της συνολικής ισχύος που λαμβάνει ο σταθμός βάσης. Αυτή η αύξηση της ισχύος αυξάνει τις παρεμβολές στις κλήσεις της κυψέλης που ήδη εξυπηρετούνται με αποτέλεσμα οι νέες κλήσεις που λογικά θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της *Ισχύος του Σήματος* ως προς το *Θόρυβο* ( $E_b/N_0$ ), να απορρίπτονται λόγω της έντασης των παρεμβολών. Αυτό γίνεται γιατί οι κλήσεις που δεν ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις τους αντιμετωπίζουν αυξημένους ρυθμούς εμφάνισης σφαλμάτων κατά την διάρκεια της επικοινωνίας και υποβιβασμό της ποιότητας της επικοινωνίας τους. Ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κλήσης (Call Admission Control) διασφαλίζει την ποιότητα επικοινωνίας όλων των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Οι κύριοι τρόποι με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος αποδοχής κλήσης είναι τρεις [9]:

- **Έλεγχος αποδοχής κλήσης βάσει του αριθμού των χρηστών μιας υπηρεσίας**  
Η συνθήκη αποδοχής βασίζεται μόνο στον αριθμό των χρηστών που υπάρχουν ήδη στο σύστημα. Ο αλγόριθμος θεωρεί ότι κάθε χρήστης καταναλώνει μία ποσότητα από ισοδύναμους πόρους του συστήματος (Radio Resource Equivalent Units). Μία μονάδα πόρων αντιστοιχεί σε ένα χρήστη ο οποίος χρησιμοποιεί μία υπηρεσία με συγκεκριμένη απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης. Ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης του κάθε χρήστη, ο χρήστης απαιτεί περισσότερους ή λιγότερους πόρους για την σύνδεσή του.
- **Έλεγχος αποδοχής κλήσης βάσει μετρήσεων για μία υπηρεσία**  
Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος αποδοχής μιας κλήσης γίνεται με βάση το φορτίο της κυψέλης και του παράγοντα φορτίου της κλήσης. Έστω ότι έχουμε  $P$  την συνολική λαμβανόμενη ισχύ στον σταθμό βάσης την οποία μπορεί να μετρήσει ο σταθμός βάσης για να υπολογίζει ανά πάσα στιγμή το φορτίο της κυψέλης. Τότε, υποθέτοντας ότι υπάρχουν  $N$  ενεργοί χρήστες στην κυψέλη, η αποδοχή του χρήστη  $N + 1$  θα γίνει όταν το τρέχον φορτίο της κυψέλης μαζί με το επιπρόσθετο φορτίο κυψέλης που θα προσθέσει η νέα κλήση, δεν θα ξεπεράσουν το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο. Αν το ξεπεράσουν, τότε η νέα κλήση απορρίπτεται.
- **Έλεγχος αποδοχής κλήσης βάσει στατιστικής εκτίμησης για μία υπηρεσία**  
Σε αυτή την περίπτωση αντί να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις του φορτίου της κυψέλης κάνουμε τις εκτιμήσεις του με βάση τα χαρακτηριστικά της κάθε υπηρεσίας. Ωστόσο πρέπει να τονίσουμε ότι η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται από την σωστή ρύθμιση των εκτιμώμενων μεταβλητών για την κάθε υπηρεσία.

## 1.7 Συντελεστής δραστηριότητας & παράγοντας φορτίου

### 1.7.1 Συντελεστής δραστηριότητας (Activity Factor)

Σε κάθε κλήση που εισέρχεται σε σύστημα WCDMA πολύ σημαντικό ρόλο στην επιβάρυνση που προσφέρει παίζει και ο συντελεστής δραστηριότητας της εκάστοτε υπηρεσίας [9]. Κάθε υπηρεσία έχει κάποια συγκεκριμένη συμπεριφορά ως προς τον τρόπο με τον οποίο παράγει δεδομένα τα οποία στην συνέχεια μεταδίδονται. Αυτός ο τρόπος με τον οποίο η πηγή παράγει τα δεδομένα εκφράζει την δραστηριότητα (activity) της πηγής. Ένα παράδειγμα είναι η video κλήση, η οποία χρησιμοποιεί μία εφαρμογή που παράγει δεδομένα εικόνας προς μετάδοση πάρα πολύ συχνά επειδή απαιτείται μία συνεχής ροή της εικόνας και άρα μία συνεχής ροή δεδομένων. Έτσι, η δραστηριότητα της πηγής είναι μεγάλη κατά την διάρκεια της κλήσης. Σε αντίθεση με την υπηρεσία της περιαγωγής WWW όπου εξαιτίας του ότι ο χρήστης κατά την διάρκεια της κλήσης χρειάζεται να διαβάζει και το περιεχόμενο της σελίδας HTML χωρίς να στέλνει δεδομένα, η πηγή δεν έχει τόσο υψηλή δραστηριότητα. Στατιστικά μοντέλα έχουν δώσει, ανάλογα με την υπηρεσία και την εφαρμογή, το ποσοστό του χρόνου της κλήσης που η πηγή παράγει δεδομένα προς μετάδοση. Αυτό είναι το ποσοστό που εκφράζεται από τον **συντελεστή δραστηριότητας (activity factor)**.

### 1.7.2 Παράγοντας φορτίου (Load Factor)

Σε ένα σύστημα WCDMA όπου μπορεί να εισέλθουν προς εξυπηρέτηση πολλοί διαφορετικοί χρήστες που ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διαφορετική υπηρεσία, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε τι ποσοστό του συνολικού φορτίου στον σταθμό βάσης αντιστοιχεί στην κάθε υπηρεσία. Οπότε ο **παράγοντας φορτίου (Load Factor)** μιας υπηρεσίας είναι ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος στον σταθμό βάσης από όλους τους χρήστες που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη υπηρεσία ( $P_{service}$ ) προς την συνολική ισχύ του θορύβου (θερμικού θορύβου και παρεμβολές) που λαμβάνει ο σταθμός βάσης ( $P_{total}$ ) [9].

Με αυτά τα στοιχεία όσον αφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων WCDMA ολοκληρώνουμε την εισαγωγή μας για το που θα πρέπει να δώσουμε βάση κατά την προσομοίωση. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλύσουμε τη δομή της γλώσσας που θα χρησιμοποιήσουμε (SIMSCRIPT II.5) και θα παραθέσουμε γενικές πληροφορίες όσον αφορά στην καθεαυτώ διαδικασία της προσομοίωσης (όπως μοντέλα προσομοίωσης και πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα διαδικασίας).

## Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στην προσομοίωση και στη SIMSCRIPT II.5

### 2.1 Εισαγωγικά στοιχεία περί προσομοίωσης

Σε αυτή την πρώτη ενότητα του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου θα κάνουμε μια αναφορά στις έννοιες της προσομοίωσης, τα διάφορα είδη μοντέλων προσομοίωσης, καθώς και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση αυτής. Τέλος θα αναλύσουμε το θέμα των πολλαπλών εκτελέσεων με τη χρήση διαφορετικών «γεννήτριων» αριθμών, ώστε να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα.

#### 2.1.1 Γενικές έννοιες προσομοίωσης

**Μοντέλο** (model, από το λατινικό modus = τρόπος, μέτρο)

Κάτι που αντιπροσωπεύει κάτι άλλο (= πρωτότυπο), δίνοντας έμφαση σε ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του – όχι όλα (βλ. Chartrand, 1985, σ.2). Παραδείγματα: χάρτης, σχέδια ή μακέτα κτηρίου, πρότυπο ή πιλοτικό σύστημα, μοντέλο αεροπλάνου.

**Προσομοίωση** (simulation)

Τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στο χρόνο.

**Μοντέλο προσομοίωσης** (simulation model)

Σύνολο υποθέσεων για τη λειτουργία του συστήματος, εκφρασμένων υπό μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων του συστήματος (και συνήθως κωδικοποιημένων σε πρόγραμμα υπολογιστή). Σημείωση: Η προσομοίωση γίνεται πάντα σε μοντέλο – όχι στο πρωτότυπο.

#### 2.1.2 Είδη μοντέλων προσομοίωσης

Έχοντας ένα σύστημα που πρέπει να προσομοιώσουμε, θα πρέπει να αναζητήσουμε το κατάλληλο μοντέλο προσομοίωσης για το σκοπό αυτό. Στην βιβλιογραφία συναντάμε τρία βασικά μοντέλα [10]:

1. **Στατικά ή Δυναμικά Μοντέλα Προσομοίωσης:** Ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης, αναπαριστά ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ή αναπαριστά ένα σύστημα στο οποίο ο χρόνος δεν έχει σημασία. Αντίθετα, ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.
2. **Ντετερμινιστικά ή Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης:** Αν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει πιθανοτικά (δηλαδή "τυχαία") τμήματα, ονομάζεται ντετερμινιστικό. Για παράδειγμα, ένα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία χημική αντίδραση, μπορεί να είναι ένα τέτοιο μοντέλο. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη, με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Όμως, πολλές φορές για την περιγραφή κάποιων συστημάτων με προσομοίωση απαιτείται να χρησιμοποιηθούν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης, δηλαδή μοντέλα που θα έχουν τουλάχιστον ορισμένα τμήματα με "τυχαία" είσοδο. Για την περιγραφή συστημάτων αναμονής χρησιμοποιούμε τέτοια στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης.

3. **Διακριτά ή Συνεχή Μοντέλα Προσομοίωσης:** Τα μοντέλα μπορούν να είναι διακριτά (discrete) ή συνεχή (continuous). *Διακριτό* μοντέλο είναι αυτό στο οποίο οι μεταβλητές κατάστασης μπορούν να αλλάξουν σε διακεκριμένες στιγμές του χρόνου. *Συνεχές* είναι το μοντέλο του οποίου οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν συνεχώς στο χρόνο. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ένα διακριτό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αναπαράσταση ενός διακριτού συστήματος και ένα διακριτό σύστημα δεν αναπαριστάται μόνο από ένα διακριτό μοντέλο προσομοίωσης. Η απόφαση για τη χρήση ενός διακριτού ή ενός συνεχούς μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα, εξαρτάται από τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο ροής πακέτων δεδομένων σε ένα WAN, θα είναι διακριτό εάν μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά και η κίνηση των επιμέρους πακέτων και κατά συνέπεια των επιμέρους χρηστών. Αντίθετα, αν μας ενδιαφέρει μόνο η συνολική κίνηση, η ροή των πακέτων θα μπορούσε ίσως να περιγραφεί με διαφορετικές εξισώσεις σε ένα συνεχές μοντέλο [10].

### 2.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων. Ορισμένα πιθανά πλεονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω:

- Τα περισσότερα σύνθετα συστήματα του πραγματικού κόσμου με "τυχαίες" παραμέτρους, δεν μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά με κάποιο μαθηματικό μοντέλο. Έτσι, η προσομοίωση είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη μέθοδος μελέτης.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης ενός υπάρχοντος συστήματος, κάτω από κάποιο προβλεπόμενο σύνολο λειτουργικών συνθηκών.
- Μπορούν να συγκριθούν μέσω της προσομοίωσης, εναλλακτικές προτεινόμενες σχεδιάσεις ή εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας του συστήματος, ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί.
- Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο στις συνθήκες των πειραμάτων, σε σχέση με πιθανό πειραματισμό με το πραγματικό σύστημα.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη ενός συστήματος που έχει μακρόχρονη εξέλιξη (π.χ. ένα οικονομικό σύστημα), σε πολύ λιγότερο χρόνο, ή την εμβάθυνση σε κάποιες λεπτομέρειες που πιθανώς στην πραγματική ροή να μην μπορεί να δοθεί η απαιτούμενη προσοχή.
- Είναι μια μέθοδος οικονομική, αφού είναι δυνατό να υλοποιηθεί πλέον σε μικρούς υπολογιστές με τη χρήση γλωσσών προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C.
- Η προσομοίωση μπορεί να υλοποιηθεί από μηχανικούς που δεν είναι απαραίτητο να έχουν εκτεταμένες μαθηματικές γνώσεις, παρά μόνο τη δυνατότητα να κατανοούν βασικές έννοιες στατιστικής και να μπορούν να εφαρμόζουν ήδη έτοιμα μαθηματικά εργαλεία.

Αντιθέτως, ορισμένα μειονεκτήματα της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω:

- Τα μοντέλα προσομοίωσης συχνά απαιτούν πολύ χρόνο και πόρους για να αναπτυχθούν.

- Ο μεγάλος όγκος αριθμών που παράγονται από μία μελέτη προσομοίωσης ή η εντύπωση που δημιουργούν οι τυχόν γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων της, συχνά ενισχύουν μία τάση να δίνεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα αυτά από όσο πρέπει. Αν το μοντέλο δεν είναι μία αρκετά έγκυρη αναπαράσταση του συστήματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανεξάρτητα του πόσο εντυπωσιακά είναι, θα προσθέσουν λίγη χρήσιμη πληροφορία για το πραγματικό σύστημα.
- Κάθε εκτέλεση ενός μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων παράγει μόνο εκτιμήσεις των πραγματικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Έτσι, είναι πιθανό να χρειασθούν πολλές διαφορετικές ανεξάρτητες εκτελέσεις του μοντέλου για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου που θα μελετηθεί. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση δεν είναι γενικά τόσο καλή μέθοδος για βελτιστοποίηση, όσο είναι για τη σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων του συστήματος.

Αυτό το τελευταίο μειονέκτημα είναι ο λόγος για τον οποίο σε κάθε γλώσσα προσομοίωσης θέτουμε διαφορετικά “SEED” numbers, δηλαδή «γεννήτριες» αριθμοσειρών, που καθορίζουν τη μορφή των ψευδοτυχαίων αριθμών που παράγονται και ως εκ τούτου συμβάλλουν στη διαμόρφωση των τελικών αποτελεσμάτων εξόδου σε κάθε, διαφορετική, εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων του συνόλου των διαφορετικών εκτελέσεων (runs) μπορεί να μας δώσει μια πολύ καλή προσέγγιση με μικρό ποσοστό απόκλισης, το οποίο είναι και το ζητούμενο για κάθε επιτυχημένο μοντέλο προσομοίωσης. Τέλος αξίζει να επισημάνουμε ότι όσο μεγαλύτερο το πλήθος των διαφορετικών εκτελέσεων, δηλαδή εκτελέσεις (runs) με διαφορετικά SEED numbers κάθε φορά, τόσο καλύτερη θα είναι η προσέγγιση που θα λάβουμε στα αποτελέσματά μας, αλλά και τόσο περισσότερο χρόνο θα χρειαστεί να διαθέσουμε.

