

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΕ
ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Εξεταστική επιτροπή: Καθ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ (επιβλέπων)
Καθ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ
Επικ. Καθ. ΜΑΤΤΙΑΣ ΜΠΟΥΧΕΡ

ΧΑΝΙΑ 2007

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης τους Καθηγητές κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο και κ. Μπούχερ Ματτίας για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή. Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτέρως τον Δρ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την πολύτιμη καθοδήγησή του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Συστοιχίες συσσωρευτών φορτίζονται από την απορριπτόμενη ισχύ αιολικών πάρκων και στη συνέχεια εκφορτίζονται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα συμβάλλοντας στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μελετώνται δυο διαφορετικά συστήματα: το πρώτο είναι αυτόνομο που σημαίνει ότι η μόνη ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα είναι αυτή που απορρίπτεται από τα αιολικά πάρκα και το δεύτερο είναι μη-αυτόνομο, οπότε γίνεται και εισαγωγή ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος (υπολογισμός του πλήθους συσσωρευτών και μετατροπών ισχύος και τιμή της ωριαίας εγγυημένης παραγόμενης ισχύος) χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι υπολογίζουν τις βέλτιστες τιμές των παραπάνω παραμέτρων χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποιεί το συνολικό κόστος του συστήματος και εφαρμόζεται και στα δύο συστήματα, ενώ η δεύτερη βελτιστοποιεί το λόγο Ετήσια Προμηθευόμενη Ενέργεια/Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια και εφαρμόζεται μόνο στο δεύτερο, μη-αυτόνομο σύστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	13
2.1	Δομικά υλικά στοιχείων και συσσωρευτές.....	13
2.2	Λειτουργία του στοιχείου	14
2.2.1	Εκφόρτιση.....	14
2.2.2	Φόρτιση.....	15
2.3	Κατηγοριοποίηση στοιχείων και συσσωρευτών.....	15
2.3.1	Πρωτεύοντα στοιχεία ή συσσωρευτές.....	15
2.3.2	Δευτερεύοντα ή επαναφορτιζόμενα στοιχεία	15
2.3.3	Εφεδρικοί συσσωρευτές	16
2.4	Υπολογισμός χρόνου ζωής	16
2.5	Συσσωρευτές μολύβδου οξέος.....	18
2.5.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	18
2.5.2	Χημεία.....	20
2.5.3	Τάση.....	21
2.5.4	Μέθοδοι φόρτισης.....	21
2.6	Συσσωρευτές νικελίου καδμίου	23
2.6.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	23
2.6.2	Χημεία.....	25
2.6.3	Τάση.....	25
2.6.4	Μέθοδοι φόρτισης.....	25
3	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC	28
3.1	Μετατροπείς DC-AC διακοπτικού τύπου.....	28
3.1.1	Στρατηγική διαμόρφωσης εύρους παλμών	29
3.1.2	Μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας.....	31
3.1.3	Μονοφασικοί αντιστροφείς με πλήρη γέφυρα.....	31
3.1.4	Τριφασικοί αντιστροφείς	32
3.2	Διασύνδεση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο.....	33
3.2.1	Μονοφασική διασύνδεση.....	34
3.2.2	Τριφασική διασύνδεση	34
4	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	35
4.1	Ιστορική αναδρομή	35
4.2	Βασικές αρχές γενετικών αλγορίθμων.....	36
4.3	Κωδικοποίηση των μεταβλητών	37
4.4	Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής.....	38
4.5	Μηχανισμός επιλογής.....	39
4.6	Γενετικές πράξεις.....	42
4.6.1	Επιλογή	43
4.6.2	Διασταύρωση	43
4.6.3	Μετάλλαξη.....	45
4.6.4	Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων (repair algorithm).....	47
4.7	Σύγκλιση του αλγορίθμου.....	47
4.8	Ανακεφαλαίωση.....	48
5	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ	50

5.1	Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος.....	52
5.1.1	Περιγραφή και συμβολισμοί του αλγορίθμου προσομοίωσης	56
5.1.2	Περιγραφή μη αυτόνομου συστήματος με χρήση του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτών.....	57
5.1.3	Περιγραφή μη-αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού μοντέλου συσσωρευτών.....	73
5.1.4	Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού και του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτή	81
6	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	83
6.1	Μέθοδος προσδιορισμού χρόνου απόσβεσης.....	86
6.2	Μέθοδος Προσδιορισμού Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης.....	86
7	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ	
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ	88
7.1	Αντικειμενική συνάρτηση για αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του κόστους.....	89
7.2	Αντικειμενική συνάρτηση για μη-αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του κόστους.....	92
7.3	Αντικειμενική συνάρτηση για μη αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του λόγου Ετήσια προμηθευόμενη ενέργεια/ Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια.....	93
7.4	Μετασχηματισμοί των αντικειμενικών συναρτήσεων.....	93
8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	95
8.1	Αποτελέσματα για το αυτόνομο σύστημα	97
8.1.1	Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA	97
8.2	Αποτελέσματα για το μη-αυτόνομο συστήματα και βελτιστοποίηση του κόστους.....	104
8.2.1	Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA	104
8.3	Αποτελέσματα για το μη-αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του λόγου Ετήσια προμηθευόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια.....	172
8.3.1	Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA	172
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	228
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	233

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να παρέχουν προστασία σε περιπτώσεις στιγμιαίων αλλά και εκτεταμένων διακοπών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνδεδεμένα με ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος υψηλής τεχνολογίας, μπορούν να μειώσουν της αρμονικές διαταραχές και να εξαλείψουν πτώσεις τάσης και ξαφνικές υπερτάσεις. Σε συνδυασμό με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σταθεροποίηση της τάσης και της συχνότητας, τη διαχείριση φορτίων αιχμής και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της ενέργειας. Ένας από του παλαιότερους και πλέον διαδεδομένους τρόπος αποθήκευσης ενέργειας είναι σε μορφή χημικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές εκτείνονται από πλήρως ανεπτυγμένες και αξιόπιστες τεχνολογίες, όπως οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, οι οποίοι έχουν δοκιμαστεί και αναπτυχθεί εδώ και πολλά χρόνια, έως διάφορες καινούριες τεχνολογίες οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης π.χ. sodium sulphur, sodium nickel chloride κ.α.. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται μερικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές ανά τεχνολογία και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους [1].

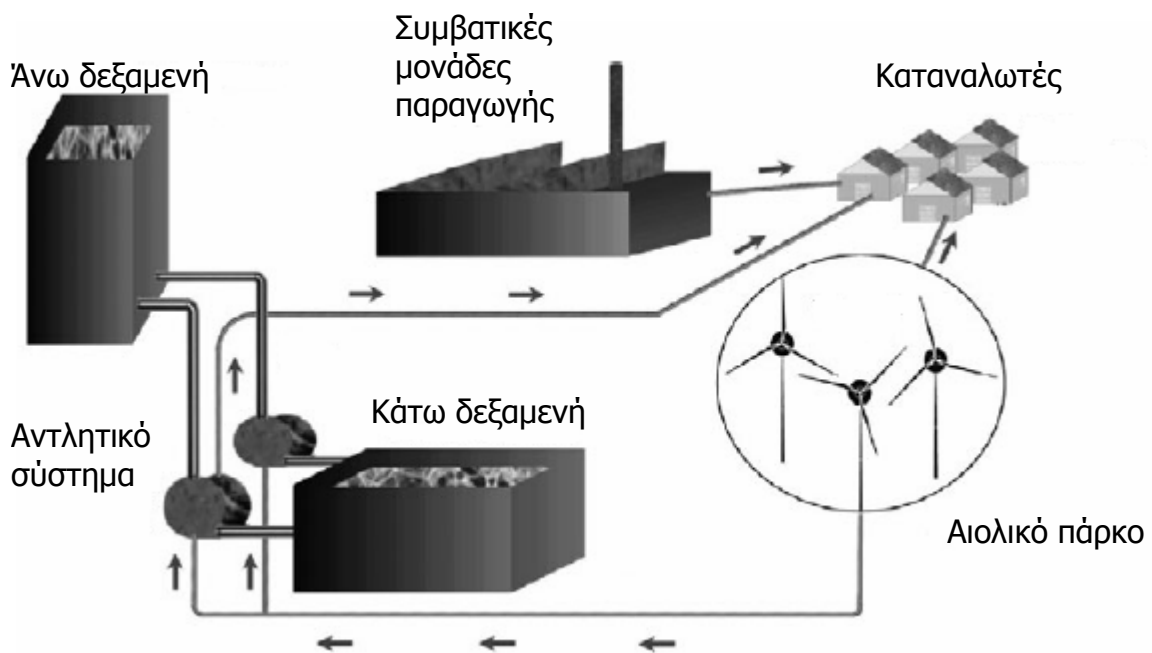
Πίνακας 1.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές ανά τεχνολογία					
Τεχνολογία συσσωρευτών	Lead acid	Nickel cadmium	Sodium sulphur	Lithium ion	Sodium nickel chloride
Μέγιστη ισχύς	Πολλαπλάσια δεκάδων MW	Δεκάδες MW	Κλίμακα MW	Δεκάδες kW	Δεκάδες/λίγες εκατοντάδες kW
Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	35 - 50	75	150 - 240	150 - 200	125
Ειδική ισχύς (W/kg)	75 - 300	150 - 300	90 - 230	200 - 315	130 - 160
Κύκλοι ζωής (κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης)	500-1500	2.500	2.500	1.000–10.000	2.500+
Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης (%)	~80	~70	90	~95	~90
Αυτοεκφόρτιση	2 – 5% ανά μήνα	5 – 20% ανά μήνα	Δεν υπάρχει	~1% ανά μήνα	Δεν υπάρχει

Στον Πίνακα 1.2 φαίνονται μερικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούν συσσωρευτές μολύβδου-οξέος οι οποίοι είναι και οι πλέον χρησιμοποιούμενοι λόγω του χαμηλού τους κόστους και της σχετικά καλής τους απόδοσης [1].

Πίνακας 1.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για συσσωρευτές μολύβδου οξέος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας				
Όνομα και τοποθεσία	Έτος εγκατάστασης	Εκτιμωμένη ενέργεια (MWh)	Εκτιμωμένη ισχύς (MW)	Κόστος το έτος 1995 (\$/kWh)
BEWAG Βερολίνο	1986	8.5	8.5	707
Chino Καλιφόρνια	1988	40	10	201
PREPA Πουέρτο Ρίκο	1994	14	20	341
Vernon Καλιφόρνια	1995	4.5	3	305
Helco Χαβάι	1993	15	10	304

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία είναι η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης ενέργειας από αιολικά πάρκα σε απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Παρόλη την τεχνολογική εξέλιξη, η διείσδυση αιολικής ενέργειας είναι περιορισμένη, γεγονός που οφείλεται κυρίως σε τεχνικά όρια. Η αστάθεια του ηλεκτρικού δικτύου και η δυσκολία στην ακριβή εκτίμηση ζήτησης και παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν στην προαναφερθείσα απόρριψη ενέργειας από τα αιολικά πάρκα. Προηγούμενες εργασίες προτείνουν την κατασκευή αντλησιοταμιευτικής εγκατάστασης η οποία απορροφά την απορριπτόμενη ενέργεια και την μετατρέπει σε υδραυλική αντλώντας νερό από μια κάτω δεξαμενή προς μια υψηλότερη [2]. Η υδραυλική αυτή ενέργεια μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική τροφοδοτώντας το ηλεκτρικό δίκτυο με εγγυημένη ενέργεια, οπότε παράγεται ηλεκτρική ισχύς με καθορισμένη (σταθερή) τιμή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθημερινά. Στην περίπτωση κατά την οποία δεν έχει απορριφθεί αρκετή ενέργεια ώστε η άνω δεξαμενή να κινδυνεύει να μην μπορεί να καλύψει την εγγυημένη ενέργεια κατά το χρονικό διάστημα παραγωγής που ακολουθεί, θα πρέπει η απορριπτόμενη ενέργεια να συμπληρώνεται με ενέργεια εισαγόμενη από το ηλεκτρικό δίκτυο κατά το χρονικό διάστημα που

δεν παράγεται επαρκής απορριπτόμενη αιολική ενέργεια. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα του αντλιοσταμειευτικού συστήματος. Το σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό δεξαμενών (δύο τουλάχιστον) που θα βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη, ένα ή περισσότερα αιολικά πάρκα, ένα ή περισσότερα αντλητικά συστήματα, τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και τη σύνδεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής



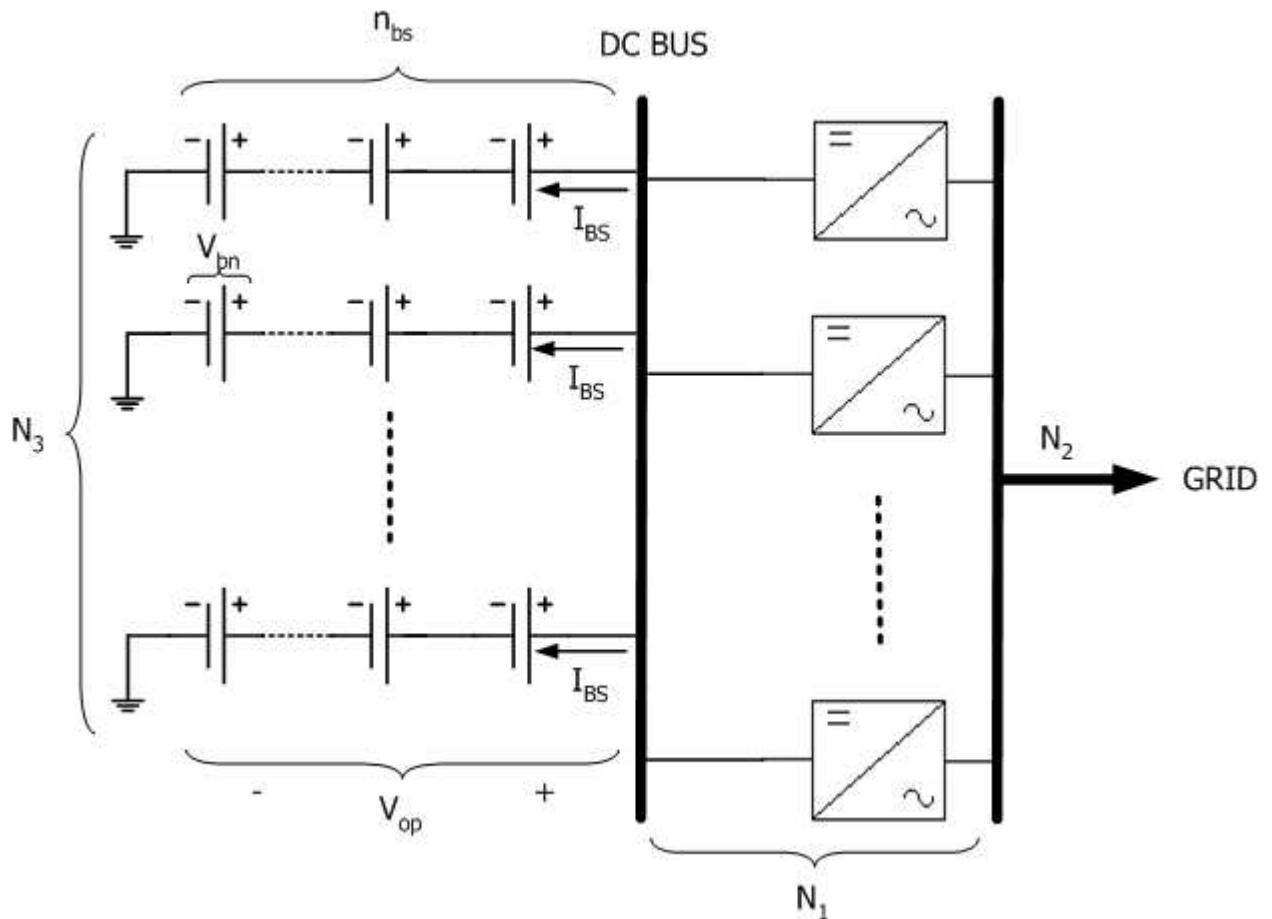
Σχήμα 1.1 Αντλιοσταμειευτικό σύστημα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Η απορριπτόμενη ενέργεια αποθηκεύεται στους συσσωρευτές σε μορφή χημικής ενέργειας και στη συνέχεια μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική τροφοδοτώντας το ηλεκτρικό δίκτυο με εγγυημένη ενέργεια, οπότε παράγεται ηλεκτρική ισχύς με καθορισμένη (σταθερή) τιμή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθημερινά. Οι ώρες παραγωγής εγγυημένης ηλεκτρικής ενέργειας είναι 11:00-15:00. Η επιλογή αυτή γίνεται γιατί στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπάρχει υψηλή ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αποτελείται από συσσωρευτές και μετατροπείς ισχύος οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη φόρτιση και την εκφόρτιση των συσσωρευτών. Μελετώνται

δύο περιπτώσεις συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι το σύστημά είναι αυτόνομο, οπότε η μόνη ενέργεια που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών προέρχεται από την ενέργεια που απορρίπτεται από το αιολικό πάρκο. Στη δεύτερη περίπτωση (μη-αυτόνομο σύστημα) το σύστημα προμηθεύεται ηλεκτρική ενέργεια και από το ηλεκτρικό δίκτυο κατά το χρονικό διάστημα που δεν παράγεται αιολική ενέργεια, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ώρες κατά τις οποίες γίνεται εισαγωγή ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι 00:00-08:00. Η επιλογή αυτή γίνεται γιατί στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπάρχει χαμηλή ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από τους καταναλωτές, οπότε η απορρόφηση ενέργειας για τη φόρτιση των συσσωρευτών δεν επιβαρύνει σημαντικά τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής ενέργειας. Έτσι, η προμήθεια της εισαγόμενης ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί με χαμηλό κόστος. Η διαστασιολόγηση και η οικονομική αξιολόγηση του συστήματος υλοποιούνται με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και μελετώνται τρεις διαφορετικοί μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Η πρώτη χρησιμοποιείται για το αυτόνομο σύστημα και έχει στόχο τη βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Περιλαμβάνει το αρχικό κεφάλαιο που πρέπει να επενδυθεί, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του χρήματος, το κόστος συντήρησης των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα και τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη χρησιμοποιείται για το μη-αυτόνομο σύστημα. Περιλαμβάνει το αρχικό κεφάλαιο που πρέπει να επενδυθεί, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του χρήματος, το κόστος συντήρησης των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα, τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η τρίτη χρησιμοποιείται για το μη αυτόνομο σύστημα και έχει στόχο την ελαχιστοποίηση του λόγου της ετήσιας προμηθευόμενης προς την ετήσια παραγόμενη ενέργεια.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές.



Σχήμα 1.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές

Το σύστημα αποτελείται από έναν DC-δίαυλο (DC-Bus) πάνω στον οποίο συνδέονται οι συσσωρευτές και οι μετατροπείς ισχύος. Σημειώνεται ότι είναι δυνατόν να συνδεθούν πολλές συστοιχίες συσσωρευτών σε σειρά και παράλληλα καθώς και πολλοί μετατροπείς ισχύος παράλληλα. Με n_{bs} συμβολίζεται ο αριθμός των συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά για τη δημιουργία μιας συστοιχίας συσσωρευτών. Με N_3 συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των συστοιχιών που συνδέονται παράλληλα και υπολογίζεται από το γενετικό αλγόριθμο που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Με V_{op} συμβολίζεται η ονομαστική DC τάση λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος. Με V_{bn} συμβολίζεται η ονομαστική τάση του κάθε συσσωρευτή. Με N_1 συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος και υπολογίζεται σύμφωνα με την τιμή του N_2 , το οποίο είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς που παράγει το σύστημα. Με I_{BS} συμβολίζεται το ρεύμα φόρτισης του κάθε κλάδου των

συσσωρευτών. Σημειώνεται ότι κατά την εκφόρτιση οι φορές των ρευμάτων I_{BS} αντιστρέφονται και η ροή ισχύος είναι από την DC πλευρά προς την AC.

Στο αντλιοσταμειωτικό σύστημα το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι το μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης το οποίο εξαρτάται κυρίως από το κόστος για την κατασκευή των ταμειωτήρων νερού, την ονομαστική ισχύ των υδροστροβίλων και τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ανάγκη για μεγάλα έργα καθώς και οι αλλαγές που θα προκαλέσουν αυτά στην μορφολογία του περιβάλλοντα χώρου (κατασκευή φράγματος για την δημιουργία της άνω δεξαμενής κ.α.). Επίσης τα αντλιοσταμειωτικά συστήματα δεν μπορούν να εγκατασταθούν παντού. Χρειάζεται κατάλληλη μορφολογία του εδάφους για να είναι δυνατή η κατασκευή των δεξαμενών και κατάλληλες ποσότητες νερού. Σε μικρά νησιά (π.χ. Κυκλάδες) υπάρχουν αιολικά πάρκα αλλά δεν υπάρχουν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή αντλιοσταμειωτικών, οπότε η μόνη λύση είναι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προκύπτει από την κατασκευή αντλιοσταμειωτικών συστημάτων είναι η δυνατότητα αντικατάστασης των επιβλαβών για το περιβάλλον θερμικών μονάδων παραγωγής ενέργειας.

Στα αντίστοιχα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές δεν απαιτείται σημαντική επέμβαση στη μορφολογία του περιβάλλοντος και δεν υπάρχει ανάγκη για κατασκευαστικά έργα μεγάλης κλίμακας (εκτός από την κτηριακή εγκατάσταση στην οποία θα βρίσκεται το σύστημα). Η μορφολογία του περιβάλλοντος χώρου δεν αλλάζει σημαντικά και η κατασκευή και εγκατάσταση του συστήματος δεν είναι χρονοβόρες διαδικασίες. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι μηδαμινές και η αντικατάσταση μέρους των μονάδων παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν πετρέλαιο ή αέριο κάνει την κατασκευή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές ακόμα πιο ελκυστική. Επιπλέον, σύμφωνα με τους κατασκευαστές συσσωρευτών, σχεδόν όλα τα συστατικά των συσσωρευτών είναι ανακυκλώσιμα. Αναλυτικά οικονομικά οφέλη και το κόστος της παραγόμενης ενέργειας παρουσιάζονται σε επόμενες παραγράφους.

Για την κατασκευή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές χρειάζεται μελέτη για την σωστή διαστασιολόγηση του συνόλου των συσσωρευτών και για την επιλογή των χαρακτηριστικών των μετατροπέων ισχύος. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης εξαρτάται από τον πλήθος και την τεχνολογία των συσσωρευτών καθώς και από το πλήθος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος. Τα κόστη συντήρησης είναι σχεδόν αμελητέα λόγω της φύσης των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το σύστημα. Υπάρχουν καινούριες τεχνολογίες συσσωρευτών που χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση κατά την διάρκεια ζωής τους. Το ίδιο συμβαίνει και με τους σύγχρονους μετατροπείς ισχύος. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές είναι η μικρή διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα. Αυτό το χαρακτηριστικό οφείλεται στην μικρή διάρκεια ζωής των συσσωρευτών η οποία κυμαίνεται από 7 έως 20 χρόνια. Η περιορισμένη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών προκαλεί την αύξηση τους κόστους της εγκατάστασης καθώς είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του συνόλου των συσσωρευτών με καινούριους. Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές, καθώς και η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την διαστασιολόγηση και την οικονομική αξιολόγηση.

2 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

2.1 Δομικά υλικά στοιχείων και συσσωρευτές

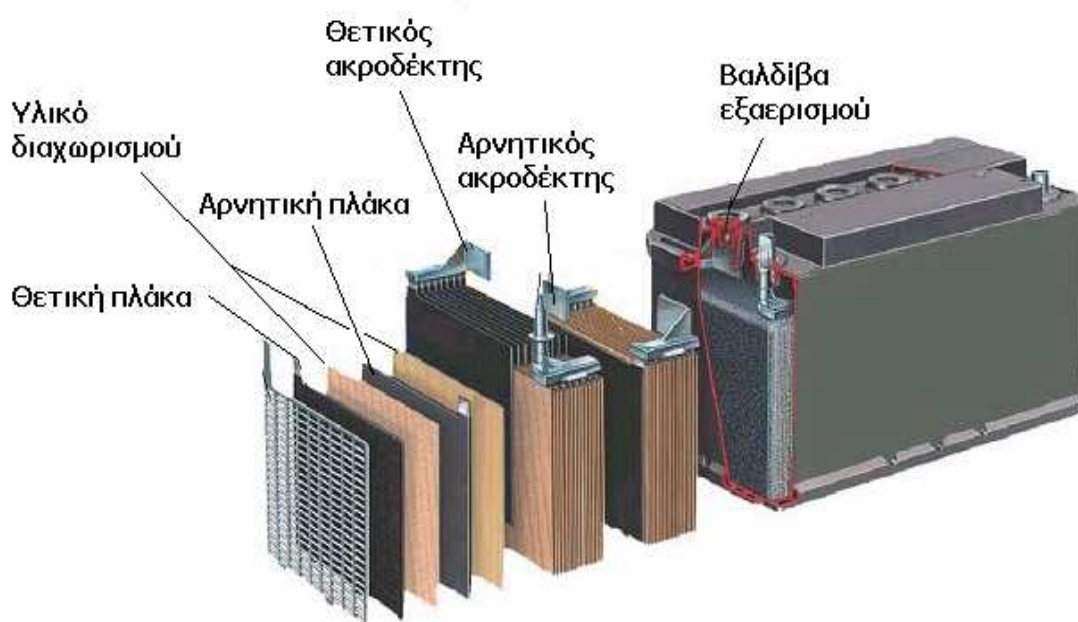
Ο συσσωρευτής είναι μια διάταξη που μετατρέπει την χημική ενέργεια που περιέχεται στα ενεργά της υλικά σε ηλεκτρική [3]. Η μετατροπή γίνεται μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδωσης-αναγωγής. Αυτού του τύπου η αντίδραση περιλαμβάνει την μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Αν και ο όρος συσσωρευτής χρησιμοποιείται συχνά, η βασική ηλεκτροχημική μονάδα είναι το στοιχείο. Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα και ο τρόπος σύνδεσής τους εξαρτάται από την επιθυμητή τάση εξόδου και την χωρητικότητα της συστοιχίας. Το στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

1. Την άνοδο, η οποία δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά την διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
2. Την κάθοδο, η οποία δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά την διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
3. Τον ηλεκτρολύτη (ιονικός αγωγός) ο οποίος αποτελεί το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως κάποιο διάλυμα που συμβάλλει στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης.

Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδος επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω: καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και μικρό κόστος. Συνήθως τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή ανόδων είναι τα μέταλλα. Η κάθοδος πρέπει να είναι ένας καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά χημικά με τον ηλεκτρολύτη. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καθόδων είναι τα οξειδία μετάλλων. Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιονική αγωγιμότητα. Η άνοδος και η κάθοδος είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μέσα στο στοιχείο για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Στις κατασκευές των στοιχείων χρησιμοποιείται ένα υλικό διαχωρισμού για να

διαχωρίσει τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Το υλικό διαχωρισμού είναι διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη έτσι ώστε να διατηρηθεί η ιονική αγωγιμότητα του στοιχείου. Κατάλληλα υλικά μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για την μείωση της εσωτερικής τους αντίστασης.

Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε πολλά σχήματα: κυλινδρικό, επίπεδο ή πρισματικό. Τα στοιχεία σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη. Μερικά στοιχεία διαθέτουν βαλβίδες για να επιτρέπουν την διαφυγή των αερίων που παράγονται κατά τη λειτουργία τους. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η δομή ενός συσσωρευτή όπου διακρίνονται τα δομικά χαρακτηριστικά που έχουν περιγραφεί παραπάνω.



Σχήμα 2.1 Η δομή ενός συσσωρευτή

2.2 Λειτουργία του στοιχείου

2.2.1 Εκφόρτιση

Όταν το στοιχείο συνδέεται με ένα εξωτερικό φορτίο τότε ρέουν ηλεκτρόνια από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται, μέσω του εξωτερικού φορτίου προς την κάθοδο της οποίας το υλικό μειώνεται. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται

στον ηλεκτρολύτη με την ροή ανιόντων (αρνητικά ιόντα) και κατιόντων (θετικά ιόντα) στην άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα.

2.2.2 Φόρτιση

Κατά την φόρτιση του στοιχείου, η ροή του ρεύματος αντιστρέφεται, η οξειδωση γίνεται στο θετικό ηλεκτρόδιο και η μείωση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Εξ' ορισμού η άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο οποίο συμβαίνει η οξειδωση και η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο στο οποίο συμβαίνει η αναγωγή. Κατά τη φόρτιση το θετικό ηλεκτρόδιο είναι η άνοδος και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι η κάθοδος.

2.3 Κατηγοριοποίηση στοιχείων και συσσωρευτών

2.3.1 Πρωτεύοντα στοιχεία ή συσσωρευτές

Τα πρωτεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) δεν γίνεται να επαναφορτιστούν, γι' αυτό εκφορτίζονται μια φορά και στη συνέχεια αποσύρονται. Ο πρωτεύων συσσωρευτής είναι μια ικανοποιητική και συνήθως φθηνή πηγή ενέργειας. Τα γενικά πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη ζωή τους όταν βρίσκονται αποθηκευμένοι, η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για μικρούς ή μεσαίους ρυθμούς εκφόρτισης, η μικρή έως καθόλου ανάγκη για συντήρηση και η ευκολία χρήσης. Διάφορες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμός, φωτογραφικός εξοπλισμός, παιχνίδια κ.α. Οι πιο συνηθισμένοι πρωτεύοντες συσσωρευτές έχουν κυλινδρικό ή επίπεδο σχήμα.

2.3.2 Δευτερεύοντα ή επαναφορτιζόμενα στοιχεία

Τα δευτερεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά μετά την εκφόρτιση, μέχρι να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση πριν την εκφόρτιση. Αυτό γίνεται με την εφαρμογή ρεύματος με αντίθετη φορά από αυτήν του ρεύματος εκφόρτισης. Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής εκφορτίζεται μόνο όταν είναι απαραίτητο και φορτίζεται από μια πηγή τάσης ή ρεύματος. Τέτοιες εφαρμογές είναι τα συστήματα αεροπλάνων, συστήματα έκτακτης ανάγκης και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.
2. Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή ενέργειας και επαναφορτίζεται μετά χρήση αντί να αποσύρεται. Τέτοιες εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν τις φορητές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, ηλεκτρικά οχήματα και γενικά εφαρμογές τις οποίες δεν μπορούν να καλύψουν οι πρωτεύοντες συσσωρευτές.

Οι δευτερεύοντες συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Μερικοί συσσωρευτές οι οποίοι είναι γνωστοί και ως μηχανικά επαναφορτιζόμενοι, φορτίζονται με την αντικατάσταση ενός από τα ηλεκτρόδια, συνήθως της μεταλλικής ανόδου.

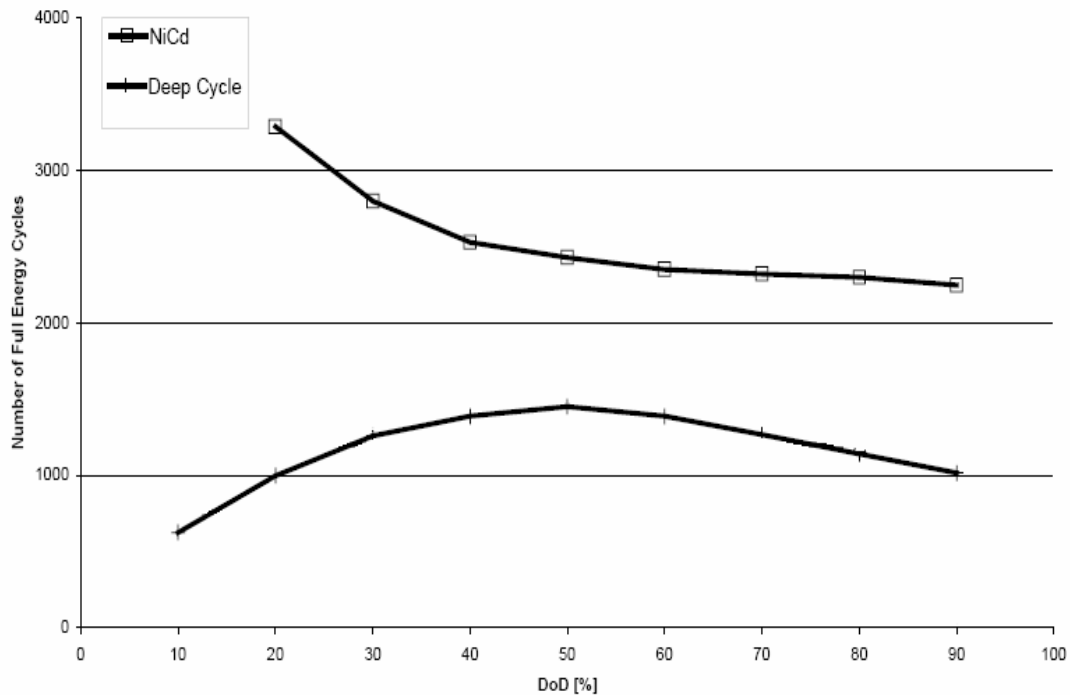
2.3.3 Εφεδρικοί συσσωρευτές

Στους συγκεκριμένους συσσωρευτές ένα συστατικό στοιχείο έχει αφαιρεθεί πριν την ενεργοποίησή τους. Σ' αυτήν την κατάσταση η αυτό-εκφόρτιση εξαλείφεται και ο συσσωρευτής είναι δυνατόν να αποθηκευτεί για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συνήθως το στοιχείο που αφαιρείται και απομονώνεται είναι ο ηλεκτρολύτης. Σε άλλα συστήματα, όπως είναι ο θερμικός συσσωρευτής, η ενεργοποίηση γίνεται όταν ο συσσωρευτής θερμανθεί λιώνοντας έναν στέρεο ηλεκτρολύτη. Ο εφεδρικός συσσωρευτής είναι σχεδιασμένος για να αντέχει σε συνθήκες αποθήκευσης που δεν είναι δυνατόν να αντέξουν οι ενεργοί συσσωρευτές. Μερικές τυπικές εφαρμογές είναι οι πύραυλοι, οι τορπίλες και άλλα οπλικά συστήματα στα οποία απαιτείται πολύ υψηλή κατανάλωση ενέργειας μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα.

2.4 Υπολογισμός χρόνου ζωής

Ο όρος βάθος εκφόρτισης (DoD) περιγράφει το επίπεδο εκφόρτισης ενός συσσωρευτή, εκφρασμένο σε ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας. Η ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα συσσωρευτή κατά την

διάρκεια της ζωής του είναι σχεδόν σταθερή και ανεξάρτητη από το βάθος εκφόρτισης για τιμές DoD 20%-80% [4]. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η αναπαράσταση των κύκλων πλήρους ενέργειας για διάφορα μοντέλα συσσωρευτών. Ένας κύκλος πλήρους ενέργειας είναι ένας κύκλος πλήρους φόρτισης/εκφόρτισης. Αντίστοιχα ένας κύκλος μερικής ενέργειας είναι ένας κύκλος μερικής φόρτισης/εκφόρτισης.



Σχήμα 2.2 Κύκλοι πλήρους ενέργειας για διάφορους τύπους συσσωρευτών

Έτσι τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από ένα συσσωρευτή κατά την διάρκεια της ζωής του υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή των κύκλων πλήρους ενέργειας με την ονομαστική χωρητικότητα, ή σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Ah_{\text{BatteryLife}} = C_{\text{nom}} \cdot \frac{80\%}{\sum_{i=20\%}} DoD(i) \cdot NoCycles(i) \quad (2.1)$$

όπου $Ah_{\text{BatteryLife}}$ είναι τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από το συσσωρευτή, C_{nom} είναι η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή (Ah), DoD (%) είναι το εκάστοτε βάθος εκφόρτισης και

NoCycles είναι ο αριθμός των κύκλων μερικής-ενέργειας για το αντίστοιχο DoD.

2.5 Συσσωρευτές μολύβδου οξέος

2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Ο συσσωρευτής μολύβδου οξέος είναι αντικείμενο εμπορίου για περισσότερο από έναν αιώνα. Η παραγωγή και η χρήση του συνεχίζουν να αυξάνονται λόγω καινούριων εφαρμογών όπως η αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα έκτακτης ανάγκης και ηλεκτρικά οχήματα. Η ευρεία χρήση του συσσωρευτή μολύβδου οξέος, σε πολλά μεγέθη και τάσεις λειτουργίας εξηγείται λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας στην παραγωγή. Ο συσσωρευτής μολύβδου οξέος είναι σχεδόν πάντα ο πιο οικονομικός συσσωρευτής αποθήκευσης για οποιαδήποτε εφαρμογή, παρέχοντας καλή απόδοση. Η ιδιότητά του να μπορεί να χρησιμοποιεί πάνω από το 75% της αποθηκευμένης ενέργειας του, τον κάνει πολύ ελκυστικό για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η δομή του συσσωρευτή μολύβδου οξέος που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία [5].



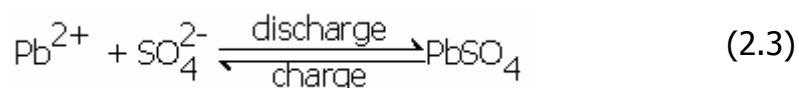
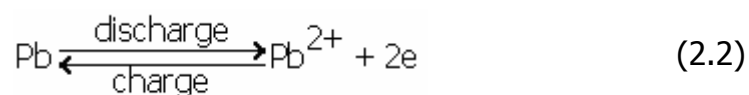
Σχήμα 2.3 Δομή ενός συσσωρευτή μολύβδου οξέος

Οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος ουσιαστικά γεννήθηκαν με την έρευνα και τις εφευρέσεις του Raymond Gaston Plante το 1860, παρόλο που συσσωρευτές οι οποίοι περιείχαν θειικό οξύ και συστατικά μολύβδου είχαν εμφανιστεί αρκετά νωρίτερα. Στην μέθοδο κατασκευής του Plante, δύο λωρίδες από έλασμα μολύβδου με ενδιάμεσα σπειροειδή τυλίγματα χοντρού υφάσματος βυθίζονταν σε ένα διάλυμα που περιείχε περίπου 10% θειικό οξύ. Τα στοιχεία του Plante είχαν μικρή χωρητικότητα, αφού η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτώταν από την διάβρωση ενός από τα ελάσματα μολύβδου σε διοξείδιο του μολύβδου για την δημιουργία του θετικού ενεργού υλικού και παρομοίως το αρνητικό ηλεκτρόδιο σχηματιζόταν από την σκλήρυνση του άλλου ελάσματος.

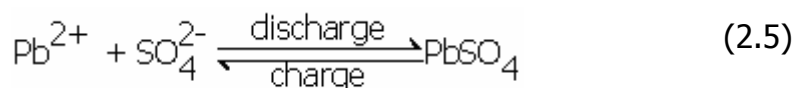
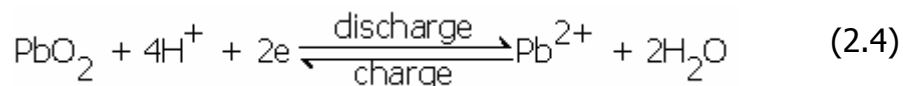
2.5.2 Χημεία

Ο συσσωρευτής μολύβδου οξέος χρησιμοποιεί το διοξείδιο του μολύβδου ως ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου και μολύβδο σε μια μεγάλης επιφάνειας πορώδη κατασκευή ως το αρνητικό ενεργό υλικό. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα διάλυμα θειικού οξέος. Κατά την εκφόρτιση και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μολύβδο. Κατά την φόρτιση η διαδικασία αντιστρέφεται. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα δύο ηλεκτρόδια είναι:

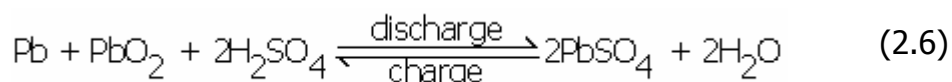
Αρνητικό ηλεκτρόδιο:



Θετικό ηλεκτρόδιο:

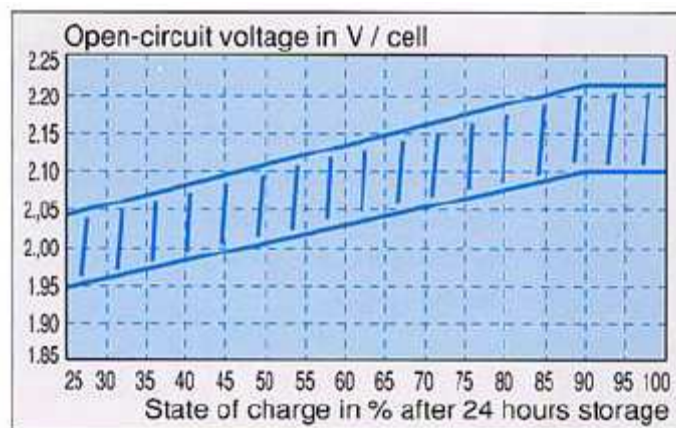


Ολοκληρωμένη αντίδραση:



2.5.3 Τάση

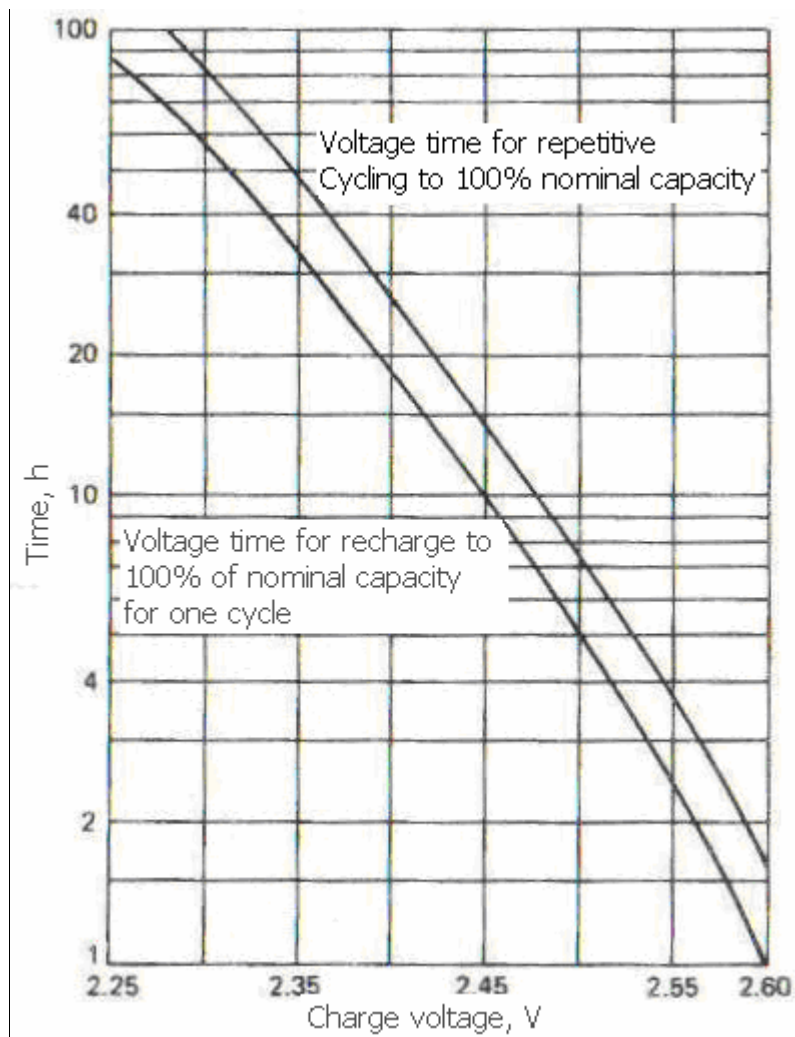
Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου μολύβδου οξέος είναι 2 Volt. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης έχει άμεση σχέση με την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και κυμαίνεται από 2.05 Volt, έως 2.125 Volt. Η τελική τάση αποκοπής για μεσαίου ρυθμού εκφορτίσεις είναι 1.75 Volt ανά στοιχείο αλλά μπορεί να φτάσει μέχρι 1 Volt ανά στοιχείο σε περιπτώσεις πολύ υψηλού ρυθμού εκφόρτισης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.



Σχήμα 2.4 Τάση ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης

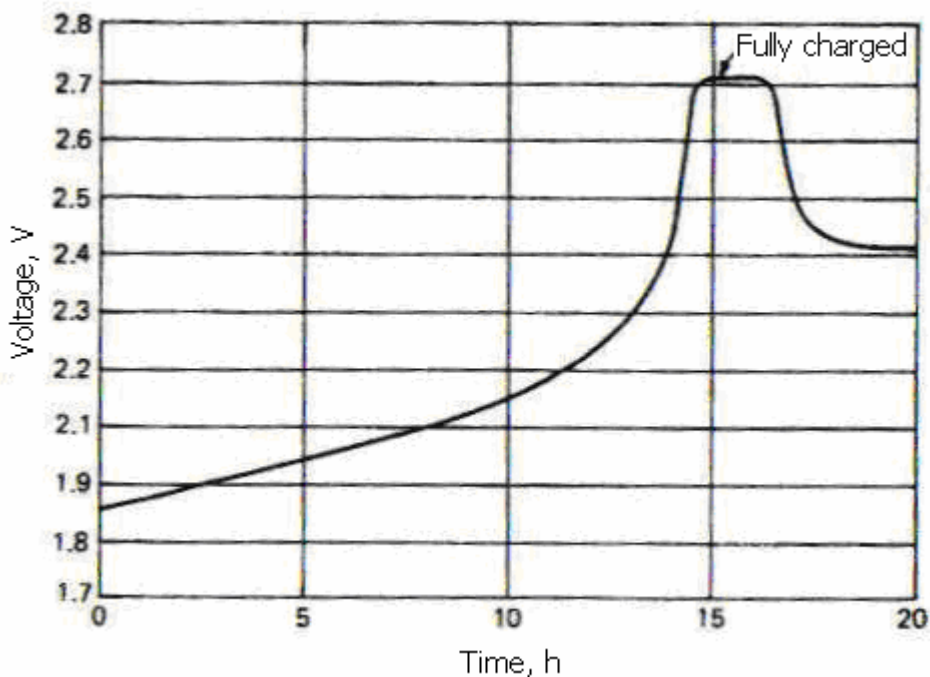
2.5.4 Μέθοδοι φόρτισης

Η μέθοδος φόρτισης με σταθερή τάση είναι η πιο αποτελεσματική και γρήγορη μέθοδος φόρτισης για ένα συσσωρευτή μολύβδου-οξέος κλειστού τύπου. Στη συγκεκριμένη μέθοδο εφαρμόζεται στον συσσωρευτή μια σταθερή τάση με τιμή που κυμαίνεται από 2.15 έως 2.45 Volt για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (10-16 ώρες) Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται οι χρόνοι επαναφόρτισης για διάφορες τιμές σταθερής τάσης φόρτισης που αφορούν ένα στοιχείο το οποίο έχει εκφορτιστεί κατά 100%.



Σχήμα 2.5 Τάση φόρτισης σε σχέση με το χρόνο στους 25°C

Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα είναι άλλη μια αποτελεσματική μέθοδος φόρτισης για συσσωρευτές μολύβδου-οξέος κλειστού τύπου. Η φόρτιση επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας στο συσσωρευτή μια σταθερή πηγή ρεύματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ειδικά αποτελεσματική στην περίπτωση που πρόκειται να φορτιστούν πολλοί συσσωρευτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Αυτό συμβαίνει γιατί η μέθοδος φόρτισης με σταθερό ρεύμα, φορτίζει όλους τους συσσωρευτές εξίσου επειδή είναι ανεξάρτητη από την τάση φόρτισης του κάθε ξεχωριστού στοιχείου του συσσωρευτή. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της τάσης του στοιχείου σε σχέση με το χρόνο φόρτισης για την μέθοδο της φόρτισης με σταθερό ρεύμα. Το στοιχείο είχε προηγουμένως εκφορτιστεί κατά 100%.



Σχήμα 2.6 Τάση στοιχείου σε σχέση με το χρόνο φόρτισης για φόρτιση με σταθερό ρεύμα

2.6 Συσσωρευτές νικελίου καδμίου

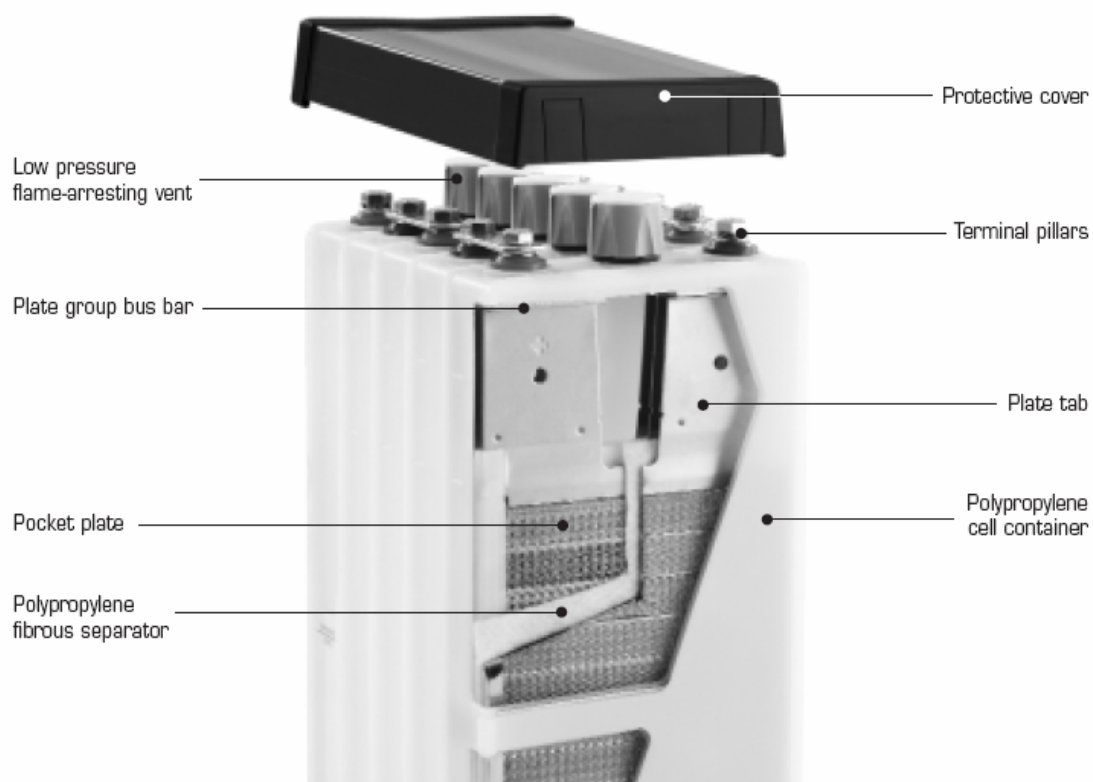
2.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Το 1899, ο Waldemar Jungner δημιούργησε τον πρώτο συσσωρευτή νικελίου-καδμίου, χρησιμοποιώντας οξείδιο του νικελίου στην κάθοδο και σίδηρο και κάδμιο στην άνοδο. Εκείνη την περίοδο, ο μόνος άμεσος ανταγωνιστής ήταν ο συσσωρευτής μολύβδου-οξέος. Με ελάχιστες βελτιώσεις στα πρώτα πρωτότυπα, η ενεργειακή πυκνότητα αυξήθηκε γρήγορα σε σχέση με αυτή των πρωτευόντων συσσωρευτών και σημαντικά περισσότερο από τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος.

Οι συσσωρευτές νικελίου καδμίου κλειστού τύπου ενσωματώνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό των στοιχείων με σκοπό να εμποδίσουν την δημιουργία πίεσης στο εσωτερικό του στοιχείου που προκύπτει από τα αέρια που εμφανίζονται κατά την υπερφόρτιση. Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω:

- Λειτουργία χωρίς συντήρηση: Τα στοιχεία είναι σφραγισμένα, δεν περιέχουν ελεύθερο ηλεκτρολύτη και δεν χρειάζονται επισκευές ή συντήρηση πέρα από την φόρτιση.
- Φόρτιση υψηλού ρυθμού: Τα στοιχεία νικελίου καδμίου κλειστού τύπου μπορούν να φορτιστούν με υψηλούς ρυθμούς φόρτισης.
- Εκφόρτιση υψηλού ρυθμού: Η χαμηλή εσωτερική αντίσταση και η σταθερή τάση εκφόρτισης κάνουν το συσσωρευτή νικελίου καδμίου ιδανικό για εφαρμογές με υψηλό ρυθμό εκφόρτισης.
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασίας: Τα στοιχεία νικελίου καδμίου κλειστού τύπου μπορούν να λειτουργήσουν μέσα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών από περίπου -40 έως 50° C και ξεχωρίζουν για την απόδοσή τους σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής: Πάνω από 500 κύκλοι εκφόρτισης ή μέχρι 5-7 χρόνια εφεδρείας ενέργειας είναι τυπικές τιμές για τα στοιχεία νικελίου καδμίου κλειστού τύπου.

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η δομή ενός συσσωρευτή νικελίου καδμίου [6].

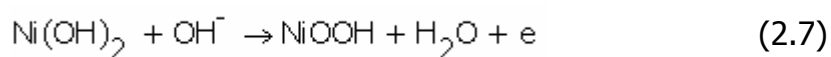


Σχήμα 2.7 Η δομή ενός συσσωρευτή νικελίου καδμίου

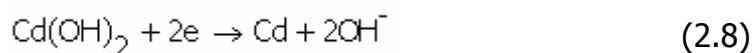
2.6.2 Χημεία

Στην φορτισμένη κατάσταση τα ενεργά συστατικά είναι το κάδμιο για το αρνητικό ηλεκτρόδιο, οξυ-υδροξείδιο του νικελίου για το θετικό ηλεκτρόδιο και ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου για τον ηλεκτρολύτη. Στην εκφορτισμένη κατάσταση, το υδροξείδιο του νικελίου είναι το ενεργό υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και το υδροξείδιο του καδμίου είναι το ενεργό υλικό για το αρνητικό ηλεκτρόδιο.

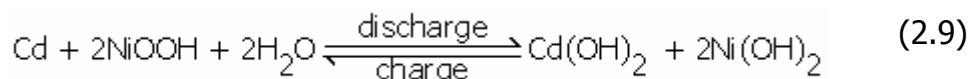
Κατά την φόρτιση το υδροξείδιο του νικελίου $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$, μετατρέπεται σε οξείδιο υψηλότερου σθένους:



Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο το υδροξείδιο του καδμίου $[\text{Cd}(\text{OH})_2]$, ανάγεται σε κάδμιο:



Η ολοκληρωμένη αντίδραση είναι:



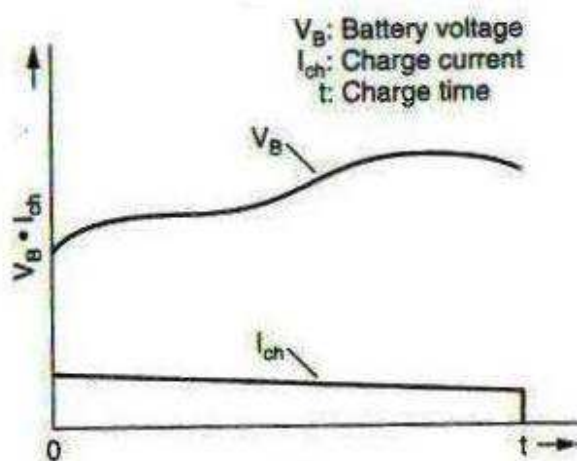
2.6.3 Τάση

Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου νικελίου-καδμίου είναι 1.2 Volt. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης κυμαίνεται από 1.25 έως 1.35 Volt.

2.6.4 Μέθοδοι φόρτισης

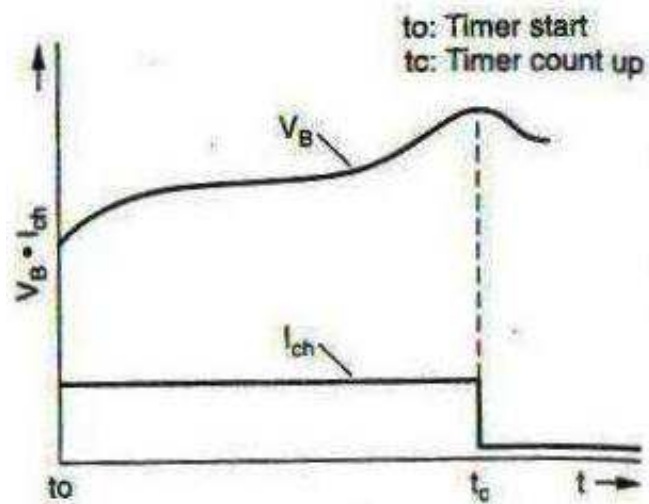
Η πιο απλή μέθοδος φόρτισης βασίζεται στη χρήση ενός σχετικά φτηνού και απλού κυκλώματος για τον έλεγχο του ρεύματος φόρτισης παρεμβάλλοντας μια αντίσταση ανάμεσα στην DC πηγή και τον συσσωρευτή. Ο συσσωρευτής φορτίζεται με σχετικά σταθερό ρεύμα μικρής τιμής έτσι ώστε ο ρυθμός παραγωγής οξυγόνου να παραμένει μικρότερος από τον ρυθμό ανασυνδυασμού. Η μικρή τιμή του ρεύματος φόρτισης περιορίζει επίσης και

την αύξηση της θερμοκρασίας. Η υπερφόρτιση με αυτή τη μέθοδο πρέπει να αποφεύγεται. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο αργός ρυθμός φόρτισης. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα του ρεύματος φόρτισης καθώς και η τάση του συσσωρευτή σε σχέση με το χρόνο φόρτισης.



Σχήμα 2.8 Το ρεύμα φόρτισης και η τάση συσσωρευτή σε σχέση με το χρόνο φόρτισης

Η μέθοδος φόρτισης με χρονομέτρηση εφαρμόζεται για μεσαίους ρυθμούς φόρτισης. Ένας χρονομετρητής χρησιμοποιείται για να αποκόψει το ρεύμα φόρτισης στο τέλος προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος. Η μέθοδος ενδύκνεται για εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής έχει εκφορτιστεί πλήρως πριν την έναρξη της φόρτισης. Δεν ενδύκνεται για εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής φορτίζεται συχνά χωρίς να έχει προηγηθεί πλήρης εκφόρτιση, καθώς αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει φαινόμενα υπερφόρτισης. Ένα θερμικό κύκλωμα ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σταματήσει τη φόρτιση όταν η θερμοκρασία του συσσωρευτή φτάσει σε υψηλά επίπεδα για πρόσθετη προστασία από την υπερφόρτιση. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα του ρεύματος φόρτισης και η τάση του συσσωρευτή σε σχέση με το χρόνο φόρτισης.



Σχήμα 2.9 Το ρεύμα φόρτισης και η τάση του συσσωρευτή σε σχέση με το χρόνο φόρτισης

Άλλη μια μέθοδος φόρτισης είναι αυτή στην οποία εφαρμόζεται στο συσσωρευτή μια σταθερή τάση με τιμή που κυμαίνεται από 1.45 έως 1.5 Volt για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC

3.1 Μετατροπείς DC-AC διακοπτικού τύπου.

Οι μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς) διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούνται σε AC κινητήρια συστήματα και σε AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας, όπου αντικειμενικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος όσο και την συχνότητά της [7].

Οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Σε αυτούς που η είσοδός τους είναι μια DC πηγή τάσης (αντιστροφείς πηγής τάσης, voltage source inverters) και σε αντιστροφείς πηγής ρεύματος (current source inverters), όπου η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια DC πηγή ρεύματος. Σήμερα οι CSI χρησιμοποιούνται μόνο σε AC κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος.

Επίσης οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε:

- i. μονοφασικούς αντιστροφείς ημιγέφυρας,
- ii. μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας και
- iii. τριφασικούς αντιστροφείς ημιγέφυρας.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

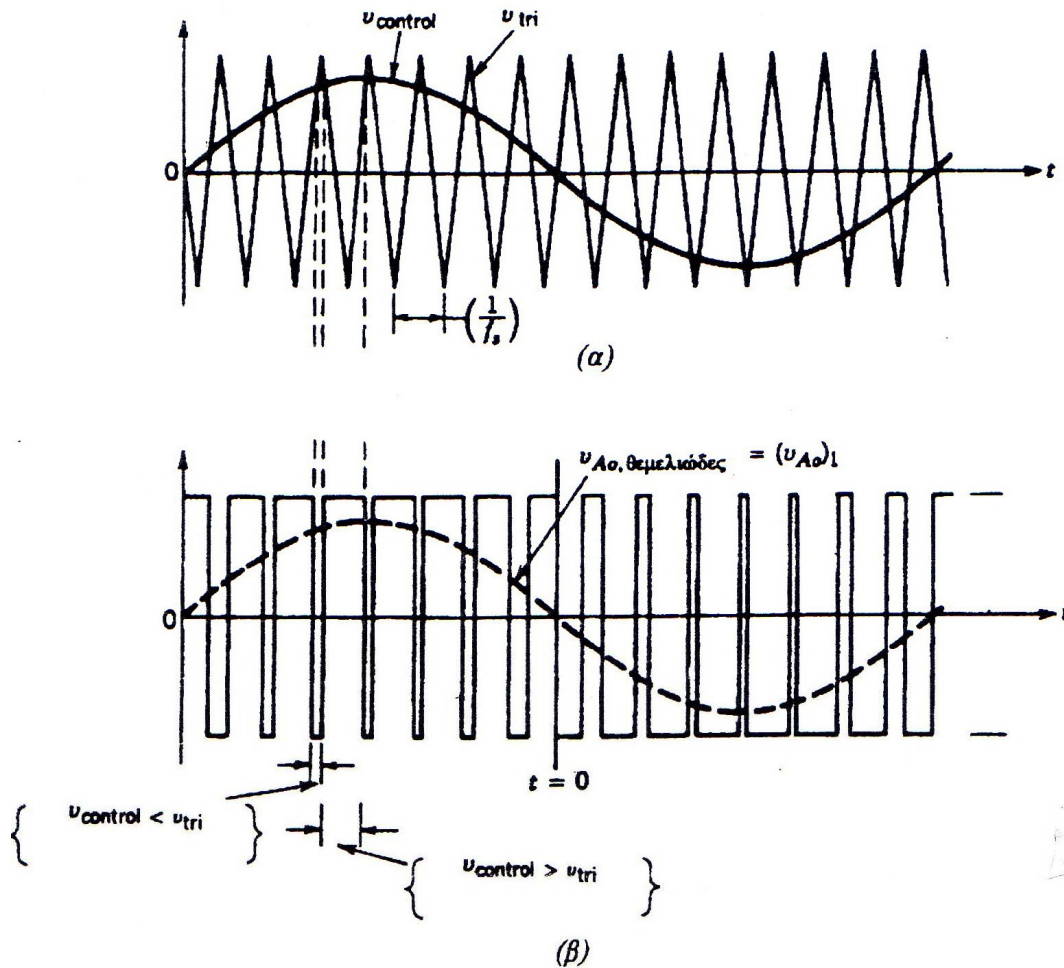
1. Αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών. Στους αντιστροφείς αυτούς η DC τάση εισόδου έχει σταθερό πλάτος. Επομένως ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγχει το πλάτος και την συχνότητα της AC τάσης εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαμόρφωση του εύρους των παλμών της εξόδου του αντιστροφέα και έτσι τέτοιοι αντιστροφείς ονομάζονται αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse width modulation, PWM). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης PWM με σκοπό την επίτευξη AC τάσεων που να πλησιάζουν την ημιτονοειδή μορφή.
2. Αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή. Στους αντιστροφείς αυτούς για τον έλεγχο του πλάτους της AC τάσης εξόδου ελέγχεται το

πλάτος της DC τάσης εισόδου. Έτσι ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει μόνο την συχνότητα της τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή παρόμοια με τετραγωνική και γι'αυτό το λόγο οι αντιστροφείς αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή.

3. Μονοφασικοί αντιστροφείς με απαλοιφή τάσης. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Επομένως, οι μονοφασικοί αντιστροφείς με απαλοιφή τάσης συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων αντιστροφέων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική της απαλοιφής τάσης (voltage cancellation technique) λειτουργεί μόνο στους μονοφασικούς και όχι στους τριφασικούς αντιστροφείς.

3.1.1 Στρατηγική διαμόρφωσης εύρους παλμών

Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου στην επιθυμητή συχνότητα με μια τριγωνική κυματομορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(α). Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται σταθερή, όπως και το πλάτος της \hat{V}_{tri} . Η συχνότητα f_s της τριγωνικής κυματομορφής u_{tri} που φαίνεται στο Σχήμα 3.1(β) καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency). Ακόμα ονομάζεται και φέρουσα συχνότητα (carrier frequency). Το σήμα ελέγχου $u_{control}$ χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει μια συχνότητα, f_1 , η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα δεν θα είναι μια τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει αρμονικές της f_1 .



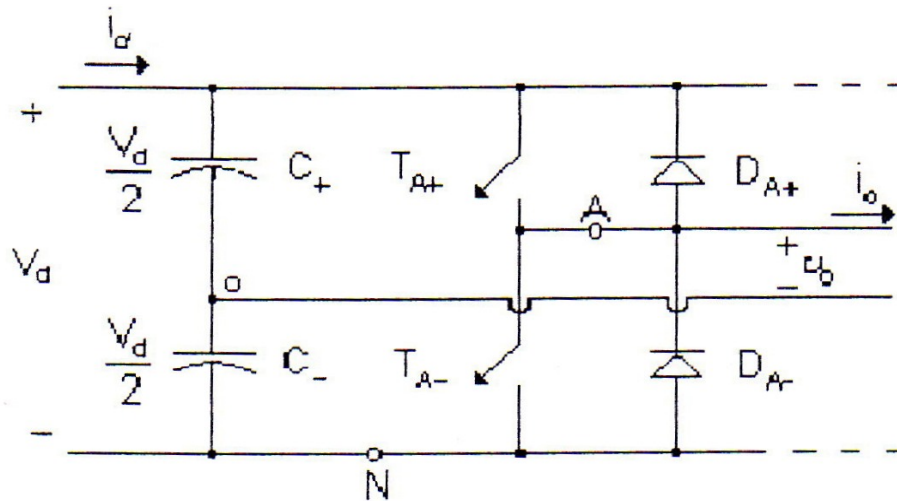
Σχήμα 3.1 Η διαμόρφωση εύρους παλμών

Σε έναν αντιστροφέα με ένα σκέλος, όπως αυτός που φαίνεται στο Σχήμα 3.2, οι διακόπτες T_{A+} και T_{A-} ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των $u_{control}$ και u_{tri} και προκύπτει η ακόλουθη τάση εξόδου, ανεξάρτητα από την φορά του ρεύματος εξόδου i_o :

$$u_{control} > u_{tri} , T_{A+} \text{ είναι on} , u_{Ao} = 1/2V_d \tag{3.1}$$

$$u_{control} < u_{tri} , T_{A-} \text{ είναι on} , u_{Ao} = -1/2V_d \tag{3.2}$$

Εφόσον οι διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ανοιχτοί, η τάση εξόδου U_{Ao} κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών ($V_d/2$ και $-V_d/2$).



Σχήμα 3.2 Αντιστροφείας ημιγέφυρας

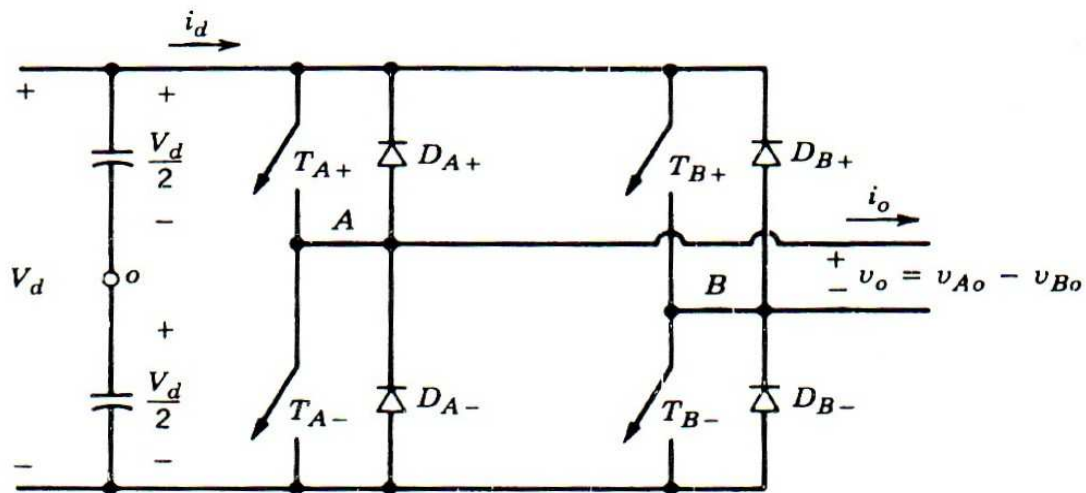
3.1.2 Μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα του αντιστροφέα ημιγέφυρας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, στα άκρα της DC εισόδου συνδέονται σε σειρά δύο πυκνωτές. Το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών βρίσκεται στο μισό δυναμικό, οπότε στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται τάση ίση με $V_d/2$. Οι χωρητικότητες που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλες, ώστε το δυναμικό στο σημείο 'ο' να παραμένει σταθερό σε σχέση με το δυναμικό του αγωγού N.

3.1.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς με πλήρη γέφυρα

Ένας αντιστροφείας με πλήρη γέφυρα αποτελείται από δύο αντιστροφείς ενός σκέλους και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Προτιμάται σε σχέση με άλλες διατάξεις σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος. Με την ίδια DC τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι διπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει πως για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών έχουν την μισή τιμή από εκείνα του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό

είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα καθώς απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.

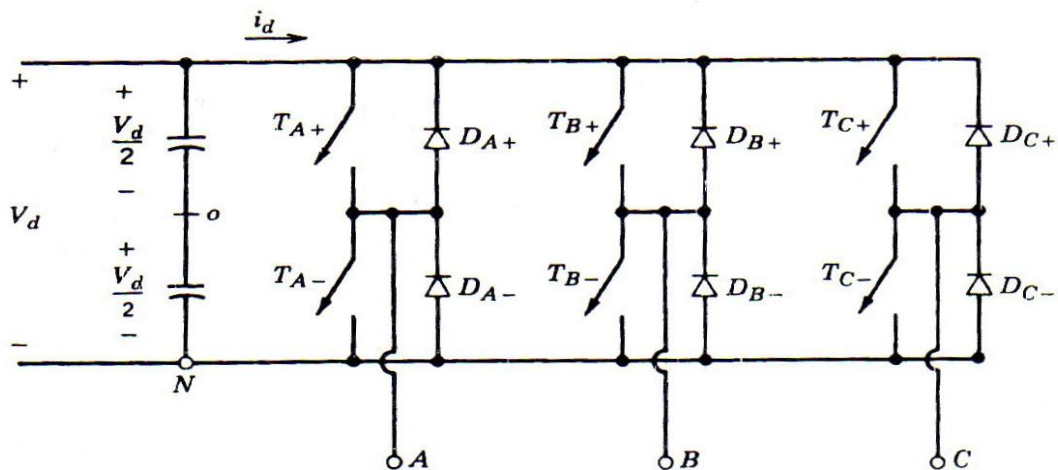


Σχήμα 3.3 Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα

3.1.4 Τριφασικοί αντιστροφέες

Σε τριφασικές εφαρμογές, όπως τα AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας και τα AC κινητήρια συστήματα, χρησιμοποιούνται συνήθως τριφασικοί αντιστροφέες. Είναι δυνατή η τροφοδοσία ενός τριφασικού φορτίου μέσω τριών ξεχωριστών μονοφασικών αντιστροφέων, όπου ο κάθε αντιστροφέας παράγει μια έξοδο (στη θεμελιώδη συχνότητα) μετατοπισμένη κατά 120° σε σχέση με τις άλλες. Παρά το ότι αυτή η διάταξη μπορεί να είναι προτιμότερη κάτω από ορισμένες συνθήκες, απαιτεί είτε έναν τριφασικό μετασχηματιστή εξόδου ή ξεχωριστή πρόσβαση σε καθεμία από τις τρεις φάσεις του φορτίου. Στην πράξη, μια τέτοια πρόσβαση δεν είναι, γενικά, δυνατή. Επιπλέον, απαιτεί δώδεκα διακόπτες. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα αποτελείται από τρία σκέλη, ένα για κάθε φάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Το καθένα από τα σκέλη του αντιστροφέα είναι όμοιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή βασικού αντιστροφέα ενός σκέλους στην ενότητα 3.1.1. Η έξοδος του κάθε σκέλους, για παράδειγμα η τάση v_{AN} (σε αναφορά με τον αγωγό που φέρει την αρνητική DC τάση) εξαρτάται μόνο από την V_d και την κατάσταση των διακοπών. Η τάση εξόδου

είναι ανεξάρτητη του ρεύματος εξόδου, εφόσον σε κάθε χρονική στιγμή ένας από τους διακόπτες σε κάθε σκέλος είναι κλειστός. Εδώ με την υπόθεση ιδανικών διακοπών, αγνοείται ο κενός χρόνος που απαιτείται στα πρακτικά κυκλώματα. Επομένως, η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι ανεξάρτητη της φοράς του ρεύματος του φορτίου.



Σχήμα 3.4 Τριφασικός αντιστροφέας

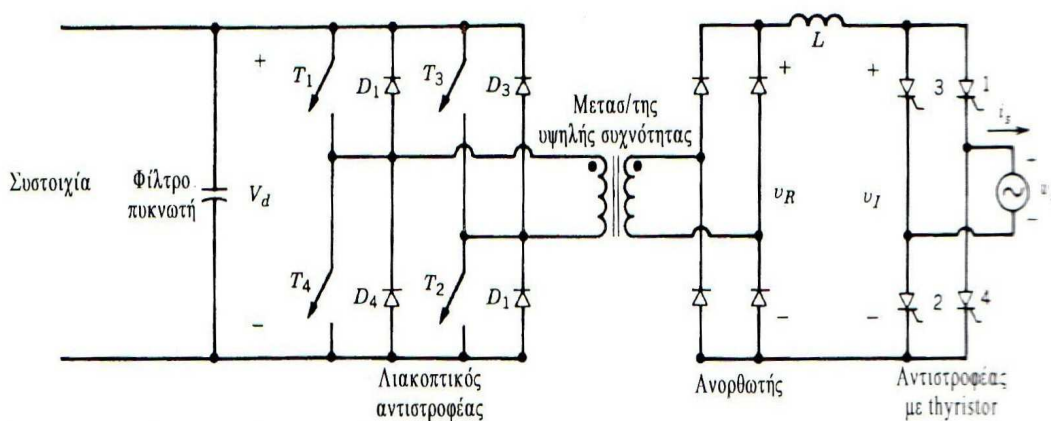
3.2 Διασύνδεση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο

Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν fuel cells και οι συσσωρευτές είναι κάποια από τα μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των φορτίων αιχμής των συμβατικών μονάδων παραγωγής ενέργειας. Για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του φορτίου πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες γεννήτριες παραγωγής ενέργειας, που ονομάζονται μονάδες ζήτησης αιχμής, οι οποίες έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος λόγω του καυσίμου που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία τους. Εναλλακτικά, μπορούμε να αποθηκεύσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όταν επικρατούν συνθήκες χαμηλής ζήτησης, περιορίζοντας την ανάγκη για μονάδες ζήτησης αιχμής. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές παράγουν συνεχή τάση οπότε για τη διασύνδεσή τους με το

ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μονοφασικό ή τριφασικό σχήμα όπως περιγράφεται παρακάτω.

3.2.1 Μονοφασική διασύνδεση

Το κυκλωματικό διάγραμμα της διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας δίνεται στο Σχήμα 3.5. Η DC τάση εισόδου μετατρέπεται σε AC για να τροφοδοτηθεί με υψηλή συχνότητα το πρωτεύον του μετασχηματιστή. Η τάση στο δευτερεύον ανορθώνεται και η παραγόμενη DC τάση διασυνδέεται με την τάση γραμμής μέσω ενός μετατροπέα DC/AC.



Σχήμα 3.5 Διασύνδεση υψηλής συχνότητας

3.2.2 Τριφασική διασύνδεση

Σε επίπεδα ισχύος πάνω από μερικά kW είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται τριφασική διασύνδεση. Ημιτονοειδή ρεύματα με σχεδόν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος μπορούν ληφθούν με τη χρήση ενός αντιστροφέα DC/AC διακοπτικού τύπου με έλεγχο ρεύματος. Επίσης χρειάζεται και ένας τριφασικός μετασχηματιστής των 50 ή 60Hz (ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρικού δικτύου) για να παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική απομόνωση.

4 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1 Ιστορική αναδρομή

Στις δεκαετίες του '50 και του '60 διάφοροι επιστήμονες υπολογιστών μελέτησαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο εξελικτικά συστήματα με τη σκέψη ότι η εξέλιξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε τεχνολογικά προβλήματα [8]. Η ιδέα πίσω από τα συστήματα αυτά ήταν η ανάπτυξη ενός πληθυσμού από υποψήφια λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα χρησιμοποιώντας πράξεις εμπνεόμενες από την φυσική γενετική μεταβολή και τη φυσική επιλογή.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Ο αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να κατασκευάσει αλγόριθμους που να λύνουν συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά μάλλον να μελετήσει συστηματικά το φαινόμενο της προσαρμογής όπως λαμβάνει χώρα στη φύση και να αναπτύξει τρόπους με τους οποίους οι μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής θα μπορούσαν να εμφυτευτούν στα υπολογιστικά συστήματα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων σε ένα νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος φυσικής επιλογής μαζί με γενετικούς τελεστές μετάλλαξης και αντιστροφής. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο αλληλόμορφο. Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν. Τα χρωμοσώματα που προσαρμόζονται παράγουν περισσότερους απογόνους από τα λιγότερο προσαρμόσιμα. Η διασταύρωση ανταλλάσσει υπομέρη δύο χρωμοσωμάτων, μιμούμενη χονδρικά το βιολογικό επανασυνδυασμό μεταξύ δύο οργανισμών. Η μετάλλαξη αλλάζει τυχαία τις τιμές των αλληλόμορφων και η αντιστροφή αναστρέφει την τάξη μιας γειτνιάζουσας περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας έτσι την σειρά με την οποία τοποθετούνται τα γονίδια.