## 2.2 Περιγραφή χρησιμότητας της γλώσσας SIMSCRIPT

Για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορες μεθόδους [11]. Μία είναι η μέθοδος *διακριτών γεγονότων*, η οποία στηρίζεται στην παρατήρηση του κάθε γεγονότος που λαμβάνει χώρα καθώς ο χρόνος περνά. Μία άλλη τεχνική είναι η *μέθοδος διαδικασίας*. Η *μέθοδος διαδικασίας* είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για την ανάπτυξη προγραμμάτων προσομοίωσης επειδή αποφεύγει κανείς τον προγραμματισμό της λεπτομερούς παρατήρησης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Ένα παράδειγμα μπορεί να είναι το εξής: Έστω ότι θέλουμε να προσομοιώσουμε ένα σύστημα  $M|M|1$  (αφίξεις πελατών κατά Poisson|εξυπηρέτηση πελατών εκθετικής κατανομής|σύστημα με 1 εξυπηρετητή) για κάποιο χρονικό διάστημα  $x$ . Τα σημεία που θα πρέπει να τονίσουμε ώστε να περιγράψουμε σωστά το πρόγραμμα είναι:

- i. Το σύστημα αποτελείται από έναν εξυπηρετητή
- ii. Μια διαδικασία αφίξεων τροφοδοτεί τον εξυπηρετητή με πελάτες και την χρονική στιγμή  $x$  υπάρχει διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.
- iii. Οι αφίξεις γίνονται κατά Poisson
- iv. Όταν γίνει μία άφιξη πελάτη, αυτός ζητά να εξυπηρετηθεί. Αν υπάρχει διαθέσιμος εξυπηρετητής τότε μένει εκεί για ένα τυχαίο διάστημα που έχει εκθετική κατανομή και τέλος φεύγει από το σύστημα.



Ένα πρόγραμμα SIMSCRIPT μοιάζει πολύ με το προηγούμενο παράδειγμα. Με τον όρο **διαδικασία** (process) (πχ. άφιξη) ονομάζουμε μία χρονικά διατεταγμένη ακολουθία γεγονότων η οποία περιγράφει τις διαδοχικές θέσεις ή φάσεις ενός αντικειμένου-οντότητας από την εισαγωγή του στο σύστημα μέχρι κάποιο σημείο του συστήματος ή ακόμη και την έξοδό του. Μία διαδικασία μπορεί να ενεργοποιήσει μία άλλη διαδικασία η οποία περιγράφει τη συνέχεια της κίνησης του αντικειμένου στο σύστημα. Στο προηγούμενο παράδειγμα η διαδικασία **άφιξη** (ARRIVAL) εισάγει στο σύστημα έναν πελάτη. Αν η συνέχεια της πορείας του πελάτη περιγραφεί από την διαδικασία με όνομα **πελάτης** (CUSTOMER) τότε:

- a) Μέσα από την διαδικασία ARRIVAL δίδεται η εκκίνηση της διαδικασίας CUSTOMER.
- b) Η διαδικασία CUSTOMER φέρνει τον πελάτη στην ουρά, κατόπιν στην εξυπηρέτηση και τέλος τον εξάγει από το σύστημα.

Η διαδικασία CUSTOMER δεν πρέπει να συγχέεται με το αντικείμενο που ονομάζουμε πελάτη. Η διαδικασία μπορεί να έχει αυθαίρετο όνομα. **Πόροι** (resources) είναι στοιχεία που ζητά ένα αντικείμενο κατά την μετακίνησή του στο σύστημα (πχ. ο εξυπηρετητής).

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης, μία διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί αρκετές φορές (πχ. να γίνουν πολλές αφίξεις). Επίσης μία διαδικασία δύναται να ενεργοποιήσει άλλη διαδικασία. Για παράδειγμα, για όλη την περίοδο από 0 μέχρι τη στιγμή x, η προσομοίωση ενεργοποιεί συνεχώς διαδικασίες με το όνομα ARRIVAL. Ακόμα, κάθε διαδικασία ARRIVAL περιέχει την εντολή "ενεργοποίησε την διαδικασία CUSTOMER". Κάθε φορά που ενεργοποιείται μία διαδικασία, το πρόγραμμα αυτόματα ενημερώνει ένα διάγραμμα διαδικασιών που έχουν ίδιο όνομα (process notice). Έτσι κάποια χρονική στιγμή, στο σύστημα μπορεί να εκτελούνται πολλές διαδικασίες με ίδιο όνομα ταυτοχρόνως (πχ. έχουν εισαχθεί πολλοί πελάτες που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις ο καθένας). Το πρόγραμμα φροντίζει για τις θέσεις που καταλαμβάνουν βάσει των κανόνων μετακίνησης που έχουν καθορισθεί από τον προγραμματιστή. Αυτό γίνεται αυτόματα με τη βοήθεια προγραμμάτων-βιβλιοθηκών διαχείρισης λιστών χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού. Αυτό είναι βασικό πλεονέκτημα των γλωσσών προσομοίωσης έναντι των γλωσσών γενικού σκοπού (πχ. C).

## 2.3 Δομή προγράμματος SIMSCRIPT II.5

Η γλώσσα SIMSCRIPT έχει αναπτυχθεί με βάση τη γλώσσα C [11]. Ένα πρόγραμμα προσομοίωσης σε SIMSCRIPT αποτελείται από τρία ή τέσσερα στοιχεία:

- **PREAMBLE:** *Πρόλογος.* Εμφανίζεται μόνο μία φορά. Καθορίζονται τα ονόματα των διαδικασιών, πόρων, και ποσοτήτων ή μεταβλητών που θέλουμε να υπολογισθούν (πχ. μέσος χρόνος παραμονής σε ουρά). Όσες μεταβλητές ορίζονται εδώ είναι κοινές (common, global) Επίσης ορίζονται οι μονάδες χρόνου:

DEFINE .MINUTES TO MEAN UNITS

Η μεταβλητή χρήστη .MINUTES (με τελεία ή και χωρίς τελεία) δηλώνεται ως ταυτόλογη με την σταθερά UNITS την οποία η SIMSCRIPT θεωρεί ως μονάδα χρόνου. Αυτό γίνεται προαιρετικά, για ευκολότερη ανάγνωση και κατανόηση του κώδικα από έναν χρήστη.

- **MAIN:** *Κυρίως πρόγραμμα.* Εμφανίζεται μόνο μια φορά. Παρέχει τις εντολές ανάγνωσης δεδομένων (δυνατή και η κλήση υπορουτινών), καθώς και την ενεργοποίηση των πρώτων διαδικασιών.
- **PROCESS:** *Διαδικασία.* Ορίζεται ένα σύνολο διαδικασιών με ίδιο όνομα. Η εκτέλεση μίας διαδικασίας μπορεί να κάνει την ένδειξη του ρολογιού της προσομοίωσης να αυξηθεί. Μπορούν να ορισθούν πολλά σύνολα διαδικασιών στο πρόγραμμα.
- **ROUTINE:** *Υπορουτίνα.* Πχ. για ανάγνωση δεδομένων, εκτύπωση αποτελεσμάτων. Η εκτέλεση μίας υπορουτίνας δεν μεταβάλλει τον τρέχοντα χρόνο.

## 2.4 Στοιχεία προγραμματισμού της SIMSCRIPT II.5

### 2.4.1 Διαδικασία (PROCESS)

Στο παράδειγμα του M|M|1 έχουμε τρεις διαδικασίες: άφιξη, κίνηση πελάτη μέχρις ότου εξέλθει από το σύστημα και τέλος προσομοίωσης. Κάθε διαδικασία δηλώνεται στον PREAMBLE (Πρόλογος) και έχουμε ως εξής:

```
PROCESSES INCLUDE ARRIVAL, CUSTOMER AND STOP.SIMULATION
```

Μετά τη δήλωση του ονόματος, η SIMSCRIPT είναι έτοιμη να διαχειρισθεί πολλές ομώνυμες διαδικασίες. Σε μία διαδικασία μπορεί να αντιστοιχίσουμε κάποιες **μεταβλητές ή χαρακτηριστικά** (attributes). Για παράδειγμα μπορεί να μας ενδιαφέρει η ηλικία του κάθε πελάτη που φθάνει (αν π.χ. στο πρόγραμμα επιθυμούμε κάποιες ηλικίες να έχουν προτεραιότητα στην ουρά). Οπότε μπορούμε να έχουμε την εξής εντολή:

```
EVERY CUSTOMER HAS A CU.AGE
```

Μετά τη δήλωση της διαδικασίας στο PREAMBLE φτιάχνουμε την υπορουτίνα που περιγράφει την διαδικασία. Αυτή είναι ξεχωριστή από το PREAMBLE. Οι εντολές διαδικασιών είναι:

- **ACTIVATE**

Η εντολή ACTIVATE:

1. δημιουργεί νέα διαδικασία, και
2. την ενεργοποιεί, δηλαδή την αφήνει να εξελίσσεται ("τρέχει") μέσα στο σύστημα.

Παραδείγματα:

```
ACTIVATE AN ARRIVAL NOW
ACTIVATE A CUSTOMER IN 10 .MINUTES
ACTIVATE A STOP.SIMULATION IN X .HOURS
```

Όταν ενεργοποιείται μία διαδικασία, μπορεί στο σύστημα να υπάρχουν ήδη και άλλες ομώνυμες διαδικασίες σε εξέλιξη.

- **CREATE / DESTROY**

Η εντολή CREATE χρησιμοποιείται για τη **δημιουργία** διαδικασιών και πόρων (επόμενη ενότητα) αλλά δεν ενεργοποιεί. Αυτό είναι χρήσιμο προκειμένου να εκτελέσουμε μια εντολή πριν την ενεργοποίηση. Παράδειγμα: Δημιουργούμε μία διαδικασία (πελάτη) που έχει το χαρακτηριστικό "ηλικία" και τιμή 23:

```
CREATE A CUSTOMER
LET CU.AGE (CUSTOMER)=23
ACTIVATE THE CUSTOMER NOW
```

Η εντολή DESTROY **εξαφανίζει** ένα αντικείμενο που βρίσκεται στην κατάσταση "γέννησης" ή "δημιουργίας". Δεν μπορεί να εξαφανίσει κάτι που έχει ενεργοποιηθεί (ACTIVATED). Επίσης μία διαδικασία δεν μπορεί να εξαφανίσει τον εαυτό της.

- **REQUEST / RELINQUISH**

Ένα αντικείμενο ζητά μία μονάδα πόρου: πχ. ο πελάτης θέλει να εξυπηρετηθεί από μία μονάδα εξυπηρέτησης (έναν εξυπηρετητή, server) του κόμβου εξυπηρέτησης SERVER(1). Τότε γράφουμε:

```
REQUEST 1 UNIT OF SERVER(1)
ή απλώς
REQUEST 1 SERVER(1)
```

δηλαδή ζήτησε μία μονάδα του πόρου SERVER(1). Εδώ το UNIT εννοείται ότι δεν αναφέρεται στη μονάδα χρόνου. Αν ο πόρος δεν είναι διαθέσιμος, ο πελάτης μπαίνει στην ουρά. Η μετακίνηση του πελάτη στις διάφορες θέσεις της ουράς **δεν** απαιτεί προγραμματισμό. Με την απλή αυτή εντολή περιγράφουμε τον πελάτη μέχρι τη στιγμή που θα αρχίσει να εξυπηρετείται. Στο τέλος της εξυπηρέτησης ο πελάτης φεύγει και ο εξυπηρετητής ελευθερώνεται:

```
RELINQUISH 1 UNIT OF SERVER(1)
```

- **WORK / WAIT**

Είναι δύο απολύτως ίδιες εντολές. Ωστόσο συνηθίζεται η εντολή WORK να χρησιμοποιείται εκεί όπου δηλώνεται ο χρόνος εξυπηρέτησης ή επεξεργασίας ενώ η WAIT όταν περιγράφονται οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων. Παράδειγμα:

```
REQUEST 1 UNIT OF SERVER(1)
WORK 10 .MINUTES
RELINQUISH 1 UNIT OF SERVER(1)
```

Εδώ ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι ίσος με 10 λεπτά (. MINUTES) και με τις εντολές αυτές περιγράφεται όλη η πορεία του πελάτη μέσα στο σύστημα.

- **SUSPEND / REACTIVATE THE**

Η εντολή SUSPEND μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υπορουτίνα μίας διαδικασίας για να σταματήσει η λειτουργία της. Για την περίπτωση που θέλουμε να επανενεργοποιηθεί πρέπει να σημειώσουμε την θέση της σε μία μεταβλητή (attribute) αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να την χάσουμε. Η εντολή

```
REACTIVATE THE "ΟΝΟΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ" NOW
```

την ενεργοποιεί πάλι.

- **INTERRUPT / RESUME**

Η πρώτη χρησιμοποιείται σε μία διαδικασία ή ρουτίνα για να διακόψει την εξέλιξη μίας άλλης διαδικασίας, πχ. πελάτη στη μέση της εξυπηρέτησης:

```
INTERRUPT THE CUSTOMER
```

Κάθε διαδικασία έχει τη μεταβλητή συστήματος **TIME.A** που δείχνει τον χρόνο συμπλήρωσής της. Αν  $TIME.A = 50$  τη στιγμή  $TIME.V=30$  και γίνει διακοπή τότε η μεταβλητή **TIME.A** παίρνει την τιμή  $50 - 30 = 20$  (σαν να μηδενιζόταν ο χρόνος τώρα). Μετά τη διακοπή η διαδικασία θα εκκρεμεί μέχρι την εμφάνιση της εντολής:

RESUME THE CUSTOMER

Αν αυτό συμβεί τη στιγμή 80 τότε η νέα τιμή της **TIME.A** θα είναι  $80+20=100$ .

- **END**

Η εντολή **END** τοποθετείται στο τέλος κάθε υπορουτίνας που περιγράφει μία διαδικασία.

## 2.4.2 Πόρος (RESOURCE)

Ο πόρος είναι ένα στοιχείο (πχ. μηχανή, εργαζόμενος) που προσφέρει κάποιο έργο σε ένα αντικείμενο (πχ. πελάτης). Όταν ο πόρος δεν είναι διαθέσιμος τότε το αντικείμενο περιμένει την σειρά του στην ουρά και, όπως αναφέρθηκε πριν, αυτό γίνεται αυτομάτως στην SIMSCRIPT χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού. Κάθε πόρος δηλώνεται στο PREAMBLE. Για το  $M|M|1$  ο πόρος είναι ο εξυπηρετητής (SERVER):

RESOURCES INCLUDE SERVER

Μετά τη δήλωσή κάποιου πόρου η SIMSCRIPT **αυτομάτως**:

**α)** Θεωρεί ότι πιθανόν να υπάρχουν πολλές συστοιχίες πόρων με το όνομα **SERVER** στο σύστημα. Είναι έτοιμη να τις καταχωρήσει στη μνήμη ως **SERVER(1)**, **SERVER(2)**, ..., χωρίς να έχει καθορισθεί το πλήθος τους ακόμη. Ο καθορισμός του πλήθους θα γίνει αργότερα.

**β)** Η SIMSCRIPT δημιουργεί **αυτομάτως** 6 μεταβλητές συστήματος

- **N.SERVER**

για το πλήθος των συστοιχιών που έχουν πόρους με όνομα **SERVER**, το οποίο πρέπει να καθορισθεί έμμεσα ή άμεσα. Για κάθε μια συστοιχία πόρων  $I=1, \dots, N$ .**SERVER**, δημιουργεί αυτόματα τις εξής μεταβλητές:

- **U.SERVER(I)**

= Units of **SERVER(I)** = πόσες μονάδες πόρου **SERVER(I)** είναι διαθέσιμες τώρα. Για παράδειγμα αν ο σταθμός παραγωγής **SERVER(1)** έχει 5 παράλληλες μηχανές, αποτελεί έναν πόρο με 5 συνολικά μονάδες. Η μεταβλητή **U.SERVER(1)** δίνει το πλήθος των μονάδων που είναι διαθέσιμες τώρα.