4.2 Βασικές αρχές γενετικών αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να λύσουν ένα πρόβλημα όχι με μαθηματικό αλλά με βιολογικό τρόπο, γεγονός που τους κάνει ευέλικτους [9]. Φτάνουν στην βέλτιστη λύση ανεξάρτητα από το αν οι συναρτήσεις που περιγράφουν το πρόβλημα είναι γραμμικές ή μη-γραμμικές, διακριτού ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακρότατων, υποκειμενικές σε ανισοτικούς ή μη περιορισμούς, NP ή non-NP complete.

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης, μια οποιαδήποτε υποψήφια λύση ονομάζεται χρωμόσωμα και το σύνολο των πιθανών λύσεων ονομάζεται πληθυσμός. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων. Κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει και μια μεταβλητή της συνάρτησης και μπορεί να παρασταθεί από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 ή 1). Αν για παράδειγμα έχουμε την συνάρτηση $f(x,y)$, τότε κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού, δηλαδή κάθε πιθανή λύση αυτής, θα έχει την μορφή $[x \ y]$ ή αν παρασταθεί με δυαδική μορφή $[0 \ 0 \ | \ 1 \ 0]$, όπου βλέπουμε ότι κάθε γονίδιο έχει δύο ψηφία (θα μπορούσε να έχει οσαδήποτε).

Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους ονομάζεται γενεά. Ο γενετικός αλγόριθμος με ένα σύνολο από πράξεις παράγει καινούριες γενιές με την προοπτική ότι τα καινούρια χρωμοσώματα θα είναι καλύτερα (θα δίνουν καλύτερες λύσεις) από αυτά των παλαιότερων γενεών. Λαμβάνει χώρα δηλαδή μια διαδικασία παρόμοια με την διαδικασία της επιβίωσης του ισχυρότερου.

Τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων – ευελιξία, επιλογή, μετάλλαξη και διασταύρωση – δουλεύουν μαζί για να αποφεύγουν τα τοπικά βέλτιστα και να ανακαλύπτουν το ολικό βέλτιστο. Ο γενετικός αλγόριθμος πρέπει να έχει τα παρακάτω στοιχεία:

- Γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος,
- Έναν τρόπο δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού,
- Μια συνάρτηση αξιολόγησης που παίζει τον ρόλο του περιβάλλοντος,
- Γενετικούς τελεστές που αλλάζουν την σύνθεση των απογόνων και

- Διάφορες άλλες απαραίτητες παραμέτρους όπως είναι το μέγεθος πληθυσμού, οι πιθανότητες των γενετικών πράξεων κ.α.

Τα βήματα ενός απλού γενετικού αλγορίθμου είναι:

1. Τυχαία αρχικοποίηση του πληθυσμού $P(t)$,
2. Καθορισμός της καταλληλότητας του πληθυσμού,
3. Επαναληπτική διαδικασία,
 - a. Επιλογή των γονέων από τον πληθυσμό $P(t)$,
 - b. Διασταύρωση των γονέων για την δημιουργία του πληθυσμού $P(t+1)$,
 - c. μετάλλαξη στον πληθυσμό $P(t+1)$,
 - d. καθορισμός καταλληλότητας του πληθυσμού $P(t+1)$.
4. Τερματισμός όταν η λύση είναι αρκετά καλή.

Ο γενετικός αλγόριθμος διατηρεί ένα σύνολο πιθανών λύσεων $P(t) = \{x_1^t \dots x_n^t\}$, τα χρωμοσώματα. Στην συνέχεια δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός επιλέγοντας τα περισσότερο κατάλληλα άτομα. Κάποια από τα άτομα αυτά υπόκεινται σε διαφοροποιήσεις διαμέσου των τελεστών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης για την δημιουργία νέων πιθανών λύσεων. Κατά την διασταύρωση συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά δύο χρωμοσωμάτων με την ανταλλαγή γονιδίων. Στην μετάλλαξη έχουμε αλλαγή σε ένα ή περισσότερα γονίδια και έτσι προστίθενται κάποιες επιπλέον λύσεις στον πληθυσμό. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, διατηρώντας ένα πλήθος πιθανών λύσεων, έχουν την δυνατότητα για αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε πολλές κατευθύνσεις και ευνοούν την δημιουργία και ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε αυτές.

4.3 Κωδικοποίηση των μεταβλητών

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης που βελτιστοποιούνται αποτελεί μια πολύ κρίσιμη απόφαση κατά την μοντελοποίηση ενός προβλήματος με γενετικούς αλγορίθμους. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι η χρήση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων. Αν οι μεταβλητές

του προβλήματος παίρνουν τιμές μέσα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τότε θα χρειαστούν πολλά bits κωδικοποίησης. Όταν αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων) τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται θα έχουν πολύ μεγάλο μήκος και ο χώρος αναζήτησης μέσα στον οποίο πρέπει να αναζητηθεί η λύση θα γίνει τεράστιος. Ένα άλλο πρόβλημα εμφανίζεται όταν έχουμε μεταβλητές που είναι πραγματικοί αριθμοί λόγω της δυσκολίας της αναπαράστασης πραγματικών αριθμών με ακολουθίες δυαδικών ψηφίων. Τα παραπάνω αποτελούν τα μειονεκτήματα που έχει η κωδικοποίηση με ακολουθίες δυαδικών ψηφίων.

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αναπαράσταση με floating point. Σε μια τέτοια αναπαράσταση το χρωμοσώμα έχει την μορφή $[a_1 a_2 a_3 \dots a_n]$, όπου τα a_i είναι πραγματικοί αριθμοί και τιμές τους είναι μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος $[\underline{a}_i , \bar{a}_i]$. Το \underline{a}_i είναι το κάτω φράγμα και το \bar{a}_i είναι το άνω φράγμα αυτού του εύρους. Ενώ οι τελεστές της επιλογής και της διασταύρωσης δεν αλλάζουν, ο τελεστής της μετάλλαξης πρέπει να υποστεί κάποια τροποποίηση. Έτσι λοιπόν όταν ένα γονίδιο επιλεγεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

4.4 Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής

Ως αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και την οποία επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Αυτή μπορεί να εκφράζει ανάλογα με το πρόβλημα οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κ.τ.λ. Επίσης μπορεί να παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές. Συνάρτηση προσαρμογής ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η συνάρτηση εκείνη που προέρχεται από την αντικειμενική συνάρτηση μέσω κάποιας αντιστοιχίας – μετατροπής – και η οποία χρησιμοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο για την πράξη της επιλογής. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ενώ η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να παίρνει και θετικές και αρνητικές τιμές, η συνάρτηση προσαρμογής πρέπει να παίρνει μόνο θετικές τιμές.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις προβλημάτων. Τα προβλήματα μεγιστοποίησης και τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Εάν έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση $g(X)$ όπου X το διάνυσμα των μεταβλητών, για να λύσουμε το πρόβλημα με γενετικό αλγόριθμο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση $f(X) = -g(X)$, οπότε αυτόματα το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης μετατρέπεται σε πρόβλημα μεγιστοποίησης. Σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης, για να μετατρέψουμε την αντικειμενική συνάρτηση $g(X)$ σε συνάρτηση προσαρμογής έτσι ώστε να μην παίρνει αρνητικές τιμές κάνουμε την εξής μετατροπή:

$$f(x) = \begin{cases} C_{\min} + g(x), & \text{αν } C_{\min} + g(x) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.1)$$

Η ποσότητα C_{\min} μπορεί να είναι μια παράμετρος εισόδου ή η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της $g(x)$ για την τρέχουσα γενεά. Μετατροπή πρέπει να γίνει και στην περίπτωση που έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης έτσι ώστε η συνάρτηση προσαρμογής να μην παίρνει αρνητικές τιμές:

$$f(x) = \begin{cases} C_{\max} - g(x), & \text{αν } C_{\max} - g(x) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.2)$$

Το C_{\max} και εδώ μπορεί να είναι παράμετρος εισόδου αλλά πιο σωστό είναι να επιλέγεται ως η μέγιστη τιμή της $g(x)$ για κάθε γενεά.

4.5 Μηχανισμός επιλογής

Ο μηχανισμός της επιλογής αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό σημείο ενός γενετικού αλγορίθμου. Μετά την επιλογή προκύπτει ένα σύνολο ατόμων, τα οποία θα συμμετάσχουν στις πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης για να δώσουν έναν νέο πληθυσμό. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις σημαντικότερες μεθόδους επιλογής που χρησιμοποιούνται:

- Elitist selection: τα καταλληλότερα άτομα είναι βέβαιο ότι θα επιλεγούν.
- Fitness-proportionate selection: τα καταλληλότερα άτομα είναι πιθανότερο άλλα όχι βέβαιο ότι θα επιλεγούν.

- **Scaling selection:** καθώς η καταλληλότητα του πληθυσμού βελτιώνεται, αυξάνεται και η δύναμη της διαδικασίας επιλογής και γίνεται περισσότερο αυστηρή. Αυτή η μέθοδος βοηθά στο να γίνει η επιλογή του καλύτερου αργότερα, όταν τα άτομα θα έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.
- **Tournament selection:** επιλέγονται υποσύνολα του πληθυσμού και τα άτομα του κάθε υποσυνόλου συγκρίνονται μεταξύ τους. Μόνο ένα άτομο από κάθε υποσύνολο επιλέγεται για αναπαραγωγή.
- **Rank selection:** κάθε άτομο κατατάσσεται σε σειρά ανάλογη της καταλληλότητας του και η επιλογή βασίζεται περισσότερο σε αυτήν την κατάταξη παρά στην διαφορά καταλληλότητας. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως μπορεί να εμποδίσει τα πολύ κατάλληλα άτομα να κυριαρχήσουν νωρίς σε βάρος των άλλων, γεγονός που θα μειώσει την ποικιλότητα του πληθυσμού και θα δυσκολέψει την εύρεση της λύσης.
- **Generational selection:** οι απόγονοι των ατόμων από κάθε γενεά αποτελούν ολοκληρωτικά την επόμενη χωρίς να γίνεται διατήρηση των ατόμων από γενεά σε γενεά.
- **Steady-state selection:** οι απόγονοι των ατόμων που επιλέγονται τοποθετούνται στον υπάρχοντα πληθυσμό, αντικαθιστώντας κάποια από τα λιγότερο κατάλληλα άτομα.
- **Hierarchical selection:** τα άτομα περνούν από πολλές διαδικασίες επιλογής σε κάθε γενεά. Οι αρχικές αξιολογήσεις δεν είναι πολύ αυστηρές αλλά γρήγορες ενώ οι επόμενες είναι περισσότερο αυστηρές. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως τελικά έχουμε μικρότερο χρόνο υπολογισμού.

Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής που ονομάζεται μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας. Αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση προσαρμογής f_i για όλα τα χρωμοσώματα μιας γενεάς. Η πιθανότητα επιλογής p_i για κάθε χρωμόσωμα υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (4.3)$$

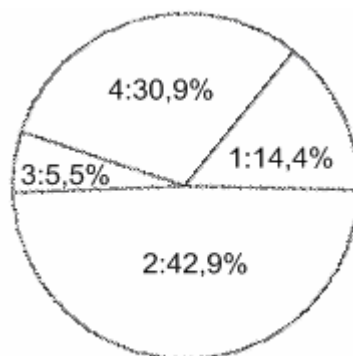
όπου N είναι το πλήθος των χρωμοσωμάτων ανά γενεά. Αφού έχουν υπολογιστεί οι πιθανότητες p_i ακολουθεί η τυχαία γέννηση αριθμών για N φορές μέσα στο διάστημα $[0,1]$. Ένα χρωμόσωμα επιλέγεται εάν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος από την πιθανότητα του χρωμοσώματος αυτού και μεγαλύτερη από την αμέσως μικρότερη πιθανότητα χρωμοσώματος. Ο αναμενόμενος αριθμός ενός χρωμοσώματος δίνεται από την σχέση:

$$n_i = \frac{f_i}{\bar{f}} = N \cdot p_i \quad (4.4)$$

όπου \bar{f} είναι η μέση τιμή της συνάρτησης προσαρμογής. Για να γίνει πιο σαφής ο μηχανισμός αυτός ακολουθεί ένα παράδειγμα. Έστω η συνάρτηση προσαρμογής μιας μεταβλητής $f(x)=x^2$ και έστω ότι έχουμε τα εξής τέσσερα χρωμοσώματα: [13], [24], [8], και [19] ($N = 4$). Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές της συνάρτησης, οι πιθανότητες επιλογής των χρωμοσωμάτων, ο αναμενόμενος αριθμός επιλογής κάθε χρωμοσώματος και ο πραγματικός αριθμός επιλογής όπως προέκυψε από τις γεννήσεις τεσσάρων τυχαίων αριθμών.

Πίνακας 4.1 Επιλογή τροχού ρουλέτας				
x	$f(x)=x^2$	p_i	n_i	$n_{i,actual}$
13	169	0.14	0.58	1
24	576	0.49	1.97	2
8	64	0.06	0.22	0
19	361	0.31	1.23	1
Sum	1170	1	4	4
Average	293	0.25	1	1
Max	576	0.49	1.97	2

Όπως βλέπουμε το χρωμόσωμα [24] επιλέγεται 2 φορές, το [13] και 1 φορά και το [8] καμία φορά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πολύ κοντά στα αναμενόμενα τα οποία βρίσκονται στην τέταρτη στήλη του πίνακα. Το Σχήμα 4.1 δείχνει την κατανομή των πιθανοτήτων p_i .



Σχήμα 4.1 Κατανομή των πιθανοτήτων p_i

Επειδή η γέννηση ενός τυχαίου αριθμού για την επιλογή ενός χρωμοσώματος μοιάζει με τη ρίψη της μπίλιας στη ρουλέτα, η μέθοδος αυτή ονομάστηκε μέθοδος του τροχού της ρουλέτας. Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στη ρουλέτα τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να επιλεγθεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενεά.

4.6 Γενετικές πράξεις

Όλος ο πληθυσμός υπόκειται σε ένα σύνολο πράξεων που οδηγούν στην διαμόρφωση των επόμενων γενεών. Οι καλές λύσεις είναι αυτές που αναπαράγονται και χρησιμοποιούνται και στην επόμενη γενεά ενώ οι υπόλοιπες δεν χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό της νέας γενεάς. Αυτό γίνεται με σκοπό τα καινούρια χρωμοσώματα να δίνουν καλύτερη βέλτιστη τιμή. Προσομοιώνεται μια διαδικασία παρόμοια με τη φυσική διαδικασία της επιβίωσης του ισχυρότερου. Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

4.6.1 Επιλογή

Ο μηχανισμός της επιλογής είναι η διαδικασία επιλογής κάποιων χρωμοσωμάτων που θα υπάρχουν και στις επόμενες γενεές. Είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία των γενετικών αλγορίθμων και έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.5.

4.6.2 Διασταύρωση

Απλή διασταύρωση (simple crossover)

Ο τελεστής διασταύρωσης λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δύο χρωμοσώματα ως εξής: έστω τα χρωμοσώματα $c_w^t = [w_1, w_2 \dots w_m]$ και $c_v^t = [v_1, v_2 \dots v_m]$. Αφού επιλεγεί το k γονίδιο τυχαία ως σημείο διασταύρωσης τα επόμενα γονίδια ανταλλάσσονται και δημιουργούνται δύο νέα χρωμοσώματα. Δηλαδή θα έχουμε $c_w^{t+1} = [w_1 \dots w_k, v_{k+1} \dots v_m]$ και $c_v^{t+1} = [v_1 \dots v_k, w_{k+1} \dots w_m]$. Εδώ έχουμε μόνο ένα σημείο διασταύρωσης, είναι όμως δυνατόν να έχουμε και περισσότερα. Η πιθανότητα διασταύρωσης p_{sc} λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου στον γενετικό αλγόριθμο. Η προεπιλεγμένη τιμή για πληθυσμό ίσο με 30 χρωμοσώματα είναι $p_{sc} = 10\%$. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα διασταυρωθούν γίνεται με την γέννηση ενός τυχαίου αριθμού r ($0 \leq r \leq 1$) για κάθε χρωμόσωμα. Αν για κάποιο χρωμόσωμα ισχύει $r \leq p_{sc}$ τότε αυτό επιλέγεται για διασταύρωση. Αν ο συνολικός αριθμός των χρωμοσωμάτων που θα επιλεγούν για διασταύρωση δεν είναι άρτιος τότε επιλέγεται ένα ακόμα χρωμόσωμα.

Απλή αριθμητική διασταύρωση (simple arithmetical crossover)

Οι απόγονοι του χρωμοσώματος $c_w^t = [w_1, w_2 \dots w_m]$ τώρα θα είναι $c_w^{t+1} = [w_1 \dots w'_k \dots w_m]$ και του $c_v^t = [v_1, v_2 \dots v_m]$ θα είναι $c_v^{t+1} = [v_1 \dots v'_k \dots v_m]$, ενώ για τα w'_k και v'_k θα ισχύει $w'_k = av_k + (1-a)w_k$ και $v'_k = aw_k + (1-a)v_k$. Το k επιλέγεται τυχαία ενώ το a επιλέγεται ως εξής:

$$a \in \begin{cases} [\max(a,b), \min(g,d)], w_k > v_k \\ [0,0], w_k = v_k \\ [\max(g,d), \min(a,b)], w_k < v_k \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} a &= (l_k^{c_v^t} - v_k) / (w_k - v_k) \\ b &= (u_k^{c_w^t} - w_k) / (v_k - w_k) \\ c &= (l_k^{c_w^t} - w_k) / (v_k - w_k) \\ d &= (u_k^{c_v^t} - v_k) / (w_k - v_k) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ο παραπάνω τρόπος εξασφαλίζει πως τα νέα χρωμοσώματα θα βρίσκονται μέσα στο επιτρεπτό πεδίο τιμών. Το εύρος τιμών του κάθε γονιδίου είναι $[l_{(k)}^{c_v^t}, u_{(k)}^{c_v^t}]$. Η πιθανότητα για την απλή αριθμητική διασταύρωση p_{sc} λαμβάνεται ίση με 10%. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένα τυχαίος αριθμός r , όπως και στην απλή διασταύρωση και αν ισχύει $p_{sc} \leq r \leq p_{sc}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει στην απλή αριθμητική διασταύρωση.

Ολική αριθμητική διασταύρωση (whole arithmetic crossover)

Ως ολική αριθμητική διασταύρωση, ορίζεται ο γραμμικός συνδυασμός δύο χρωμοσωμάτων. Έτσι οι απόγονοι των χρωμοσωμάτων που θα λάβουν μέρος στην πράξη θα είναι: $c_w^{t+1} = a c_v^t + (1-a) c_w^t$ και $c_v^{t+1} = a c_w^t + (1-a) c_v^t$. Το a είναι σταθερό και επιλέγεται από το πεδίο $a \in [0,1]$. Έτσι είναι σίγουρο πως οι απόγονοι θα βρίσκονται μέσα στο επιτρεπτό πεδίο τιμών. Η πιθανότητα για την ολική αριθμητική διασταύρωση λαμβάνεται ίση με 10%. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται τυχαία ένας αριθμός r και αν ισχύει $p_{sc} \leq r \leq p_{wac}$, τότε το χρωμόσωμα επιλέγεται για να συμμετάσχει στην πράξη της ολικής αριθμητικής διασταύρωσης.

Οι τρεις παραπάνω γενετικές πράξεις εφαρμόζονται με την σειρά που παρουσιάστηκαν. Τα χρωμοσώματα επιτρέπεται να συμμετάσχουν μόνο σε μια από τις παραπάνω πράξεις. Αυτό σημαίνει ότι εάν κάποιο χρωμόσωμα έχει επιλεγεί να συμμετάσχει στην πράξη της ολικής αριθμητικής διασταύρωσης, δεν μπορεί να λάβει μέρος σε καμία από τις υπόλοιπες δύο πράξεις. Ο δεύτερος και ο τρίτος τύπος διασταύρωσης εγγυώνται πως οι απόγονοι των χρωμοσωμάτων θα είναι σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, κάτι που δεν συμβαίνει με τον τύπο της απλής διασταύρωσης.

4.6.3 Μετάλλαξη

Η πράξη της μετάλλαξης γίνεται πάντα μετά από την πράξη της διασταύρωσης και θεωρούμε ότι μόνο ένα γονίδιο κάθε χρωμοσώματος μεταλλάσσεται.

Ομοιόμορφη μετάλλαξη (uniform mutation)

Στην ομοιόμορφη μετάλλαξη επιλέγεται τυχαία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή του γονιδίου λαμβάνεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του. Η πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης λαμβάνεται ίση με 10%. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας τυχαίος αριθμός r και αν ισχύει $r \leq p_{um}$ τότε το χρωμόσωμα επιλέγεται για να συμμετάσχει στην πράξη της ομοιόμορφης μετάλλαξης.

Boundary μετάλλαξη (boundary mutation)

Το γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και παίρνει με ίση πιθανότητα τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή από το επιτρεπτό εύρος τιμών που μπορεί να λάβει. Η πιθανότητα της boundary μετάλλαξης λαμβάνεται ίση με 3%. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας τυχαίος αριθμός r και αν ισχύει $p_{um} \leq r \leq p_{bm}$ τότε το χρωμόσωμα επιλέγεται για να συμμετάσχει στην πράξη της boundary μετάλλαξης.

Μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non uniform mutation)

Η δράση αυτής της πράξης δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου. Όπως έχει αναφερθεί, οι γενετικοί αλγόριθμοι

μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Η δυνατότητα του αλγορίθμου να εκτελεί επιτυχώς και τοπική αναζήτηση ονομάζεται *fine local tuning*. Η πράξη της μη-ομοιομορφης μετάλλαξης χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της δυνατότητας για *fine local tuning* του συστήματος. Αν σε ένα χρωμόσωμα έχει επιλεγθεί το γονίδιο g_k για μετάλλαξη τότε το νέο γονίδιο g'_k δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$g'_k = \begin{cases} g_k + \rho(\bar{g}_k - g_k) \\ g_k - \rho(g_k - \underline{g}_k) \end{cases} \quad 4.8$$

όπου $[\bar{g}_k, \underline{g}_k]$ είναι το επιτρεπτό εύρος τιμών του γονιδίου g_k και το ρ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

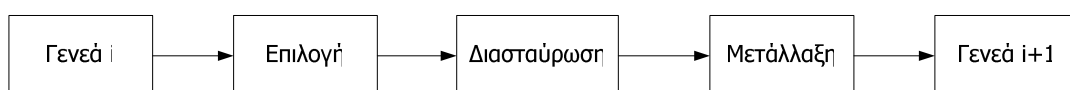
$$\rho = u \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^B \quad 4.9$$

όπου u είναι ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα $[0,1]$, t είναι ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς, T είναι ο συνολικός αριθμός γενεών και B είναι ένας συντελεστής ανομοιομορφίας που είναι σταθερός κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου και παίρνει τιμές στο διάστημα $[2,5]$. Στην συγκεκριμένη εργασία το B επιλέγεται να είναι ίσο με 3.5.

Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται αμέσως μετά τις πράξεις της διασταύρωσης με τη σειρά που παρουσιάστηκαν. Τα χρωμοσώματα που επιλέγονται για να συμμετάσχουν στις πράξεις μετάλλαξης δεν μπορούν να συμμετάσχουν σε άλλου είδους μετάλλαξη. Τέλος και οι τρεις πράξεις που αναλύθηκαν εγγυώνται ότι οι απόγονοι που θα δώσουν θα ανήκουν στο επιτρεπτό πεδίο τιμών.

4.6.4 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων (repair algorithm)

Όπως είδαμε, ο τελεστής της απλής διασταύρωσης μπορεί να δώσει χρωμοσώματα που έχουν τιμές εκτός του επιτρεπτού πεδίου τιμών. Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων χρησιμοποιείται για να εξαλείψει αυτά τα χρωμοσώματα αντικαθιστώντας τα με άλλα που δεν παραβιάζουν το σύνολο των περιορισμών. Μετά την αρχικοποίηση του γενετικού αλγορίθμου και μετά από κάθε πράξη που μπορεί να δώσει χρωμοσώματα που έχουν τιμές εκτός του επιτρεπτού πεδίου τιμών, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων. Ένα χρωμόσωμα που αποτυγχάνει στον αλγόριθμο προσομοίωσης του συστήματος, κρίνεται ακατάλληλο και αντικαθίσταται με ένα καινούριο που δεν θα έχει τιμές εκτός του επιτρεπτού πεδίου. Ο κύκλος εξέλιξης, δηλαδή η διαδοχή των γενετικών πράξεων, συνεχίζεται μέχρι ο αλγόριθμος να φτάσει σε κάποια συνθήκη τερματισμού. Η συνθήκη μπορεί να είναι το πλήθος των συνολικών εκτελέσεων του αλγορίθμου ή μια προκαθορισμένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο βασικός γενετικός αλγόριθμος για μια εφαρμογή του.



Σχήμα 4.2 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος για ένα βήμα εφαρμογής του

4.7 Σύγκλιση του αλγορίθμου

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι το κριτήριο λήξης της εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι γενετικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν την περιοχή της βέλτιστης λύσης και δεν πέφτουν στην παγίδα άλλων τοπικών μέγιστων.

Το πιο απλό κριτήριο σύγκλισης είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο πλήθος γενεών. Το ποιο είναι το κρίσιμο πλήθος γενεών πέρα

από το οποίο είμαστε σίγουροι ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει στην βέλτιστη λύση προκύπτει μετά από την εξέταση ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων.

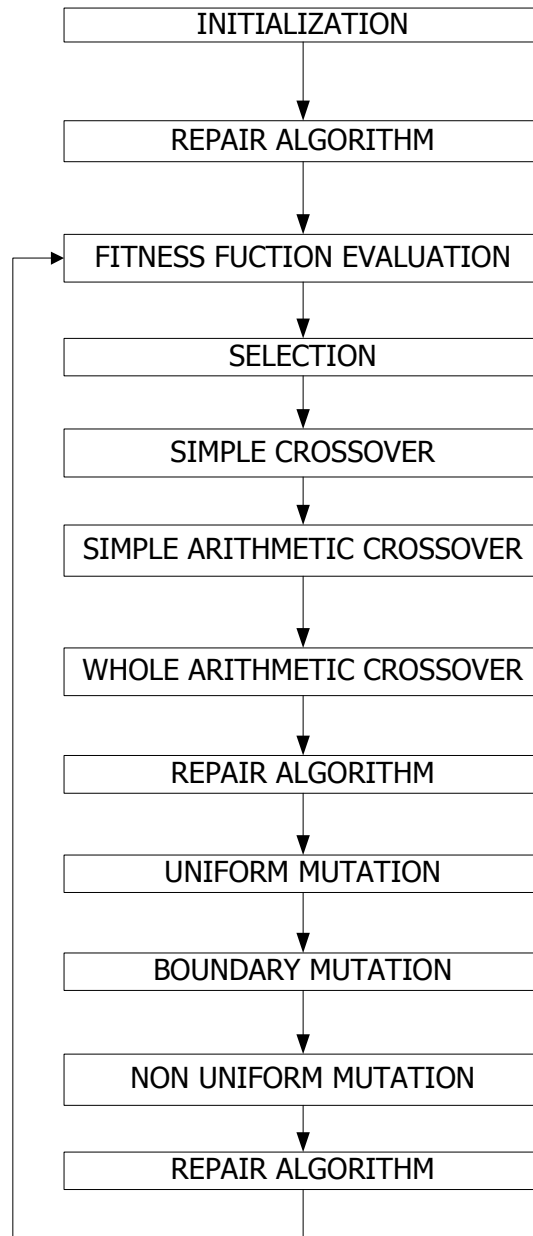
Ένα άλλο κριτήριο που χρησιμοποιείται συχνά είναι το κριτήριο σύγκλισης του πληθυσμού. Ένας πληθυσμός θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν η διαφορά της μέσης τιμής της συνάρτησης κόστους του από την βέλτιστη τιμή είναι μικρότερη από κάποιο ποσοστό βέλτιστης τιμής.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα σύνθετο κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου. Έχουμε το κριτήριο της σύγκλισης του πληθυσμού θέτοντας και ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Αν το κριτήριο σύγκλισης του πληθυσμού ικανοποιηθεί πριν την εκτέλεση του συνολικού αριθμού γενεών που έχει οριστεί τότε ο αλγόριθμος λήγει, αλλιώς εκτελείται μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι επαναλήψεις.

Τέλος πρέπει να πούμε ότι οι γενετικές πράξεις που έχουμε χρησιμοποιήσει, έχουν σχεδιαστεί ειδικά για προβλήματα που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια λύσης, που έχουν πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους και πολύπλοκους περιορισμούς. Έτσι με την εφαρμογή αυτών των πράξεων για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων είναι βέβαιο πως ο αλγόριθμος θα συγκλίνει.

4.8 Ανακεφαλαίωση

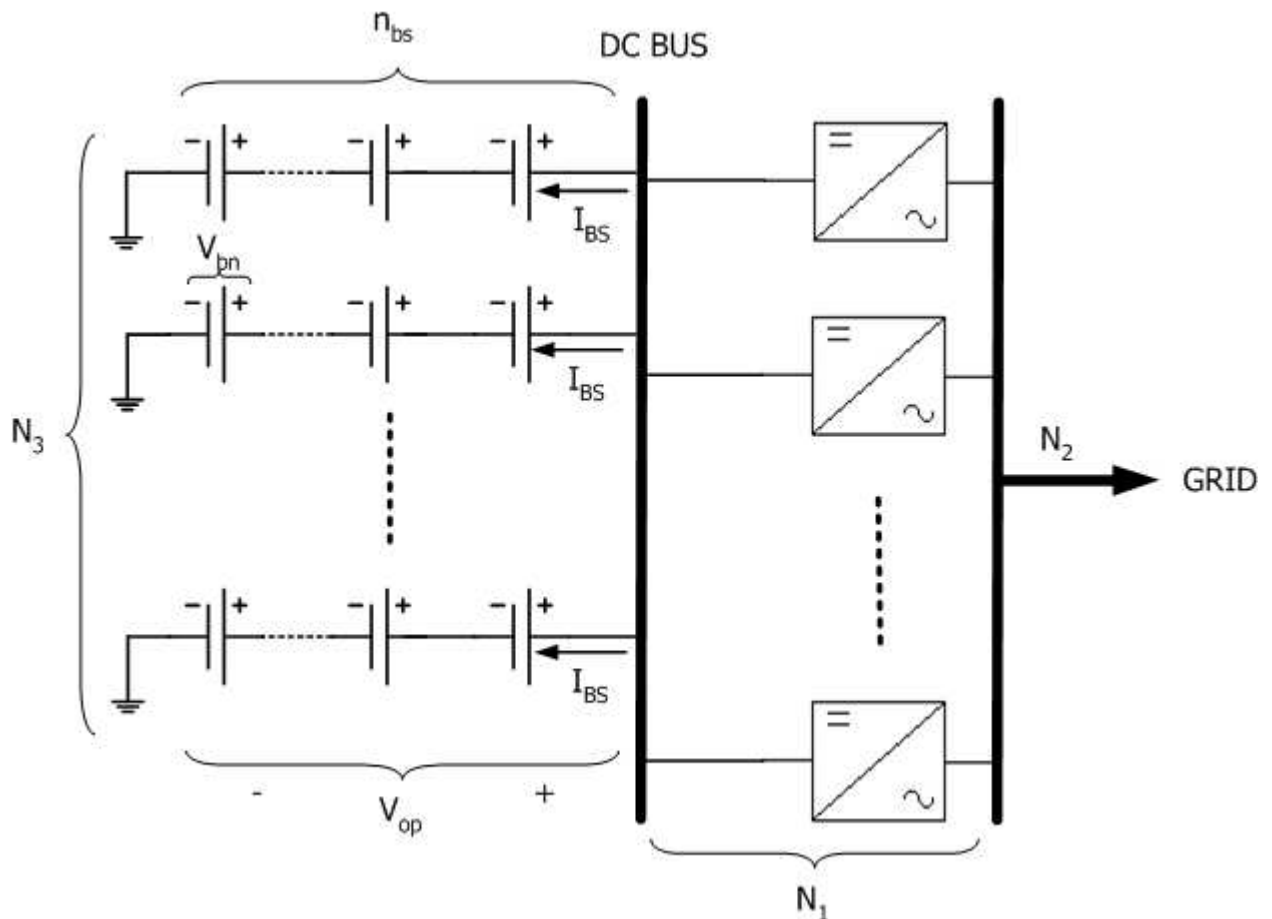
Η αρχικοποίηση του πληθυσμού μπορεί να γίνει με τυχαίο τρόπο ή όχι. Στην συνέχεια, σε κάθε γενεά αξιολογείται κάθε χρωμόσωμα. Επιλέγεται ο νέος πληθυσμός και εφαρμόζονται οι γενετικές πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Μετά από κάποιες γενεές ο αλγόριθμος τερματίζεται. Ανάμεσα στα βήματα του αλγορίθμου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης εσφαλμένων λύσεων. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η απεικόνιση των βημάτων του γενετικού αλγορίθμου.



Σχήμα 4.3 Τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου

5 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι για την βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με καθορισμένη (σταθερή) τιμή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθημερινά. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές που μελετάται στην παρούσα εργασία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές

Το σύστημα αποτελείται από έναν DC δίαυλο (DC Bus) στον οποίο συνδέονται οι συσσωρευτές και οι μετατροπείς ισχύος. Σημειώνεται ότι είναι δυνατόν να συνδεθούν πολλές συστοιχίες συσσωρευτών σε σειρά και παράλληλα καθώς και πολλοί μετατροπείς ισχύος παράλληλα. Με n_{bs} συμβολίζεται ο αριθμός των

συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά για τη δημιουργία μιας συστοιχίας συσσωρευτών. Με N_3 συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των συστοιχιών που συνδέονται παράλληλα και υπολογίζεται από το γενετικό αλγόριθμο που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Με V_{op} συμβολίζεται η ονομαστική DC τάση λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος και με V_{bn} συμβολίζεται η ονομαστική τάση του κάθε συσσωρευτή. Με N_1 συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος και υπολογίζεται σύμφωνα με το N_2 , το οποίο είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς που παράγει το σύστημα. Με I_{BS} συμβολίζεται το ρεύμα φόρτισης του κάθε κλάδου των συσσωρευτών. Σημειώνεται ότι κατά την εκφόρτιση οι φορές των ρευμάτων I_{BS} αντιστρέφονται και η ροή ισχύος είναι από την DC πλευρά προς την AC. Η διαστασιολόγηση περιλαμβάνει τον υπολογισμό:

- Του αριθμού των συσσωρευτών,
- Του αριθμού των μετατροπέων ισχύος και
- Την τιμή της εγγυημένης ισχύος που παρέχεται καθημερινά από 11:00 έως 15:00 για ολόκληρο το έτος.

Μελετώνται δύο περιπτώσεις συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι το σύστημα είναι αυτόνομο, οπότε η μόνη ενέργεια που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών προέρχεται από την ενέργεια που απορρίπτεται από το αιολικό πάρκο. Στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα προμηθεύεται ηλεκτρική ενέργεια και από το δίκτυο κατά το χρονικό διάστημα μη παραγωγής αιολικής ενέργειας με σκοπό την αύξηση της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο υπολογισμός του αριθμού των συσσωρευτών και της τιμής της εγγυημένης ισχύος γίνεται με τη βοήθεια του γενετικού αλγορίθμου. Το κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους για μια επιθυμητή χρονική περίοδο. Το οικονομικό κόστος περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς των διαφόρων στοιχείων όσο και το κόστος συντήρησής τους. Στην περίπτωση του μη-αυτόνομου συστήματος στο κόστος προστίθεται και η

αγορά της συμπληρωματικής ενέργειας από το δίκτυο. Αναλυτικότερα οι παράμετροι της συνάρτησης κόστους για το αυτόνομο σύστημα είναι οι εξής:

- Κόστος αγοράς και συντήρησης των συσσωρευτών,
- Κόστος αγοράς και συντήρησης των μετατροπέων ισχύος,
- Κόστος αγοράς και συντήρησης της μονάδας ελέγχου των μετατροπέων ισχύος και
- Τιμή πώλησης της παραγόμενης ισχύος.

Οι παράμετροι της συνάρτησης κόστους για το μη-αυτόνομο σύστημα είναι οι εξής:

- Κόστος αγοράς και συντήρησης των συσσωρευτών,
- Κόστος αγοράς και συντήρησης των μετατροπέων ισχύος,
- Κόστος αγοράς και συντήρησης της μονάδας ελέγχου των μετατροπέων ισχύος,
- Τιμή πώλησης της παραγόμενης ισχύος και
- Τιμή προμήθειας συμπληρωματικής ενέργειας από το δίκτυο.

Για την αξιολόγηση μιας λύσης υλοποιείται μια προσομοίωση διάρκειας ενός έτους σε ωριαία βάση. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, των μετατροπέων ισχύος, την τιμή της ημερήσιας εγγυημένης ισχύος, την απορριπτόμενη ισχύ από τις ανεμογεννήτριες και την απαίτηση του φορτίου.

5.1 Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος προσομοιώνει την λειτουργία του συστήματος όσον αφορά την ισχύ που απορρίπτεται από τις ανεμογεννήτριες, την ισχύ που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές και την ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο. Το βήμα του αλγορίθμου είναι μια ώρα και η

προσομοίωση γίνεται για την διάρκεια ενός έτους. Ο αλγόριθμος αυτός ενσωματώνεται έπειτα στο γενετικό αλγόριθμο.

Πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος εισάγονται ως δεδομένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, των μετατροπέων ισχύος, το αρχείο με την απαίτηση του φορτίου για διάρκεια ενός έτους και το αρχείο της απορριπτόμενης ισχύος των ανεμογεννητριών για διάρκεια ενός έτους. Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή όλων των εισόδων:

1. Όλα τα είδη των συσσωρευτών μαζί με τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ανάλογα με τον συσσωρευτή που έχει επιλεγεί για την διαδικασία της διαστασιολόγησης, διαβάζονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι: ένας αύξων αριθμός που λειτουργεί ως ταυτότητα του συσσωρευτή, το όνομα του μοντέλου, η χωρητικότητα (Ah), η ονομαστική τάση (Volt), η εσωτερική αντίσταση (mOhm), αν ο κατασκευαστής δεν δίνει στοιχεία για την εσωτερική αντίσταση τότε η τιμή που θέτουμε στο αντίστοιχο πεδίο είναι -1, ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή, το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή, το κόστος αγοράς του συσσωρευτή (€), το κόστος συντήρησης του συσσωρευτή (€), ένας δείκτης που δηλώνει αν ο συσσωρευτής είναι μολύβδου οξέος (δείκτης = 1) ή νικελίου καδμίου (δείκτης = 0), το throughput του συσσωρευτή το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή και την εξίσωση (2.1) και είναι το σύνολο των αμπερωρίων που μπορεί να παρέχει και να παραλάβει ο συσσωρευτής μέχρι να λήξει η διάρκεια ζωής του και τέλος, η μέγιστη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή που δίνεται από τον κατασκευαστή. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το αρχείο με τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών.