- **X.SERVER(I)**

= eXecuting jobs in **SERVER(I)** = μία λίστα (πίνακας, διάνυσμα) ή, ισοδύναμα, ένα σύνολο (λέγεται **SET** στην SIMSCRIPT) που περιέχει τα αντικείμενα-διαδικασίες οι οποίες έχουν καταλάβει μονάδες του πόρου **SERVER(I)** τώρα.

- **N.X.SERVER(I)**  
= Number of eXecuting jobs in SERVER(I) = το πλήθος διαδικασιών που είναι στο σύνολο X.SERVER(I) (δηλ. που έχουν καταλάβει μονάδες του πόρου SERVER(I) τώρα).
- **Q.SERVER(I)**  
= Queue of SERVER(I) = ένα σύνολο (SET) που περιέχει τα αντικείμενα-διαδικασίες οι οποίες αναμένουν στην ουρά τώρα, για να εξυπηρετηθούν από μονάδες του πόρου SERVER(I).
- **N.Q.SERVER(I)**  
= Number in Queue of SERVER(I) = πόσα αντικείμενα-διαδικασίες περιμένουν τώρα στην ουρά του SERVER(I) για εξυπηρέτηση.

Οι μεταβλητές αυτές είναι ΑΚΕΡΑΙΕΣ. Μετά τη δήλωσή του στο PREAMBLE ο πόρος πρέπει να **δημιουργηθεί**. Αυτό γίνεται στο κυρίως πρόγραμμα MAIN. Για ένα δίκτυο με 2 σταθμούς M|M|5 και M|M|3 γράφουμε:

```
CREATE EVERY SERVER (2) (δύο σταθμοί)
LET U.SERVER (1) = 5 (5 μονάδες-μηχανές ο 1ος)
LET U.SERVER (2) = 3 (3 μονάδες-μηχανές ο 2ος)
```

Όλες οι μεταβλητές που ορίσαμε μέχρι τώρα μεταβάλλονται με το χρόνο καθώς το σύστημα αρχίζει να λειτουργεί. Τη στιγμή TIME.V που συμβολίζει το **ΤΩΡΑ** στην SIMSCRIPT, κάποιες μονάδες μπορεί να αδρανούν στον SERVER(1) οπότε U.SERVER(1)  $\neq$  5. Αν θέλουμε το πρόγραμμα να θυμάται πόσες μονάδες είχαν εγκατασταθεί εξ αρχής τότε πρέπει να ορίσουμε μία δική μας μεταβλητή ΧΡΗΣΤΗ, πχ. την NUM.MACHINES. Οπότε θα έχουμε:

#### α) Δήλωση στο PREAMBLE

```
(πρώτα RESOURCES INCLUDE SERVER και αμέσως μετά ...)
EVERY SERVER HAS A NUM.MACHINES
DEFINE NUM.MACHINES AS AN INTEGER VARIABLE
```

#### β) Ανάγνωση στο MAIN ή σε υπορουτίνα εισαγωγής δεδομένων

```
(πρώτα CREATE EVERY SERVER (2) και αμέσως μετά ...)
FOR EACH SERVER
DO
* READ NUM.MACHINES (SERVER)
* LET U.SERVER (SERVER) = NUM.MACHINES (SERVER)
LOOP
```

Παρατηρούμε ότι ο πόρος SERVER χρησιμοποιείται ως δείκτης στις εντολές \*.

## 2.4.3 Αντικείμενα (ENTITIES)

Οι πόροι και οι διαδικασίες μπορεί να αρκούν για να προσομοιώσει κανείς ένα απλό σύστημα. Ωστόσο πολύπλοκα συστήματα μπορεί να απαιτήσουν πιο σύνθετες δομές της SIMSCRIPT όπως **τα μόνιμα αντικείμενα, τα προσωρινά αντικείμενα και τα σύνολα** (ορισμένα από τα σύνολα τα δημιουργεί αυτόματα η SIMSCRIPT).

- **MONIMA ANTIKEIMENA (PERMANENT ENTITIES)**  
Σε ένα σύστημα αναμονής με τρεις τύπους πελατών κάθε τύπος μπορεί να επισκέπτεται διαφορετικούς εξυπηρετητές και να έχει διαφορετικούς χρόνους

εξυπηρέτησης από τους άλλους τύπους. Π.χ. σε ένα εμπορικό λιμάνι, έχουμε τρεις τύπους δεξαμενόπλοιων 1, 2, και 3 με αντίστοιχους χρόνους φόρτωσης (LOADING TIMES) που ακολουθούν ομοιόμορφες κατανομές.

Δήλωση στο PREAMBLE:

```
PERMANENT ENTITIES
EVERY TANKER.TYPE HAS A MIN.LOADING.TIME AND A
MAX.LOADING.TIME
```

Υπάρχουν δύο μεταβλητές συστήματος που αυτομάτως δημιουργούνται μετά από αυτή την εντολή: η μεταβλητή TANKER.TYPE που είναι ένα σύνολο (διάνυσμα, πίνακας) με στοιχεία 1, 2, ή 3 και η N.TANKER.TYPE (= πλήθος στοιχείων-τύπων πελατών= 3). Η τιμή της τελευταίας είτε αποτελεί δεδομένο και πρέπει να εισαχθεί από το πληκτρολόγιο (οπότε στη συνέχεια δημιουργείται και το σύνολο) :

```
READ N.TANKER.TYPE
CREATE EVERY TANKER.TYPE
```

ή ορίζεται εμμέσως με τη δημιουργία του συνόλου:

```
CREATE EVERY TANKER.TYPE (3)
```

- **ΠΡΟΣΩΡΙΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ (TEMPORARY ENTITIES)**

Στην περίπτωση που σε ένα σύστημα παραγωγής κάποιο κομμάτι ενδέχεται να κριθεί ως ελαττωματικό και να απορριφθεί, θα ορίσουμε τα κομμάτια ως προσωρινά αντικείμενα. Αν μας ενδιαφέρει ο χρόνος απόρριψης, τότε δηλώνουμε στο PREAMBLE:

```
TEMPORARY ENTITIES
EVERY ITEM HAS AN ITEM.SPOIL.TIME
```

Η δήλωση αυτή φανερώνει ότι στο σύστημα πρόκειται να κυκλοφορήσουν ένα ή περισσότερα προσωρινά κομμάτια ITEM. Μερικά απ' αυτά πιθανόν να εξαφανισθούν. Η καταστροφή ενός κομματιού γίνεται με την εντολή

```
DESTROY THIS ITEM
```

εφ' όσον είναι καθορισμένο εμμέσως ποιο κομμάτι είναι ελαττωματικό, οπότε εκείνο το αντικείμενο ITEM απορρίπτεται.

- **ΣΥΝΟΛΑ (SETS)**

Είναι μία διάταξη αντικειμένων κατά φθίνουσα σειρά προτεραιότητας. Μπορεί να είναι διαδικασίες, πόροι, προσωρινά ή μόνιμα αντικείμενα. Οι πελάτες στην ουρά του SERVER τη χρονική στιγμή TIME.V (=τώρα), αποτελούν ένα σύνολο συστήματος το οποίο είναι καταχωρημένο στη μνήμη του προγράμματος **αυτόματα** από τη στιγμή που δηλώνεται ο πόρος SERVER στο PREAMBLE, και το πλήθος τους δίνεται από το N.Q.SERVER. Το σύνολο αυτών των πελατών είναι το Q.SERVER. Το σύνολο των εξυπηρετούμενων πελατών από τον SERVER είναι το X.SERVER. Μπορούμε να ορίσουμε και σύνολα ΧΡΗΣΤΗ. Για παράδειγμα στο σύστημα M|M|1 οι πελάτες στην ουρά (QUEUE) διατάσσονται σύμφωνα με τον κανόνα FIFO. Φαντασθείτε το σύστημα που οι γεροντότεροι μπαίνουν πρώτοι στην ουρά. Αν λάβουμε υπ' όψιν μας και την μεταβλητή CU.AGE, τότε γράφουμε στο PREAMBLE:

(πρώτα PROCESSES INCLUDE ARRIVAL, CUSTOMER AND STOP.SIMULATION και μετά ...)  
 EVERY CUSTOMER HAS A CU.AGE AND MAY BELONG TO THE QUEUE  
 DEFINE QUEUE AS A SET RANKED BY HIGH CU.AGE  
 THE SYSTEM OWNS THE QUEUE

#### 2.4.4 Γεννήτριες τυχαίων αριθμών

Οι γεννήτριες συναρτήσεις τυχαίων αριθμών καλούνται ως εξής:

ONOMA.F (ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ, . . . , I)

όπου ONOMA, είναι το όνομα της γεννήτριας και ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ,..., οι παράμετροί της. Συχνά χρειαζόμαστε περισσότερες από μία γεννήτριες ανεξάρτητες μεταξύ τους (πχ. χρόνοι άφιξης, εξυπηρέτησης, κλπ). Στον δείκτη I (αναφέρεται ως STREAM = ρεύμα, ακολουθία) μπορούμε να δώσουμε τιμή από **1 έως και 10** για μια από τις 10 ακολουθίες τυχαίων αριθμών. Φυσικά κάθε ακολουθία έχει άπειρους, πρακτικά, όρους. Στους παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μορφές κάθε γεννήτριας:

ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ Τ.Μ.	ΤΙΜΕΣ	ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
Ομοιόμορφη [A,B]	A, A+1,..., B	RANDI.F(A,B,I)
Poisson( $\lambda$ ), MEAN= $\lambda$	0, 1, ..., $\infty$	POISSON.F(MEAN,I)
Δυωνυμική bin(N,P)	0, 1, ..., N	BINOMIAL.F(N,P,I)

Πίνακας 2.1: Γεννήτριες τυχαίων αριθμών (Διακριτών τιμών)

ΣΥΝΕΧΕΙΣ Τ.Μ.	ΤΙΜΕΣ	ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
Εκθετική exp( $\lambda$ ), MEAN=1/ $\lambda$	[0, $\infty$ )	EXPONENTIAL.F(MEAN,I)
Γάμμα, gamma( $\alpha,\beta$ ), MEAN= $\alpha\beta$	[0, $\infty$ )	GAMMA.F(MEAN, $\alpha$ ,I)
n-Erlang( $\beta$ ), MEAN= $n\beta$	[0, $\infty$ )	ERLANG.F(MEAN,n,I)
Κανονική N( $\mu, \sigma^2$ )	( $-\infty, \infty$ )	NORMAL.F( $\mu,\sigma$ ,I)
Ομοιόμορφη U( $\alpha,\beta$ )	[ $\alpha,\beta$ ]	UNIFORM( $\alpha,\beta$ ,I)

Πίνακας 2.2: Γεννήτριες τυχαίων αριθμών (Συνεχών τιμών)

Για παράδειγμα στην διαδικασία ARRIVAL του M|M|1 θα γράφαμε:

WAIT EXPONENTIAL.F (MEAN.ARRIVAL, 1)

ενώ στην διαδικασία CUSTOMER

WORK EXPONENTIAL.F (MEAN.SERVICE, 2)

όπου οι πραγματικές μεταβλητές MEAN.ARRIVAL και MEAN.SERVICE είναι οι μέσοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων και χρόνοι εξυπηρέτησεων αντιστοίχως. Θα πρέπει να έχουν δηλωθεί στο PREAMBLE προηγουμένως και να έχουν αναγνωσθεί με την εντολή READ στο κυρίως πρόγραμμα ή σε υπορουτίνα εισαγωγής δεδομένων.

## 2.4.5 Διάφορες άλλες εντολές ελέγχου

Εκτός όμως από τις άνω εντολές υπάρχουν και κάποιες ακόμα που θα αναφέρουμε παρακάτω:

- **IF...(ELSE IF)...ELSE**

Αν ισχύει το  $\alpha$  τότε εκτέλεσε τις εντολές A, αλλιώς αν ισχύει το  $\beta$  τότε εκτέλεσε τις εντολές B, αλλιώς αν ..., αλλιώς εκτέλεσε τις εντολές Γ:

```
IF  $\alpha$ 
  A...
ELSE IF  $\beta$ 
  B...
ELSE IF
  ....
ELSE
  Γ.....
ENDIF
```

- **FOR...DO...LOOP**

Επανάληψη με δείκτη I (τα I και N πρέπει να δηλωθούν στο PREAMBLE):

```
FOR I=1 TO N
DO
  ΕΝΤΟΛΕΣ...
  ...
LOOP
```

- **WHILE...DO...LOOP**

Όσο ισχύει το  $\alpha$  να εκτελούνται συνεχώς οι εντολές A, όπως στο παράδειγμα:

```
WHILE  $\alpha$ 
DO
  A...
LOOP
```

Με το σύνολο αυτών των εντολών έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα των σημαντικότερων κανόνων που διέπουν τη δομή και την σύνταξη της SIMSCRIPT, όσον αφορά στη δημιουργία εκτελέσιμου κώδικα για την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων και μοντέλων.



## Κεφάλαιο 3: Το μοντέλο προσομοίωσης των Staehle-Mäder

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα περιγράψουμε αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης των Staehle-Mäder, το οποίο υπολογίζει τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε δίκτυα WCDMA. Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε στη γλώσσα SIMSCRIPT, της οποίας οι βασικές αρχές και τα προγραμματιστικά της στοιχεία αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για καλύτερη και ευκολότερη περιγραφή, η παρουσίαση των χαρακτηριστικών του μοντέλου θα γίνει σε μια αρχική ενότητα, ώστε να προϋπάρχει η απαιτούμενη γνώση για την κατανόηση των περαιτέρω.