File	Edit	Format	View	Help							
1	SB12/185A	185	12	3.5	0.8	0.8	280	4.2	1	228870	7
2	SLM48/6	48	7.2	-1	0.8	0.8	81	1.2	0	262330	10

Ln 1, Col 1

Σχήμα 5.2 Το αρχείο με τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών

2. Τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος διαβάζονται επίσης από ξεχωριστό αρχείο. Αυτά είναι: ένας αύξων αριθμός που λειτουργεί ως ταυτότητα του κάθε μετατροπέα ισχύος, το όνομα του εκάστοτε μοντέλου, ο βαθμός απόδοσης, η ονομαστική ισχύς (kVA), ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (MTBF) σε ώρες, το κόστος αγοράς (€), το κόστος συντήρησης (€), η τάση λειτουργίας (Volt), το κόστος αγοράς της μονάδας ελέγχου (€) και τέλος το κόστος επισκευής του εκάστοτε μετατροπέα ισχύος (€). Σημειώνεται ότι το κόστος επισκευής λαμβάνεται ίσο με 1% επί της τιμής αγοράς του εκάστοτε μετατροπέα ισχύος ενώ το κόστος συντήρησης λαμβάνεται ίσο με 1.5%. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται το αρχείο με τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος.

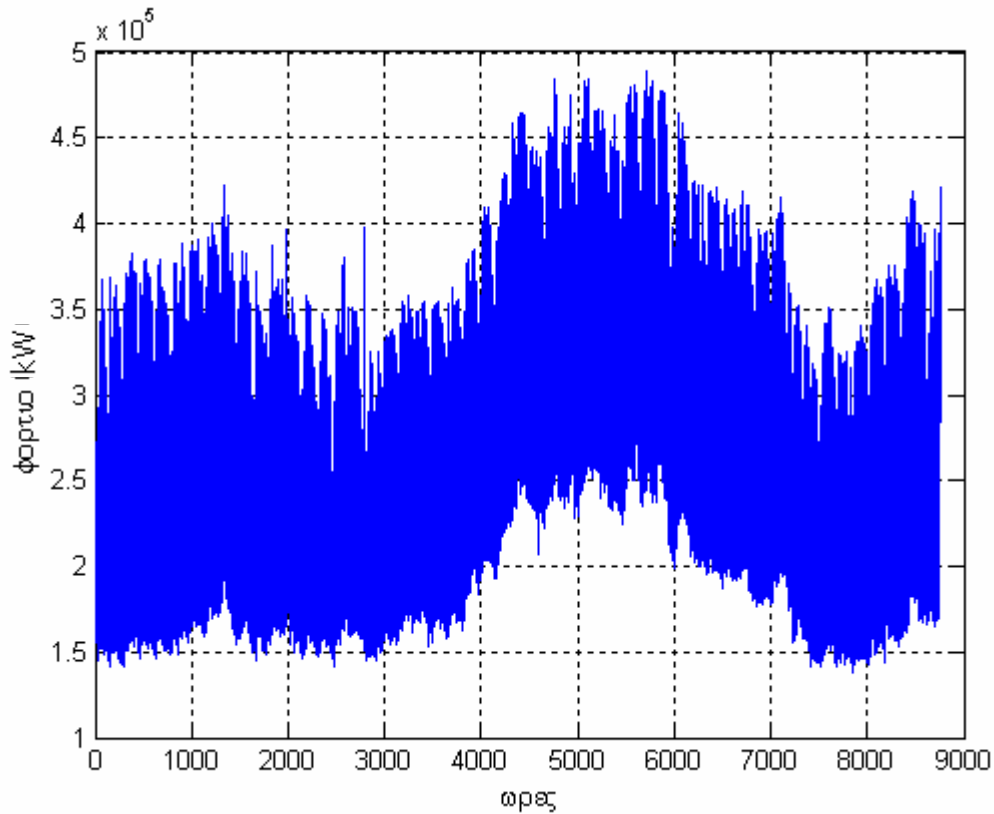
File	Edit	Format	View	Help					
1	3kVA-conv	0.88	3	87600	469.5	7.04	48	50	4.695
2	Ppower30	0.89	30	87600	4695	70.425	240	50	46.95
3	Everest	0.94	100	87600	15650	234.75	360	50	156.5

Ln 1, Col 1

Σχήμα 5.3 Το αρχείο με τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος

3. Η απαίτηση του φορτίου διαβάζεται από ξεχωριστό αρχείο και οι τιμές δίνονται σε ωριαία βάση για όλο τον χρόνο. Διαβάζονται δηλαδή 8760 τιμές. Στον αλγόριθμο προσομοίωσης του συστήματος γίνεται σύγκριση μεταξύ της μέγιστης ισχύος που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας ισχύος με την απαίτηση του φορτίου. Αν η απαίτηση του φορτίου είναι μικρότερη από την ισχύ που μπορεί να παρέχει ο

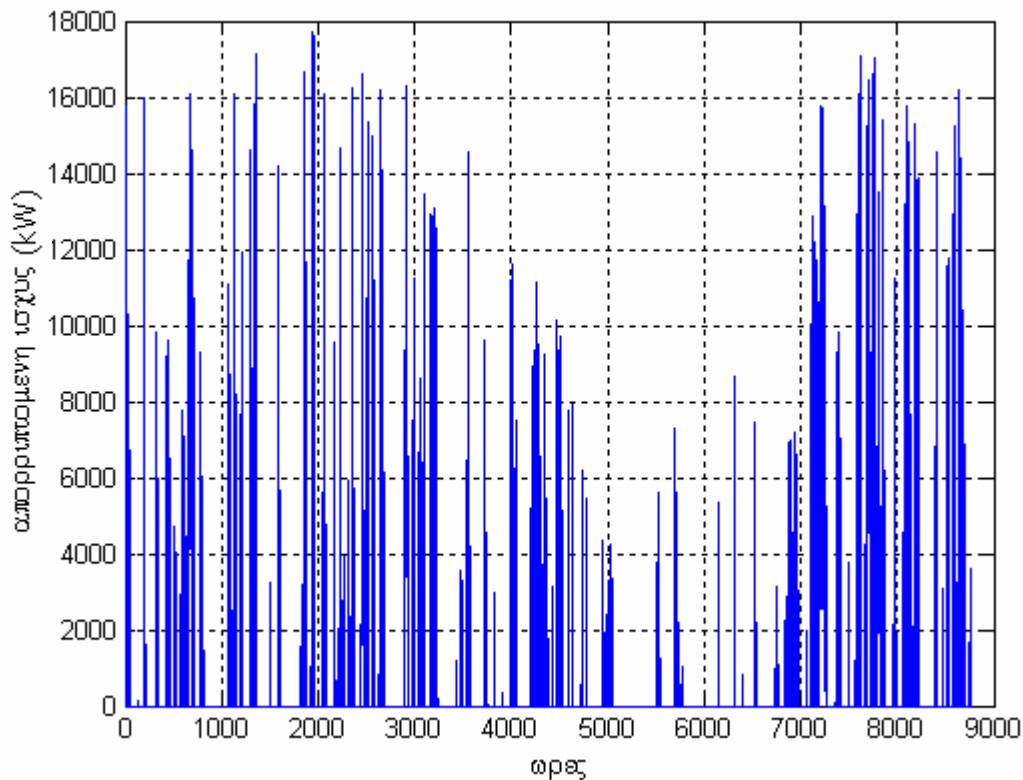
μετατροπéας ισχύος τότε η τελευταία τίθεται ίση με την απαίτηση του φορτίου. Στο Σχήμα 5.4 δίνεται η χρονοσειρά της απαίτησης του φορτίου με βήμα μίας (1) ώρας.



Σχήμα 5.4 Η απαίτηση του φορτίου

4. Η απορριπτόμενη ισχύς διαβάζεται επίσης από ξεχωριστό αρχείο και οι τιμές δίνονται σε ωριαία βάση για διάρκεια ενός έτους. Διαβάζονται δηλαδή 8760 τιμές.

Η απορριπτόμενη ισχύς αφορά το έτος 2005. Στο Σχήμα 5.5 δίνεται η χρονοσειρά της απορριπτόμενης ενέργειας με χρονικό βήμα μίας (1) ώρας. Από την ολοκλήρωση της καμπύλης αυτής προκύπτει ότι η ενέργεια που απορρίπτεται συνολικά στο διάστημα ενός έτους είναι ίση με: $E_{RY} = 9774$ MWh. Σημειώνεται ότι η απόρριψη ενέργειας γίνεται στο 18% της διάρκειας του έτους ενώ στο υπόλοιπο 82% δεν υπάρχει απόρριψη.



Σχήμα 5.5 Χρονοσειρά απορριπτόμενης ισχύος έτους 2005

Ο χρήστης του συστήματος, μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στη βελτιστοποίηση για έναν μόνο τύπο συσσωρευτή και ένα μετατροπέα ισχύος και στη βελτιστοποίηση για όλους τους συνδυασμούς συσσωρευτών και μετατροπέων ισχύος.

5.1.1 Περιγραφή και συμβολισμοί του αλγορίθμου προσομοίωσης

Πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου, διαβάζονται το αρχείο με την απαίτηση του φορτίου και το αρχείο με την απορριπτόμενη ισχύ, καθώς και τα αρχεία που περιέχουν τα χαρακτηριστικά των συσκευών.

Μελετώνται τέσσερις περιπτώσεις προσομοίωσης. Η πρώτη αφορά μη αυτόνομο σύστημα (εισαγωγή ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο) και αναλυτικό μοντέλο συσσωρευτών. Στο αναλυτικό μοντέλο συσσωρευτών χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες εξισώσεις για τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης του συνόλου των συσσωρευτών και εφαρμόζεται όταν δίνονται οι τιμές των εσωτερικών αντιστάσεων των συσσωρευτών. Η δεύτερη

αφορά μη-αυτόνομο σύστημα (εισαγωγή ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο) και απλό μοντέλο συσσωρευτών. Στο απλό μοντέλο συσσωρευτών χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες εξισώσεις για τον υπολογισμό της συνολικής χωρητικότητας του συνόλου των συσσωρευτών και εφαρμόζεται όταν δεν δίνονται οι τιμές των εσωτερικών αντιστάσεων των συσσωρευτών. Η τρίτη περιγράφει αυτόνομο σύστημα και αναλυτικό μοντέλο συσσωρευτή και τέλος η τέταρτη περιγράφει αυτόνομο σύστημα και απλό μοντέλο συσσωρευτή. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναλυτική παρουσίαση των συμβολισμών και λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας κάθε αλγορίθμου προσομοίωσης.

5.1.2 Περιγραφή μη αυτόνομου συστήματος με χρήση του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτών

Για λόγους απλότητας, έχει επιλεγθεί ως τάση λειτουργίας του συστήματος V_{op} η τάση του μετατροπέα ισχύος. Γνωρίζοντας την ονομαστική τάση του συσσωρευτή V_{bn} , είναι δυνατός ο υπολογισμός των συσσωρευτών που θα συνδεθούν σε σειρά έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας κλάδος συσσωρευτών:

$$n_{bs} = \frac{V_{op}}{V_{bn}} \quad (5.1)$$

Το σύνολο των κλάδων των συσσωρευτών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{bp} = N_3 \quad (5.2)$$

όπου n_{bp} είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων συσσωρευτών και N_3 είναι ένας τυχαίος αριθμός που δίνεται από τον γενετικό αλγόριθμο. Σημειώνεται ότι το N_3 είναι ένα από τα δύο γονίδια που έχει το κάθε χρωμόσωμα. Το n_{bp} είναι πάντα ακέραιος αριθμός και αν ο αριθμός των κλάδων είναι μικρότερος από τον αριθμό των μετατροπέων ισχύος, τότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει και το συγκεκριμένο χρωμόσωμα απορρίπτεται. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική ονομαστική χωρητικότητα των συστοιχιών των συσσωρευτών από την παρακάτω σχέση:

$$C_{nom} = n_{bp} \cdot C_b \quad (5.3)$$

όπου C_b είναι η ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή. Η αρχική χωρητικότητα του συνόλου των συστοιχιών των συσσωρευτών, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{init} = (1 - \frac{DOD}{2}) \cdot C_{nom} \quad (5.4)$$

όπου DoD (%) είναι το μέγιστο βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή, το οποίο αν δεν δίνεται από τον κατασκευαστή λαμβάνεται ίσο με 80%. Έχοντας τις τιμές για την ονομαστική και την αρχική χωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί η αρχική κατάσταση φόρτισης του array των συσσωρευτών με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$SOC_{initial} = \frac{C_{init}}{C_{nom}} \quad (5.5)$$

όπου $SOC_{initial}$ η αρχική κατάσταση φόρτισης. Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται γιατί στην αρχή της προσομοίωσης οι συσσωρευτές δεν θεωρούνται πλήρως φορτισμένοι.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξής: Σε διάρκεια ενός έτους παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο μια συγκεκριμένη εγγυημένη ισχύς από τους συσσωρευτές κατά τις ώρες αιχμής (11:00-15:00) και παράλληλα όταν υπάρχει διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύς φορτίζονται οι συσσωρευτές. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα επιλέχθηκε λόγω της αυξημένης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται ότι εάν παρουσιαστεί απορριπτόμενη ισχύς κατά τις ώρες παραγωγής της εγγυημένης ισχύος τότε αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση των συσσωρευτών. Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύς και το σύστημα δεν βρίσκεται στις ώρες παραγωγής εγγυημένης ισχύος, τότε γίνεται εισαγωγή ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές και να αυξηθεί

η αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Οι ώρες εισαγωγής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι 00:00πμ - 08:00πμ. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα επιλέχθηκε λόγω της χαμηλής ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια που παρουσιάζει.

5.1.2.1 Φόρτιση

Από τις ώρες 00:00 έως 11:00 και από 15:00 έως 00:00 ελέγχεται αν υπάρχει διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύς:

$$WP_c^i(t) > 0 \quad (5.6)$$

όπου $WP_c^i(t)$ είναι η απορριπτόμενη ισχύς την ημέρα i και ώρα t . Εάν υπάρχει, αυτή χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών σύμφωνα με την διαδικασία: Αρχικά ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης των συστοιχιών των συσσωρευτών. Στην περίπτωση που οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα της προσομοίωσης. Αν δεν είναι πλήρως φορτισμένοι, υπολογίζεται αρχικά η τάση ανοιχτοκύκλωσης ενός κλάδου συσσωρευτών με τη σχέση:

$$E_{oc_s}^i(t) = [v_1 + v_2 \cdot SOC^i(t)] \cdot n_{bs} \quad (5.7)$$

όπου $E_{oc_s}^i(t)$ είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης ενός κλάδου συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , v_1 και v_2 είναι σταθερές που υπολογίζονται σύμφωνα με την γραφική παράσταση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή που δίνει ο κατασκευαστής, n_{bs} είναι ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t .

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή της εσωτερικής αντίστασης ενός κλάδου συσσωρευτών από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_{int_s}^i(t) = [r_1 - r_2 \cdot SOC^i(t)] \cdot n_{bs} \quad (5.8)$$

όπου $R_{ints}^i(t)$ είναι η τιμή τις εσωτερικής αντίστασης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , r_1 και r_2 είναι σταθερές που δίνονται από τον κατασκευαστή και $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t .

Ο υπολογισμός του ρεύματος φόρτισης του κάθε κλάδου των συσσωρευτών γίνεται με την παρακάτω σχέση:

$$I_{BS}^i(t) = \frac{V_{ch} \cdot n_{bs} \cdot N_c - E_{ocs}^i(t)}{R_{ints}^i(t)} \quad (5.9)$$

όπου $I_{BS}^i(t)$ είναι το ρεύμα φόρτισης του κάθε κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , V_{ch} είναι η σταθερή τάση φόρτισης ανά στοιχείο, n_{bs} είναι ο αριθμός των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, N_c είναι ο αριθμός των στοιχείων ανά συσσωρευτή, $E_{ocs}^i(t)$ είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t και $R_{ints}^i(t)$ είναι η τιμή τις εσωτερικής αντίστασης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t . Η σταθερή τάση φόρτισης V_{ch} για τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος είναι 2.2Volt/στοιχείο. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης και η εσωτερική αντίσταση υπολογίζονται από τις εξισώσεις (5.7) και (5.8) αντίστοιχα.

Η σχέση που συνδέει το ρεύμα φόρτισης του συνόλου των συστοιχιών των συσσωρευτών με το ρεύμα φόρτισης του κλάδου είναι:

$$I_{BA}^i(t) = I_{BS}^i(t) \cdot n_{bp} \quad (5.10)$$

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές των $E_{ocs}^i(t)$ και $R_{ints}^i(t)$, μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα φόρτισης των συστοιχιών των συσσωρευτών με την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{BA}^i(t) = \left[\frac{V_{ch} \cdot n_{bs} \cdot N_c - E_{oc_s}^i(t)}{R_{int_s}^i(t)} \right] \cdot n_{bp} \quad (5.11)$$

όπου n_{bp} είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε με την εξίσωση (5.12) το μέγιστο ρεύμα φόρτισης που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας ισχύος:

$$I_{DC,max} = \frac{n_{inv} \cdot P_{nom}}{V_{bat}} \quad (5.12)$$

όπου P_{nom} είναι η ονομαστική AC ισχύς του συνόλου των μετατροπέων ισχύος, n_{inv} είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε μετατροπέα ισχύος και $V_{bat} = V_{ch} \cdot n_{bs} \cdot N_c$. Αν το $I_{DC,max}$ είναι μεγαλύτερο από $C_{nom}/5$, τότε τίθεται ίσο με $C_{nom}/5$. Ο έλεγχος του $I_{DC,max}$ με το $C_{nom}/5$ γίνεται για την προστασία των συσσωρευτών από την υπερφόρτιση. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση μεταξύ του $I_{BA}^i(t)$ και του $I_{DC,max}$. Αν το $I_{BA}^i(t)$ είναι μεγαλύτερο από το $I_{DC,max}$ τότε τίθεται ίσο με $I_{DC,max}$ και έχουμε φόρτιση με σταθερό ρεύμα. Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα διαρκεί μέχρι η τάση του κλάδου των συσσωρευτών, που υπολογίζεται από την σχέση (5.13), γίνει ίση με $V_{ch} \cdot n_{bs} \cdot N_c$. Με την παρακάτω σχέση μπορεί να υπολογιστεί η τάση του κλάδου των συσσωρευτών κάθε ημέρα i και κάθε ώρα t .

$$V_B^i(t) = E_{oc_s}^i(t) + I_{BS}^i(t) \cdot R_{int_s}^i(t) \quad (5.13)$$

Αφού υπολογιστεί το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς φόρτισης από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{chA}^i(t) = I_{BA}^i(t) \cdot V_B^i(t) \quad (5.14)$$

όπου $I_{BA}^i(t)$ είναι το ρεύμα φόρτισης που προκύπτει από τη σχέση (5.10) και μετά από την σύγκριση με το $I_{DC,max}$ και $V_B^i(t)$ είναι η τάση του κλάδου των συσσωρευτών και δίνεται από τη σχέση (5.13).

Είτε γίνεται φόρτιση με σταθερή τάση, είτε φόρτιση με σταθερό ρεύμα

συγκρίνεται η $P_{chA}^i(t)$ με την $W_{PC}^i(t) \cdot \eta_{inv}$. Αν η $P_{chA}^i(t)$ είναι μεγαλύτερη

από την $W_{PC}^i(t) \cdot \eta_{inv}$ τότε η ισχύς φόρτισης της συστοιχίας των

συσσωρευτών τίθεται ίση με την $W_{PC}^i(t) \cdot \eta_{inv}$. Ο προηγούμενος έλεγχος

γίνεται για την περίπτωση που οι συσσωρευτές χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ φόρτισης από την διαθέσιμη. Το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{BA}^i(t) = \frac{W_{PC}^i(t) \cdot \eta_{inv}}{V_B^i(t)} \quad (5.15)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ξανά η τάση του συσσωρευτή από τη σχέση (5.13)

για να διαπιστωθεί αν γίνεται φόρτιση με σταθερό ρεύμα ή σταθερή τάση.

Αφού γνωρίζουμε το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα φόρτισης του συσσωρευτή από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q^i(t) = \int_{t-1}^t I_{BA}^i(t') dt' \quad (5.16)$$

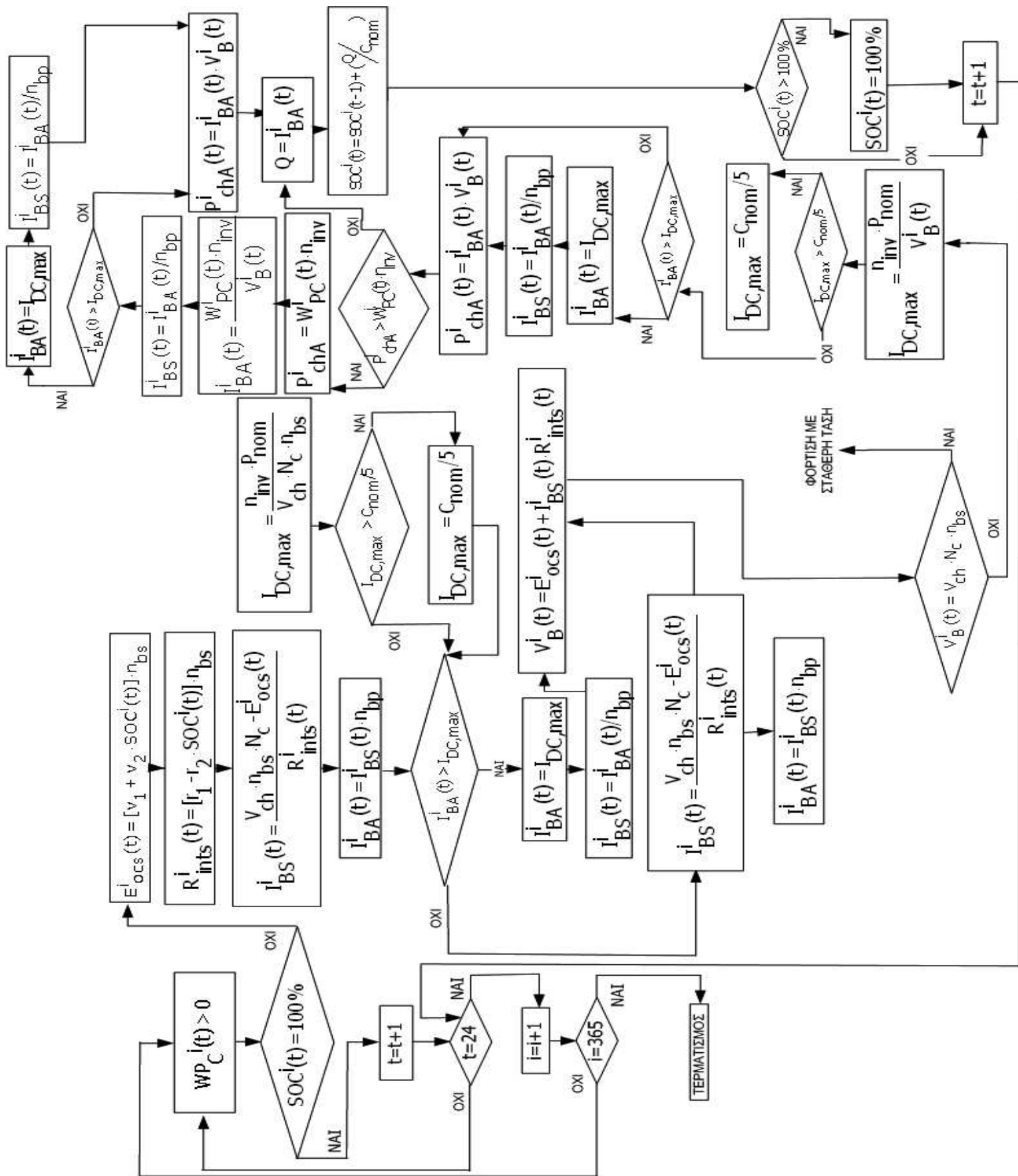
Η ποσότητα που υπολογίζεται από την σχέση (5.16) χρησιμοποιείται στον υπολογισμό τις κατάστασης φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών, ο οποίος γίνεται ως εξής:

$$SOC^i(t) = SOC^i(t-1) + \left(\frac{Q^i(t)}{C_{nom}}\right) \quad (5.17)$$

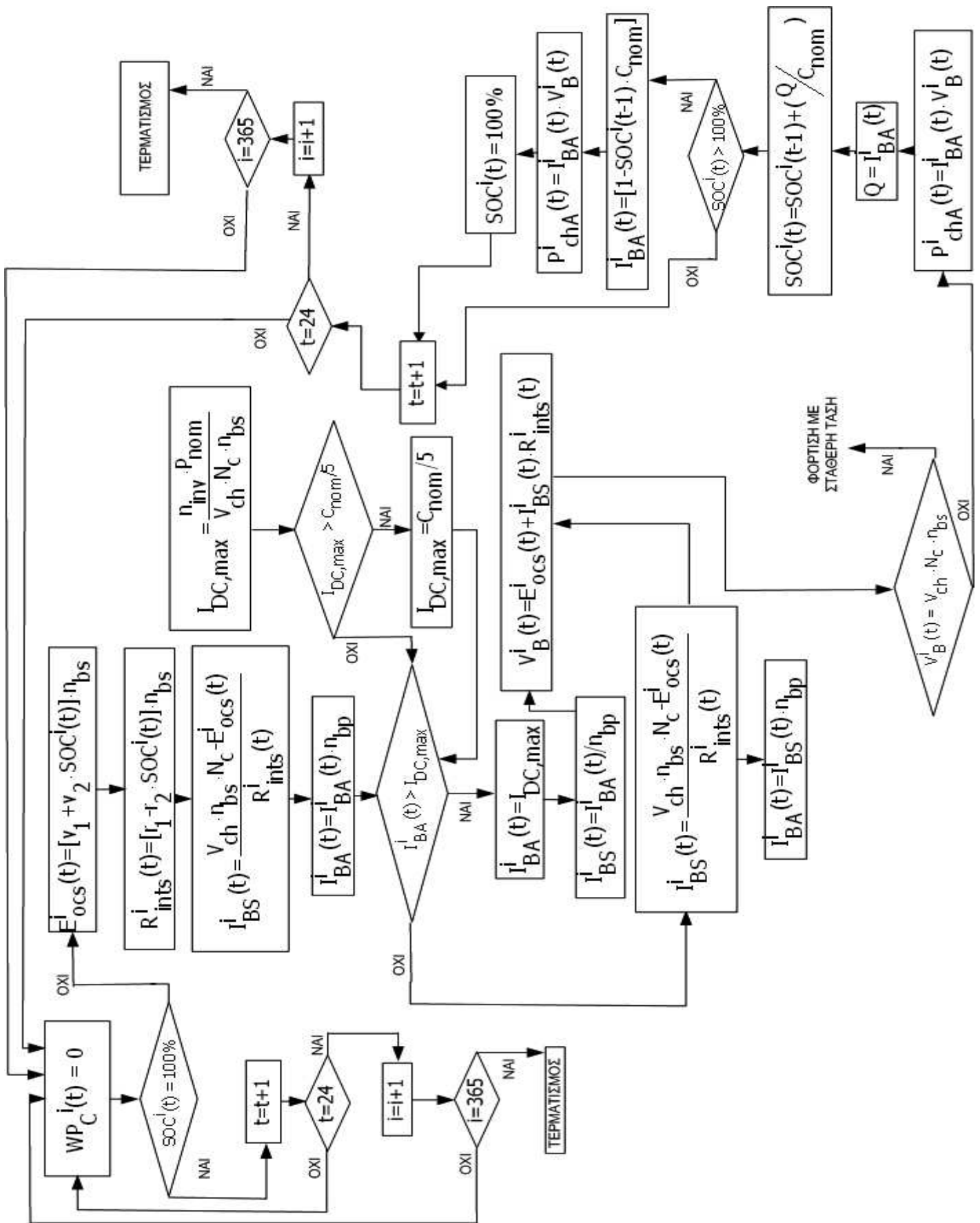
όπου $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t , $SOC^i(t-1)$ είναι η αμέσως προηγούμενη κατάσταση φόρτισης, $Q^i(t)$ είναι η ποσότητα με την οποία θα φορτιστούν οι συσσωρευτές και C_{nom} είναι η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών. Πριν την επόμενη ώρα τις προσομοίωσης ελέγχεται αν η κατάσταση φόρτισης είναι πάνω από 100%. Αν είναι, τότε υπολογίζεται το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών που θα δώσει $SOC=100\%$, στη συνέχεια υπολογίζεται ξανά η ισχύς φόρτισης των συσσωρευτών, τίθεται το $SOC=100\%$ και ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται όταν το SOC γίνει μεγαλύτερο από 100% και είναι απαραίτητοι για να βρεθεί ακριβώς πόση ισχύς θα εισαχθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο όταν δεν θα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς και το σύστημα δεν βρίσκεται στο χρονικό διάστημα παραγωγής εγγυημένης ισχύος, εισάγεται ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές. Το χρονικό διάστημα που γίνεται εισαγωγή ισχύος από το δίκτυο είναι 00:00πμ–08:00πμ. Γίνεται έλεγχος της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών και εάν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, τότε δεν χρειάζεται να εισαχθεί ισχύς και ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα της προσομοίωσης. Αν δεν είναι πλήρως φορτισμένοι, τότε εισάγεται ισχύς και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5.7)–(5.13) και (5.16)–(5.17) υπολογίζεται η νέα κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών. Στο σχήμα 5.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με σταθερό ρεύμα. Η ισχύς φόρτισης προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με σταθερό ρεύμα. Η ισχύς φόρτισης εισάγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σχήμα 5.8 φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με σταθερή τάση. Η ισχύς φόρτισης προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου. Στο σχήμα 5.9

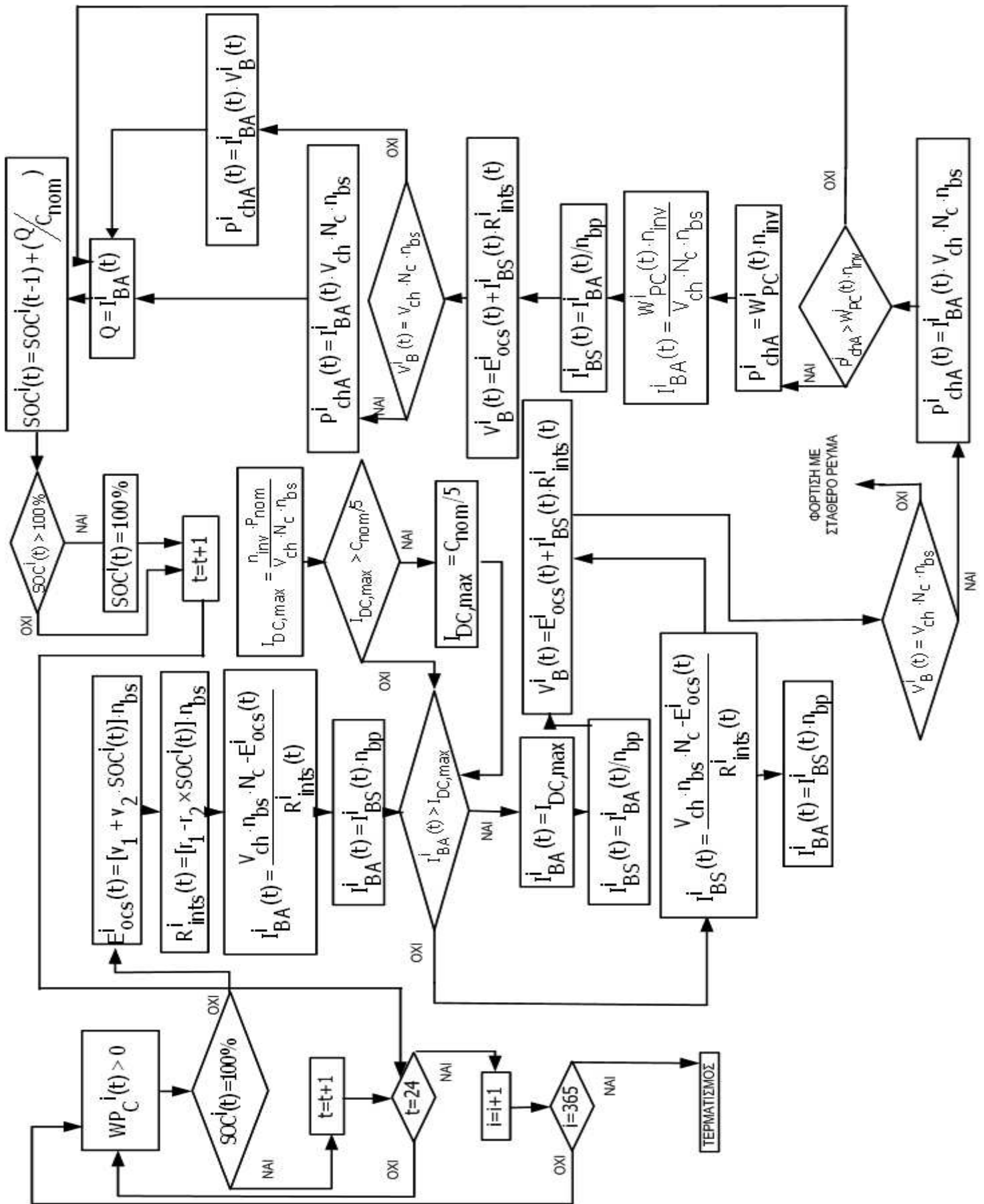
φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με σταθερή τάση. Η ισχύς φόρτισης εισάγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο.



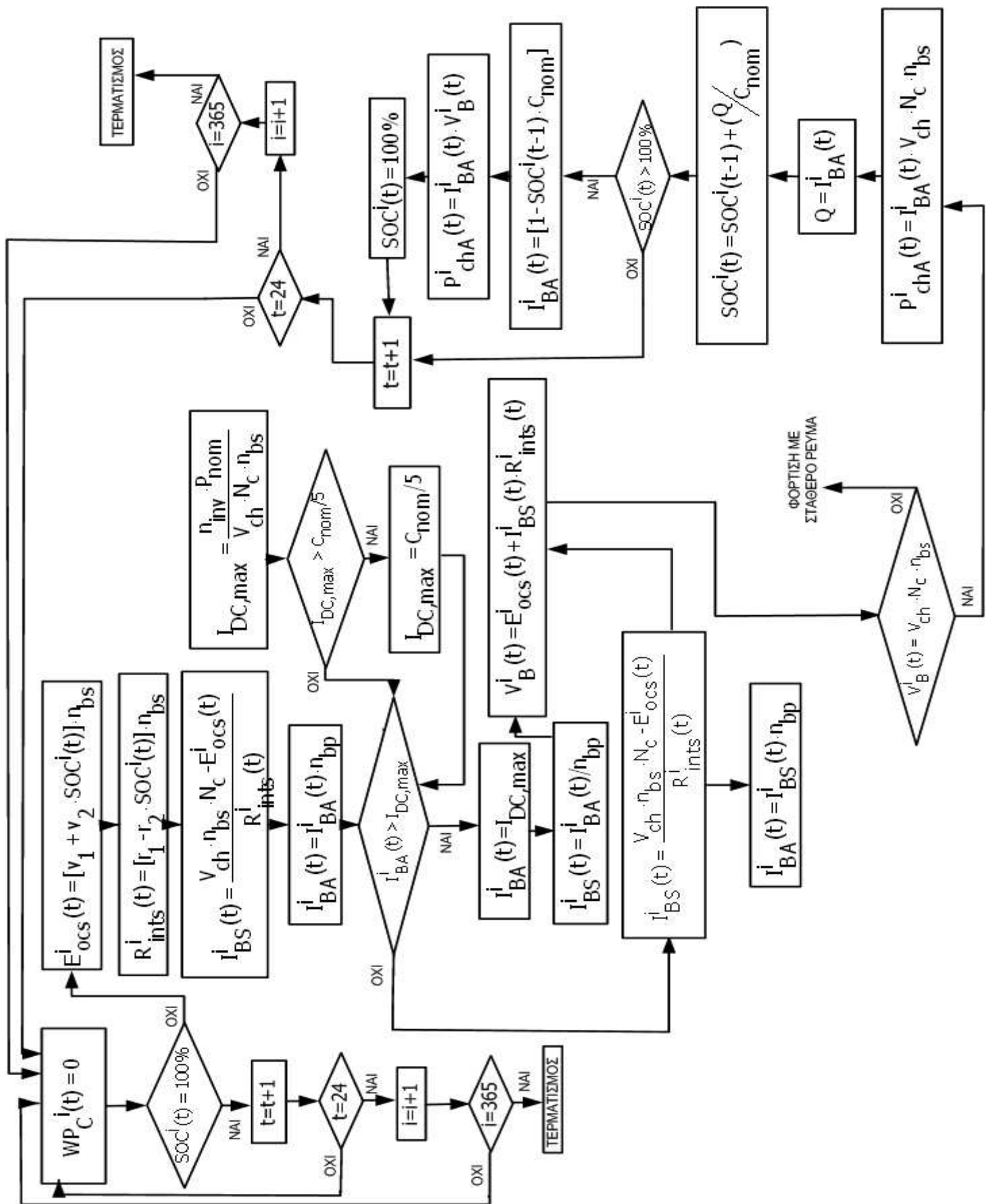
Σχήμα 5.6 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με σταθερό ρεύμα με ισχύ που προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με σταθερό ρεύμα με ισχύ εισαγόμενη από το ηλεκτρικό δίκτυο



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με σταθερή τάση με ισχύ που προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με σταθερή τάση με ισχύ εισαγόμενη από το ηλεκτρικό δίκτυο

5.1.2.2 Εκφόρτιση

Τις ώρες από 11:00πμ έως 15:00μμ παρέχεται ισχύς από τους συσσωρευτές προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Αρχικά υπολογίζεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης του κλάδου των συσσωρευτών:

$$E_{oc_s}^i(t) = [(v_1 + v_2 \cdot SOC^i(t))] \cdot n_{bs} \quad (5.18)$$

όπου $E_{oc}^i(t)$ είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης του string των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , v_1 και v_2 είναι σταθερές που υπολογίζονται από τη γραφική παράσταση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή που δίνει ο κατασκευαστής, n_{bs} είναι ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, και $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της εσωτερικής αντίστασης:

$$R_{int_s}^i(t) = [r_1 - r_2 \cdot SOC^i(t)] \cdot n_{bs} \quad (5.19)$$

όπου $R_{ints}^i(t)$ είναι η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , r_1 και r_2 είναι σταθερές που υπολογίζονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής και $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t .

Ο υπολογισμός της τάσης του κλάδου των συσσωρευτών γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$V_B^i(t) = E_{oc_s}^i(t) - I_{BS}^i(t) \cdot R_{int_s}^i(t) \quad (5.20)$$

όπου $V_B^i(t)$ είναι η τελική τάση του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , $E_{ocs}^i(t)$ είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t , $I_{BS}^i(t)$ είναι το ρεύμα εκφόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών και $R_{ints}^i(t)$ η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t .

Το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{BA}^i(t) = \frac{N_2}{n_{inv} \cdot V_B^i(t)} \quad (5.21)$$

όπου N_2 είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς και αποτελεί το δεύτερο από τα δύο γονίδια του κάθε χρωμοσώματος του γενετικού αλγορίθμου, n_{inv} είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε μετατροπέα ισχύος και $V_B^i(t)$ είναι η τελική τάση του κλάδου των συσσωρευτών την ημέρα i και ώρα t .

Το ρεύμα εκφόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{BS}^i(t) = \frac{I_{BA}^i(t)}{n_{bp}} \quad (5.22)$$

όπου n_{bp} είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

Αντικαθιστώντας την παραπάνω τιμή του $I_{BS}^i(t)$ στην εξίσωση (5.20) και λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς $V_B^i(t)$ προκύπτει ότι:

$$V_{B1,2}^j(t) = \frac{E_{ocS}^j(t) \pm \sqrt{(E_{ocS}^j(t))^2 + \frac{4 \cdot N_2 \cdot R_{intS}^i(t)}{n_{inv}}}}{2} \quad (5.23)$$

Θέτοντας την μεγαλύτερη τιμή από τις $V_{B1,2}^j(t)$ που υπολογίστηκε από την σχέση (5.23) στην εξίσωση (5.21) μπορεί να βρεθεί το ρεύμα εκφόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών και κατ'έπекταση το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών. Η επιλογή της μεγαλύτερης από τις $V_{B1,2}^j(t)$ γίνεται γιατί αν επιλεγεί η μικρότερη, το ρεύμα εκφόρτισης του κλάδου που υπολογίζεται προκύπτει μεγαλύτερο από $C_B/5$. Σημειώνεται ότι κάθε φορά που υπολογίζεται το ρεύμα εκφόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών ελέγχεται αν είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από την τιμή $C_B/5$ όπου C_B η ονομαστική

χωρητικότητα του κλάδου των συσσωρευτών. Αν το ρεύμα είναι μεγαλύτερο από την παραπάνω τιμή τότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει και το συγκεκριμένο χρωμόσωμα απορρίπτεται. Αυτός ο έλεγχος γίνεται για την προστασία του συνόλου των συσσωρευτών από την υπερφόρτιση. Αν είναι μικρότερο ή ίσο από $C_B/5$ τότε μένει ως έχει.

Γνωρίζοντας το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα εκφόρτισης από την παρακάτω σχέση:

$$Q^i(t) = \int_{t-1}^t I_{BA}^i(t') dt' \quad (5.24)$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται αυτή η ποσότητα για τον υπολογισμό της νέας κατάστασης φόρτισης:

$$SOC^i(t) = SOC^i(t-1) - \left(\frac{Q^i(t)}{C_{nom}} \right) \quad (5.25)$$

όπου $SOC^i(t)$ είναι η κατάσταση φόρτισης την ημέρα i και ώρα t , $SOC^i(t-1)$ είναι η αμέσως προηγούμενη κατάσταση φόρτισης, $Q^i(t)$ είναι η ποσότητα εκφόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών και C_{nom} είναι η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών.

Στο τέλος κάθε ώρας εκφόρτισης του συσσωρευτή, ελέγχεται αν η κατάσταση φόρτισης είναι μικρότερη από 20%. Αν αυτή η συνθήκη ισχύει, τότε ο αλγόριθμος τερματίζει ανεπιτυχώς. Αν δεν ισχύει τότε ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα.

Την τελευταία ώρα της τελευταίας ημέρας ελέγχεται αν η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη από την αρχική κατάσταση φόρτισης:

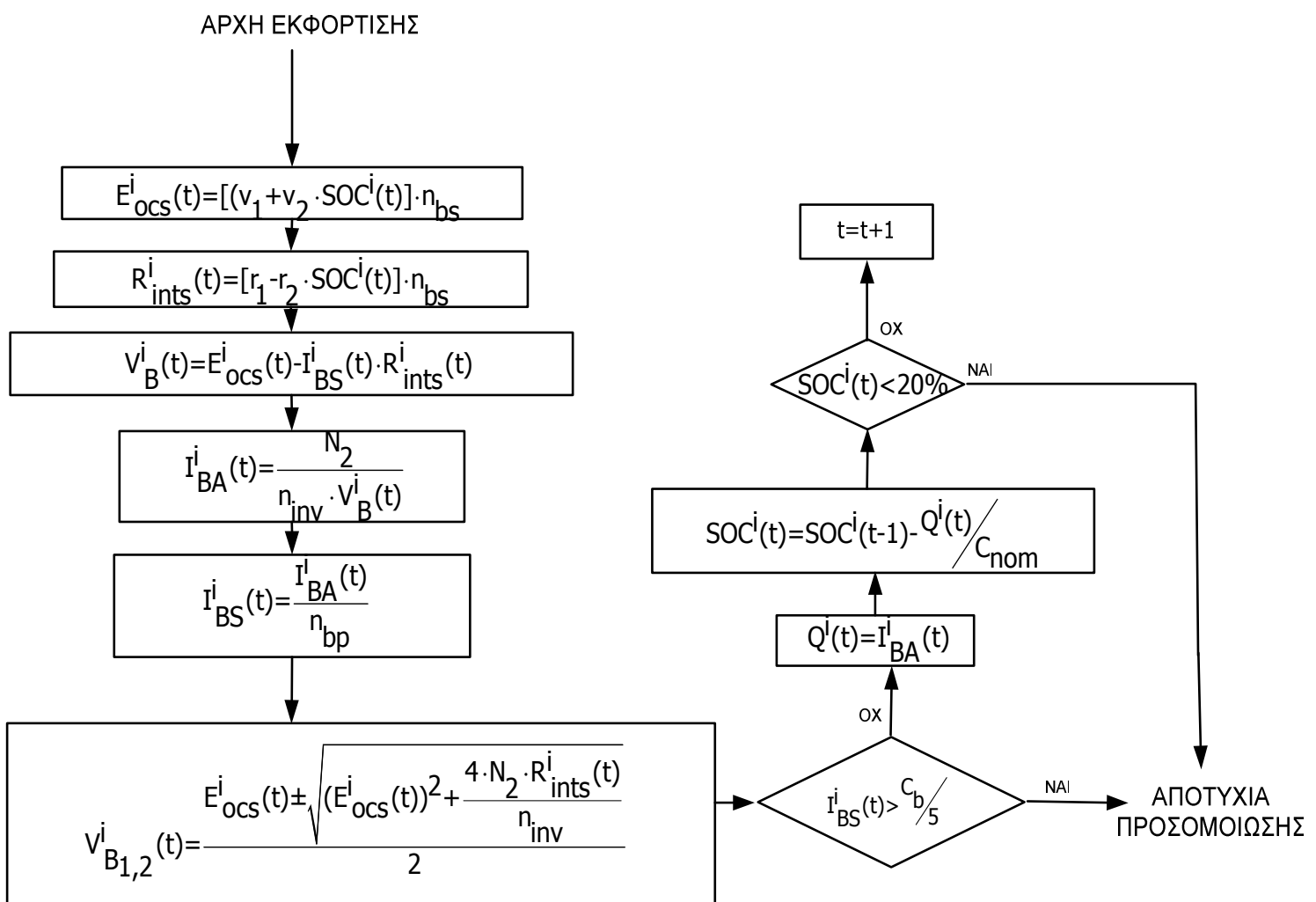
$$SOC^{365}(24) \geq SOC^1(0) \quad (5.26)$$

Αν η ανισότητα (5.26) ισχύει, τότε ο αλγόριθμος τερματίζει επιτυχώς, διαφορετικά προκύπτει αποτυχία του αλγορίθμου.

Ο υπολογισμός του συνόλου των μετατροπών ισχύος, γίνεται με την εξίσωση:

$$N_1 = \frac{1.2 \cdot N_2}{P_{nom}} \quad (5.27)$$

όπου η παράμετρος N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των μετατροπών ισχύος και P_{nom} είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου στην AC πλευρά ενός μετατροπέα ισχύος. Στο σχήμα 5.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής για την εκφόρτιση των συσσωρευτών για μια ώρα.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα ροής για την εκφόρτιση των συσσωρευτών για μια ώρα

5.1.3 Περιγραφή μη-αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού μοντέλου συσσωρευτών

Η τάση λειτουργίας του συστήματος V_{op} είναι η ονομαστική τάση του μετατροπέα ισχύος. Γνωρίζοντας την ονομαστική τάση του συσσωρευτή V_{bn} , είναι δυνατός ο υπολογισμός των συσσωρευτών που θα συνδεθούν σε σειρά έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας κλάδος συσσωρευτών:

$$n_{bs} = \frac{V_{op}}{V_{bn}} \quad (5.28)$$

Το σύνολο των κλάδων των συσσωρευτών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{bp} = N_3 \quad (5.29)$$

όπου n_{bp} είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων συσσωρευτών και N_3 είναι ένας τυχαίος αριθμός που δίνεται από τον γενετικό αλγόριθμο. Σημειώνεται ότι το N_3 είναι το ένα από τα δύο γονίδια που έχει το κάθε χρωμόσωμα και το n_{bp} είναι πάντα ακέραιος αριθμός. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική ονομαστική χωρητικότητα των συστοιχιών των συσσωρευτών από την παρακάτω σχέση:

$$C_{nom} = n_{bp} \cdot C_b \quad (5.30)$$

όπου C_b είναι η ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή και n_{bp} είναι ο αριθμός των κλάδων που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Η αρχική χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_{init} = \left(1 - \frac{DOD}{2}\right) \cdot C_{nom} \quad (5.31)$$

όπου DoD είναι το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή το οποίο αν δεν δίνεται από τον κατασκευαστή λαμβάνεται ίσο με 80%.

5.1.3.1 Φόρτιση

Τις ώρες από 00:00 έως 11:00 και από 15:00 έως 00:00 ελέγχεται αν υπάρχει διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύς:

$$WP_c^i(t) > 0 \quad (5.32)$$

όπου $WP_c^i(t)$ είναι η απορριπτόμενη ισχύς την ημέρα i και ώρα t . Εάν υπάρχει τότε, αυτή χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών και ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια:

Αρχικά ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών. Στην περίπτωση που οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα της προσομοίωσης. Αν δεν είναι πλήρως φορτισμένοι τότε υπολογίζεται το ρεύμα φόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών από την εξίσωση:

$$I_{BA}^i(t) = \frac{WP_c^i(t) \cdot \eta_{inv}}{V_B} \quad (5.33)$$

όπου $WP_c^i(t)$ είναι η απορριπτόμενη ισχύς την ημέρα i και ώρα t , η_{inv} είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε μετατροπέα ισχύος και $V_B = V_{ch} \cdot \eta_{bs} \cdot N_c$. Ελέγχεται αν το $I_{BA}^i(t)$ είναι μεγαλύτερο από $C_{nom}/5$ και αν είναι τότε τίθεται ίσο με $C_{nom}/5$. Ο έλεγχος αυτός γίνεται για την προστασία των συσσωρευτών από υπερφόρτιση.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέγιστο ρεύμα φόρτισης που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας ισχύος:

$$I_{DC,max} = \frac{\eta_{inv} \cdot P_{nom}}{V_{bat}} \quad (5.34)$$

όπου P_{nom} είναι η ονομαστική AC ισχύς του συνόλου των μετατροπέων ισχύος, η_{inv} είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε μετατροπέα ισχύος και $V_{bat} = V_{ch} \cdot \eta_{bs} \cdot N_c$. Αν το $I_{DC,max}$ είναι μεγαλύτερο από $C_{nom}/5$, τότε τίθεται ίσο με $C_{nom}/5$. Ο έλεγχος

του $I_{DC,max}$ με το $C_{nom}/5$ γίνεται για την προστασία των συσσωρευτών από την υπερφόρτιση. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος μεταξύ του $I_{B,array}(t)$ και του $I_{DC,max}$. Αν το $I_{B,array}(t)$ είναι μεγαλύτερο από το $I_{DC,max}$ τότε τίθεται ίσο με $I_{DC,max}$ και γίνεται φόρτιση με σταθερό ρεύμα.

Η ισχύς φόρτισης των συσσωρευτών υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{chA}^i(t) = I_{BA}^i(t) \cdot V_B \quad (5.35)$$

Αφού έχει υπολογιστεί το ρεύμα φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών μπορεί να υπολογιστεί η νέα χωρητικότητα της συστοιχίας με την ακόλουθη εξίσωση:

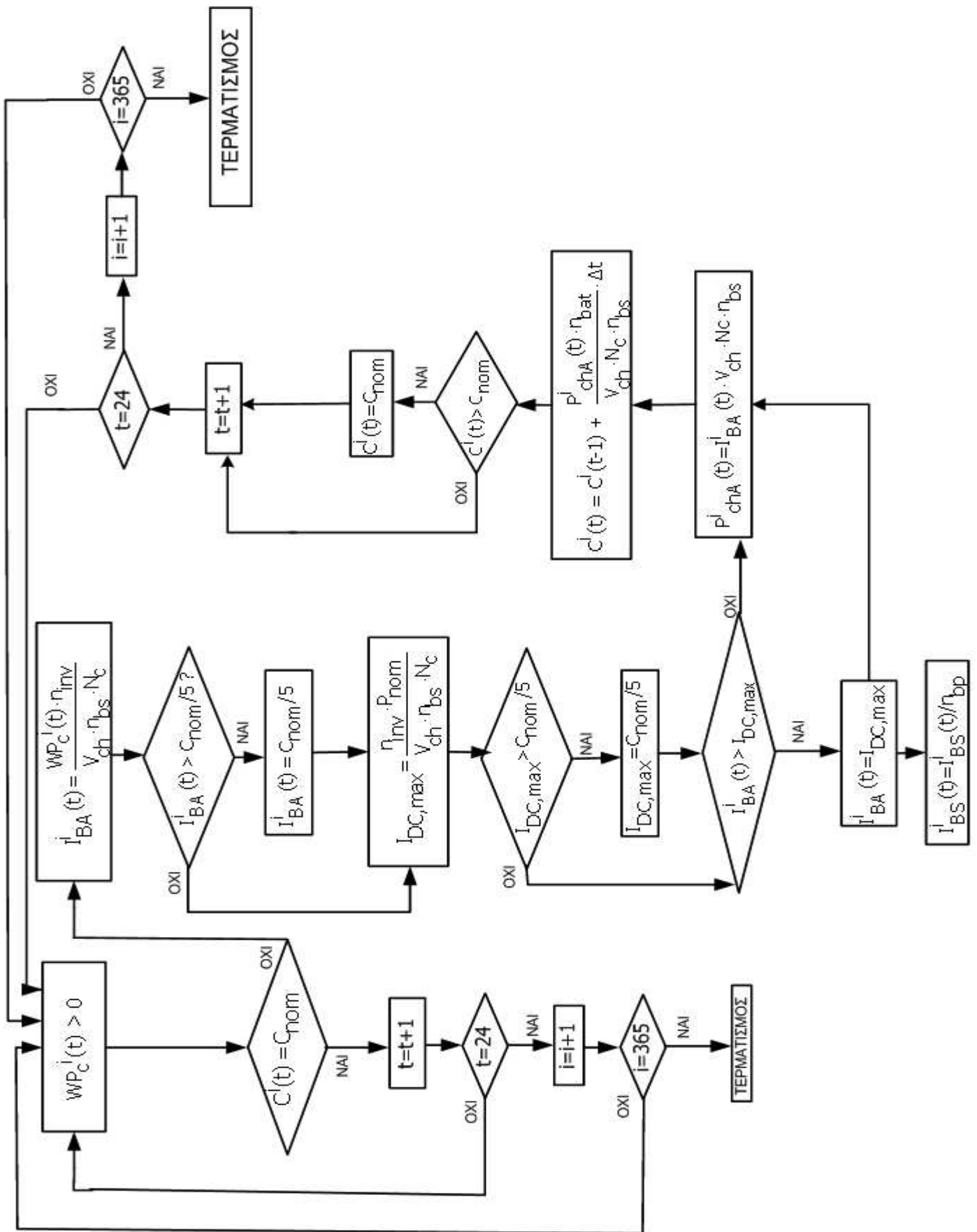
$$C^i(t) = C^i(t-1) + \frac{P_{chA}^i(t) \cdot \eta_{bat}}{V_B} \cdot \Delta t \quad (5.36)$$

όπου $C^i(t-1)$ είναι η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών την προηγούμενη ώρα της προσομοίωσης, η_{bat} είναι ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή (λαμβάνεται ίσος με 80%) και Δt ($\Delta t=1$ ώρα) είναι το βήμα της προσομοίωσης.

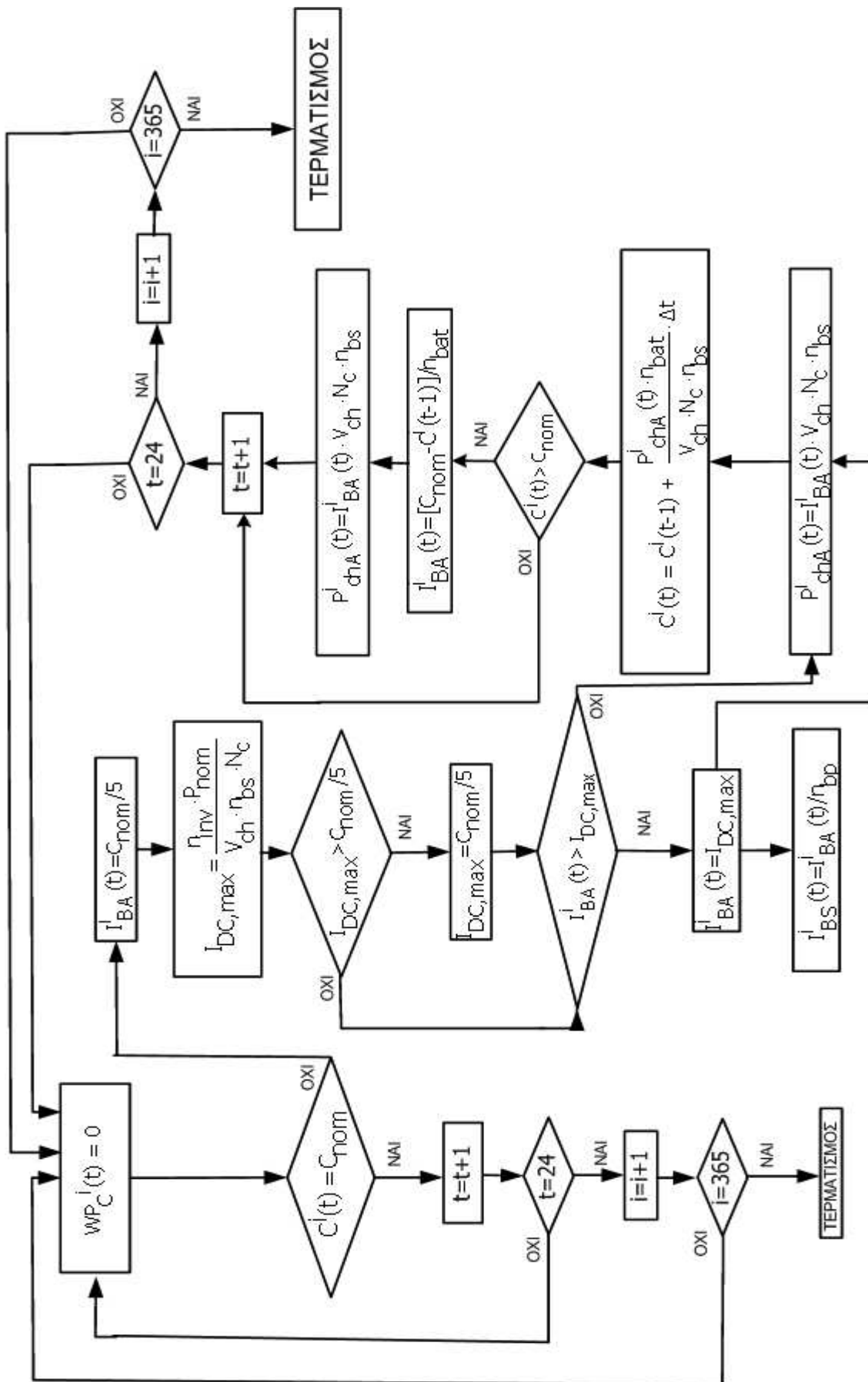
Πριν την επόμενη ώρα ελέγχεται αν η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη από την C_{nom} . Αν είναι, τότε υπολογίζεται το ρεύμα φόρτισης που θα δώσει χωρητικότητα ακριβώς ίση με C_{nom} , υπολογίζεται εκ' νέου η ισχύς φόρτισης, η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών τίθεται ίση με C_{nom} και ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται όταν η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών γίνει μεγαλύτερη από την C_{nom} και είναι απαραίτητοι για να υπολογιστεί ακριβώς πόση ισχύ θα εισαχθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο όταν δεν θα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς. Αν η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών δεν είναι μεγαλύτερη από την C_{nom} ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα της προσομοίωσης.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς και το σύστημα δεν βρίσκεται στο χρονικό διάστημα παραγωγής εγγυημένης ισχύος, εισάγεται

ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές. Οι ώρες εισαγωγής ενέργειας από το δίκτυο είναι 00:00πμ–08:00πμ, λόγω της χαμηλής ζήτησης που υπάρχει σε αυτό το χρονικό διάστημα. Γίνεται πάλι ο έλεγχος της χωρητικότητας για να διαπιστωθεί αν υπάρχει ανάγκη φόρτισης. Αν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, τότε δεν χρειάζεται να εισαχθεί ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο και ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη ώρα. Αν δεν είναι όμως πλήρως φορτισμένοι, εισάγεται ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5.33)-(5.36) υπολογίζεται η νέα χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών. Επειδή στο συγκεκριμένο μοντέλο συσσωρευτών δεν είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός της τιμής του ρεύματος φόρτισης των συσσωρευτών, εισάγεται τόση ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο όση χρειάζεται για να φορτιστούν οι συσσωρευτές με ρεύμα που υπολογίζεται από τη σύγκριση του $C_{nom}/5$ με το $I_{DC,max}$. Στο σχήμα 5.11 φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με ισχύ που προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου. Στο σχήμα 5.12 φαίνεται το διάγραμμα ροής για τη μέθοδο φόρτισης με ισχύ που εισάγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με ισχύ που προέρχεται από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα ροής για φόρτιση με ισχύ που εισάγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο

5.1.3.2 Εκφόρτιση

Τις ώρες από 11:00 έως 15:00 παρέχεται ισχύς από τους συσσωρευτές προς το δίκτυο. Αρχικά δίνεται η ισχύς εκφόρτισης των συσσωρευτών ως τυχαίος αριθμός από τον γενετικό αλγόριθμο:

$$P_{Bdisch} = N_2 \quad (5.37)$$

Η εγγυημένη ισχύς είναι σταθερή για όλο τον χρόνο. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.37) μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών με την σχέση:

$$I_{BA}^i(t) = \frac{N_2}{n_{inv} \cdot V_B} \quad (5.38)$$

όπου $V_B = V_{ch} \cdot n_{bs} \cdot N_c$ και n_{inv} είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε μετατροπέα ισχύος. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για να διαπιστωθεί αν το ρεύμα εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από $C_{nom}/5$, όπου C_{nom} είναι η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών. Αν το ρεύμα είναι μεγαλύτερο από την παραπάνω τιμή, τότε ο αλγόριθμος τερματίζει ανεπιτυχώς. Αν είναι μικρότερο ή ίσο τότε μένει ως έχει. Αφού έχει υπολογίσει το ρεύμα εκφόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών υπολογίζεται η νέα χωρητικότητα της συστοιχίας ως εξής:

$$C^i(t) = C^i(t-1) - \frac{P_{Bdisch}}{n_{inv} \cdot V_{op}} \cdot \Delta t \quad (5.39)$$

όπου $C^i(t-1)$ είναι η προηγούμενη τιμή της χωρητικότητας και Δt ($\Delta t=1$ ώρα) είναι το βήμα της προσομοίωσης.

Στο τέλος κάθε ώρας εκφόρτισης της συστοιχίας ελέγχεται η τιμή της χωρητικότητας:

$$C^i(t) < [(1 - DOD) \cdot C_{nom}] \quad (5.40)$$

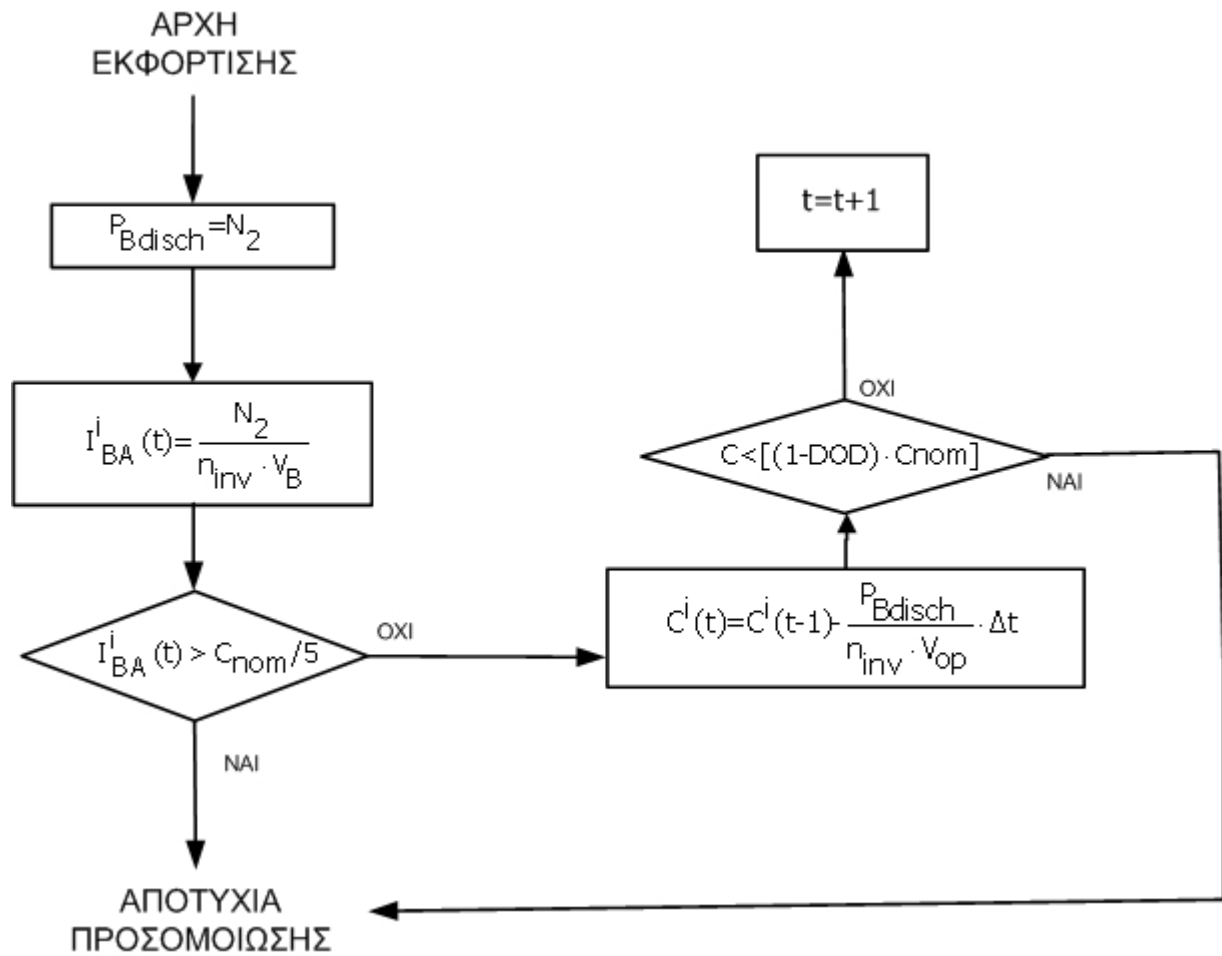
Αν η ανισότητα ισχύει, τότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει, διαφορετικά προχωράει στην επόμενη ώρα. Την τελευταία ώρα της τελευταίας ημέρας γίνεται έλεγχος για το αν η υπολειπομένη χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη από την αρχική χωρητικότητα:

$$C^{365}(24) \geq C_{init} \quad (5.41)$$

Αν οι παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται τότε ο αλγόριθμος τερματίζει επιτυχώς διαφορετικά τερματίζει ανεπιτυχώς. Ο υπολογισμός του συνόλου των μετατροπών ισχύος γίνεται με την εξίσωση:

$$N_1 = \frac{1.2 \cdot N_2}{P_{nom}} \quad (5.42)$$

όπου η παράμετρος N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των μετατροπών ισχύος που και P_{nom} είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου στην AC πλευρά ενός μετατροπέα ισχύος. Στο σχήμα 5.13 φαίνεται το διάγραμμα ροής για την εκφόρτιση σε χρονικό διάστημα μιας ώρας.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα ροής για την εκφόρτιση σε χρονικό διάστημα μιας ώρας

5.1.4 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού και του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτή

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν οι περιγραφές των αλγορίθμων προσομοίωσης για τα μη-αυτόνομα συστήματα. Στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος, η φόρτιση των συσσωρευτών γίνεται μόνο από την διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι εάν δεν υπάρχει διαθέσιμη απορριπτόμενη ισχύς και το σύστημα δεν βρίσκεται στο χρονικό διάστημα παραγωγής εγγυημένης ενέργειας, τότε δεν γίνεται εισαγωγή ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο και η κατάσταση φόρτισης ή η χωρητικότητα παραμένουν ως έχουν. Η εκφόρτιση και οι εξισώσεις που την περιγράφουν είναι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στις περιγραφές των μη-αυτόνομων συστημάτων. Τα διαγράμματα ροής για την φόρτιση και την εκφόρτιση είναι τα αντίστοιχα με αυτά του μη-αυτόνομου συστήματος με τη διαφορά ότι η

μόνη ισχύς που χρησιμοποιείται για την φόρτιση προέρχεται αποκλειστικά από την απορριπτόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου.

6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση βιωσιμότητας της υπό διερεύνηση επένδυσης θα βασισθεί σε δύο από τις πλέον καθιερωμένες μεθόδους της διεθνούς βιβλιογραφίας, σε αυτή του προσδιορισμού του σύνθετου χρόνου απόσβεσης (payback period) σε συνδυασμό με τη μέθοδο του καθορισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης (IRR). Για την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών απαιτείται αρχικά ο καθορισμός των οικονομικών στοιχείων του προβλήματος καθώς και ο καθορισμός των οικονομικών παραμέτρων της εγχώριας ενεργειακής αγοράς. Για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης απαιτείται ο καθορισμός των παρακάτω παραμέτρων:

- Χρονικός ορίζοντας αξιολόγησης της επένδυσης: Αν και ο ωφέλιμος χρόνος ζωής για τους μετατροπείς ισχύος τοποθετείται στα 15 με 20 χρόνια και έως και 50 χρόνια για τον υπόλοιπο εξοπλισμού (κτηριακή εγκατάσταση για την στέγαση του συστήματος) θα μελετηθούν τρεις χρονικές περίοδοι ανάλυσης βιωσιμότητας. Η πρώτη θα είναι 5, η δεύτερη 10 και η τρίτη 15 έτη ($n=5$, $n=10$, $n=15$). Ας σημειωθεί, ότι αντίστοιχες επενδύσεις αιολικών πάρκων και μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων εμφανίζουν χρόνο απόσβεσης περίπου στα επτά (7) και δέκα (10) έτη, αντίστοιχα.
- Ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης: Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης εξαρτάται από τη βέλτιστη ωριαία εγγυημένη ισχύ που θα υπολογίζει ο γενετικός αλγόριθμος και από τις εγγυημένες ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης (έχει επιλεγεί πλάνο λειτουργίας 4 ώρες ημερησίως).
- Συμμετοχή απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας στην ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης: Η συμμετοχή της απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας στην ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση μελέτης γιατί η παραγωγή της εγκατάστασης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος του μετατροπέα ισχύος, ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης και αρκετές

άλλες παραμέτρους οι οποίες θα αναλυθούν στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση το υπόλοιπο ποσοστό συμμετοχής θα συμπληρώνεται από την προμηθευόμενη ενέργεια που θα αγοράζεται από το δίκτυο στην προσυμφωνημένη τιμή c_1 (€/kWh).

- Παράμετροι εγχώριας οικονομίας: Από τη διερεύνηση των διαθέσιμων επίσημων ιστορικών στοιχείων της εγχώριας οικονομίας και από προβλέψεις που αφορούν τη μεσοπρόθεσμη συμπεριφορά των οικονομικών δεικτών της ευρωπαϊκής οικονομίας, ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός g (%) κατά τη χρονική διάρκεια της ανάλυσης λαμβάνεται ίσος με 3% και το αντίστοιχο κόστος του χρήματος I (%) λαμβάνεται ίσο με 8%. Παράλληλα, αναμένεται μια μέση ετήσια ανατίμηση e (%) της ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 2%. Τέλος, ο ετήσιος συντελεστής συντήρησης των συσκευών m (%), λαμβάνεται ίσος με 1.5% επί της τιμής αγοράς.
- Διάθεση εγγυημένης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής: Η τιμή διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας στο τοπικό δίκτυο τις ώρες υψηλής ζήτησης αποτελεί μια από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος, καθορίζοντας σε σημαντικό βαθμό και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπογραμμισθεί ότι σημαντικό κόστος (λειτουργικό και επενδυτικό) της επένδυσης επιβάλλεται από την προϋπόθεση παροχής εγγυημένης ισχύος και ενέργειας στο δίκτυο τις ώρες αιχμής (π.χ. αγορά ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας επιπλέον της απορριπτόμενης από τα αιολικά πάρκα, αριθμός συσσωρευτών, αριθμός μετατροπέων ισχύος κ.λπ.), με άμεσο στόχο να ανακουφισθεί το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο από τη ξαφνική αύξηση ζήτησης και να μειωθεί η ανάγκη λειτουργίας των υψηλού κόστους μονάδων παραγωγής (π.χ. αεριοστρόβιλοι). Στα πλαίσια αυτά η παρεχόμενη τιμή αγοράς θα πρέπει να αντανakλά το σύνολο των ωφελημάτων που παρέχει η εγκατάσταση στο δίκτυο σε ώρες υψηλής κατανάλωσης. Βάσει των ανωτέρω στην συγκεκριμένη περίπτωση θα μελετηθούν πέντε διαφορετικές τιμές πώλησης c_0 ($c_0 =$

0,1 €/kWh, $c_0 = 0,13$ €/kWh, $c_0 = 0,29$ €/kWh, $c_0 = 0,35$ €/kWh και τέλος $c_0 = 0,45$ €/kWh).

- Τιμή προμήθειας συμπληρωματικής ενέργειας: Από την προηγηθείσα ανάλυση και λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς του ανέμου και των μη προβλέψιμων περικοπών αιολικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, σε συνδυασμό με τη δέσμευση παροχής συγκεκριμένης ισχύος σε προκαθορισμένες χρονικές περιόδους από την παρούσα εγκατάσταση, είναι απαραίτητη η προμήθεια πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας, ως συμπλήρωμα της απορροφούμενης ενέργειας από την απορριπτόμενη των αιολικών πάρκων. Η ενέργεια αυτή είναι δυνατόν να προέρχεται από την παραγωγή των άλλων αιολικών πάρκων ή από το ίδιο το ηλεκτρικό δίκτυο τις ώρες χαμηλής ζήτησης (αποκλείονται ώρες αιχμής). Για τον ορθότερο συνυπολογισμό της εν λόγω παραμέτρου στην ανάλυση βιωσιμότητας, εκφράζεται η τιμή της c_1 σαν ποσοστό της τιμής διάθεσης της εγγυημένης ενέργειας στο δίκτυο, οπότε ο λόγος τιμή προμήθειας συμπληρωματικής ενέργειας/τιμή πώλησης της εγγυημένης ενέργειας αποτελεί την κύρια μεταβλητή της ανάλυσης που ακολουθεί, δηλαδή $\gamma = c_1/c_0$. Κατ' αυτό τον τρόπο θα καθορίζεται η τιμή προμήθειας συμπληρωματικής ενέργειας με μακροχρόνιο συμβόλαιο με τους προμηθευτές (Δ.Ε.Η., άλλα αιολικά πάρκα) και θα προκύπτει η τιμή πώλησης εγγυημένης ενέργειας έτσι ώστε ο λόγος γ να αντιστοιχεί στην τιμή εκείνη που θα εξασφαλίζει, με βάση την επιδότηση του έργου, τη βιωσιμότητα της επένδυσης.
- Ύψος επιδότησης εγκατάστασης: Η προτεινόμενη μελέτη αποτελεί μια εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιορίζοντας το περιβαλλοντικό και το μακροοικονομικό κόστος από τη λειτουργία συμβατικών θερμικών σταθμών με χρήση εισαγόμενων και ρυπογόνων υγρών καυσίμων. Συνεπώς, είναι λογικό να τύχει επιδότησης ανάλογης αυτής που απολαμβάνουν αντίστοιχοι σταθμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βάσει των ανωτέρω θα μελετηθούν τρία διαφορετικά ποσοστά επιδότησης γ ($\gamma = 0\%$, $\gamma = 30\%$ και $\gamma = 50\%$).