### 3.1 Περιγραφή του μοντέλου των Staehle-Mäder

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο πρότειναν οι Staehle και Mäder [12] υπολογίζει προσεγγιστικά την πιθανότητα απώλειας κλήσεων πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε συστήματα WCDMA. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με την ποιοτική περιγραφή του μοντέλου και την συνολική λειτουργία του, καθώς σκοπός είναι η προσομοίωση του και φυσικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτά του προσεγγιστικού μαθηματικού μοντέλου. Οι άξονες πάνω στους οποίους θα κινηθούμε για την προσομοίωση της λειτουργίας του μοντέλου, είναι η καθεαυτώ εύρεση του ποσοστού απώλειας κλήσεων σε κάθε κατηγορία κίνησης και η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση κατειλημμένων πόρων με βάση κάποιες παραμέτρους αρχικοποίησης, πάνω στις οποίες θα βασιστούν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τους Staehle και Mäder, ένα σύστημα WCDMA έχει διαθέσιμη χωρητικότητα,  $n_{max}$ , η οποία διατίθεται στους χρήστες για την εξυπηρέτηση των διαφόρων ειδών κλήσεων (πολυδιάστατη κίνηση) που δημιουργούνται από αυτούς. Κάθε νέα κλήση στο σύστημα εκτός από τους απαιτούμενους πόρους για την εξυπηρέτησή της, προσθέτει στο σύστημα και παρεμβολές που υποβαθμίζουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Άμεσος αντίκτυπος αυτής της επιπλέον επιβάρυνσης είναι ακόμα περισσότεροι δεσμευμένοι πόροι του συστήματος από τον ίδιο αριθμό εξυπηρετούμενων κλήσεων με σκοπό την διατήρηση της ποιότητας εξυπηρέτησης σε ικανοποιητικά επίπεδα. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να γίνει κάθε εισερχόμενη κλήση αποδεκτή από το σύστημα, αλλά θα πρέπει να ικανοποιείται κάποια σχέση. Οι Staehle και Mäder περιέγραψαν τη σχέση ως εξής [12]: Το άθροισμα του συνολικού φορτίου της κυψέλης ( $n_{own}$ ), μαζί με τον παράγοντα φορτίου της νέας εισερχόμενης κλήσης ( $w_i$ ), καθώς και το σύνολο των παρεμβολών που δημιουργούνται ( $n_{other}$ ), δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τη μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα που έχουμε ορίσει για το σύστημά μας ( $n_{max}$ ). Μόνο τότε η νέα κλήση θα γίνεται αποδεκτή από το σύστημα. Ο μαθηματικός τύπος που συνοδεύει αυτή την περιγραφή είναι ο εξής:

$$n_{own} + w_i + n_{other} < n_{max} \quad (3.1)$$

Όσον αφορά στο σκέλος της προσομοίωσης θα ακολουθήσουμε την εξής συλλογιστική πορεία: Αρχικά θα δημιουργήσουμε τις κλήσεις κάθε κατηγορίας

κίνησης μέσω μιας διαδικασίας Poisson, και αυτό το εξασφαλίζουμε χρησιμοποιώντας την εκθετική κατανομή για τα διαστήματα μεταξύ των αφίξεων των κλήσεων. Κάθε νέα κλήση έχει ως βασικά χαρακτηριστικά κίνησης τον παράγοντα φορτίου (ουσιαστικά πρόκειται για το εύρος ζώνης που ζητάει μια νέα κλήση) και τον παράγοντα δραστηριότητας (activity factor). Παράλληλα όλες οι ήδη εξυπηρετούμενες από το σύστημα κλήσεις ελέγχονται με βάση τον παράγοντα δραστηριότητάς τους για το αν επιβαρύνουν ενεργά το σύστημα ή όχι την τρέχουσα στιγμή. Μόνο οι ενεργές κλήσεις (active calls) προσθέτουν παρεμβολές στο σύστημα. Η συνολική επιβάρυνση από όλες τις ενεργές κλήσεις αποθηκεύεται στο  $n_{own}$  (ή  $N_{ownTotal}$  όπως θα συναντήσουμε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης). Ο παράγοντας  $n_{other}$ , σύμφωνα με τους Staehle και Mäder, δίνεται από τη σχέση [12]:

$$n_{other} = (1 - n_{max}) * (I_{other}/N_o) \quad (3.2)$$

Όσον αφορά στον παράγοντα  $I_{other}$  πρέπει να επισημάνουμε ότι σχετίζεται με την παρεμβολή των γειτονικών κυψελών, οπότε για μεγαλύτερη ακρίβεια τον υπολογίζουμε μέσω μιας λογαριθμικής κατανομής (lognormal distribution) με μια διακύμανση  $S$  [12]. Τελικά αν αυτό το άθροισμα των 3 παραγόντων ( $N_{ownTotal} + w_{actual} + N_{other}$ ), που αντιπροσωπεύει το αριστερό μέλος της σχέσης 3.1, είναι μικρότερο του εξ'αρχής δηλωθέντος  $n_{max}$ , η κλήση μπορεί να γίνει αποδεκτή και να εξυπηρετηθεί από το σύστημα. Αλλιώς μπλοκάρεται και χάνεται.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε τη δυνατότητα να διαιρέσουμε τον παράγοντα φορτίου της κάθε κλήσης ( $w_i$  ή  $w_{actual}$ ) με έναν παράγοντα διακριτοποίησης  $G$  (granularity factor) οπότε θα πάρουμε έναν ακέραιο αριθμό που μπορεί να θεωρηθεί ως η υποθετική επιβάρυνση του συστήματος σε γραμμές (trunks) αν μιλούσαμε για ενσύρματη επικοινωνία και ακριβή αριθμό διαθέσιμων πόρων, χωρίς να υπάρχουν θέματα περιορισμού της χωρητικότητας λόγω παρεμβολών ή θορύβου. Με βάση αυτή τη διακριτοποίηση μπορούμε να υπολογίσουμε κάποια επιμέρους στοιχεία (εκτός από την πιθανότητα απώλειας κλήσεων για κάθε κατηγορία κίνησης) που έχουν να κάνουν με πιθανότητα που έχει το σύστημα να βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση κατειλημμένων πόρων. Αυτό ορίζεται ως το  $q(j)$  κάθε κατάστασης, όπου  $j$  είναι το σύνολο των πόρων που δεσμεύουν οι κλήσεις που βρίσκονται ήδη μέσα στο σύστημα. Σύμφωνα με τη λογική που επικρατεί στο μοντέλο μας, δηλαδή του προσδιορισμού της κάθε εξυπηρετούμενης κλήσης ως «ενεργής» ή «παθητικής», οι Staehle-Mäder εισήγαγαν ένα νέο στοιχείο που είναι η δεσμευμένη πιθανότητα να έχουμε  $c$  κατειλημμένους «ενεργούς» πόρους στο σύνολο των καταστάσεων  $j$ , όπου  $j$  το σύνολο των πόρων που δεσμεύουν όλες οι κλήσεις του συστήματος τη στιγμή αυτή [12]. Η αναπαράσταση του έχει τη μορφή  $\Lambda(c|j)$  και υπάρχει αντίστοιχη αναφορά σε επόμενη ενότητα επεξήγησης του κώδικα της προσομοίωσης.

Τέλος ένα ακόμα σημαντικό σημείο όσον αφορά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι η χρήση κλήσεων “Transit”. Οι κλήσεις transit είναι οι «αρχικές» κλήσεις που δημιουργούνται και ο σκοπός τους είναι να φέρουν το σύστημα σε μια κατάσταση ισορροπίας. Οι κλήσεις αυτές και ο χειρισμός τους από το σύστημα δεν προσμετρώνται για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

### 3.2 Δήλωση των μεταβλητών στο PREAMBLE (Πρόλογος)

Για το συγκεκριμένο μοντέλο θα χρησιμοποιήσουμε μια σειρά μεταβλητών (ακέραιες, πραγματικές, μονο και διδιάστατους πίνακες) καθώς και κάποιες διεργασίες (processes) που θα πρέπει όλα να δηλωθούν στο Preamble. Πιο συγκεκριμένα:

```
PROCESSES include CALL and GENERATOR
EVERY CALL has a CALL.NUM
EVERY GENERATOR has a GEN.NUM
```

Όπου έχουμε τις διεργασίες που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια του προγράμματος. Στην προκειμένη περίπτωση οι διεργασίες CALL, για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς κάθε κλήσης, και GENERATOR, που «γεννά» κάθε νέα κλήση, χαρακτηρίζονται μοναδικά με έναν αριθμό (μέσω της εντολής EVERY). Στη συνέχεια ακολουθεί η δήλωση του συνόλου των μεταβλητών και πινάκων που θα χρησιμοποιήσουμε:

```
DEFINE SUM as a REAL VARIABLE
    Δήλωση της μεταβλητής SUM ως πραγματικού τύπου

DEFINE CALL.NUM and GEN.NUM as INTEGER VARIABLES
    Δήλωση των μεταβλητών CALL.NUM και GEN.NUM ως ακέραιου
    τύπου

DEFINE TRUNKS and CLASSES as INTEGER VARIABLES
    Δήλωση των μεταβλητών TRUNKS και CLASSES, για την
    καταχώρηση των συνολικών πόρων και των κατηγοριών των κλήσεων
    αντιστοίχως, ως ακέραιου τύπου

DEFINE Nmax as REAL VARIABLE
    Δήλωση της μεταβλητής Nmax, του μέγιστου φορτίου που μπορεί να
    εξυπηρετήσει το σύστημα, ως πραγματικού τύπου

DEFINE TOTALO_CL as REAL VARIABLE
    Δήλωση της μεταβλητής TOTALO_CL, του συνολικού φορτίου
    κίνησης που εξυπηρετείται από το σύστημα, ως πραγματικού τύπου

DEFINE G as REAL VARIABLE
    Δήλωση της μεταβλητής G, που δηλώνει το granularity (παράγοντας
    διακριτοποίησης), ως πραγματικού τύπου

DEFINE EIother and N0 as DOUBLE VARIABLES
    Δήλωση των μεταβλητών EIother και N0, μέση τιμή των παρεμβολών
    από τις γειτονικές κυψέλες και μέση πυκνότητα θερμικού θορύβου
    αντίστοιχα, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE Iother and Nother as DOUBLE VARIABLES
    Δήλωση των μεταβλητών Iother και Nother, βοηθητικές μεταβλητές
    για τη λογαριθμική παρουσίαση των παρεμβολών και του θορύβου,
    που θα χρησιμεύσουν στην αποδοχή ή απόρριψη μιας εισερχόμενης
    κλήσης, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE S as a DOUBLE VARIABLE
    Δήλωση της μεταβλητής S, διακύμανση της λογαριθμικής
    συνάρτησης, ως διπλής ακρίβειας
```

DEFINE CV as INTEGER VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής CV, coefficient variance (δείκτης διασποράς), που θα χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την τιμή του S συναρτήσει του EIothe, ως ακέραιου τύπου

DEFINE I as an INTEGER VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής I, μετρητής παραγόμενων κλήσεων, ως ακέραιου τύπου

DEFINE WCDMA as an REAL VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής WCDMA, που αποθηκεύει το WCDMA chip rate (ρυθμό chip του WCDMA), ως πραγματικού τύπου

DEFINE MST as a REAL VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής MST, μέσος χρόνος εξυπηρέτησης κλήσεων (mean service time), ως πραγματικού τύπου

DEFINE X as REAL VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής X, που θα χρησιμεύσει ως «κριτής» για την απόφαση συμπεριφοράς μιας κλήσης (αν θα είναι ενεργή ή παθητική η κατάσταση της, ώστε να καθοριστεί και η επιβάρυνση που προσφέρει στο σύστημα), ως πραγματικού τύπου

DEFINE C\_Total as an INTEGER VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής C\_Total, του συνολικού αριθμού ενεργών κατειλημμένων πόρων του συστήματος, ως ακέραιου τύπου

DEFINE C\_max as an INTEGER VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής C\_max, του μεγίστου αριθμού ενεργών κατειλημμένων πόρων του συστήματος, ως ακέραιου τύπου

DEFINE COUNT as an INTEGER VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής COUNT, που χρησιμεύει για μετρητής, ως ακέραιου τύπου

DEFINE C as an INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα C, που διατηρεί στη μνήμη τον αριθμό των κατειλημμένων πόρων για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως ακέραιου τύπου

DEFINE ACTIVE, PASSIVE as INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση των μονοδιάστατων πινάκων active και passive, που αποθηκεύει τον αριθμό των ενεργών και παθητικών κλήσεων (σύμφωνα με μεταβλητή απόφασης X που δηλώθηκε προηγουμένως) ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως ακέραιου τύπου

DEFINE w as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα w, για αποθήκευση του παράγοντα φορτίου (load factor) για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE w\_actual as DOUBLE VARIABLE  
Δήλωση της μεταβλητής w\_actual, για αποθήκευση του τρέχοντα παράγοντα φορτίου (load factor) για μια συγκεκριμένη κλήση, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE TRAF\_MIX as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα TRAF\_MIX, που αποθηκεύει το ποσοστό της κίνησης (traffic mix) για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE DEM\_dB as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα DEM\_dB, για διατήρηση στη μνήμη των ενεργειακών απαιτήσεων (μετρημένων στο δεκαδικό σύστημα) για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE R as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα R, για αποθήκευση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE RES\_REQ as INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα RES\_REQ, για αποθήκευση των απαιτήσεων σε πόρους συστήματος (υποθετικά, χρησιμοποιώντας τους παράγοντες φορτίου και ακεραιότητας) για κάθε κατηγορία κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE own\_LOAD as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα own\_LOAD, για να αποθηκεύσουμε την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που παράγει κάθε κατηγορία κλήσεων με βάση το ποσοστό της κίνησης της εκάστοτε κατηγορίας (traffic mix), ως διπλής ακρίβειας

DEFINE V as a DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα V, για αποθήκευση των συντελεστών δραστηριότητας (activity factor) της κάθε κατηγορίας κλήσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE ALLOWED as an INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα ALLOWED, όπου αποθηκεύουμε τον αριθμό των κλήσεων που εξυπηρετήθηκαν από το σύστημα, ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κίνησης, ως ακέραιου τύπου

DEFINE BLOCKED as an INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα BLOCKED, όπου αποθηκεύουμε τον αριθμό των κλήσεων που αποκλείστηκαν από το σύστημα, ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κίνησης, ως ακέραιου τύπου

DEFINE TypeCalls as an INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα TypeCalls, που αποθηκεύει τον αριθμό των κλήσεων που παρήχθησαν και θέλουν να εξυπηρετηθούν από το σύστημα, ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κίνησης, ως ακέραιου τύπου

DEFINE Nown as DOUBLE, 1-DIMENSIONAL ARRAY  
Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα Nown, για αποθήκευση του συνολικού φορτίου κίνησης της κάθε κατηγορίας, ξεχωριστά, και με βάση τον αριθμό των ενεργών κλήσεων που βρίσκονται κάθε συγκεκριμένη στιγμή στο σύστημα, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE NownTotal as DOUBLE VARIABLE

Δήλωση της μεταβλητής NownTotal, για αποθήκευση του συνολικού φορτίου όλων των κατηγοριών κίνησης και με βάση τον αριθμό των ενεργών κλήσεων που βρίσκονται κάθε συγκεκριμένη στιγμή στο σύστημα, ως διπλής ακρίβειας. Ουσιαστικά κρατάει ένα άθροισμα όλων των Nown κάθε φορά που μια νέα κλήση φτάνει στο σύστημα προς εξυπηρέτηση

DEFINE TotalN as DOUBLE VARIABLE

Δήλωση της μεταβλητής TotalN, όπου αποθηκεύεται το συνολικό φορτίο όλων των κατηγοριών κίνησης, καθώς επίσης οι παρεμβολές των γειτονικών κυψελών και το τρέχον φορτίο κίνησης (της προς εξυπηρέτηση κλήσης) και εν τέλει αποφασίζει το σύστημα (ανάλογα με το κατώφλι Nmax που έχουμε θέσει) αν η κλήση θα γίνει αποδεκτή από το σύστημα, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE Serving\_Calls as INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY

Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα Serving\_Calls, για αποθήκευση των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται από το σύστημα για κάθε κατηγορία ξεχωριστά, ως ακέραιου τύπου

DEFINE Total\_SystemCalls as an INTEGER VARIABLE

Δήλωση της μεταβλητής Total\_SystemCalls, για αποθήκευση του συνόλου των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται από το σύστημα από όλες τις κατηγορίες μαζί, ως ακέραιου τύπου

DEFINE L as INTEGER, 2-DIMENSIONAL ARRAY

Δήλωση του δυσδιάστατου πίνακα L, για τη διατήρηση όλων των καταστάσεων  $\Lambda(c|j)$  που εμφανίζονται, λαμβάνοντας υπ'όψιν τους ενεργούς κατειλημμένους πόρους (c) από το σύνολο των κατειλημμένων πόρων του συστήματος (j) (ενεργών και παθητικών), ως ακέραιου τύπου

DEFINE Q as INTEGER, 1-DIMENSIONAL ARRAY

Δήλωση του μονοδιάστατου πίνακα Q, για τη διατήρηση όλων των διαφορετικών καταστάσεων  $q(j)$  που εμφανίζονται, δηλαδή πόσες φορές εμφανίζεται η κάθε κατάσταση με τόσους κατειλημμένους πόρους, ως ακέραιου τύπου

DEFINE Q\_Total as an INTEGER VARIABLE

Δήλωση της μεταβλητής Q\_Total, για τη διατήρηση του αθροίσματος των καταστάσεων  $q(j)$  που εμφανίζονται, δηλαδή πόσες φορές εμφανίζεται η κάθε κατάσταση με τόσους κατειλημμένους πόρους, ως ακέραιου τύπου

DEFINE Q\_Sum as a DOUBLE VARIABLE

Δήλωση της μεταβλητής Q\_Sum, για να αποθηκεύσουμε το συνολικό ποσοστό των καταστάσεων  $q(j)$  που εμφανίζονται, ουσιαστικά λειτουργεί ως επαλήθευση της εμφάνισης του συνολικού αριθμού των ποσοστών των διαφορετικών καταστάσεων, ως διπλής ακρίβειας

DEFINE CALLS and TRANSIT as INTEGER VARIABLES

Δήλωση των μεταβλητών CALLS και TRANSIT, για να διατηρήσουμε τον αριθμό των κλήσεων που θα δημιουργηθούν για το

σύστημα και των «αρχικών» κλήσεων έως ότου το σύστημα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, ως ακέραιου τύπου

```
DEFINE CAPACITY as an INTEGER VARIABLE
```

Δήλωση της μεταβλητής CAPACITY, όπου αποθηκεύεται η υποθετική μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος σε γραμμές (trunks), ως ακέραιου τύπου

```
DEFINE CAPACITY_J as an INTEGER VARIABLE
```

Δήλωση της μεταβλητής CAPACITY\_J, όπου αποθηκεύεται το σύνολο των υποθετικών γραμμών που θα μας χρησιμεύσουν κατόπιν για των υπολογισμό των  $q(j)$  και  $\Lambda(c|j)$ , ως ακέραιου τύπου

```
DEFINE STREAM1 and STREAM2 as INTEGER VARIABLES
```

Δήλωση των μεταβλητών STREAM1 και STREAM2, για να διατηρήσουμε τις γεννήτριες των αριθμοσειρών (seed numbers) στις ψευδοτυχαίες ακολουθίες, ως ακέραιου τύπου

### 3.3 Εισαγωγή στοιχείων και δέσμευση πινάκων στη MAIN

Μετά τη δήλωση όλων των μεταβλητών και πινάκων που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να εισάγουμε τα στοιχεία εισόδου καθώς και να δεσμεύσουμε τους πίνακες που δηλώσαμε προηγουμένως. Αυτό θα γίνει μέσω της διαδικασίας MAIN, την οποία θα χωρίσουμε σε 2 μέρη. Το 1<sup>ο</sup> είναι αυτό που θα ασχοληθούμε στην παρούσα φάση (εισαγωγή δεδομένων και δέσμευση πινάκων), ενώ το 2<sup>ο</sup> έχει να κάνει με την εκτύπωση των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων μετά το πέρας της προσομοίωσης του μοντέλου, κάτι που θα μας απασχολήσει αργότερα.

#### 3.3.1 Ανάγνωση των στοιχείων εισόδου από εξωτερικό αρχείο

Η τεχνική που θα χρησιμοποιήσουμε για να δηλώσουμε τα στοιχεία εισόδου είναι μέσω εξωτερικού αρχείου. Οπότε θα πρέπει να γίνει ανάγνωση αυτών και οι εντολές που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής:

```
PRINT 1 LINE thus
--# STAEHLE - MAEDER's FORMULA #--
OPEN UNIT 1 for INPUT, FILE NAME is "input.txt"
USE UNIT 1 for INPUT
READ CLASSES, CALLS, TRANSIT, Nmax, TOTALO_CL, G,
EIother, N0, CV, WCDMA, STREAM1 and STREAM2
```

Αφού έχουμε δημιουργήσει το αρχείο με όνομα “input.txt” το ανοίγουμε για ανάγνωση των στοιχείων. Αναλυτικότερα, και με τη σειρά εμφάνισης και σύμφωνα με τις δηλώσεις των μεταβλητών της προηγούμενης παραγράφου, έχουμε της εξής μεταβλητές σε αυτό το αρχείο: Αριθμός κατηγοριών κλήσεων, συνολικές κλήσεις που θα προσομοιωθούν, «αρχικές» κλήσεις συστήματος, μέγιστο φορτίο που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα, συνολικό φορτίο που εξυπηρετείται από το σύστημα, παράγοντας ακεραιοποίησης (granularity), ισχύς παρεμβολών από γειτονικές κυψέλες, ισχύς θερμικού θορύβου, δείκτης διασποράς (coefficient variance), ρυθμός μετάδοσης WCDMA (WCDMA chip rate), γεννήτριες (seed numbers) 1 και 2 των ψευδοτυχαίων αριθμών.

### 3.3.2 Δέσμευση χώρου για τους δηλωμένους πίνακες

Μετά τη δήλωση των πινάκων στον πρόλογο (PREAMBLE) ακολουθεί η δέσμευση του απαιτούμενου χώρου για αυτούς, ώστε να μπορέσουμε να τους χρησιμοποιήσουμε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τις παρακάτω εντολές:

```
RESERVE TRAF_MIX(*) as CLASSES
RESERVE V(*) as CLASSES
RESERVE R(*) as CLASSES
RESERVE RES_REQ(*) as CLASSES
RESERVE C(*) as CLASSES
RESERVE DEM_db(*) as CLASSES
RESERVE own_LOAD(*) as CLASSES
RESERVE w(*) as CLASSES
RESERVE ALLOWED(*) as CLASSES
RESERVE BLOCKED(*) as CLASSES
RESERVE TypeCalls(*) as CLASSES
RESERVE Nown(*) as CLASSES
RESERVE ACTIVE(*) as CLASSES
RESERVE PASSIVE(*) as CLASSES
RESERVE Serving_Calls(*) as CLASSES
RESERVE L(*,*) as 600 by 600
RESERVE Q(*) as 600
```

Όπου τους πίνακες L και Q τους έχουμε δηλώσει με σταθερό μέγεθος 600 επί 600 και 600 θέσεων αντίστοιχα, ώστε να μην παρουσιαστεί πρόβλημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, λόγω έλλειψης διαθέσιμου χώρου.

### 3.3.3 Αρχικοποίηση και υπολογισμός τιμών των μεταβλητών

Το τελευταίο απαιτούμενο βήμα της προεργασίας για την προσομοίωση είναι η αρχικοποίηση ορισμένων μεταβλητών και ο υπολογισμός κάποιων με βάση τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα που έχουμε εισάγει στο σύστημα από το εξωτερικό αρχείο στο προηγούμενο βήμα. Με τις επόμενες γραμμές κώδικα φτάνουμε στο σημείο όπου το κύριο μέρος της προσομοίωσης μπορεί να αρχίσει, με βάση το σύνολο των στοιχείων που έχουν δηλωθεί και αρχικοποιηθεί.

```
LET TRUNKS = 600
LET CAPACITY_J = TRUNKS
LET CAPACITY = Nmax/G
LET MST = 1.0
LET WCDMA = WCDMA*10**3
LET EIoother = EIoother*10**(-18)
LET S = EIoother*CV
LET N0 = N0*10**(-18)
LET COUNT = 1
FOR J = 1 to CLASSES
DO
LET TypeCalls(J) = 0
LOOP
FOR J = 1 to CLASSES
DO
```



```

READ TRAF_MIX(J), V(J), R(J) and DEM_dB(J)
LET w(J) = (DEM_dB(J)*R(J))/(WCDMA +
(DEM_dB(J)*R(J)))
LET RES_REQ(J) = w(J)/G
LET own_LOAD(J) =
(TOTALO_CL*TRAF_MIX(J))/(V(J)*w(J))
ACTIVATE A GENERATOR(J) NOW
LOOP
CLOSE UNIT 1
START SIMULATION

```

Αναλυτικότερα, σε αυτό το κομμάτι κώδικα, ορίζουμε μια θεωρητική χωρητικότητα του συστήματος (για ευκολία στον υπολογισμό των διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης) καθώς και τις μονάδες μέτρησης σε μερικές από τις μεταβλητές εισόδου, όπου χρειάζεται. Στη συνέχεια αρχικοποιούμε τους μετρητές COUNT, αλλά και TypeCalls για κάθε κατηγορία κλήσεων ξεχωριστά. Ακόμα για κάθε διαφορετική κατηγορία κλήσεων δηλώνουμε το ποσοστό της κίνησης (traffic mix), τον συντελεστή δραστηριότητας (activity factor) και τις εκάστοτε ενεργειακές απαιτήσεις (σε dB). Τέλος, σύμφωνα με τις εισόδους, υπολογίζουμε τρεις επιπλέον παραμέτρους, τον παράγοντα φορτίου (w), τις απαιτήσεις σε πόρους συστήματος με χρήση του παράγοντα ακεραιοποίησης G (RES\_REQ) και την παραγόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (own\_LOAD), για κάθε κατηγορία κλήσεων. Τώρα έχουμε όλα τα προαπαιτούμενα για την ενεργοποίηση της γεννήτριας κλήσεων και την έναρξη της προσομοίωσης.

### 3.4 Διαδικασία γεννήτριας κλήσεων

Το υλικό μέσω του οποίου θα εξάγουμε αποτελέσματα σχετικά με το μοντέλο των Staehle-Mäder είναι οι κλήσεις, των διαφόρων κατηγοριών κίνησης, που δημιουργούνται και εξυπηρετούνται (ή αποκλείονται) από το σύστημα. Ο τρόπος με τον οποίο «γεννούνται» αυτές οι κλήσεις περιγράφεται στο ακόλουθο κομμάτι του μοντέλου:

```

PROCESS GENERATOR(NUMBER)
DEFINE NUMBER as an INTEGER VARIABLE
FOR I = 1 to CALLS
DO
ACTIVATE a CALL(NUMBER) NOW
WAIT EXPONENTIAL.F(1/own_LOAD(NUMBER), STREAM1) MINUTES
LOOP
END

```

Σύμφωνα με αυτό το απόσπασμα, ο αριθμός των κλήσεων που θα «γεννηθούν» έχει προκαθοριστεί και κάθε μια από τις κλήσεις αυτές δημιουργεί με τη σειρά τις μια διαδικασία CALL, που θα μελετήσουμε στην επόμενη ενότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της «γέννησης» δύο κλήσεων ορίζεται από μια εκθετική κατανομή με ορίσματα την παραγόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και μια γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας (seed number) μετρούμενο σε λεπτά (minutes). Η χρήση της εκθετικής κατανομής εξασφαλίζει την δημιουργία κλήσεων που ακολουθούν μια διαδικασία Poisson.

### 3.5 Διαδικασία εξυπηρέτησης κλήσεων

Σε αυτή την ενότητα θα αναφέρουμε και θα εξηγήσουμε τη σειρά που ακολουθούμε για να φτάσουμε στην αποδοχή ή την απόρριψη μιας κλήσης από το σύστημα στο μοντέλο των Staehle-Mäder. Αυτό θα γίνει σε δύο στάδια, του υπολογισμού της συνολικής επιβάρυνσης του συστήματος λόγω της ήδη εξυπηρετούμενης κίνησης και των παρεμβολών που συνυπάρχουν, καθώς και της σύγκρισης αυτού του συνολικού αριθμού με το  $n_{max}$ , του μέγιστου φορτίου που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα.

#### 3.5.1 Υπολογισμός αρχικών παραμέτρων

Η προεργασία για τα δύο στάδια που θα ακολουθήσουν περιλαμβάνει τον υπολογισμό παραμέτρων παρεμβολών και αρχικοποίηση μεταβλητών αθροισμάτων που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε νέα κλήση:

```
PROCESS CALL (NUMBER)
ADD 1 to TypeCalls (NUMBER)
DEFINE K as an INTEGER VARIABLE
LET w_actual = w (NUMBER)
LET Iother = log.normal.f (EIother, S, STREAM2)
LET Nother = (1-Nmax) * (Iother/N0)
LET NownTotal = 0
LET C_Total = 0
```

Πιο συγκεκριμένα έχουμε τη μεταβλητή TypeCalls να μετράει πόσες κλήσεις της κάθε κατηγορίας δημιουργούνται από τη «γεννήτρια», ορίζουμε την τοπική μεταβλητή K ως ακέραιου τύπου και ορίζουμε τιμές στις μεταβλητές w\_actual ως το τρέχον φορτίο κίνησης της κλήσης που μόλις δημιουργήθηκε, Iother ως λογαριθμοκανονικό αποτέλεσμα με ορίσματα τις τιμές των EIother, S και STREAM1 από τις δηλώσεις της MAIN που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της Nother ως το συνολικό αποτέλεσμα παρεμβολών και θορύβου από τις γειτονικές κυψέλες. Οι μεταβλητές NownTotal, για τη μέτρηση του φορτίου της τρέχουσας κυψέλης, και C\_Total, για το σύνολο των εκάστοτε ενεργών κατειλημμένων πόρων του συστήματος, αρχικοποιούνται σε κάθε νέα εισερχόμενη κλήση, ανεξαρτήτου κατηγορίας.