6.1 Μέθοδος προσδιορισμού χρόνου απόσβεσης

Για τον προσδιορισμό του χρόνου απόσβεσης n^* της εγκατάστασης λαμβάνεται υπόψη το καθιερωμένο στη διεθνή βιβλιογραφία μοντέλο του έντοκου χρόνου απόσβεσης, βάσει του οποίου τη χρονική στιγμή της απόσβεσης των επενδυμένων κεφαλαίων η διαφορά μεταξύ των έντοκων συνολικών εσόδων της επένδυσης R_n , με το άθροισμα του αρχικά επενδυμένου κεφαλαίου IC_n (συνυπολογίζοντας το ετήσιο κόστος του χρήματος) των εξόδων συντήρησης και λειτουργίας FC_n , του κόστους προμήθειας συμπληρωματικής ηλεκτρικής EC_1 , είναι μηδέν. Σημειώνεται ότι το κόστος προμήθειας συμπληρωματικής ενέργειας EC_1 χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση του μη-αυτόνομου συστήματος. Ο υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης για το αυτόνομο σύστημα γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$IC_n + FC_n - R_n = 0, \text{ για } n = n^* \quad (6.1)$$

Οι παράμετροι της εξίσωσης (6.1) αναλύονται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Ο υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης για το μη-αυτόνομο σύστημα γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$IC_n + FC_n + EC_1 - R_n = 0, \text{ για } n = n^* \quad (6.2)$$

Οι παράμετροι της εξίσωσης (6.2) αναλύονται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

6.2 Μέθοδος Προσδιορισμού Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται, είναι η μέθοδος του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης για δεκαετή και δεκαπενταετή περίοδο λειτουργίας. Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον καθιερωμένη κατά την αξιολόγηση επενδύσεων από τραπεζικούς και κρατικούς φορείς. Βάσει της υφιστάμενης

θεωρίας, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR) μιας ενεργειακής επένδυσης μετά από προκαθορισμένο χρόνο απρόσκοπτης λειτουργίας της εγκατάστασης προκύπτει όταν μηδενισθεί η καθαρά παρούσα αξία της επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα, η καθαρά παρούσα αξία (NPV) της επένδυσης προσδιορίζεται συγκρίνοντας την παρούσα αξία των καθαρών χρηματορροών της επένδυσης (έσοδα μείον έξοδα και φόρους) με το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο μείον την παρούσα τιμή της υπολείπουσας αξίας της επένδυσης. Ο υπολογισμός του εσωτερικού βαθμού απόδοσης για το αυτόνομο σύστημα γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$NPV = IC_n + FC_n - R_n \quad (6.3)$$

όπου ο συντελεστής αναγωγής των μελλοντικών χρηματορροών στο παρόν i τίθεται ίσος με IRR όταν το $NPV=0$. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή θα ισχύει:

$$NPV = 0 \text{ για } i = IRR \quad (6.4)$$

Ο υπολογισμός του εσωτερικού βαθμού απόδοσης για το μη-αυτόνομο σύστημα γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

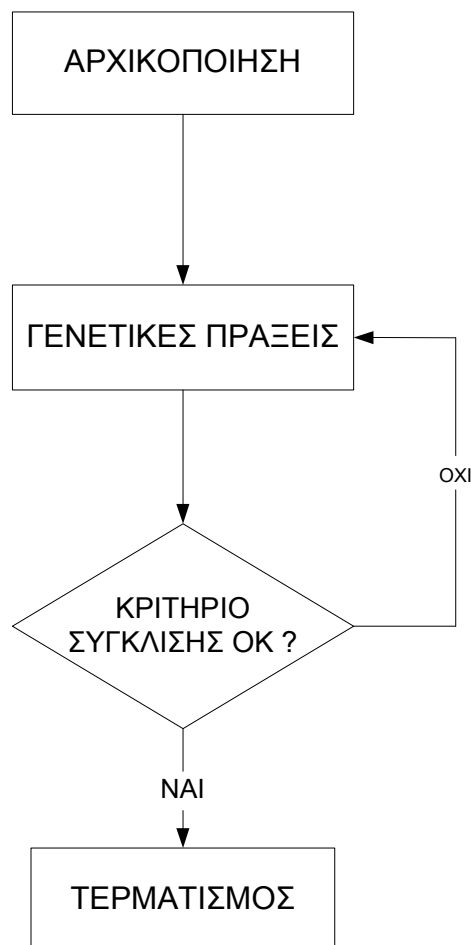
$$NPV = IC_n + FC_n + EC_1 - R_n \quad (6.5)$$

όπου ο συντελεστής αναγωγής των μελλοντικών χρηματορροών στο παρόν i τίθεται ίσος με IRR όταν το $NPV=0$. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή θα ισχύει:

$$NPV = 0 \text{ για } i = IRR \quad (6.6)$$

7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ

Το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου απεικονίζεται συνοπτικά στο σχήμα 6.1. Υλοποιείται μια ρουτίνα αρχικοποίησης και εν συνεχεία ακολουθούν οι γενετικές πράξεις. Η λήξη του αλγορίθμου συμβαίνει όταν ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού.



Σχήμα 6.1 Συνοπτική παρουσίαση του γενετικού αλγορίθμου

Οι μεταβλητές που λαμβάνουν μέρος στη βελτιστοποίηση του προβλήματος είναι ο συνολικός αριθμός των συστοιχιών συσσωρευτών και η ωριαία εγγυημένη ισχύς. Τα χρωμοσώματα του αλγορίθμου περιλαμβάνουν δύο γονίδια. Ένα τέτοιο χρωμόσωμα θα έχει την μορφή $c_1 = [N_3|N_2]$, όπου N_3 είναι ο συνολικός αριθμός των συστοιχιών των συσσωρευτών και N_2 είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς. Στα χρωμοσώματα δεν υπάρχει ο αριθμός των

μετατροπών ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί ο τελικός τους αριθμός καθορίζεται μονοσήμαντα από την ωριαία εγγυημένη ισχύ του συστήματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που οι μετατροπείς ισχύος δεν συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία των πράξεων του γενετικού αλγορίθμου, συμμετέχουν έμμεσα αφού το κόστος τους περιλαμβάνεται στην συνολική συνάρτηση κόστους. Σημειώνεται ότι κάθε μετατροπέας ισχύος πρέπει να έχει συνδεδεμένους τουλάχιστον n_{bs} συσσωρευτές για να λειτουργήσει. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για το αυτόνομο σύστημα και έχει στόχο τη βελτιστοποίηση του κόστους. Περιλαμβάνει το αρχικό κεφάλαιο που πρέπει να επενδυθεί λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος του χρήματος, το κόστος συντήρησης των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το σύστημα και τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για το μη-αυτόνομο σύστημα και είναι ίδια με την πρώτη με τη μόνη διαφορά ότι περιλαμβάνει και το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας από το δίκτυο.

Η τρίτη αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για το μη-αυτόνομο σύστημα και στόχο έχει την ελαχιστοποίηση του λόγου της ετήσιας προμηθευόμενης (συμπληρωματικής) ενεργείας προς την ετήσια (εγγυημένη) παραγόμενη ενέργεια.

7.1 Αντικειμενική συνάρτηση για αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του κόστους

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει την παρακάτω μορφή:

$$g(N_1, N_2, N_3) = IC_n + FC_n - R_n \quad (7.1)$$

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$IC_n = (1 - \gamma) \cdot IC_0 \cdot (1 + i)^n$$

όπου IC_n είναι το κεφάλαιο που θα επενδυθεί στην αρχή για την αγορά όλων των απαραίτητων στοιχείων του συστήματος. Το γ είναι το ύψος της

επιδότησης, το i είναι το αντίστοιχο κόστος χρήματος και λαμβάνεται ίσο με 8%, n είναι ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης και το IC_0 είναι το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$IC_0 = N_3 \cdot n_{bs} \cdot C_3 + N_1 \cdot C_5 + N_1 \cdot C_{cost} \quad (7.3)$$

όπου N_3 είναι ο συνολικός αριθμός των κλάδων των συσσωρευτών, n_{bs} είναι οι συσσωρευτές που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά σε έναν κλάδο συσσωρευτών, C_3 είναι το κόστος αγοράς ενός συσσωρευτή, N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος, C_5 είναι το κόστος αγοράς ενός μετατροπέα ισχύος και C_{cost} είναι το κόστος αγοράς της μονάδας ελέγχου των μετατροπέων ισχύος. Το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_n = [N_3 \cdot n_{bs} \cdot C_{m3} + N_1 \cdot C_{m5}] \cdot (1+g) \cdot (1+i)^n \cdot f_I + B_c + IN_c \quad (7.4)$$

όπου N_3 είναι ο συνολικός αριθμός των συστοιχιών των συσσωρευτών, n_{bs} είναι οι συσσωρευτές που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά σε έναν κλάδο συσσωρευτών, C_{m3} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης ενός συσσωρευτή, N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος, C_{m5} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης ενός μετατροπέα ισχύος και n είναι ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης. Το g είναι ο ετήσιος πληθωρισμός και λαμβάνεται ίσος με 3%, i είναι το ετήσιο κόστος χρήματος και το f_I υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f_I = \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{i-g} \quad (7.5)$$

Το B_c είναι το κόστος που προκύπτει από την ανάγκη για αντικατάσταση των συσσωρευτών και δίνεται από την εξίσωση:

$$B_c = C_3 \cdot N_3 \cdot nbs \cdot \left[\sum_{j=k^*} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \cdot (1+i)^n \quad (7.6)$$

Επειδή οι συσσωρευτές αλλάζουν συγκεκριμένες χρονιές, το άθροισμα υπολογίζεται μόνο εκείνες στις οποίες χρειάζεται αλλαγή. Για παράδειγμα, εάν οι συσσωρευτές έχουν χρόνο ζωής 4 χρόνια και η μελέτη γίνεται για 15 χρόνια το k^* θα πάρει τις τιμές 4, 8 και 12. Σημειώνεται ότι ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών υπολογίζεται κάθε φορά που γίνεται η προσομοίωση και εξαρτάται από τον τύπο του συσσωρευτή (νικελίου καδμίου ή μολύβδου οξέος) και από την ωριαία εγγυημένη ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης προστίθενται τα αμπερώρια που χρησιμοποιούνται από τον συσσωρευτή και στο τέλος του έτους τα συνολικά αμπερώρια που μπορεί να δώσει ο συσσωρευτής διαιρούνται με την ποσότητα που υπολογίστηκε. Σημειώνεται ότι τα συνολικά αμπερώρια που μπορεί να δώσει ο συσσωρευτής δίνονται ως δεδομένο εισόδου και υπολογίζονται με τη μέθοδο που ορίστηκε στην παράγραφο 2.4.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και το κόστος IN_c το οποίο αναπαριστά το κόστος επισκευής των μετατροπέων ισχύος και δίνεται από την εξίσωση:

$$IN_c = N_1 \cdot R_{cost} \cdot \left[\sum_{j=k^*} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \cdot (1+i)^n \quad (7.7)$$

όπου R_{cost} είναι το κόστος για την επισκευή του μετατροπέα ισχύος. Το k^* υπολογίζεται ως εξής: Διαβάζεται από το αρχείο που έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (MTBF). Στην συνέχεια μετατρέπονται τα έτη για τα οποία γίνεται η μελέτη σε ώρες και διαιρούνται με τον μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών. Τα έντοκα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας δίνονται από τη σχέση:

$$R_n = R_0 \cdot (1+e) \cdot (1+i)^n \cdot f_{II} \quad (7.8)$$

όπου είναι e είναι η μέση ετήσια ανατίμηση της ηλεκτρικής ενέργειας και λαμβάνεται ίση με 2%, n είναι η χρονική διάρκεια της μελέτης, ο όρος f_{II} δίνεται από τη σχέση:

$$f_{II} = \frac{1 - \left(\frac{1 + e}{1 + i} \right)^n}{i - e} \quad (7.9)$$

και το R_0 δίνεται από την σχέση:

$$R_0 = E_0 \cdot c_0 = (365 \cdot 4 \cdot N_2) \cdot c_0 \quad (7.10)$$

όπου N_2 είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς και c_0 είναι η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας.

7.2 Αντικειμενική συνάρτηση για μη-αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του κόστους

Η αντικειμενική συνάρτηση περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$g(N_1, N_2, N_3) = IC_n + FC_n + EC_1 - R_n \quad (7.11)$$

Η μόνη διαφορά της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης με αυτήν του αυτόνομου συστήματος (7.1) είναι ο όρος EC_1 που αντιπροσωπεύει το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$EC_1 = \frac{P_s}{N_2 \times 4 \times 365} \cdot \frac{c_1}{c_0} \cdot R_n \quad (7.12)$$

όπου P_s είναι η προμηθευόμενη (συμπληρωματική) ενέργεια για διάρκεια ενός έτους, N_2 είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς, c_1 είναι το κόστος αγοράς για κάθε

προμηθευόμενη κιλοβατώρα, c_0 είναι η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας και R_n είναι τα έντοκα συνολικά κέρδη κατά την διάρκεια της μελέτης.

7.3 Αντικειμενική συνάρτηση για μη αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του λόγου Ετήσια προμηθευόμενη ενέργεια/ Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια

Η αντικειμενική συνάρτηση περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$g(N_2) = \frac{P_s}{N_2 \cdot 4 \cdot 365} \quad (7.13)$$

όπου P_s είναι η προμηθευόμενη (συμπληρωματική) ενέργεια για διάρκεια ενός έτους και N_2 είναι η ωριαία εγγυημένη ισχύς.

7.4 Μετασχηματισμοί των αντικειμενικών συναρτήσεων

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις (7.1) και (7.11) υπολογίζουν το κόστος για το αυτόνομο και το μη-αυτόνομο σύστημα, αντίστοιχα. Η βελτιστοποίηση του κόστους είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης συνάρτησης. Λαμβάνουμε το μετασχηματισμό της συνάρτησης g ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$f(N_1, N_2, N_3) = \begin{cases} C_{\max} - g(N_1, N_2, N_3), & \text{αν } C_{\max} - g(N_1, N_2, N_3) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.14)$$

όπου $f(N_1, N_2, N_3)$ είναι η συνάρτηση προσαρμογής του γενετικού αλγορίθμου και χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής για την εκλογή των χρωμοσωμάτων κάποια από τα οποία θα συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης και η ποσότητα C_{\max} είναι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g και δεν λαμβάνεται σταθερά αλλά υπολογίζεται σε κάθε γενεά. Για την αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης του λόγου Ετήσια εισαγόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη ενέργεια ο μετασχηματισμός δίνεται από την εξίσωση:

$$f(N_2) = \begin{cases} C_{\max} - g(N_2), & \text{αν } C_{\max} - g(N_2) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.15)$$

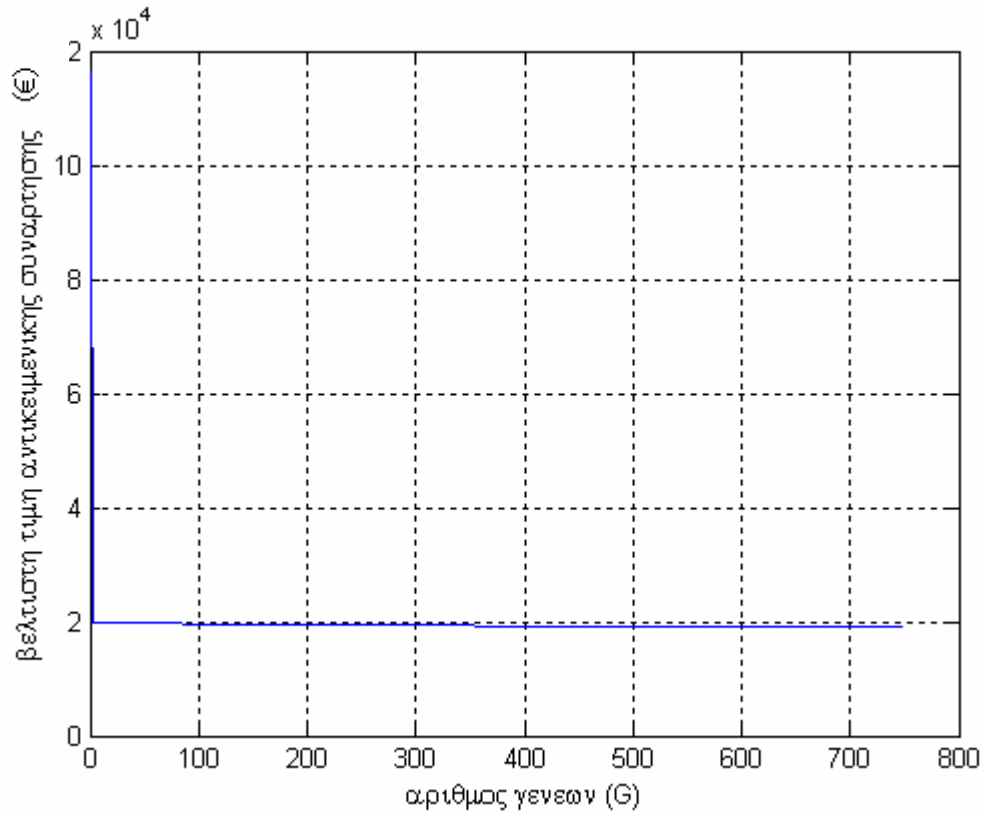
όπου $f(N_2)$ είναι η συνάρτηση προσαρμογής του γενετικού αλγορίθμου και χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής για την εκλογή των χρωμοσωμάτων κάποια από τα οποία θα συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης και η ποσότητα C_{\max} είναι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g και δεν λαμβάνεται σταθερά αλλά υπολογίζεται σε κάθε γενεά. Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι:

- Ο αριθμός των μετατροπών ισχύος πρέπει να είναι μεγαλύτερος του ενός ($N_1 \geq 1$),
- Η εγγυημένη ισχύς πρέπει να είναι σταθερή κάθε μέρα του έτους και μεγαλύτερη του μηδενός ($N_2 > 0$) και
- Ο αριθμός των κλάδων των συσσωρευτών πρέπει να είναι μεγαλύτερος του ενός ($N_3 \geq 1$).

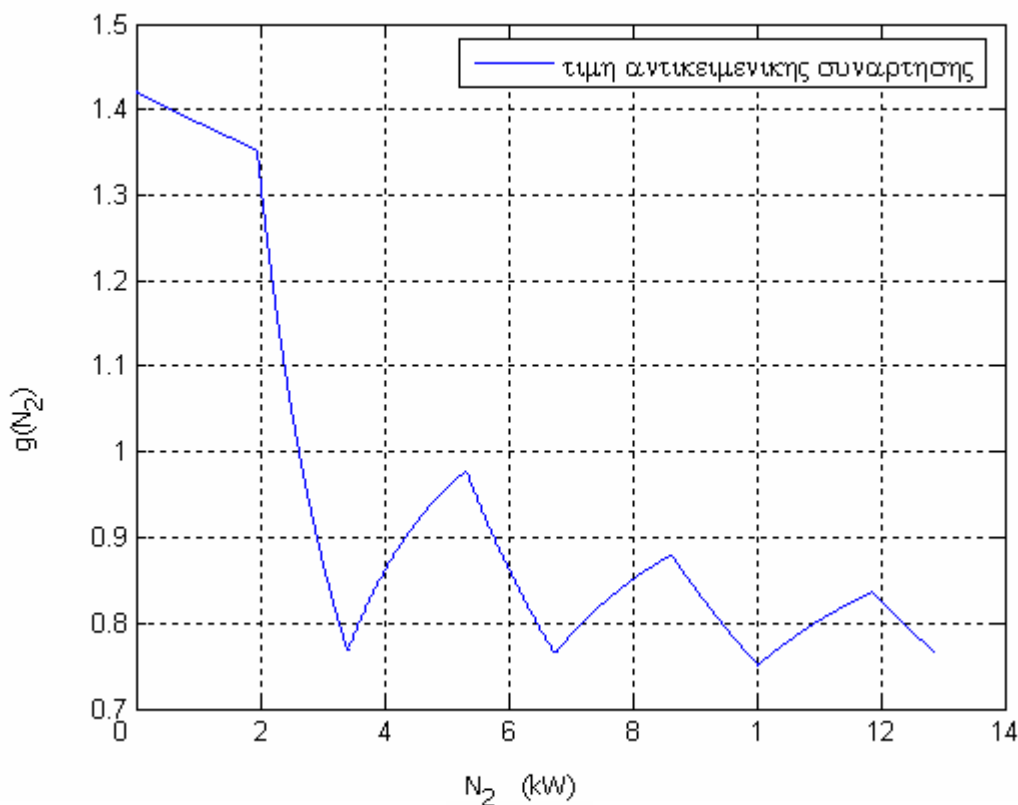
8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε κάθε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε με τα εξής χαρακτηριστικά: πλήθος χρωμοσωμάτων ανά γενεά $N = 30$, γενιές $G = 10000$, πιθανότητα simple crossover $p_{sc} = 0.1$, πιθανότητα simple arithmetic crossover $p_{sac} = 0.1$, πιθανότητα whole arithmetic crossover $p_{wac} = 0.1$, πιθανότητα uniform mutation $p_{um} = 0.1$, πιθανότητα boundary mutation $p_{bm} = 0.03$, πιθανότητα non-uniform mutation $p_{nm} = 0.35$. Οι οικονομικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται και είναι οι ίδιες σε κάθε περίπτωση είναι: i το κόστος του χρήματος που λαμβάνεται ίσο με 8%, g ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός που λαμβάνεται ίσος με 3% και e η μέση ετησία ανατίμηση της ηλεκτρικής ενέργειας και λαμβάνεται ίση με 2%. Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι βέλτιστες λύσεις που έδωσε ο γενετικός αλγόριθμος. Σημειώνεται επίσης ότι όλες οι λύσεις που παρουσιάζονται είναι βιώσιμες, το οποίο σημαίνει ότι το συνολικό κόστος του συστήματος βγαίνει αρνητικό. Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $[g(N_1, N_2, N_3)]$ για το αυτόνομο σύστημα ($c_0=0,13\text{€/kWh}$, $\gamma=50\%$ και $n=5$) σε σχέση με τον αριθμό των γενεών. Ο γενετικός αλγόριθμος προσεγγίζει αρκετά γρήγορα την περιοχή του βέλτιστου ενώ η βέλτιστη λύση εμφανίζεται κοντά στις 180 γενεές (το διάγραμμα αφορά συνολικό αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10000). Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $g(N_2)$ που υπολογίζεται από την εξίσωση (7.13), σε σχέση με την τιμή της εγγυημένης ισχύος. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι: $N_1=1$, $N_3=1$, $c_0=0,13\text{€/kWh}$, $\gamma=0.1$, $\gamma=50\%$ και $n=5$. Σημειώνεται ότι καμία από τις τιμές δεν παραβιάζει τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Το σχήμα 8.2 δείχνει την ικανότητα του γενετικού αλγορίθμου να υπολογίζει ως βέλτιστη λύση το ολικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι κάποιο τοπικό ελάχιστο. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε με τη μέθοδο της γραμμικής αναζήτησης. Ο γενετικός αλγόριθμος χρειάζεται περίπου 1 ώρα για να υπολογίσει τη βέλτιστη λύση για μια περίπτωση, χρονική διάρκεια σημαντικά μικρότερη από τις 48 ώρες που χρειάστηκε η μέθοδος της γραμμικής αναζήτησης. Σημειώνεται ότι μια περίπτωση

περιλαμβάνει μια τιμή του n , μια τιμή του c_0 , μια τιμή του c_1 , μια τιμή του γ και μια τιμή του γ . Το λογισμικό αναπτύχθηκε σε Microsoft Visual C++ και δοκιμάστηκε σε υπολογιστή AMD Athlon XP 2.08GHz με 768MB RAM.



Σχήμα 8.1 Βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τον αριθμό των γενεών



Σχήμα 8.2 Τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $g(N_2)$ σε σχέση με την τιμή της εγγυημένης ισχύος (N_2) για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $c_0=0,13$ €/kWh, $\gamma=0,1$, $\gamma=50\%$ και 5 έτη λειτουργίας.

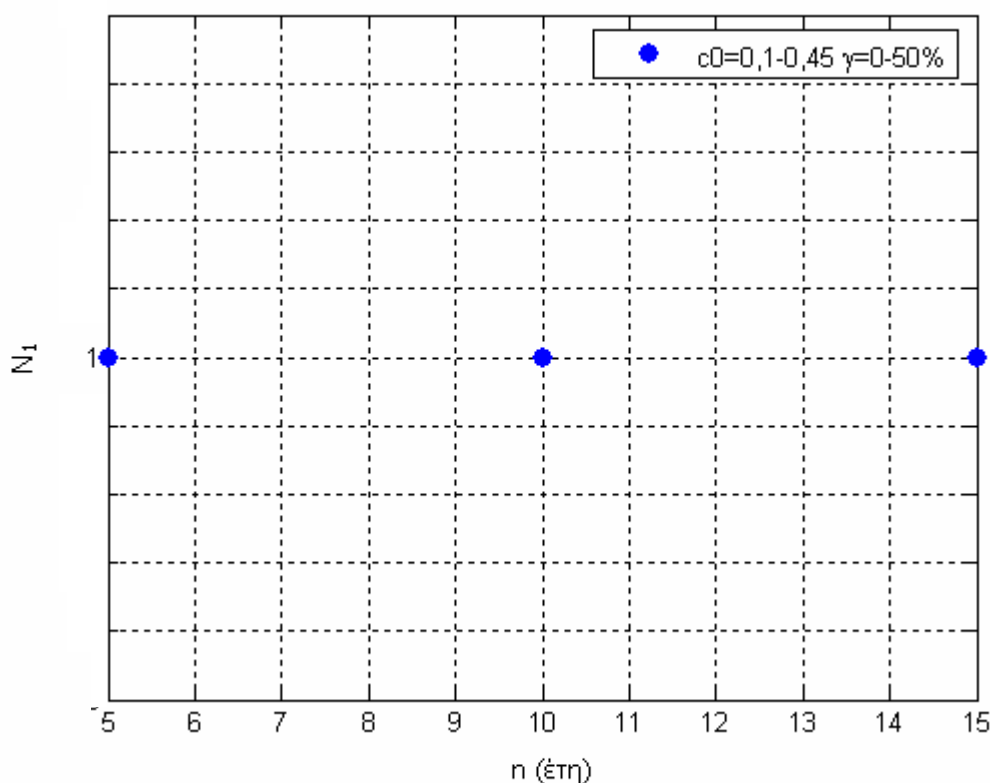
8.1 Αποτελέσματα για το αυτόνομο σύστημα

8.1.1 Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA

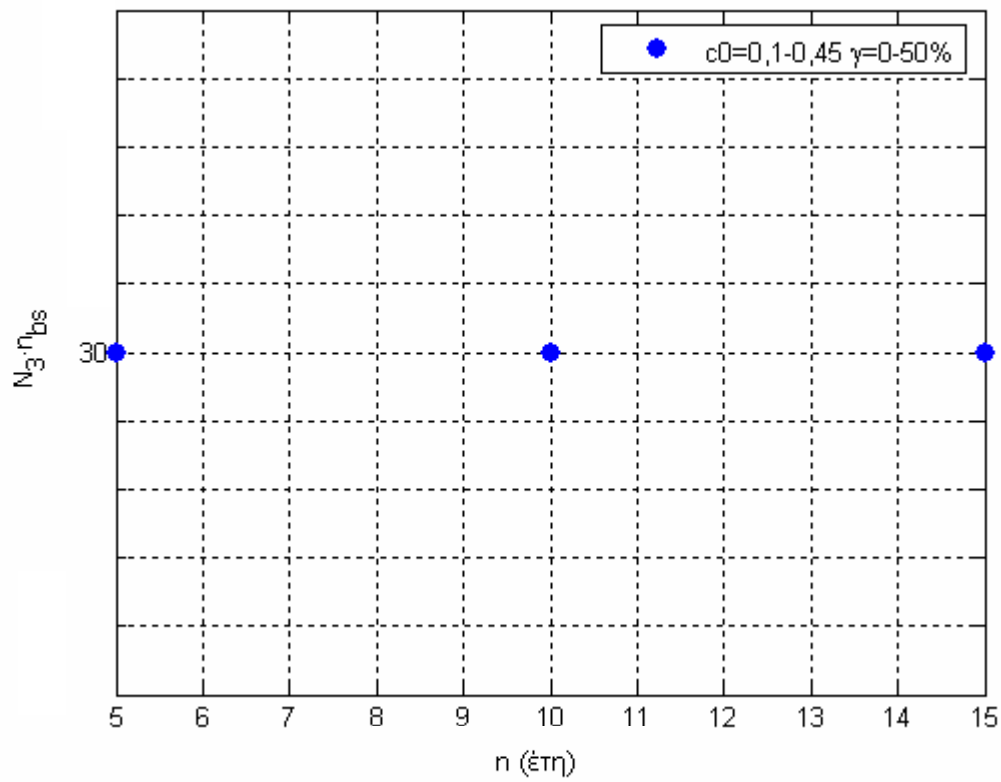
Στην παρακάτω περίπτωση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σύστημα που αποτελείται από μετατροπέα ισχύος 100kVA με τάση εισόδου 360VDC και συσσωρευτές μολύβδου οξέος χωρητικότητας 185Ah με ονομαστική τάση λειτουργίας 12V.

Στο σχήμα 8.3 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος (N_1) σε σχέση με τα έτη μελέτης. Οι τιμές που φαίνονται αφορούν όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και όλα τα ποσοστά επιδότησης. Στο σχήμα 8.4 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, για όλα τα έτη μελέτης και όλα τα ποσοστά επιδότησης. Στο σχήμα 8.5 φαίνεται η τιμή της ωριαίας

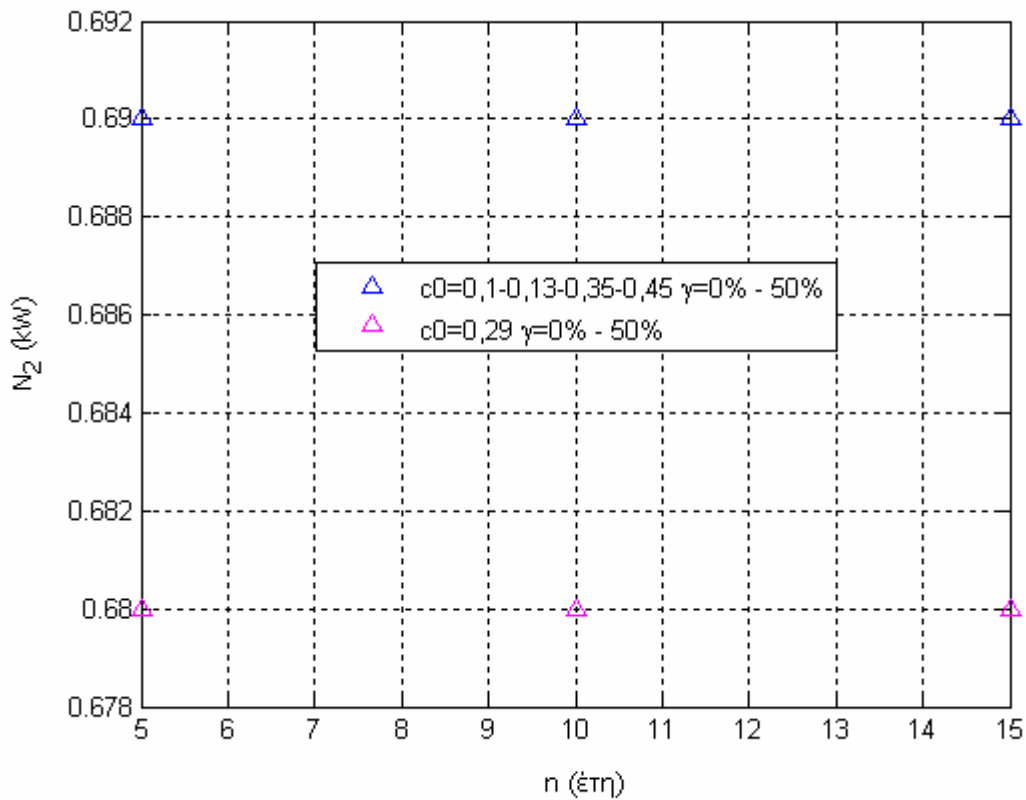
εγγυημένης ισχύος N_2 για όλες τις τιμές πώλησης και όλα τα ποσοστά επιδότησης. Στο σχήμα 8.6 φαίνεται το κόστος εγκατάστασης (IC_n) για όλες τις τιμές πώλησης και όλα τα ποσοστά επιδότησης λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος του χρήματος. Στο σχήμα 8.7 παρουσιάζεται το κόστος συντήρησης (FC_n) σε σχέση με τα έτη μελέτης. Οι τιμές αφορούν όλες τις τιμές πώλησης και όλα τα ποσοστά επιδότησης. Στο σχήμα 8.8 παρουσιάζονται τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (R_n) για όλες τις τιμές πώλησης και όλα τα ποσοστά επιδότησης. Στα σχήματα 8.9-8.13 φαίνεται το συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $c_0=0,1$ €/kWh, $c_0=0,13$ €/kWh, $c_0=0,29$ €/kWh, $c_0=0,35$ €/kWh και $c_0=0,45$ €/kWh αντίστοιχα. Από τα σχήματα 8.9-8.13 παρατηρείται ότι το σύστημα δεν δίνει βιώσιμη λύση, (η λύση θα ήταν βιώσιμη αν το ολικό κόστος έβγαине αρνητικό) το οποίο σημαίνει ότι τα έξοδα αυξάνονται με γρηγορότερο ρυθμό από τα έσοδα.



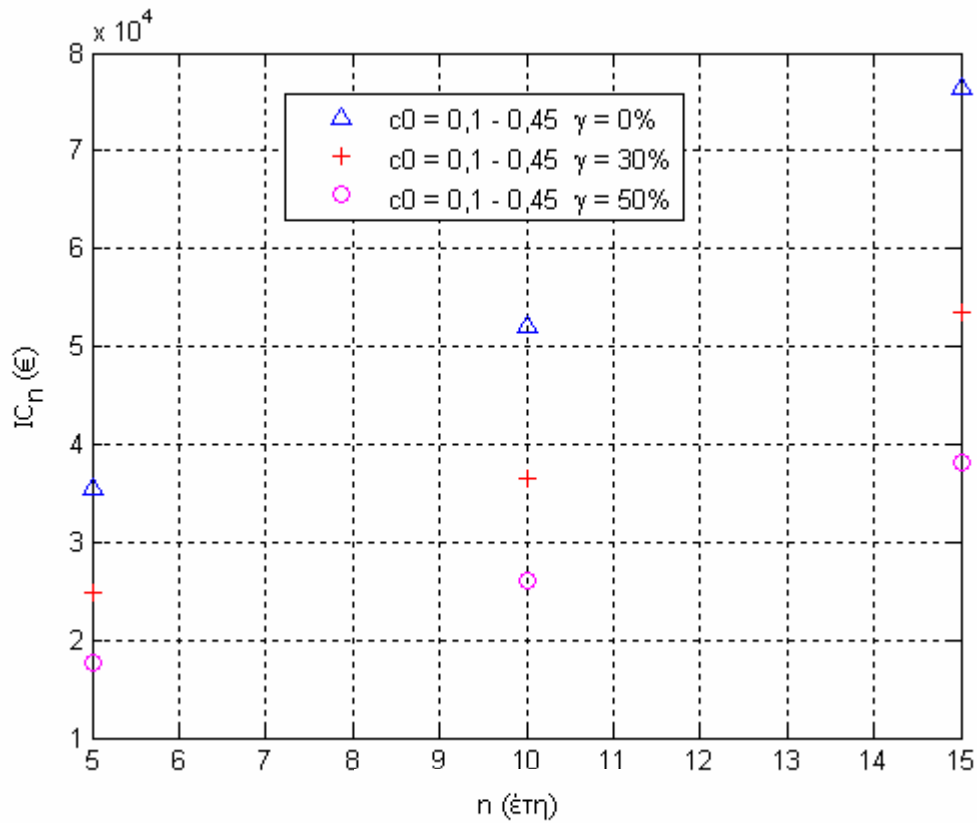
Σχήμα 8.3 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1)



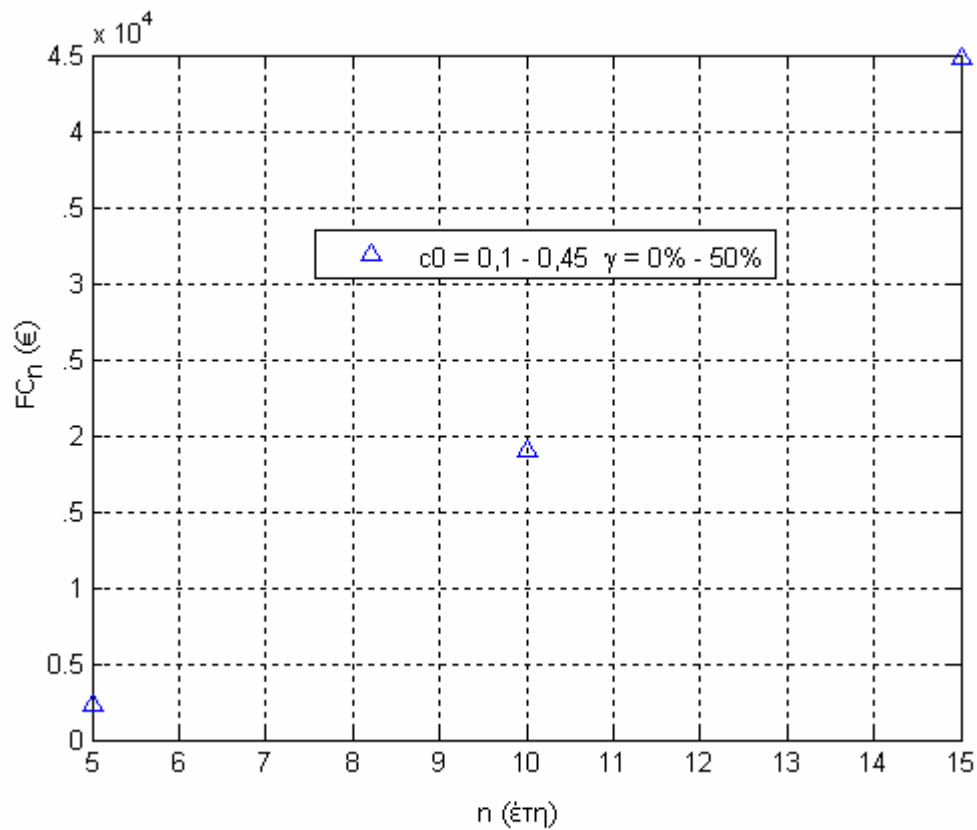
Σχήμα 8.4 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$)



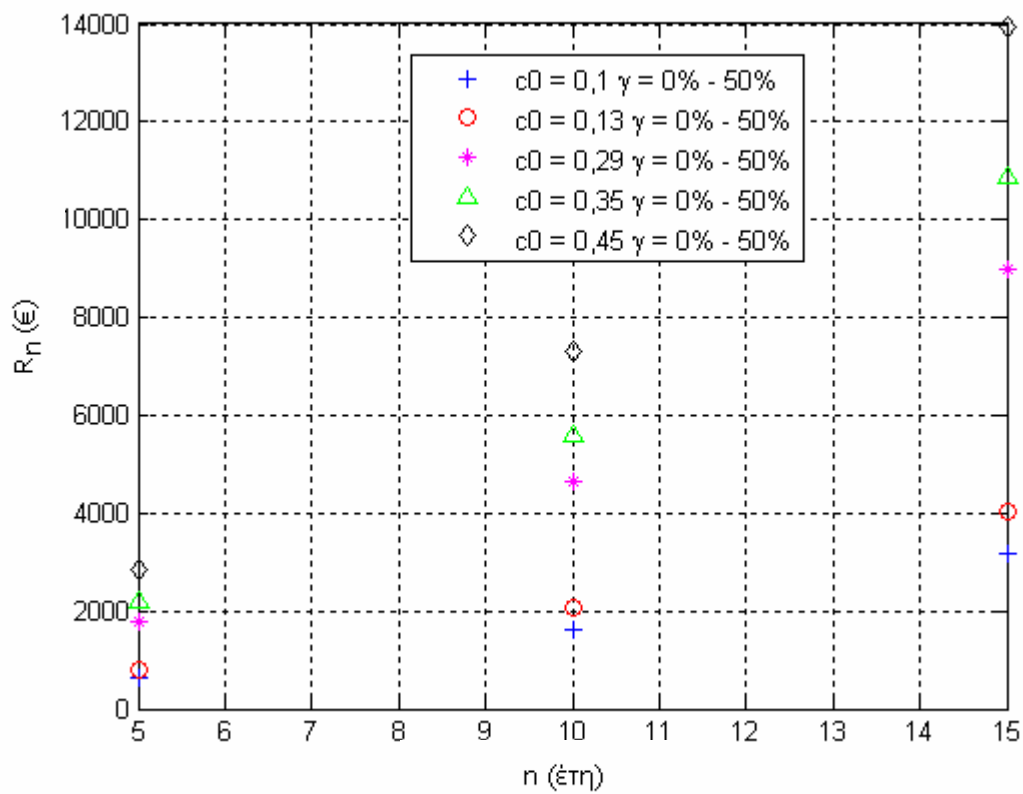
Σχήμα 8.5 Εγγυημένη ισχύς (N_2)