#### 3.5.2 Προσδιορισμός ενεργών και παθητικών κλήσεων

Όπως αναφέραμε και στην περιγραφή του μοντέλου, σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, η επιβάρυνση της κυψέλης από τις κλήσεις που ήδη εξυπηρετούνται από το σύστημα έγκειται στο αν οι κλήσεις αυτές είναι ενεργές ή παθητικές τη στιγμή που μια νέα κλήση προσπαθεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα. Αυτό θα μελετήσουμε σε αυτό το σημείο, ώστε να φτάσουμε στο πρώτο στάδιο, τον υπολογισμό της συνολικής επιβάρυνσης του συστήματος:

```
FOR J = 1 to Serving_Calls (K)
DO
LET X = UNIFORM.F (0.00, 1.00, STREAM1)
IF X > V (K)
ADD 1 to PASSIVE (K)
ELSE
```

```

ADD 1 to ACTIVE(K)
LET Nown(K) = Nown(K) + w(K)
LET C(K) = C(K) + RES_REQ(K)
ENDIF
LOOP
LET NownTotal = NownTotal + Nown(K)
LET C_Total = C_Total + C(K)
IF C_Total > C_max
LET C_max = C_Total
ENDIF
LOOP
IF I > TRANSIT
ADD 1 to Q(CAPACITY_J - TRUNKS + 1)
ADD 1 to L(C_Total+1, CAPACITY_J - TRUNKS +1)
ENDIF
LET TotalN = NownTotal + Nother + w_actual

```

Κάθε μια από τις ήδη εξυπηρετούμενες κλήσεις του συστήματος ελέγχεται για τη δραστηριότητα της (activity) συγκρίνοντας τον συντελεστή δραστηριότητας της με μια έξοδο ομοιόμορφης κατανομής (uniform distribution). Αν η κλήση θεωρηθεί ως ενεργή τότε προσθέτουμε τον παράγοντα φορτίου της  $[w(\text{class})]$  στο συνολικό φορτίο των ενεργών κλήσεων αυτής της κατηγορίας κίνησης  $[Nown(\text{class})]$  και τους πόρους που απασχολεί  $[RES\_REQ(\text{class})]$  στο σύνολο των ενεργών κατειλημμένων πόρων του συστήματος για την συγκεκριμένη κατηγορία κίνησης  $[C(\text{class})]$ . Το σύνολο όλων των κατηγοριών κίνησης αποθηκεύεται στην μεταβλητή  $NownTotal$  και των ενεργών κατειλημμένων πόρων για όλες τις κατηγορίες κίνησης στην  $C\_Total$  αντίστοιχα. Το μέγιστο των ενεργών κατειλημμένων πόρων βρίσκεται στη μεταβλητή  $C\_max$ . Επίσης, αν μια παραγόμενη προς εξυπηρέτηση κλήση δεν ανήκει στο σύνολο των «αρχικών» κλήσεων (TRANSIT), τότε η τρέχουσα κατάσταση του συνόλου των κατειλημμένων πόρων του συστήματος κρατείται στις ανάλογες θέσεις των πινάκων  $Q$  και  $L$ , για την εξαγωγή συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σχετικά με την κατάσταση του συστήματος μετά το πέρας της προσομοίωσης. Εν κατακλείδι, η συνολική επιβάρυνση του συστήματος αποθηκεύεται στη μεταβλητή  $TotalN$ , η οποία θα αποτελέσει και τον κριτή για την εξυπηρέτηση μιας κλήσης από το σύστημα ή την απόρριψή της.

### 3.5.3 Αποδοχή ή απόρριψη κλήσεων από το σύστημα

Το τελευταίο τμήμα της διαδικασίας CALLS περιλαμβάνει, όπως προαναφέραμε, την σύγκριση για την αποδοχή ή την απόρριψη των κλήσεων από το σύστημα. Αν η συνθήκη για την αποδοχή κλήσεων ικανοποιείται, τότε η κλήση εισέρχεται στο σύστημα, δεσμεύει τους απαιτούμενους πόρους, ανάλογα με την κατηγορία της, και αφού εξυπηρετηθεί με βάση τον μέσο χρόνο εξυπηρέτησής της (mean service time, MST) τότε εξέρχεται από το σύστημα, αποδεσμεύοντας παράλληλα τους πόρους που είχε δεσμεύσει. Για ευκολία στους υπολογισμούς των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης οι κλήσεις που γίνονται αποδεκτές και βρίσκονται στο σύστημα προσμετρώνται στις μεταβλητές  $Serving\_Calls$ , ανάλογα με την κατηγορία τους, και  $Total\_SystemCalls$  που είναι το συνολικό άθροισμά τους. Μετά το πέρας της εξυπηρέτησης η κάθε κλήση αφαιρείται από το επιμέρους (της κάθε κατηγορίας ξεχωριστά) και το γενικό σύνολο. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι αν η κάθε κλήση δεν ανήκει στις «αρχικές» κλήσεις (TRANSIT), την καταχωρούμε σε δύο

ξεχωριστά σύνολα, τόσο στις αποδεκτές, όσο και στις αποκλειόμενες, αναλόγως με την ενέργεια που πράξαμε, ώστε να μπορούμε να εξάγουμε την πιθανότητα απώλειας (blocking probability) για κάθε κατηγορία κίνησης ξεχωριστά. Η υλοποίηση φαίνεται στα παρακάτω:

```

IF TotalN < Nmax
IF I > TRANSIT
ADD 1 to ALLOWED(NUMBER)
ENDIF
ADD 1 to Serving_Calls(NUMBER)
ADD 1 to Total_SystemCalls
LET TRUNKS = TRUNKS - RES_REQ(NUMBER)
WORK EXPONENTIAL.F(1/MST, STREAM2) MINUTES
SUBTRACT 1 from Serving_Calls(NUMBER)
SUBTRACT 1 from Total_SystemCalls
LET TRUNKS = TRUNKS + RES_REQ(NUMBER)
ELSE
IF I > TRANSIT
ADD 1 to BLOCKED(NUMBER)
ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

### 3.6 Εμφάνιση αποτελεσμάτων στη διαδικασία MAIN

Μετά το τέλος την κύριας λειτουργίας της προσομοίωσης επιστρέφουμε στη διαδικασία MAIN όπου και θα εμφανίσουμε πληροφορίες και παραμέτρους σχετικά με τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου μας και αποτελέσματα όσον αφορά στην πιθανότητα απώλειας κάθε κατηγορίας κίνησης, την κατάσταση αξιοποίησης του συστήματος, αλλά και την αναλογία των ενεργών και παθητικών κλήσεων που βρίσκονται στο σύστημα, σύμφωνα με τους απαιτούμενους πόρους συστήματος.

#### 3.6.1 Εμφάνιση παραμέτρων προσομοίωσης του μοντέλου

Για διευκόλυνση της ανάγνωσης των περαιτέρω αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αρχικά εμφανίζουμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε, καθώς και κάποια συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραχθέντων κλήσεων ανα κατηγορία κίνησης. Οι παράμετροι εμφάνισης είναι η παραγόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (a), ο παράγοντας φορτίου κίνησης στο σύστημα (w), οι απαιτήσεις σε «γραμμές» (r) (με χρήση του παράγοντα ακεραιοποίησης G), καθώς και ο παράγοντας δραστηριότητας (activity factor) για κάθε κατηγορία κίνησης ξεχωριστά:

```

FOR J = 1 to CLASSES
DO
PRINT 6 LINE with J, own_LOAD(J), J, w(J), J,
RES_REQ(J), J, TypeCalls(J), J, V(J) thus
a(***) = **.*****
w(***) = *.*****
r(***) = **
Number of Calls of Class ** produced = *****
Activity Factor of Class ** is *.**
-----
LOOP

```

### 3.6.2 Πιθανότητες αποκλεισμού για κάθε κατηγορία κίνησης

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα σε μια προσομοίωση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, τις περισσότερες φορές, είναι η πιθανότητα που υπάρχει για τον αποκλεισμό (από το σύστημα) μιας νέας κλήσης. Αυτή την πιθανότητα μας την παρέχει το πηλίκο των αποκλεισμένων κλήσεων προς τον συνολικό αριθμό των κλήσεων (αποδεκτών και αποκλεισμένων) για κάθε διαφορετική κατηγορία κλήσεων. Για την εύρεση αυτού του πηλίκου και για την αναλυτική αναφορά των κλήσεων που εξυπηρετήθηκαν ή αποκλείστηκαν, υλοποιήσαμε τα ακόλουθα:

```

FOR J = 1 to CLASSES
DO
PRINT 3 LINE with J, ALLOWED(J), J and BLOCKED(J) thus
Allowed Calls of the * type of calls (that I >
Transit) = *****
Blocked Calls of the * type of calls (that I >
Transit) = *****
-----
LOOP
FOR J = 1 to CLASSES
DO
PRINT 1 LINE with J, (BLOCKED(J)/(ALLOWED(J) +
BLOCKED(J))*100) thus
CLASS ** BLOCKING PROBABILITY ***.***** %
LOOP

```

### 3.6.3 Εύρεση ποσοστού κατειλημμένων πόρων του συστήματος

Ένα ακόμα στατιστικό στοιχείο με μεγάλο ενδιαφέρον που μπορούμε να εξάγουμε από τα αποτελέσματα που μας δίνει η προσομοίωση είναι το ποσοστό των κατειλημμένων πόρων του συστήματος. Δηλαδή το πλήθος, επί του συνόλου των καταστάσεων, που συναντούμε το σύστημα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση κατειλημμένων πόρων. Το μέγεθος αυτό το ορίζουμε ως  $q(j)$  όπου  $j$  είναι οι κατειλημμένοι πόροι του συστήματος, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ακέραια επιβάρυνση της κάθε κλήσης που βρίσκεται κάθε στιγμή μέσα στο σύστημα:

```

FOR K = 1 to 600
DO
IF Q(K) > 0
LET Q_Sum = Q_Sum + (Q(K)/(CALLS-TRANSIT))
PRINT 1 LINE with K-1, Q(K)/(CALLS-TRANSIT) thus
q(***) = *.*****
ENDIF
LOOP
PRINT 3 LINE with Q_Sum thus
-----
Total Q is: *.****
-----
FOR K = 1 to 600
DO
LET SUM = SUM + (K-1)*Q(K)
LOOP

```

```
PRINT 1 LINE with SUM/(CALLS - TRANSIT) thus
Utilization of the System: ***.****
```

Ορισμένες σημαντικές παρατηρήσεις είναι:

- α) ότι θέτουμε έναν πεπερασμένο αριθμό μεγίστων πόρων (στην προκειμένη περίπτωση 600) που γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι η προσομοίωση δεν μπορεί να ξεπεράσει για τα παραδείγματα που έχουμε «τρέξει»,
- β) το ποσοστό της εκάστοτε κατάστασης του συστήματος προσδιορίζεται από το σύνολο των κλήσεων χωρίς τις «αρχικές» κλήσεις για την σταθεροποίηση του συστήματος (transit calls) και
- γ) η αξιοποίηση του συστήματος (utilization), ορίζεται ως ο μέσος όρος των κατειλημμένων πόρων του συστήματος, με βάση τα ποσοστά όλων των διαφορετικών καταστάσεων  $q(j)$ .

### 3.6.4 Εμφάνιση ποσοστού ενεργών/παθητικών κλήσεων ανά κατάσταση

Στα ασύρματα μοντέλα επικοινωνίας εκτός από το σύνολο των κλήσεων που βρίσκεται και εξυπηρετείται από το σύστημα, σημαντικότερη σημασία έχουν οι ενεργείς κλήσεις κάθε στιγμή, δηλαδή αυτές όπου υπάρχει ανταλλαγή δεδομένων και δεν είναι σε κατάσταση αναμονής. Αυτές, οι ενεργείς κλήσεις, προσθέτουν την επιβάρυνση στο σύστημα και είναι χρήσιμο να μελετήσουμε τα στοιχεία που πηγάζουν σχετικά με αυτές από την προσομοίωση. Η εμφάνιση του ποσοστού όλων των διαφορετικών  $\Lambda(c|j)$  (ενεργοί/παθητικοί κατειλημμένοι πόροι) γίνεται με την παρακάτω υλοποίηση:

```
FOR K = 1 to 600
DO
FOR J = 1 to K
DO
IF L(J,K) > 0
PRINT 1 LINE with COUNT, J-1, K-1, L(J,K), J-1, K-1,
L(J,K)/Q(K) thus
***** L(***/***) = ***** or L(***/***) = *.*****
ADD 1 to COUNT
READ AS /
ENDIF
LOOP
LOOP
```

## Κεφάλαιο 4: Αριθμητικά αποτελέσματα

Μετά την αναλυτική περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης των Staehle-Mäder ακολουθεί η διαδικασία της εκτέλεσης παραδειγμάτων για την επιβεβαίωση της ορθότητας του μοντέλου, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που μας δίνει το προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο. Όπως αναφέραμε σχετικά στην ενότητα 3.3.1 για την είσοδο των δεδομένων θα χρησιμοποιήσουμε εξωτερικό αρχείο. Πιο συγκεκριμένα το αρχείο εισόδου δεδομένων, με όνομα input.txt, θα έχει την εξής μορφή:

```

CLASSES
CALLS
TRANSIT
Nmax
TOTALO_CL
G
EIoother, NO
CV
WCDMA
STREAM1 STREAM2
TRAF_MIX(1), V(J), R(1), DEM_dB(1)
TRAF_MIX(2), V(J), R(2), DEM_dB(2)
...
TRAF_MIX(J), V(J), R(J), DEM_dB(J)

```

Όπου J ο συνολικός αριθμός κατηγοριών κλήσεων που θα χρησιμοποιήσουμε στα παραδείγματά μας. Οι τιμές και το είδος των μεταβλητών αναλύθηκαν στην ενότητα 3.2. Τα αποτελέσματα των πινάκων της προσομοίωσης είναι μέσος όρος 7 ξεχωριστών εκτελέσεων με διαφορετικό ζεύγος STREAM1 και STREAM2 (seed numbers). Όλα τα παραδείγματα υπολογίζονται για σύστημα WCDMA με chip rate 3,84 Mcps και θερμικό θόρυβο  $N_0 = -174 \text{ dBm}$  ( $3,98 \cdot 10^{-18} \text{ mW}$ ). Θεωρούμε 3 κατηγορίες κίνησης με ρυθμούς  $R_1 = 12,2 \text{ kbps}$ ,  $R_2 = 64 \text{ kbps}$  και  $R_3 = 144 \text{ kbps}$  και στόχο  $\frac{E_b}{N_0}$ ,  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_1 = 5 \text{ dB}$ ,  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_2 = 4 \text{ dB}$ ,  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_3 = 3 \text{ dB}$  αντίστοιχα. Επίσης ο

συντελεστής διακριτοποίησης και ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι  $G = 0,005$  και  $CV = 1$  αντίστοιχα. Τέλος το δείγμα κλήσεων πάνω στο οποίο γίνεται η προσομοίωση, όλων των παραδειγμάτων, είναι 2 εκατομμύρια κλήσεις (2.000.000) και οι «αρχικές» κλήσεις (TRANSIT) έχουν οριστεί στο 1/10 του συνόλου δηλαδή 200 χιλιάδες κλήσεις (200.000). Αναλυτικά τα παραδείγματα παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες και σε κάθε παράδειγμα γίνεται αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα του προσεγγιστικού μαθηματικού μοντέλου.

## 4.1 Παράδειγμα #1

Στο 1<sup>ο</sup> παράδειγμα, που θα αποτελέσει και κύριο σημείο αναφοράς και για τα επόμενα παραδείγματα, στόχος μας είναι να παρατηρήσουμε την κλιμάκωση του ποσοστού απώλειας κλήσεων, καθώς αυξάνουμε το συνολικό προσφερόμενο φορτίο της κυψέλης. Συνεπώς θέτουμε το μέγιστο φορτίο  $n_{\max} = 0,8$  και οι τιμές του προσφερόμενου φορτίου ( $n_{\text{own}}$ ) κυμαίνονται από 0,1 έως 0,7. Το traffic mix είναι 50% 12,2Kbps (1<sup>η</sup> κατηγορία), 25% 64Kbps (2<sup>η</sup> κατηγορία) και 25% 144Kbps (3<sup>η</sup> κατηγορία). Η μέση τιμή της παρεμβολής των άλλων κυψελών είναι  $E[I_{\text{other}}] = 2 \cdot 10^{-18} \text{ mW}$  και οι παράγοντες δραστηριότητας είναι  $\nu_1 = 0,45$ ,  $\nu_2 = 0,3$ ,  $\nu_3 = 0,8$  για την κάθε κατηγορία κίνησης αντίστοιχα. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον πίνακα 4.1:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,3383 ± 0,014	0,4017 ± 0,017	0,4659 ± 0,021	45,08	0,1180	382
0,2	0,6437 ± 0,029	0,7792 ± 0,035	0,9385 ± 0,045	89,83	0,2213	406
0,3	1,3531 ± 0,065	1,7058 ± 0,082	2,1746 ± 0,105	133,37	0,3160	422
0,4	3,0311 ± 0,149	3,9843 ± 0,195	5,2788 ± 0,262	174,15	0,4031	432
0,5	6,2501 ± 0,311	8,3768 ± 0,415	11,0809 ± 0,551	208,61	0,4741	440
0,6	10,7266 ± 0,535	14,4232 ± 0,717	18,9976 ± 0,947	235,36	0,5277	446
0,7	15,8586 ± 0,790	21,0417 ± 1,052	27,3989 ± 1,351	255,35	0,5675	450

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 1<sup>ο</sup> παράδειγμα

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,3364	0,3972	0,4693	0,11792	382
0,2	0,643	0,7794	0,9471	0,2211	406
0,3	1,3654	1,723	2,1855	0,31626	422
0,4	3,0756	4,0425	5,3184	0,403	432
0,5	6,2931	8,4131	11,1504	0,474	440
0,6	10,7663	14,3552	18,819	0,52798	446
0,7	15,7798	20,8164	26,8439	0,56855	450

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 1<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]



## 4.2 Παράδειγμα #2

Στο 2<sup>ο</sup> παράδειγμα η μόνη διαφοροποίηση ως προς το 1<sup>ο</sup> είναι η αύξηση της μέγιστης χωρητικότητας του συστήματος. Οπότε το μέγιστο φορτίο,  $n_{max}$ , το θέτουμε ως  $n_{max} = 0,9$ . Οι προσδοκίες μας από αυτή την αλλαγή είναι οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων να παρουσιάζουν μικρότερη κλιμάκωση καθώς ο παράγοντας φορτίου της κυψέλης αυξάνει. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν τις αρχικές μας εκτιμήσεις και αυτό φαίνεται και στον πίνακα 4.3:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,0112 ± 0,001	0,0123 ± 0,001	0,0135 ± 0,001	45,28	0,1058	428
0,2	0,0222 ± 0,002	0,0289 ± 0,002	0,0355 ± 0,002	90,37	0,1982	456
0,3	0,0605 ± 0,003	0,0808 ± 0,004	0,1050 ± 0,005	135,57	0,2860	474
0,4	0,2245 ± 0,011	0,3362 ± 0,015	0,5097 ± 0,025	180,50	0,3699	488
0,5	0,9541 ± 0,045	1,4758 ± 0,072	2,2608 ± 0,113	223,07	0,4479	498
0,6	2,9916 ± 0,145	4,5684 ± 0,222	6,8101 ± 0,335	260,18	0,5162	504
0,7	6,5132 ± 0,322	9,6070 ± 0,465	13,8135 ± 0,686	289,18	0,5670	510

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 2<sup>ο</sup> παράδειγμα

Αυτό μπορεί να επαληθευτεί και από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου του πίνακα 4.4:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,0106	0,0128	0,0155	0,105632	428
0,2	0,0228	0,0285	0,0357	0,198263	456
0,3	0,0602	0,0805	0,1092	0,285965	474
0,4	0,2334	0,3478	0,5206	0,369455	488
0,5	1,0115	1,5554	2,3477	0,447636	498
0,6	3,1289	4,7033	6,8585	0,515545	504
0,7	6,6777	9,7192	13,6486	0,566232	510

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 2<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Τα συμπεράσματα από τα 2 πρώτα παραδείγματα είναι τα εξής:

- Τα αποτελέσματα που μας δίνει η προσομοίωση και το μαθηματικό μοντέλο συμπίπτουν με μεγάλη ακρίβεια στο κάθε παράδειγμα, λαμβάνοντας υπ'οψιν και το γεγονός ότι το μαθηματικό μοντέλο είναι προσεγγιστικό [12].
- Η αύξηση του  $n_{max}$ , στο 2<sup>ο</sup> παράδειγμα, οδηγεί σε σημαντική μείωση του ποσοστού απώλειας κλήσεων, σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> παράδειγμα, και από τις 3 κατηγορίες κίνησης, ενώ η αξιοποίηση του συστήματος (Utilization) είναι ελαφρώς μικρότερη.

### 4.3 Παράδειγμα #3

Στο 3<sup>ο</sup> παράδειγμα θα προσομοιώσουμε μια ακόμα διαφορετική εκδοχή του 1<sup>ου</sup> παραδείγματος, που στοχεύει στην εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος αν διπλασιάσουμε την μέση τιμή παρεμβολής των γειτονικών κυψελών. Συνεπώς η μοναδική μεταβολή στα δεδομένα του 1<sup>ου</sup> παραδείγματος είναι  $E[I_{other}] = 4 \cdot 10^{-18} mW$ . Οπότε σύμφωνα με τη γνωστή διαδικασία της προσομοίωσης που ακολουθήσαμε και στα προηγούμενα παραδείγματα λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 4.5:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	2,9589 ± 0,145	3,3493 ± 0,154	3,7605 ± 0,184	43,80	0,1203	364
0,2	4,5362 ± 0,224	5,1934 ± 0,257	5,9468 ± 0,294	86,09	0,2230	386
0,3	6,9682 ± 0,344	8,0615 ± 0,402	9,4787 ± 0,466	125,19	0,3130	400
0,4	10,4837 ± 0,502	12,347 ± 0,615	14,5112 ± 0,723	159,78	0,3897	410
0,5	14,8656 ± 0,743	17,6591 ± 0,873	21,0221 ± 1,051	188,14	0,4501	418
0,6	19,7514 ± 0,953	23,5665 ± 1,157	28,0473 ± 1,401	210,91	0,4998	422
0,7	24,6531 ± 1,215	29,4984 ± 1,463	34,7745 ± 1,745	228,60	0,5366	426

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 3<sup>ο</sup> παράδειγμα

Τα αντίστοιχα μαθηματικά αποτελέσματα για το 3<sup>ο</sup> παράδειγμα είναι στον πίνακα 4.6:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	2,9472	3,3332	3,7687	0,120241	364
0,2	4,5159	5,1717	5,924	0,222678	386
0,3	6,966	8,0924	9,4064	0,312946	400
0,4	10,4676	12,3225	14,5063	0,3894	410
0,5	14,8373	17,6235	20,8913	0,45053	418
0,6	19,6301	23,4069	27,7777	0,50049	422
0,7	24,431	29,1341	34,4788	0,5382	426

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 3<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Συγκρίνοντας το 1<sup>ο</sup> με το 3<sup>ο</sup> παράδειγμα οδηγούμαστε στα εξής συμπεράσματα:

- Η αύξηση της τιμής των παρεμβολών από τις γειτονικές κυψέλες παίζει σημαντικό ρόλο, αφού παρατηρείται απότομη αύξηση των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων ακόμα και για μικρές τιμές προσφερόμενου φορτίου στην κυψέλη.
- Όσον αφορά στη σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης και του μαθηματικού μοντέλου, διαπιστώνουμε ότι ακόμα και σε μεγαλύτερες τιμές απώλειας κλήσεων η απόκλιση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

## 4.4 Παράδειγμα #4

Στο 4<sup>ο</sup> παράδειγμα θα μελετήσουμε το σενάριο του 3<sup>ου</sup> παραδείγματος, αλλά με αυξημένη χωρητικότητα συστήματος. Συνεπώς θέτουμε  $n_{\max} = 0,9$  και την τιμή παρεμβολής των γειτονικών κυψελών σε  $E[I_{\text{other}}] = 4 \cdot 10^{-18} mW$  και πραγματοποιούμε τις προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,2014 ± 0,009	0,2282 ± 0,011	0,2668 ± 0,013	45,13	0,1080	418
0,2	0,3578 ± 0,017	0,4218 ± 0,021	0,4849 ± 0,024	90,03	0,2028	444
0,3	0,6971 ± 0,034	0,8560 ± 0,042	1,0327 ± 0,051	134,63	0,2914	462
0,4	1,4946 ± 0,074	1,9090 ± 0,095	2,4217 ± 0,119	177,66	0,3748	474
0,5	3,2546 ± 0,161	4,3022 ± 0,212	5,7183 ± 0,285	217,17	0,4487	484
0,6	6,3345 ± 0,313	8,4632 ± 0,423	11,2053 ± 0,551	250,09	0,5104	490
0,7	10,4645 ± 0,523	13,9568 ± 0,694	18,2696 ± 0,911	275,84	0,5561	496

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 4<sup>ο</sup> παράδειγμα

Για αυτά τα δεδομένα εισόδου το μαθηματικό μοντέλο μας δίνει τα αποτελέσματα του πίνακα 4.8:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,20096	0,23376	0,271926	0,107931	418
0,2	0,35914	0,42608	0,50607	0,202853	444
0,3	0,700516	0,85645	1,05085	0,291243	462
0,4	1,509539	1,924071	2,463103	0,374725	474
0,5	3,306045	4,35333	5,721367	0,448303	484
0,6	6,409948	8,524506	11,21862	0,510181	490
0,7	10,522025	13,92688	18,119302	0,556276	496

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 4<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Το συμπέρασμα της σύγκρισης του 3<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> παραδείγματος είναι:

- Ότι η θεαματική μείωση των ποσοστών απώλειας κλήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της μέγιστης χωρητικότητας της κυψέλης, οδηγεί και σε μεγαλύτερη αντοχή στις παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες και ως και τούτου σε μεγαλύτερο αριθμό αποδεκτών κλήσεων.

## 4.5 Παράδειγμα #5

Στο 5<sup>ο</sup> παράδειγμα το αντικείμενο εξέτασης είναι η μεταβολή των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων, με τα αριθμητικά δεδομένα του 1<sup>ου</sup> παραδείγματος, αν διαφοροποιήσουμε τον παράγοντα δραστηριότητας (activity factor) της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας κίνησης. Συνεπώς έχουμε  $v_1 = 0,7$  και οι νέες τιμές του παράγοντα φορτίου για τις τρεις κατηγορίες κίνησης είναι  $w_1 = 9,9469$ ,  $w_2 = 4,0183$ ,  $w_3 = 6,9615$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του φορτίου κίνησης για τις 3 κατηγορίες κλήσεων. Στο πίνακα 4.9 έχουμε τις νέες τιμές του φορτίου κίνησης:

$n_{own}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\alpha_1$	7,1809	14,4618	21,5428	28,7238	35,9047	43,0857	50,2666
$\alpha_2$	2,0738	4,1477	6,2215	8,2954	10,3642	12,4432	14,517
$\alpha_3$	0,4489	0,8477	1,3466	1,7956	2,2444	2,6934	3,1423

Πίνακας 4.9: Τιμές του φορτίου κίνησης για το 5<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Εκτελώντας τις προσομοιώσεις λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα όσον αφορά στις πιθανότητες απώλειας κλήσεων και αξιοποίησης του συστήματος (Utilization):

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,3365 ± 0,016	0,3968 ± 0,019	0,4584 ± 0,022	37,09	0,1001	368
0,2	0,6410 ± 0,032	0,7762 ± 0,038	0,9384 ± 0,046	73,92	0,1925	384
0,3	1,3563 ± 0,066	1,7036 ± 0,085	2,1403 ± 0,106	109,86	0,2803	392
0,4	3,0348 ± 0,151	4,0000 ± 0,202	5,2757 ± 0,262	143,28	0,3636	394
0,5	6,1814 ± 0,307	8,3085 ± 0,413	11,1290 ± 0,553	171,34	0,4327	396
0,6	10,6116 ± 0,531	14,3090 ± 0,714	18,8857 ± 0,944	192,90	0,4871	396
0,7	15,7153 ± 0,784	20,9359 ± 1,045	27,1721 ± 1,355	208,64	0,5296	394

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 5<sup>ο</sup> παράδειγμα

Αντίστοιχα στον πίνακα 4.11 υπάρχουν τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,3365	0,3973	0,4694	0,1008	368
0,2	0,6435	0,7739	0,9476	0,1925	384
0,3	1,3690	1,7278	2,1921	0,2802	392
0,4	3,1031	4,0811	5,3721	0,3632	394
0,5	6,4186	8,5881	11,3883	0,4315	396
0,6	11,1060	14,8180	19,4256	0,4843	396
0,7	16,4253	21,6710	27,9230	0,5246	394

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 5<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Όσον αφορά στη σύγκριση του 1<sup>ου</sup> και του 5<sup>ου</sup> παραδείγματος οι παρατηρήσεις είναι οι εξής:

- Η αλλαγή ενός παράγοντα δραστηριότητας έφερε σημαντική αύξηση στις πιθανότητες απώλειας για όλες τις κατηγορίες κίνησης
- Ειδικά για την 1<sup>η</sup> κατηγορία κίνησης οι πιθανότητες απώλειας είναι πολύ αυξημένες και προσεγγίζουν τις πιθανότητες της 2<sup>ης</sup> κατηγορίας για χαμηλά προσφερόμενα φορτία κυψέλης ( $n_{own}$ )
- Ταυτόχρονα συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του μαθηματικού μοντέλου παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι μικρές παρά τις αλλαγές στα δεδομένα εισόδου.

## 4.6 Παράδειγμα #6

Στο 6<sup>ο</sup> παράδειγμα προσομοιώνουμε το ενδεχόμενο του 5<sup>ου</sup> παραδείγματος, αλλά με αυξημένη χωρητικότητα κυψέλης. Οπότε θέτουμε  $n_{max} = 0,9$ . Με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον πίνακα 4.12 που ακολουθεί:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,0108 ± 0,001	0,0127 ± 0,001	0,0195 ± 0,001	37,27	0,0896	416