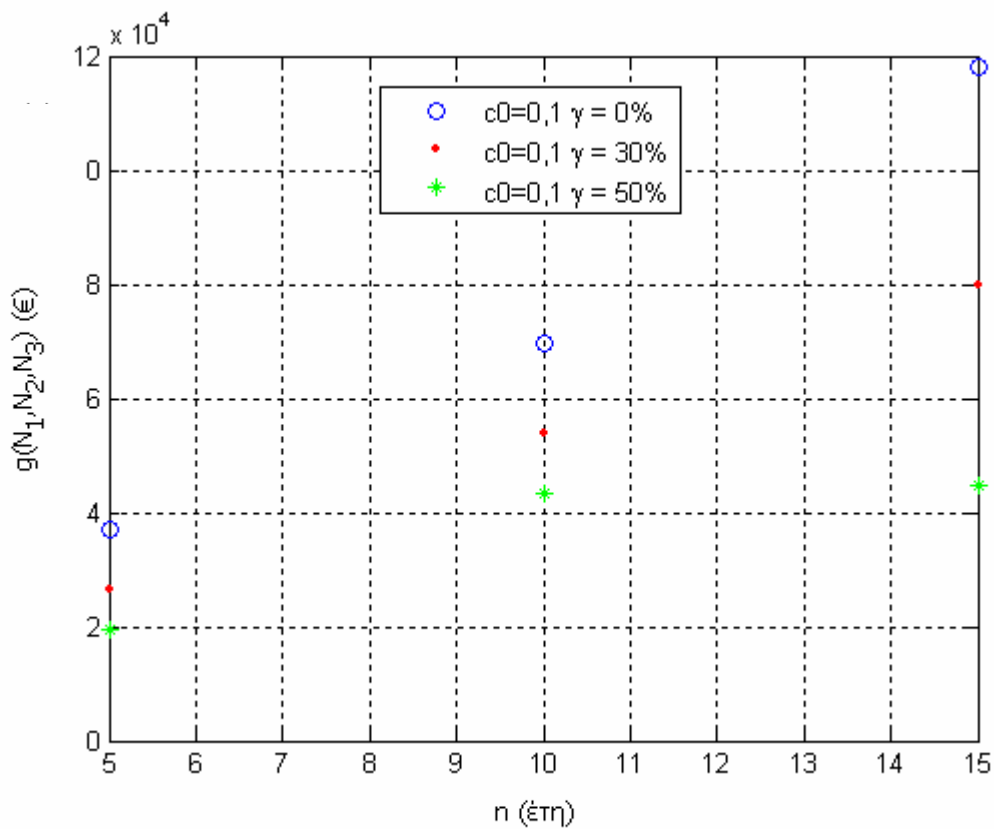
Σχήμα 8.6 Κόστος εγκατάστασης (IC_n)



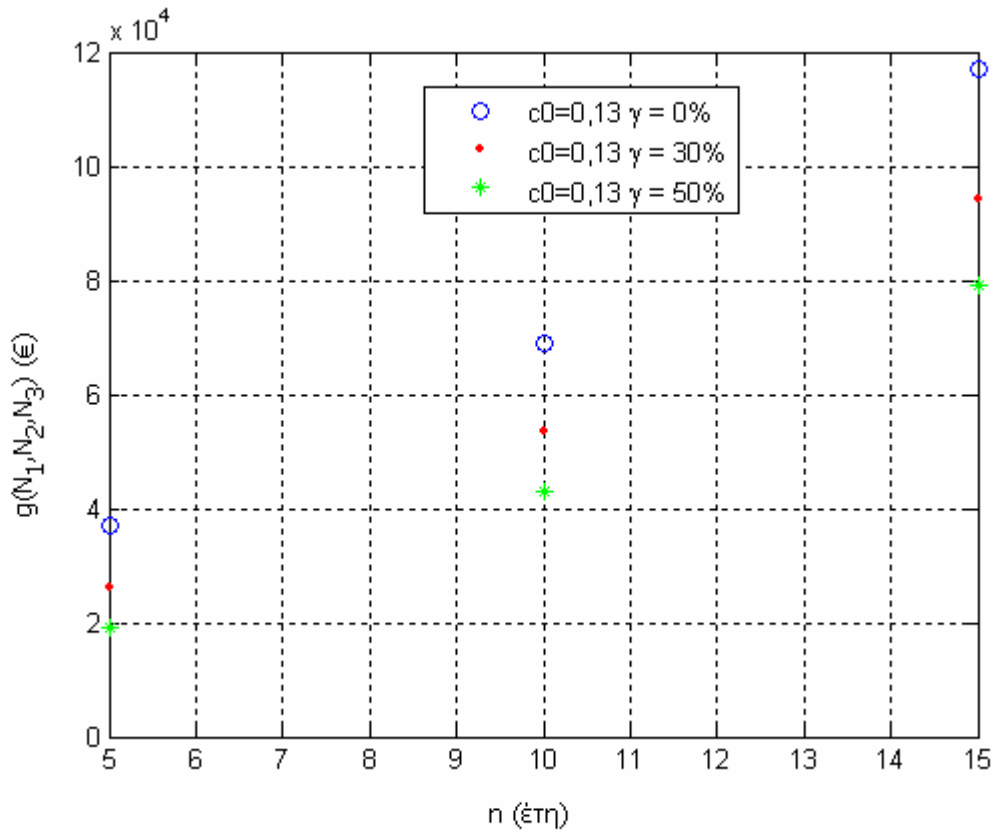
Σχήμα 8.7 Κόστος συντήρησης (Fc_n)



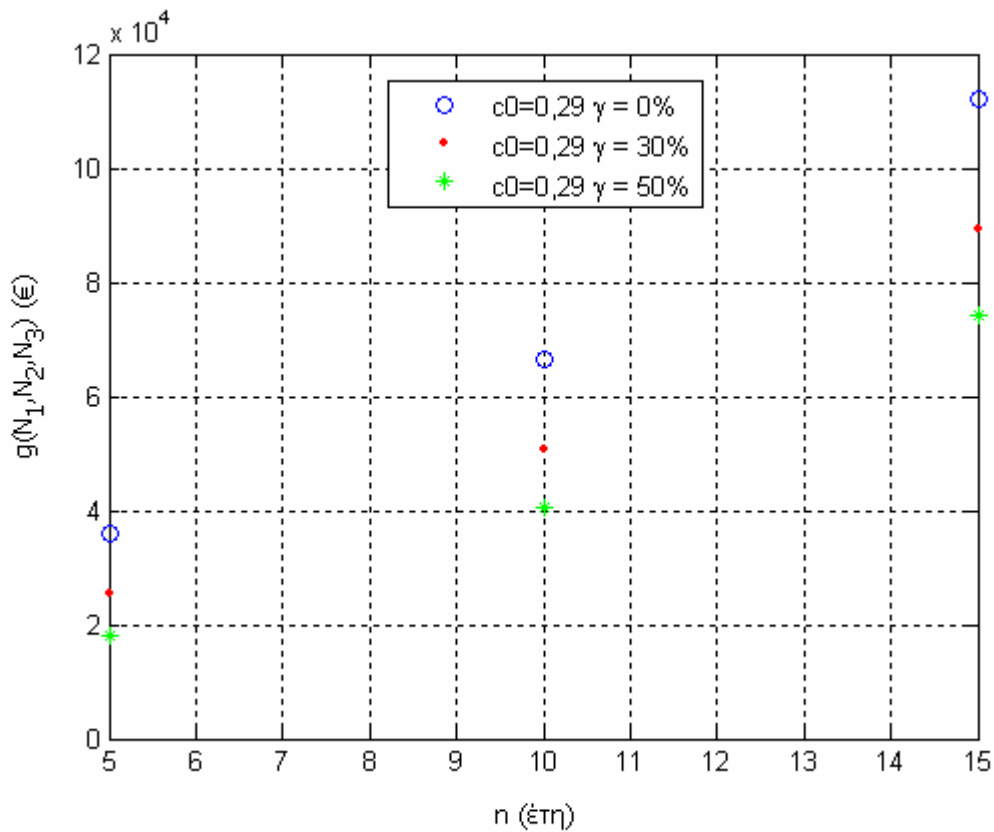
Σχήμα 8.8 Κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (R_n)



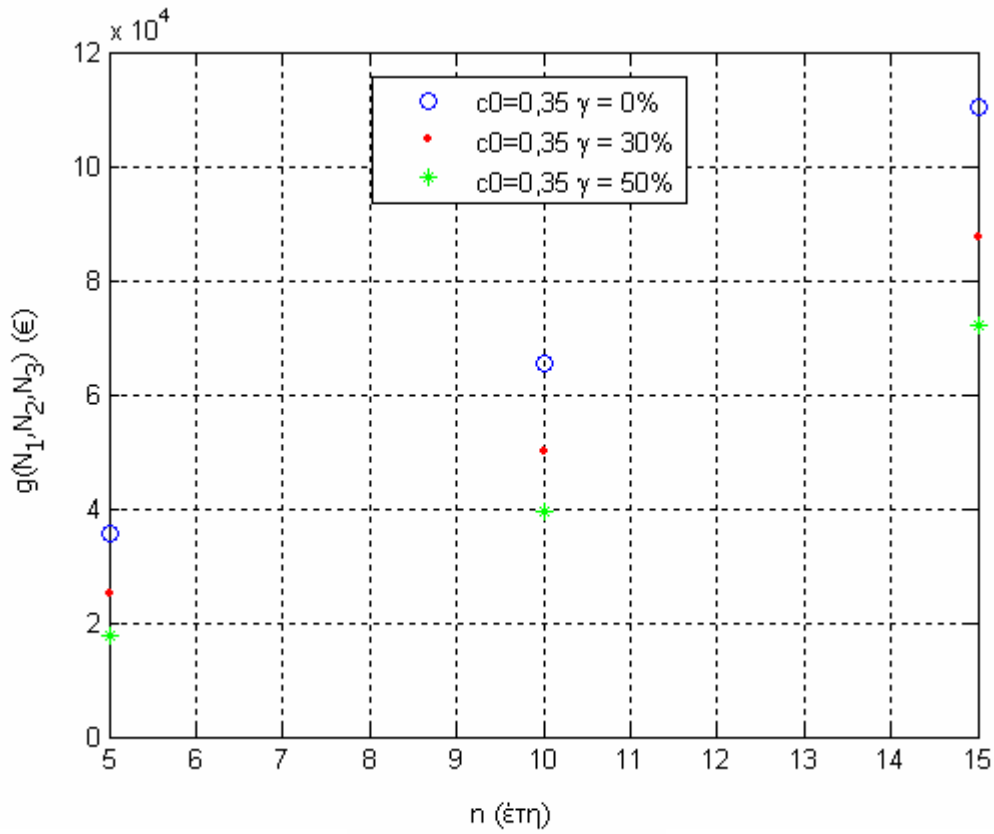
Σχήμα 8.9 Συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



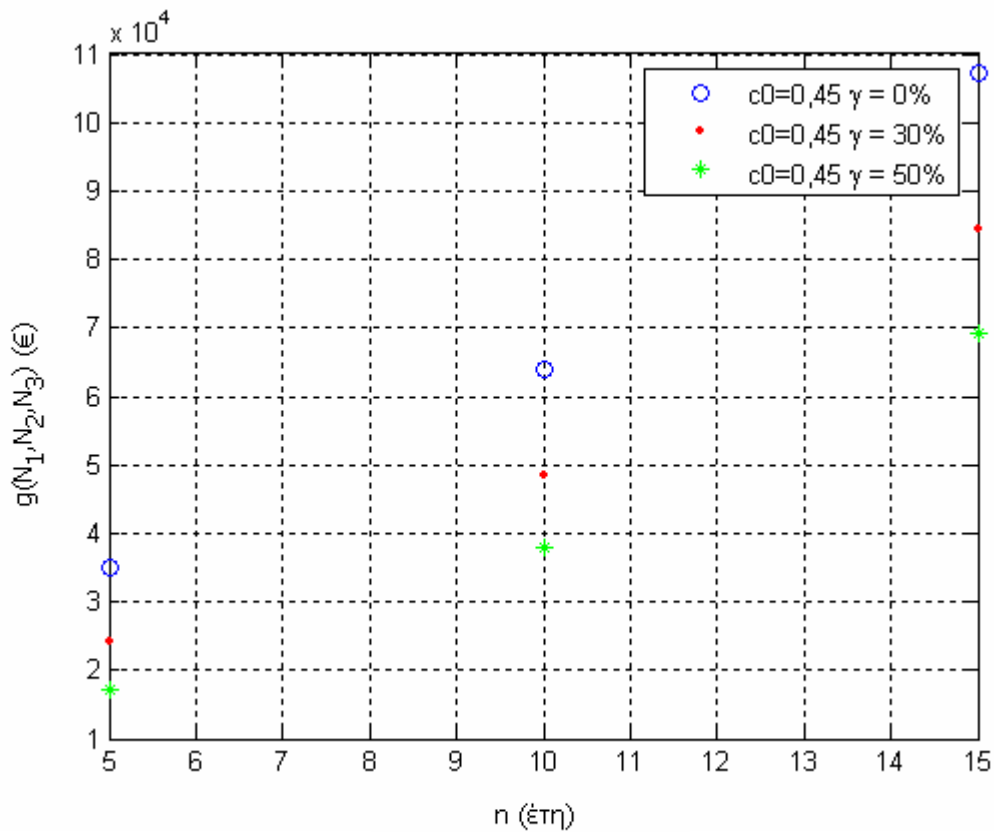
Σχήμα 8.10 Συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



Σχήμα 8.11 Συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμή πώλησης 0,29 €/kWh



Σχήμα 8.12 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμή πώλησης 0,35 €/kWh



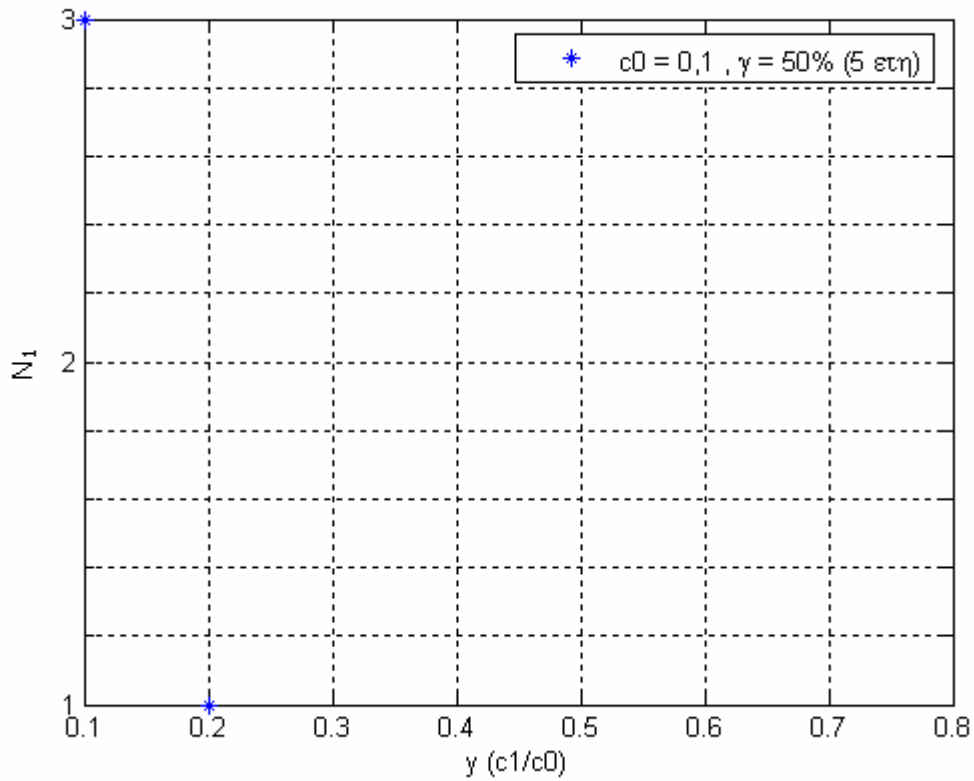
Σχήμα 8.13 Συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για τιμή πώλησης 0,45 €/kWh

8.2 Αποτελέσματα για το μη-αυτόνομο συστήματα και βελτιστοποίηση του κόστους.

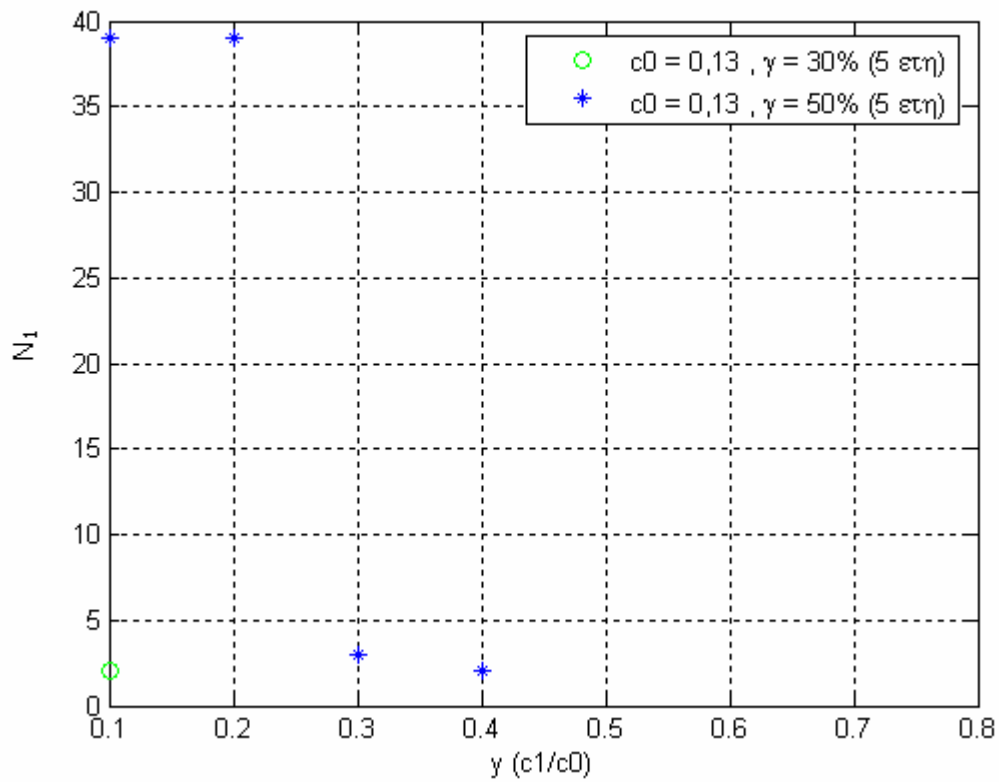
8.2.1 Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA

Στην παρακάτω διαστασιολόγηση χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος 100kVA με τάση εισόδου 360VDC και συσσωρευτές μολύβδου οξέος χωρητικότητας 185Ah με ονομαστική τάση λειτουργίας 12V. Στα σχήματα 8.14-8.26 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος (N_1) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.27-8.39 φαίνεται ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.40-8.52 παρουσιάζεται η τιμή του κόστους εγκατάστασης (IC_n) συμπεριλαμβανομένου του κόστους του χρήματος για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.53-8.65 φαίνεται η τιμή της ωριαίας εγγυημένης ισχύος (N_2) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.66-8.78 παρουσιάζεται το κόστος συντήρησης (FC_n) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.79-8.91 παρουσιάζεται το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας (EC_1) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.92-8.104 φαίνονται τα έντοκα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (R_n) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.105-8.2.117 φαίνεται το συνολικό κόστος της εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.2.118-8.2.130 παρουσιάζεται ο λόγος Ετήσια εισαγόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια (R_e), για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά

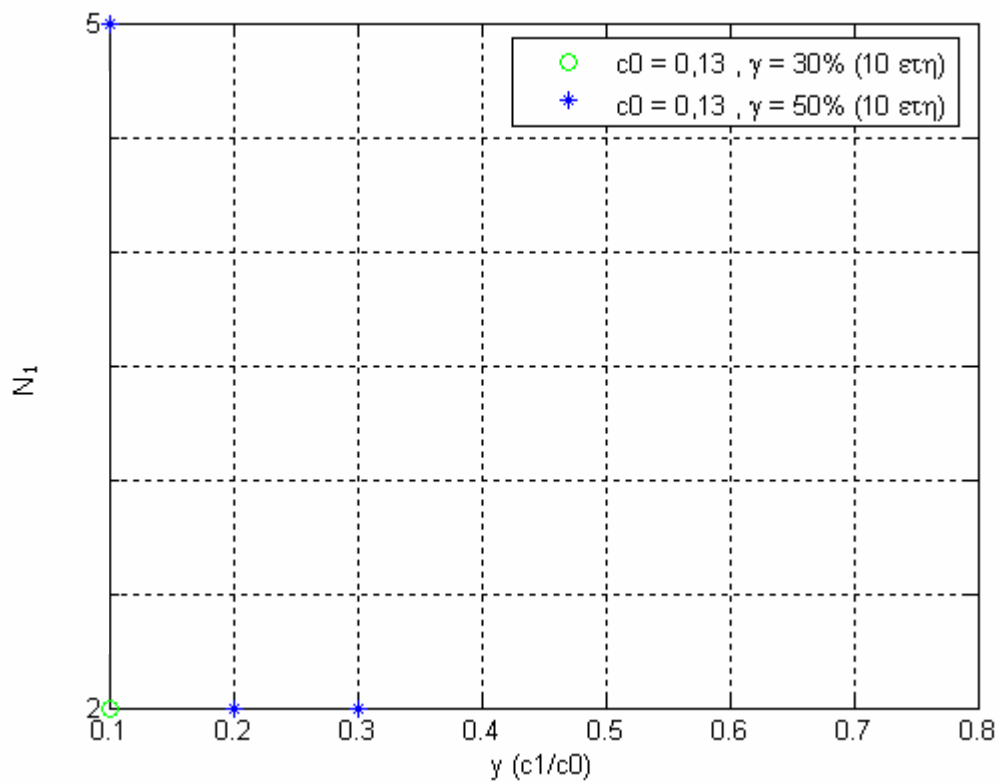
επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.131-8.141 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης (n^*). Στα σχήματα 8.142-8.145 παρουσιάζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR.



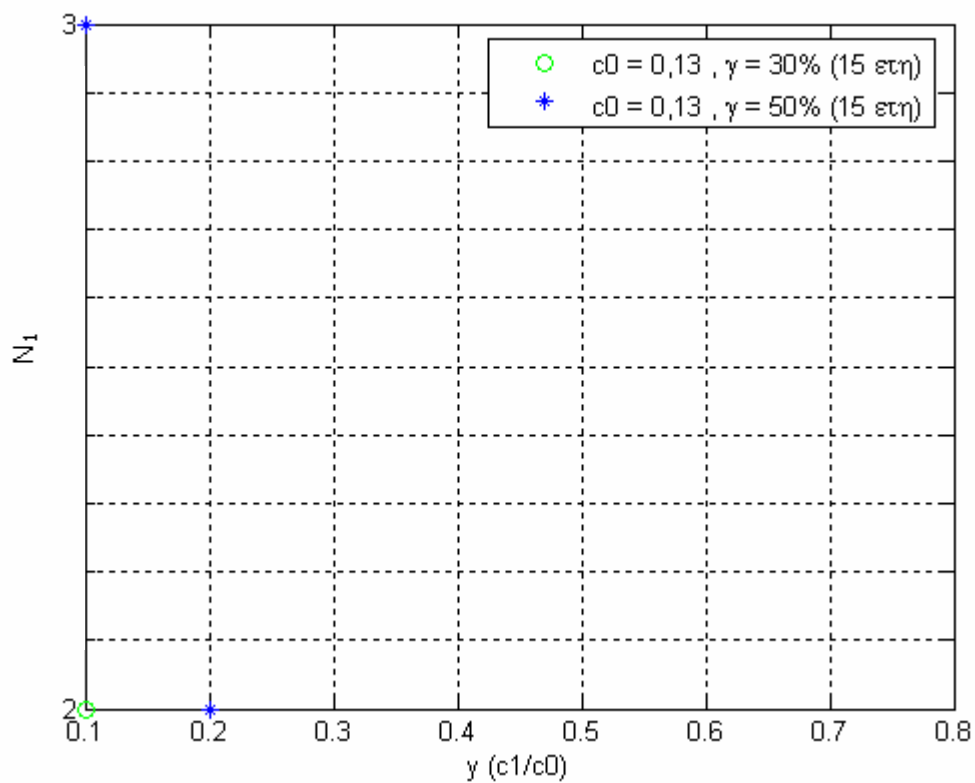
Σχήμα 8.14 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



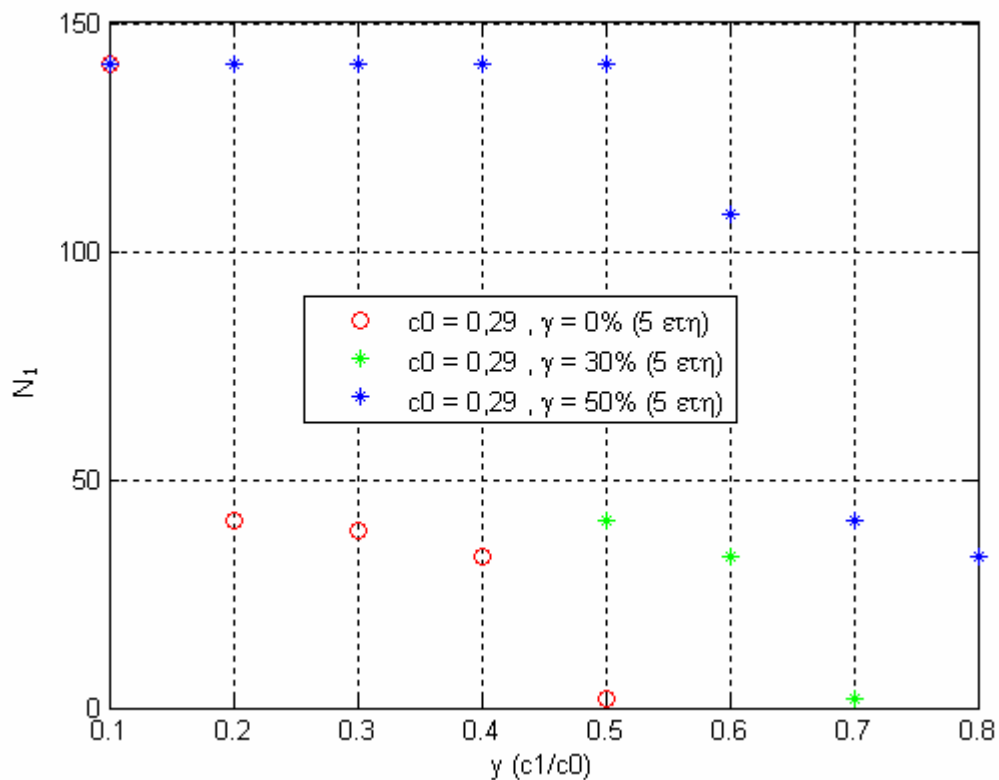
Σχήμα 8.15 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



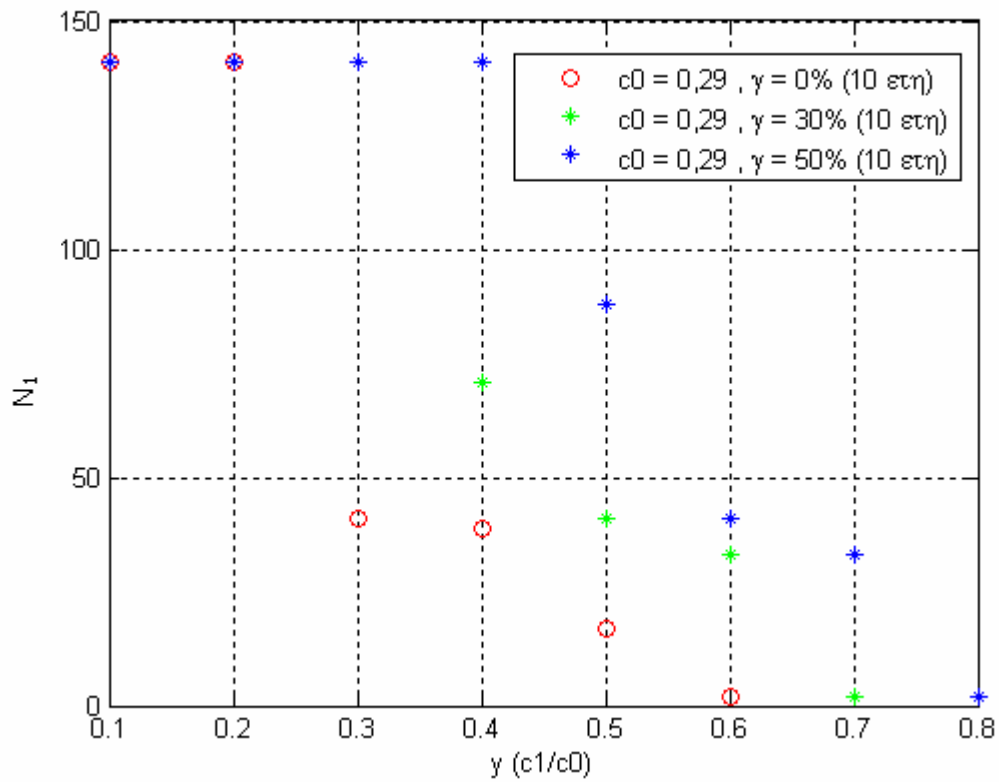
Σχήμα 8.16 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



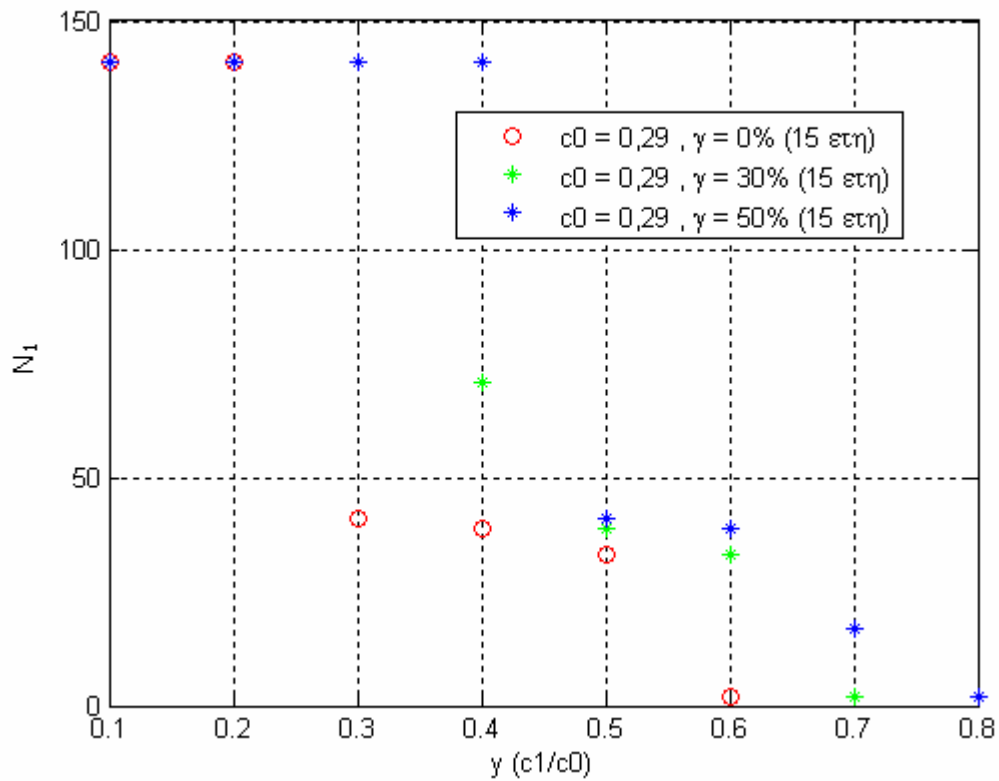
Σχήμα 8.17 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



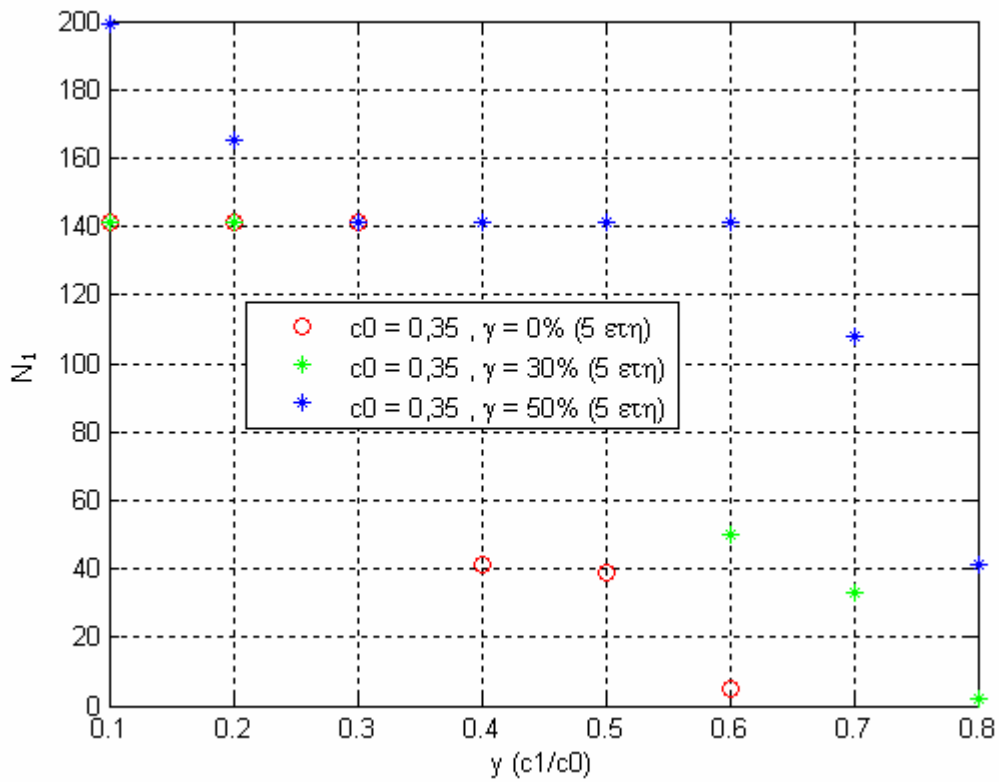
Σχήμα 8.18 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



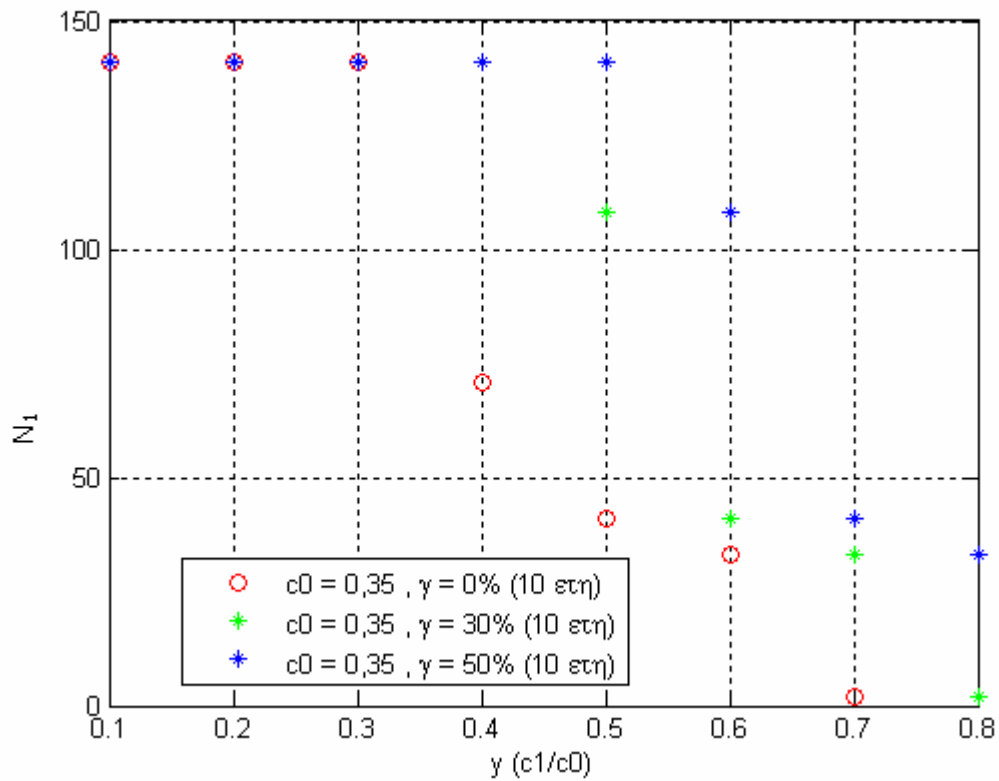
Σχήμα 8.19 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



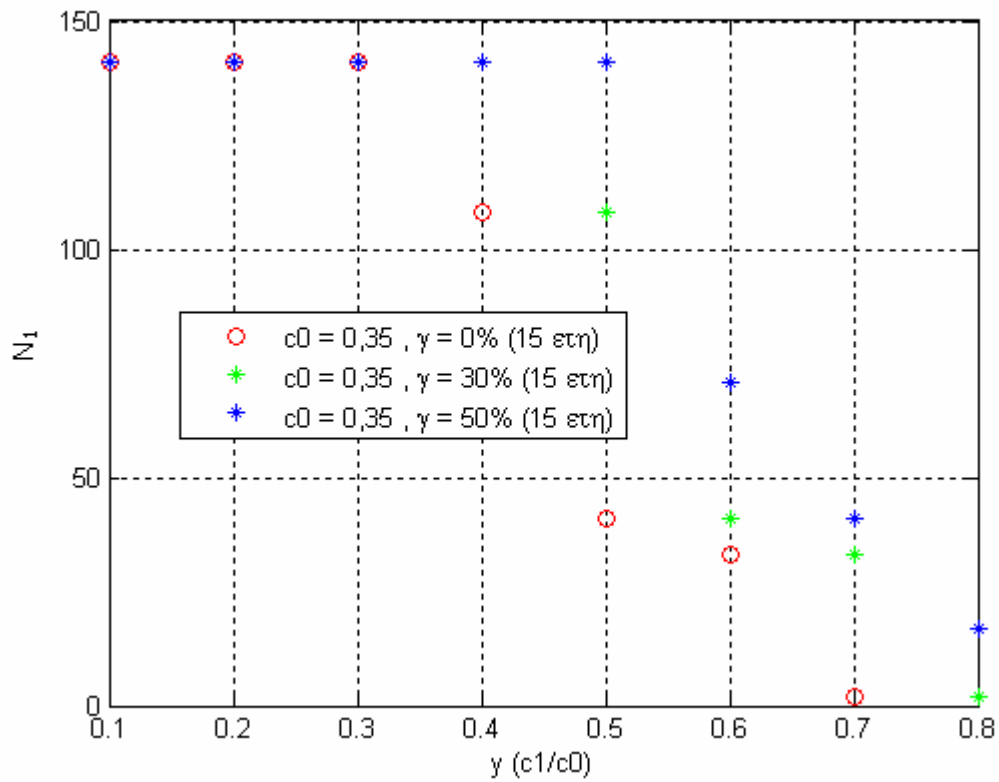
Σχήμα 8.20 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