0,2	0,0229 ± 0,002	0,0292 ± 0,002	0,0321 ± 0,002	74,50	0,1717	434
0,3	0,0601 ± 0,003	0,0843 ± 0,004	0,1150 ± 0,005	111,68	0,2515	444
0,4	0,2254 ± 0,011	0,3444 ± 0,016	0,5062 ± 0,025	148,55	0,3316	448
0,5	0,9415 ± 0,045	1,4646 ± 0,073	2,2360 ± 0,111	183,65	0,4081	450
0,6	2,9232 ± 0,145	4,4936 ± 0,223	6,6782 ± 0,332	213,88	0,4732	452
0,7	6,3763 ± 0,316	9,4945 ± 0,472	13,6984 ± 0,684	237,26	0,5272	450

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 6<sup>ο</sup> παράδειγμα

Ο πίνακας 4.13 περιέχει τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,0106	0,0128	0,0155	0,0895	416
0,2	0,0228	0,0285	0,0357	0,1716	434
0,3	0,0601	0,0852	0,1092	0,2514	444
0,4	0,2332	0,3477	0,5208	0,3314	448
0,5	1,0150	1,5632	2,3625	0,4076	450
0,6	3,1765	4,7839	6,9841	0,4719	452
0,7	6,8714	10,0163	14,0722	0,5243	450

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 6<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Από τη σύγκριση του 5<sup>ου</sup> και του 6<sup>ου</sup> παραδείγματος θα μπορούσαμε να διαπιστώσουμε ότι:

- Η αύξηση της χωρητικότητας λειτούργησε ευεργετικά όσον αφορά στην εξυπηρέτηση των κλήσεων από το σύστημα, αφού οι πιθανότητες απωλειών μειωθήκανε αισθητά.

#### 4.7 Παράδειγμα #7

Στο 7<sup>ο</sup> παράδειγμα εκτός από την μεταβολή του παράγοντα δραστηριότητας (activity factor) της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας από  $\nu_1 = 0,45$  σε  $\nu_1 = 0,7$ , θα αυξήσουμε και τη μέση τιμή παρεμβολών από τις γειτονικές κυψέλες από  $E[I_{other}] = 2 \cdot 10^{-18} mW$  σε  $E[I_{other}] = 4 \cdot 10^{-18} mW$ . Η συμπεριφορά του μοντέλου προσομοίωσης αντικατοπτρίζεται στον πίνακα 4.14:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	2,9527 ± 0,147	3,3551 ± 0,166	3,8057 ± 0,189	36,02	0,1024	352
0,2	4,5349 ± 0,226	5,1978 ± 0,258	5,9442 ± 0,296	70,72	0,1932	366
0,3	6,9816 ± 0,348	8,1124 ± 0,405	9,4020 ± 0,468	103,02	0,2769	372
0,4	10,4733 ± 0,502	12,3432 ± 0,611	14,5889 ± 0,725	131,19	0,3489	376
0,5	14,8637 ± 0,742	17,6539 ± 0,853	21,0069 ± 1,049	154,38	0,4106	376
0,6	19,6731 ± 0,982	23,4693 ± 1,172	27,9510 ± 1,395	172,57	0,4590	376
0,7	24,5418 ± 1,218	29,3103 ± 1,455	34,8626 ± 1,743	186,69	0,4965	376

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 7<sup>ο</sup> παράδειγμα

Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για το αντίστοιχο παράδειγμα βρίσκονται στον πίνακα 4.15:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	2,9482	2,3343	3,77	0,1023	352
0,2	4,5244	5,1817	5,9359	0,1932	366
0,3	7,007	8,1417	9,4656	0,2765	372
0,4	10,6019	12,4858	14,704	0,3481	376
0,5	15,1526	18,0075	21,3547	0,4087	376
0,6	20,2014	24,0989	28,6026	0,4554	376
0,7	25,2951	30,1699	35,6934	0,4907	376

Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 7<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Ως συμπέρασμα αυτού του παραδείγματος μπορούμε να αναφέρουμε:

- Την αναμενόμενη αύξηση των ποσοστών απώλειας κλήσεων σε σχέση με τα παραδείγματα 5 και 6, όπου η μέση τιμή παρεμβολών είχε τη μισή ισχύ.

## 4.8 Παράδειγμα #8

Στο 8<sup>ο</sup> παράδειγμα θα μελετήσουμε την επίδραση που έχουν οι αλλαγές στον παράγοντα δραστηριότητας και στις παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες, με ταυτόχρονη αύξηση της συνολικής χωρητικότητας της κυψέλης σε  $n_{\max} = 0,9$ . Δηλαδή προσομοιώνουμε το 7<sup>ο</sup> παράδειγμα με σύστημα μεγαλύτερης χωρητικότητας. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα 4.16:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης			
0,1	0,2006 ± 0,011	0,2340 ± 0,012	0,2657 ± 0,013	37,17	0,0920	404
0,2	0,3586 ± 0,017	0,4258 ± 0,021	0,4916 ± 0,024	74,23	0,1759	422
0,3	0,6971 ± 0,034	0,8528 ± 0,042	1,0650 ± 0,049	110,82	0,2565	432
0,4	1,4986 ± 0,074	1,8929 ± 0,094	2,4141 ± 0,120	146,28	0,3355	436
0,5	3,2416 ± 0,162	4,2903 ± 0,314	5,6541 ± 0,282	178,50	0,4075	438
0,6	6,2786 ± 0,313	8,4082 ± 0,418	11,1495 ± 0,556	205,39	0,4689	438
0,7	10,3770 ± 0,501	13,9032 ± 0,695	18,1475 ± 0,905	226,15	0,5163	438

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 8<sup>ο</sup> παράδειγμα

Ο πίνακας 4.17 παρέχει τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου:

total offered own cell load	PBLOCKING %			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
	1 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	2 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης	3 <sup>η</sup> κατηγορία κίνησης		
0,1	0,2009	0,2338	0,2719	0,09196	404
0,2	0,3592	0,4262	0,5062	0,1757	422
0,3	0,7013	0,8575	1,0522	0,2564	432
0,4	1,5161	1,9329	2,4752	0,3353	436
0,5	3,3458	4,4088	5,7978	0,4071	438
0,6	6,5594	8,7309	11,4959	0,4675	438
0,7	10,8849	14,4163	18,7555	0,5131	438

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 8<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Οι παρατηρήσεις μας, σε σχέση με το 7<sup>ο</sup> παράδειγμα, μετά την εκτέλεση του 8<sup>ου</sup> παραδείγματος είναι οι εξής:

- Η ανοχή του συστήματος στον αυξημένο θόρυβο και στον παράγοντα δραστηριότητας της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας, μετά την αύξηση της μέγιστης χωρητικότητας του συστήματος, επαληθεύεται και στο 8<sup>ο</sup> παράδειγμα, όπου τα ποσοστά απώλειας κλήσεων παρουσιάζουν σαφή μείωση.
- Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επαληθεύουμε, για μια ακόμα φορά, την ακρίβεια του μαθηματικού μοντέλου, μέσω της προσομοίωσης, αφού τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μόνο ελαφρές αποκλίσεις και στις πιθανότητες απώλειας κλήσεων, αλλά και στην αξιοποίηση (Utilization) του συστήματος.

## 4.9 Παράδειγμα #9

Το 9<sup>ο</sup> παράδειγμα το εκτελούμε για μία μόνο τιμή προσφερόμενου φορτίου κυψέλης  $\rho_{own} = 0,4$ , δίνοντας έμφαση στο πώς η τιμές απώλειας κλήσεων μεταβάλλονται καθώς αλλάζουμε το ποσοστό της κίνησης κάθε κατηγορίας (traffic mix). Τα διαφορετικά ποσοστά για το traffic mix και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπάρχουν στον πίνακα 4.18 που ακολουθεί:

traffic mix 1	traffic mix 2	traffic mix 3	PBLOCKING%			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
			1η κατηγορία κίνησης	2η κατηγορία κίνησης	3η κατηγορία κίνησης			
0,1	0,45	0,45	3,7338 ± 0,185	4,9290 ± 0,246	6,4888 ± 0,322	173,07	0,3829	452
0,2	0,40	0,40	3,5718 ± 0,177	4,7074 ± 0,235	6,1901 ± 0,309	173,47	0,3889	446
0,3	0,35	0,35	3,3889 ± 0,166	4,4797 ± 0,223	5,8541 ± 0,292	173,65	0,3929	442
0,4	0,30	0,30	3,2097 ± 0,160	4,2015 ± 0,210	5,5326 ± 0,277	173,86	0,3988	436
0,5	0,25	0,25	3,0311 ± 0,151	3,9843 ± 0,199	5,2788 ± 0,263	174,15	0,4031	432
0,6	0,20	0,20	2,8601 ± 0,143	3,7390 ± 0,186	4,9346 ± 0,246	174,38	0,4093	426
0,7	0,15	0,15	2,6821 ± 0,134	3,5218 ± 0,176	4,6202 ± 0,231	174,48	0,4154	420
0,8	0,10	0,10	2,5156 ± 0,125	3,2454 ± 0,162	4,2563 ± 0,213	174,63	0,4218	414
0,9	0,05	0,05	2,3564 ± 0,117	3,0830 ± 0,152	3,9156 ± 0,195	174,76	0,4304	406

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 9<sup>ο</sup> παράδειγμα

Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου δίνονται στον πίνακα 4.19:

traffic mix 1	traffic mix 2	traffic mix 3	PBLOCKING%			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
			1η κατηγορία κίνησης	2η κατηγορία κίνησης	3η κατηγορία κίνησης		
0,1	0,45	0,45	3,7951	4,9886	6,5176	0,3827	452
0,2	0,40	0,40	3,6177	4,7614	6,2378	0,3885	446
0,3	0,35	0,35	3,4381	4,5276	5,9447	0,3927	442
0,4	0,30	0,30	3,2571	4,2877	5,6382	0,3987	436
0,5	0,25	0,25	3,0756	4,0425	5,3184	0,403	432
0,6	0,20	0,20	2,8949	3,7937	4,9866	0,4092	426
0,7	0,15	0,15	2,7167	3,5435	4,6449	0,4154	420
0,8	0,10	0,10	2,5433	3,2956	4,298	0,4218	414
0,9	0,05	0,05	2,3777	3,0553	3,9536	0,4304	406

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 9<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Από τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι:

- Όσο αυξάνεται το traffic mix της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας, τόσο μειώνονται οι πιθανότητες απωλειών των 3<sup>ων</sup> κατηγοριών κίνησης. Αυτό συμβαίνει επειδή έχουμε λιγότερη κίνηση 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> κατηγορίας που απαιτούν περισσότερους πόρους. Αντιθέτως η αξιοποίηση του συστήματος γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό.
- Η προσομοίωση επιβεβαιώνει το μαθηματικό μοντέλο και σε αυτή την περίπτωση, αφού οι τιμές είναι παραπλήσιες σε κάθε ενδεχόμενο.



## 4.10 Παράδειγμα #10

Στο 10<sup>ο</sup> παράδειγμα επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση του προηγούμενου παραδείγματος, αλλάζοντας τους συντελεστές δραστηριότητας των τριών κατηγοριών κίνησης. Οι νέες τιμές αυτών είναι  $\nu_1 = 0,70$ ,  $\nu_2 = 0,50$  και  $\nu_3 = 0,85$ . Τα νέα αποτελέσματα είναι τα εξής:

traffic mix 1	traffic mix 2	traffic mix 3	PBLOCKING%			UTILIZATION (trunks/ποσοστό)		Jmax
			1η κατηγορία κίνησης	2η κατηγορία κίνησης	3η κατηγορία κίνησης			
0,1	0,45	0,45	3,6553 ± 0,182	4,8218 ± 0,241	6,3068 ± 0,315	119,18	0,3656	326
0,2	0,40	0,40	3,4742 ± 0,173	4,5892 ± 0,228	6,0930 ± 0,305	118,41	0,3677	322
0,3	0,35	0,35	3,3326 ± 0,161	4,3942 ± 0,219	5,8001 ± 0,290	117,84	0,3706	318
0,4	0,30	0,30	3,1568 ± 0,155	4,1873 ± 0,209	5,4677 ± 0,273	117,12	0,3730	314
0,5	0,25	0,25	2,9940 ± 0,149	3,9311 ± 0,195	5,1963 ± 0,259	116,44	0,3756	310
0,6	0,20	0,20	2,8291 ± 0,141	3,6922 ± 0,184	4,9026 ± 0,245	115,71	0,3806	304
0,7	0,15	0,15	2,6606 ± 0,133	3,4771 ± 0,172	4,5710 ± 0,223	114,94	0,3831	300
0,8	0,10	0,10	2,5014 ± 0,125	3,2224 ± 0,161	4,2330 ± 0,211	114,10	0,3881	294
0,9	0,05	0,05	2,3376 ± 0,116	3,0130 ± 0,151	3,8442 ± 0,192	113,23	0,3959	286

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το 10<sup>ο</sup> παράδειγμα

Αντίστοιχα τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για το ίδιο παράδειγμα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.20:

traffic mix 1	traffic mix 2	traffic mix 3	PBLOCKING%			UTILIZATION (ποσοστό)	Jmax
			1η κατηγορία κίνησης	2η κατηγορία κίνησης	3η κατηγορία κίνησης		
0,1	0,45	0,45	3,6637	4,8425	6,3684	0,3654	326
0,2	0,40	0,40	3,5062	4,6355	6,1071	0,3679	322
0,3	0,35	0,35	3,3458	4,4211	5,832	0,3704	318
0,4	0,30	0,30	3,1829	4,1999	5,5429	0,3729	314
0,5	0,25	0,25	3,0182	3,9725	5,2398	0,3754	310
0,6	0,20	0,20	2,8527	3,7402	4,9238	0,3804	304
0,7	0,15	0,15	2,6878	3,505	4,597	0,3829	300
0,8	0,10	0,10	2,5251	3,2699	4,2637	0,388	294
0,9	0,05	0,05	2,367	3,0396	3,931	0,3959	286

Πίνακας 4.21: Αποτελέσματα μαθηματικού μοντέλου για το 10<sup>ο</sup> παράδειγμα [13]

Συγκρίνοντας τους πίνακες του 10<sup>ου</sup> παραδείγματος με του 9<sup>ου</sup> μπορούμε να διαπιστώσουμε τα εξής:

- Αύξηση των συντελεστών δραστηριότητας προκάλεσε μείωση των πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων και στις 3 κατηγορίες κίνησης
- Αντίστοιχη μεταβολή στις τιμές της προσομοίωσης και του μαθηματικού μοντέλου, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ορθότητα του μοντέλου των Staehle-Mäder.

## Βιβλιογραφία

1. <http://www.technews.gr/modules/news/article.php?storyid=415>
2. Ιωάννης Δασκαλόπουλος, «Μελέτη των δικτύων WCDMA 3ης γενιας και υπολογισμός της χωρητικότητας μιας WCDMA κυψέλης στην κάτω ζεύξη», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Φεβρουάριος 2009.
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Spread\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Spread_spectrum)
4. [http://lvyb.net/media/1/20030330-gsm\\_cdma\\_map.jpg](http://lvyb.net/media/1/20030330-gsm_cdma_map.jpg)
5. Βασίλειος Γ. Κόκκινος, «Μελέτη και ανάλυση μηχανισμών βελτιστοποίησης ελέγχου ισχύος σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
6. <http://en.wikipedia.org/wiki/Handover>
7. <http://www.wirelesstechie.com/archives/262>
8. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.v10:3/issueto>
9. J. Pérez – Romero, O. Sallent, R. Agustí, M. A. Diaz – Guerra, eds., Radio Resource Management in UMTS, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
10. Γιάννης Δ. Γαροφαλάκης, «Σημειώσεις μαθήματος: Προσομοίωση Πληροφοριακών Συστημάτων», Τμήμα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2<sup>η</sup> έκδοση, Ιανουάριος 1999. ([http://150.140.9.29/simulation/book/Sim\\_book.pdf](http://150.140.9.29/simulation/book/Sim_book.pdf))
11. Βασίλειος Σ. Κουϊκογλου, «Σημειώσεις μαθήματος προσομοίωσης - Κεφάλαιο 6: Εισαγωγή στη γλώσσα SIMSCRIPT II.5», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2002. ([http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/simulation.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/simulation.pdf))
12. D. Staehle and A. Mäder, “An analytic approximation of the uplink capacity in a UMTS network with heterogeneous traffic”, Technical Report No. 310, University of Würzburg, May 2003.
13. Αγγελική Λουμπαρδία, «Υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων πολυδιάστατης κίνησης στην ανερχόμενη ζεύξη μιας κυψέλης WCDMA», Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Επιστημής & Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Απρίλιος 2011.