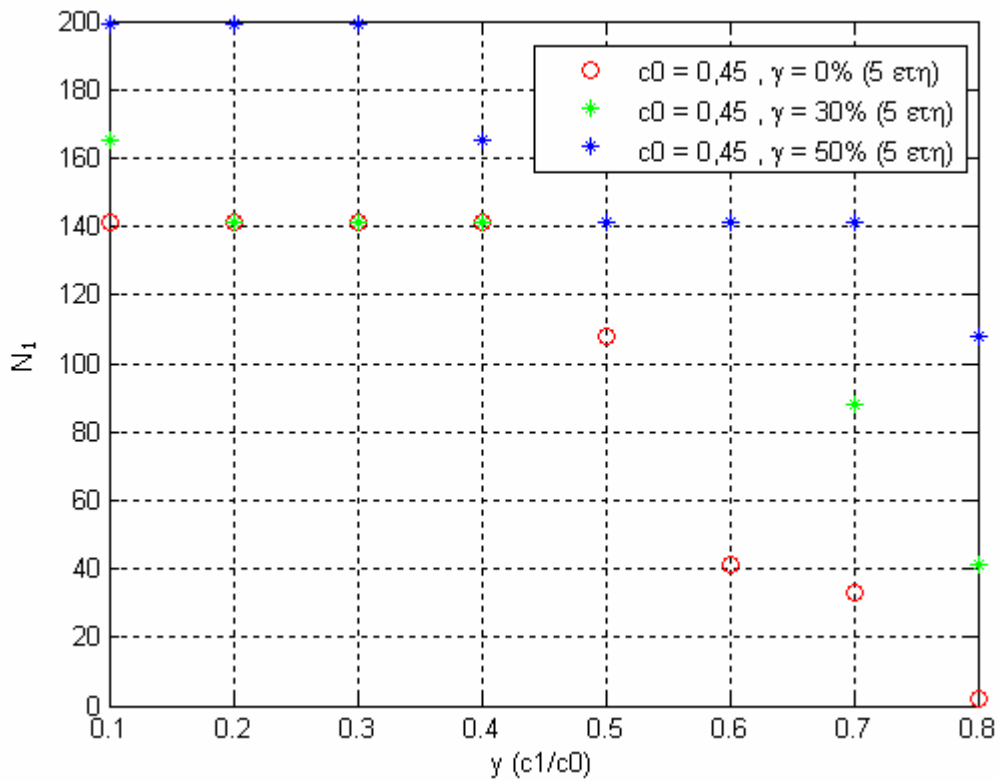
Σχήμα 8.21 Συνολικός αριθμός μετατροπέων ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



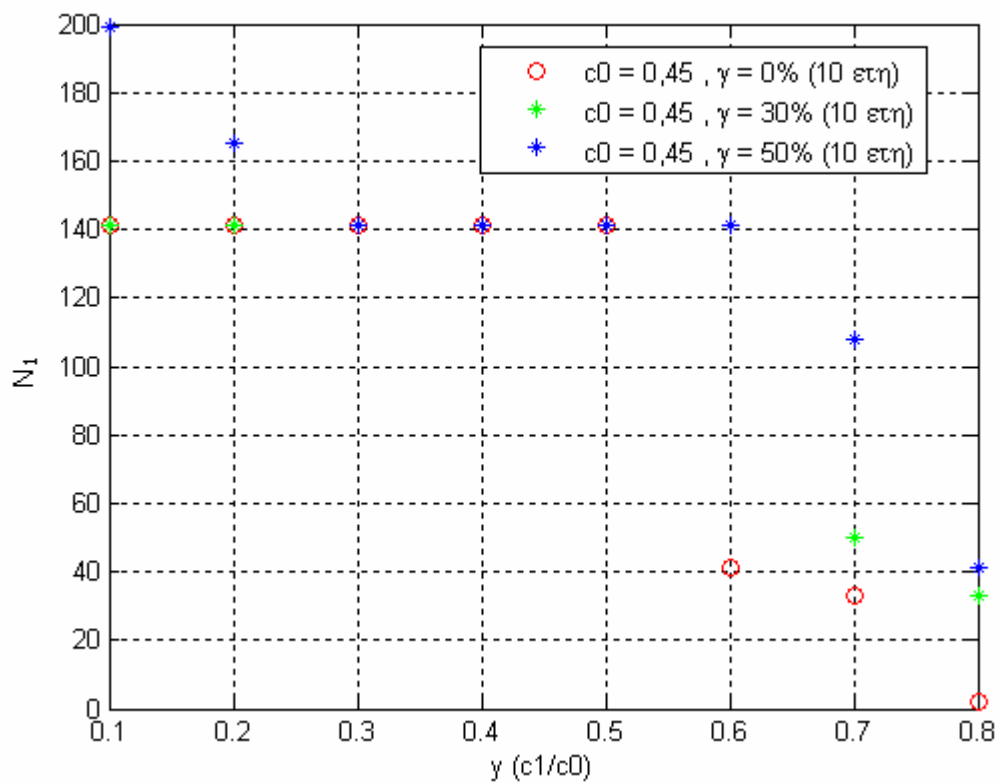
Σχήμα 8.22 Συνολικός αριθμός μετατροπέων ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



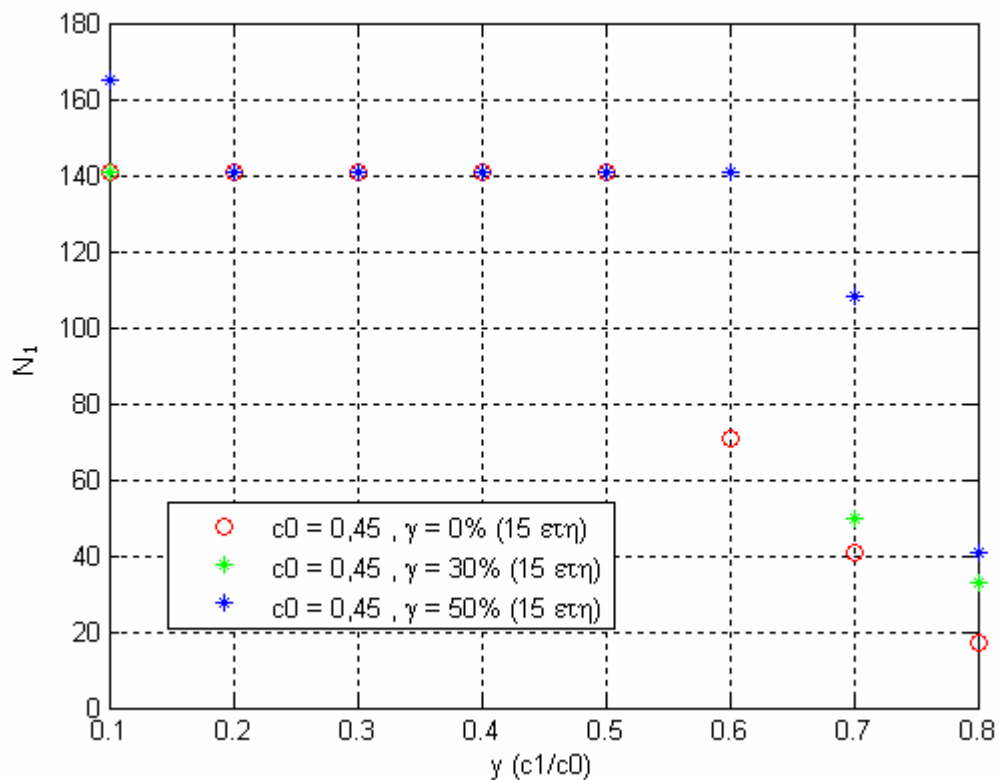
Σχήμα 8.23 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



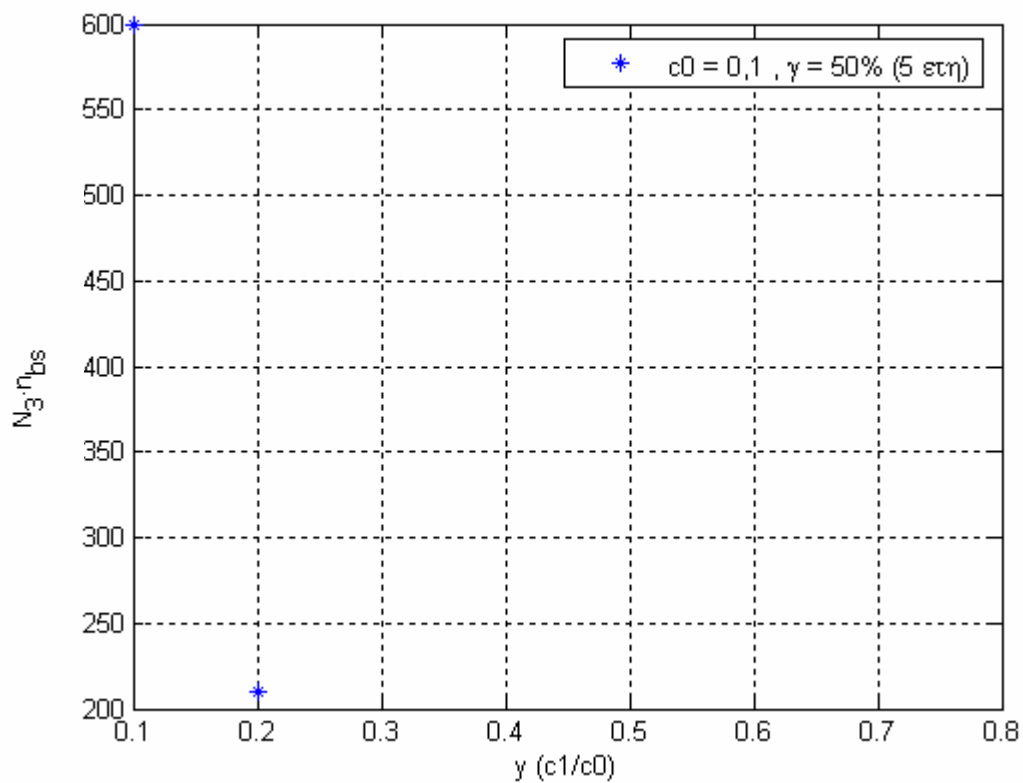
Σχήμα 8.24 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



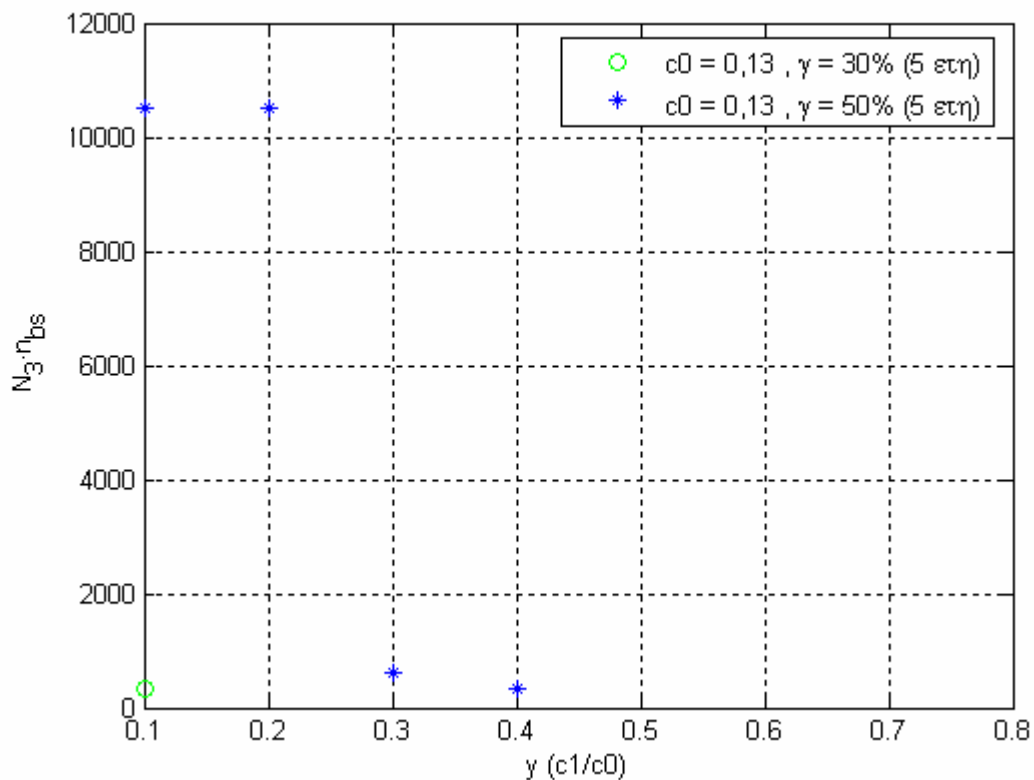
Σχήμα 8.25 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



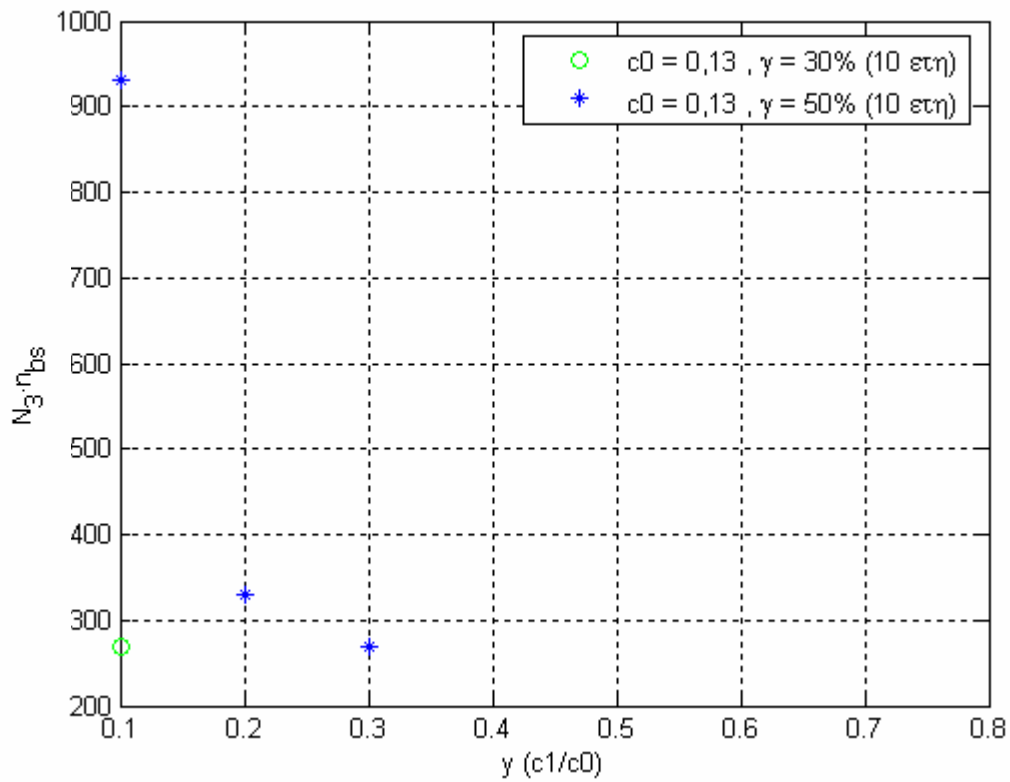
Σχήμα 8.26 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



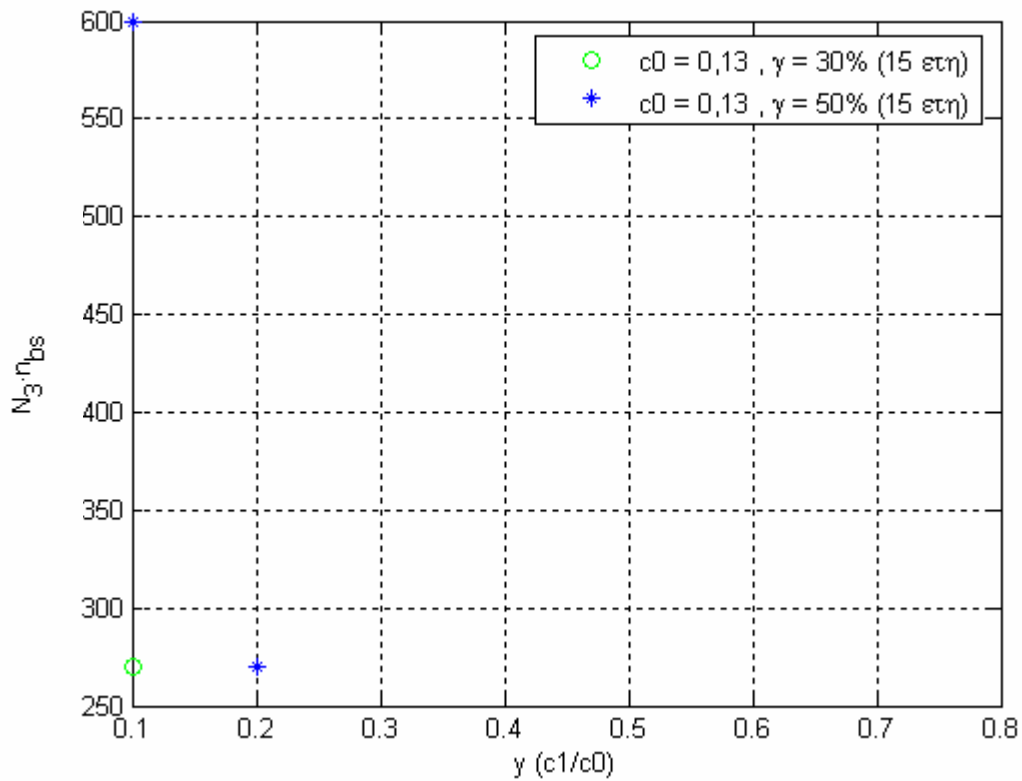
Σχήμα 8.27 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



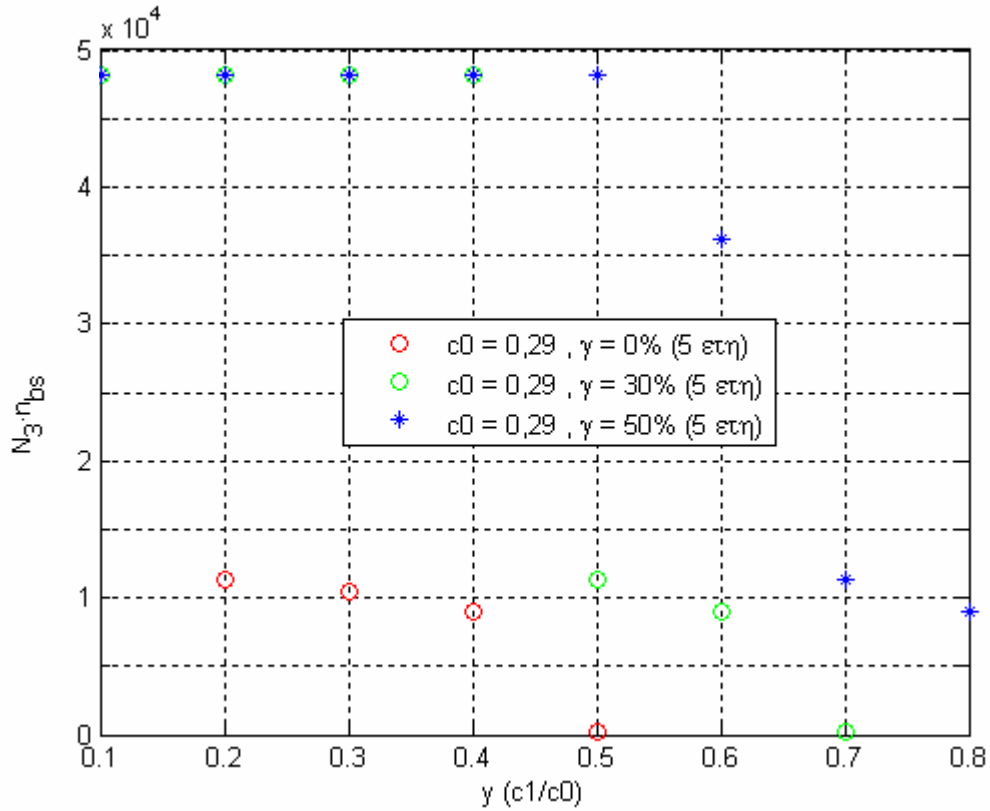
Σχήμα 8.28 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



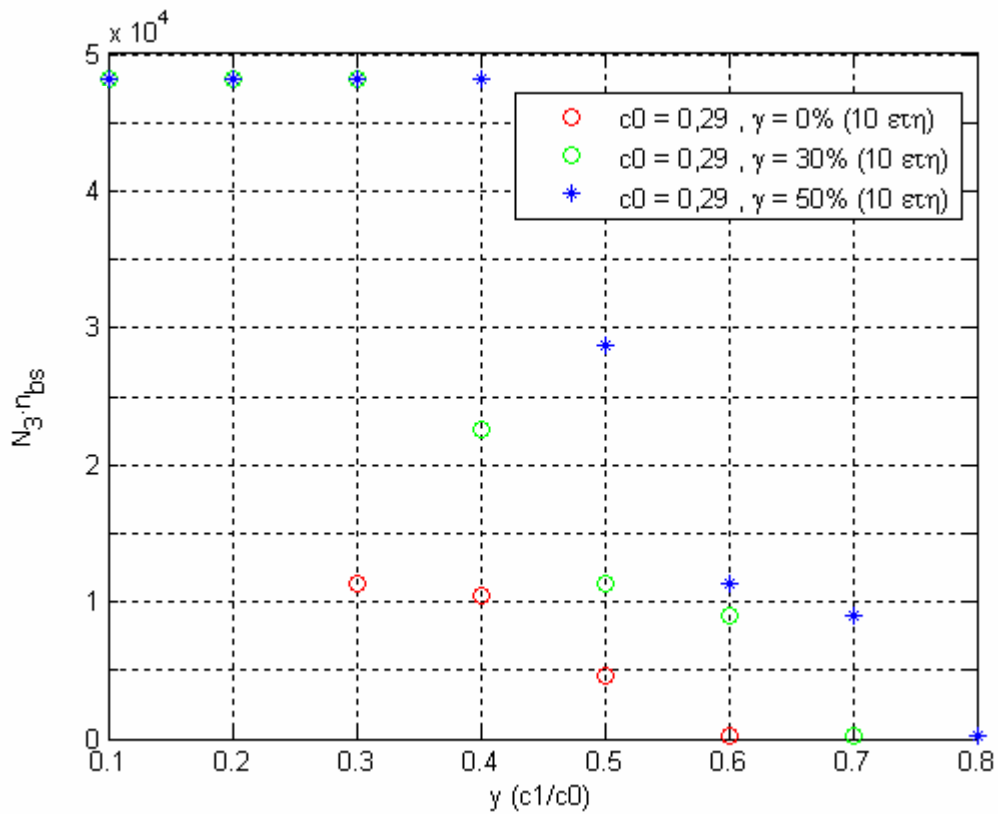
Σχήμα 8.29 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



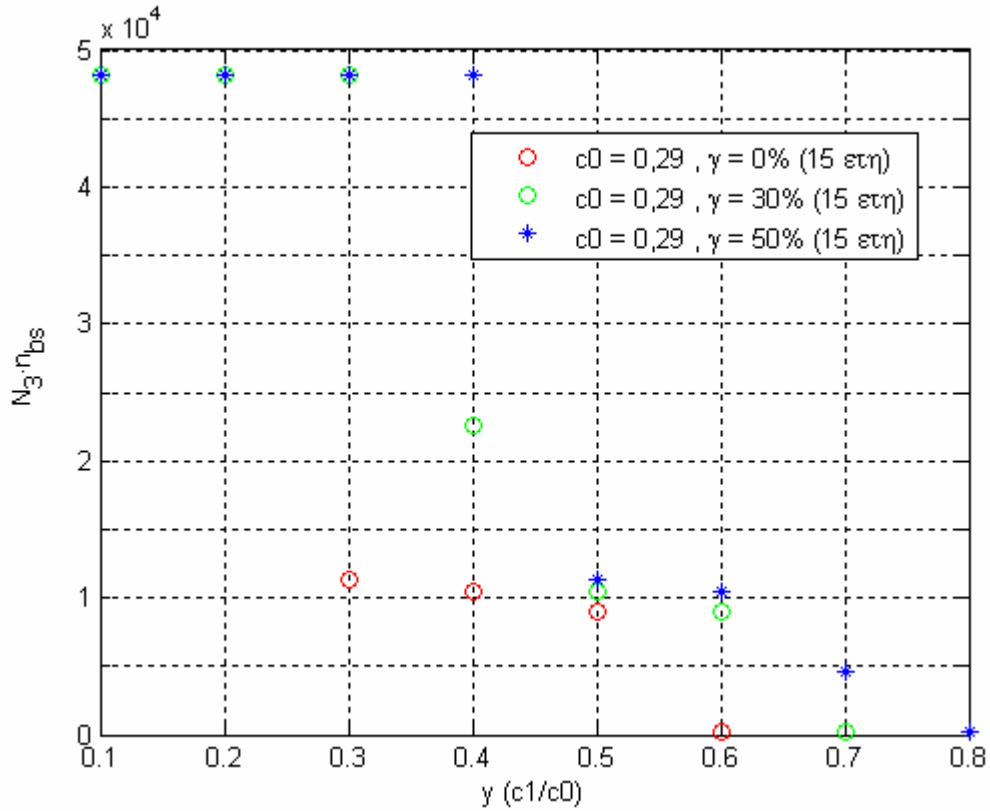
Σχήμα 8.30 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



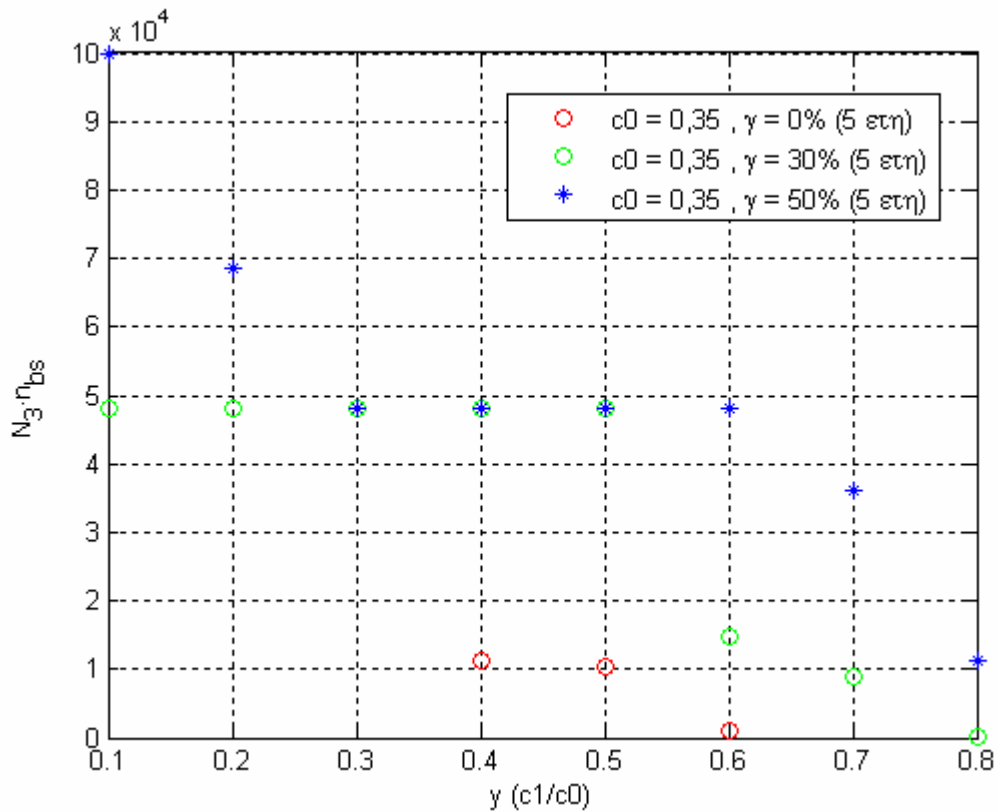
Σχήμα 8.31 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



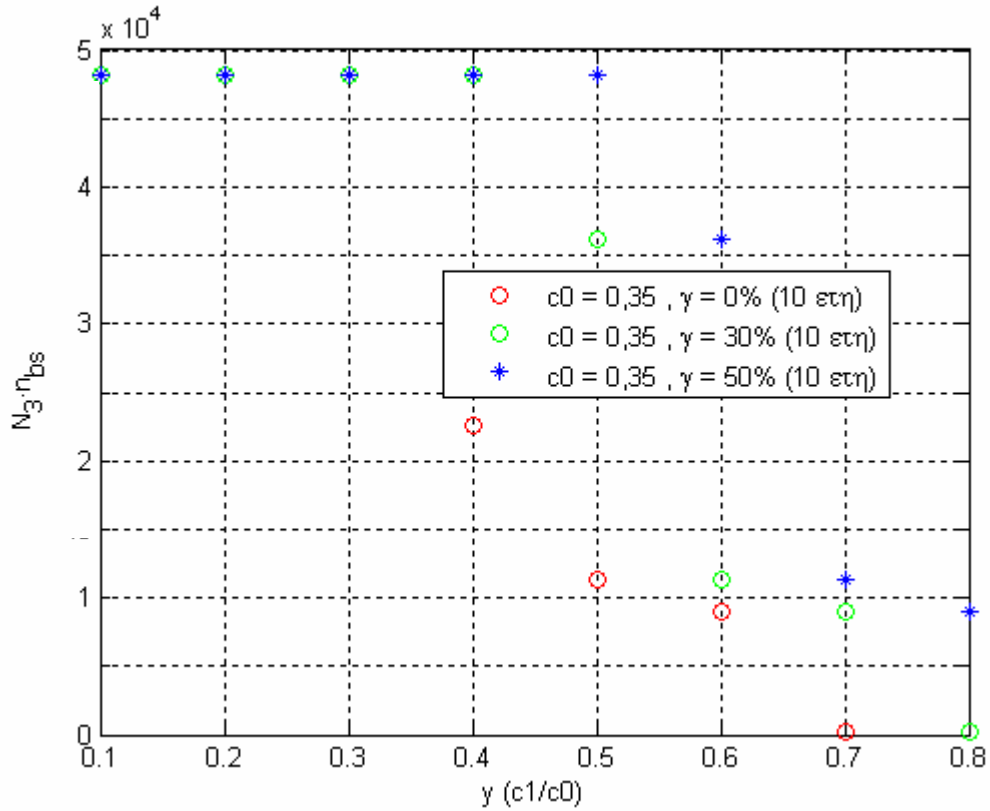
Σχήμα 8.32 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



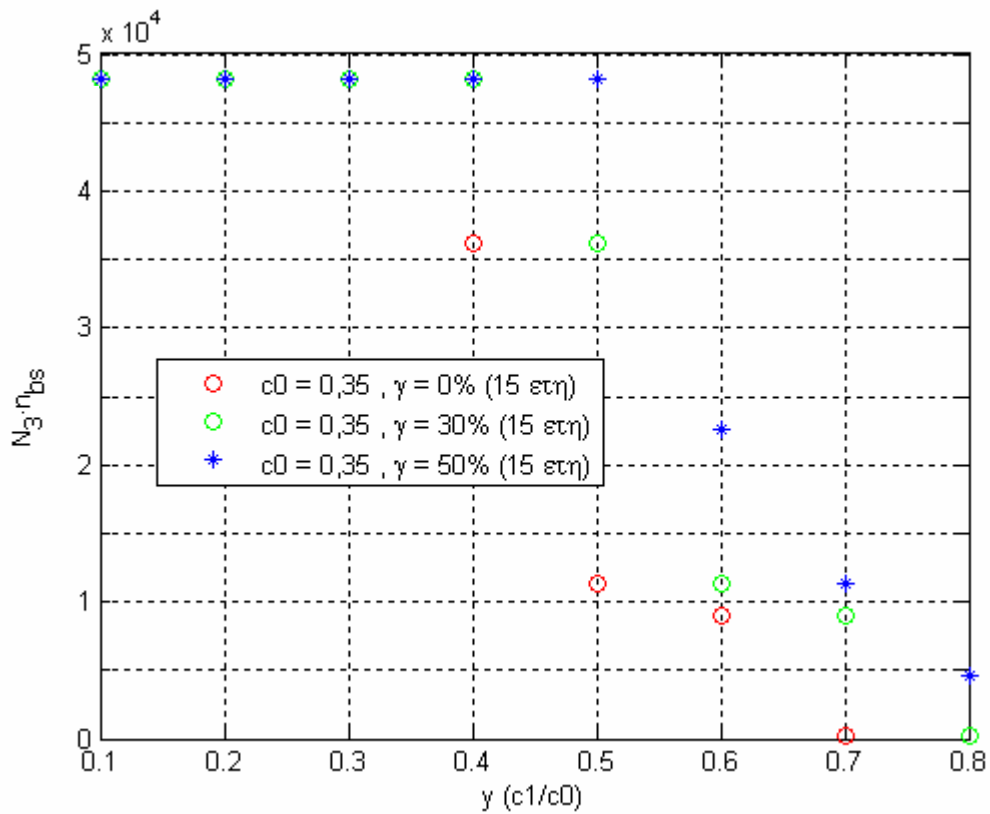
Σχήμα 8.33 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



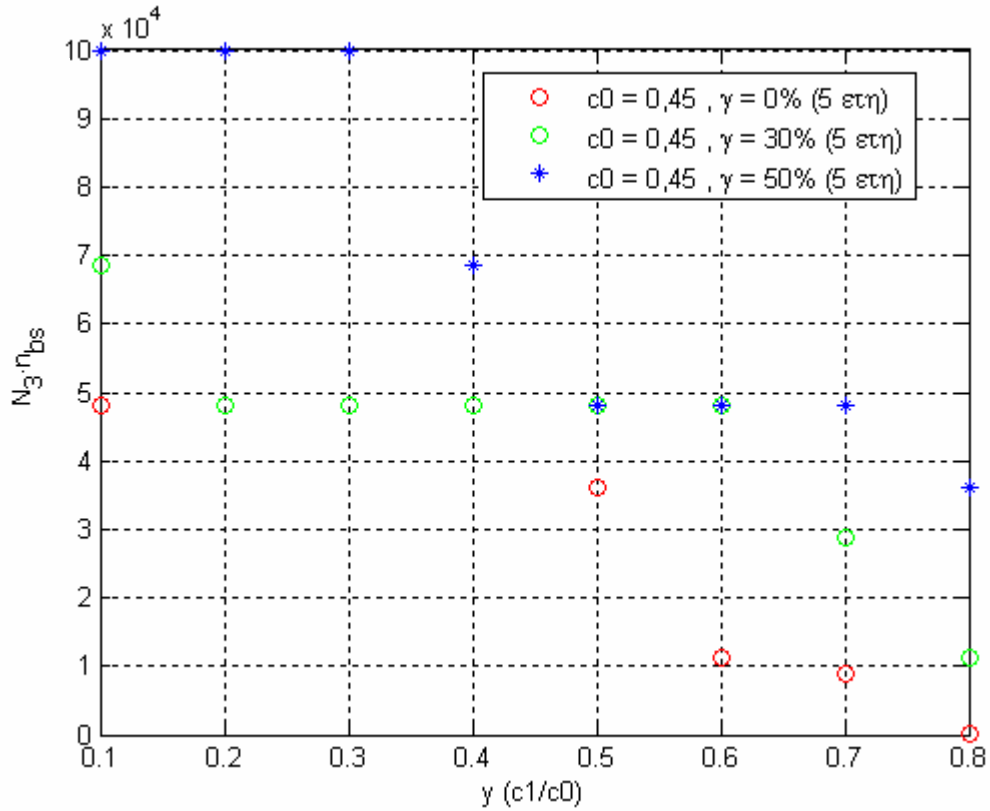
Σχήμα 8.34 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



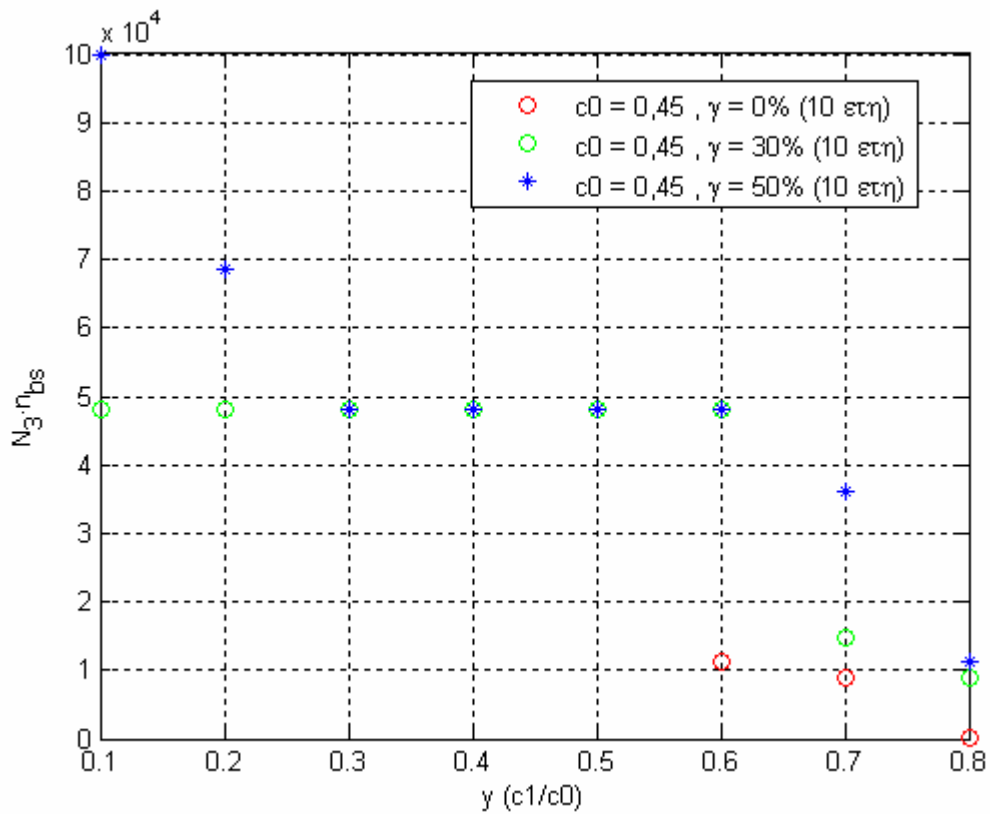
Σχήμα 8.35 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



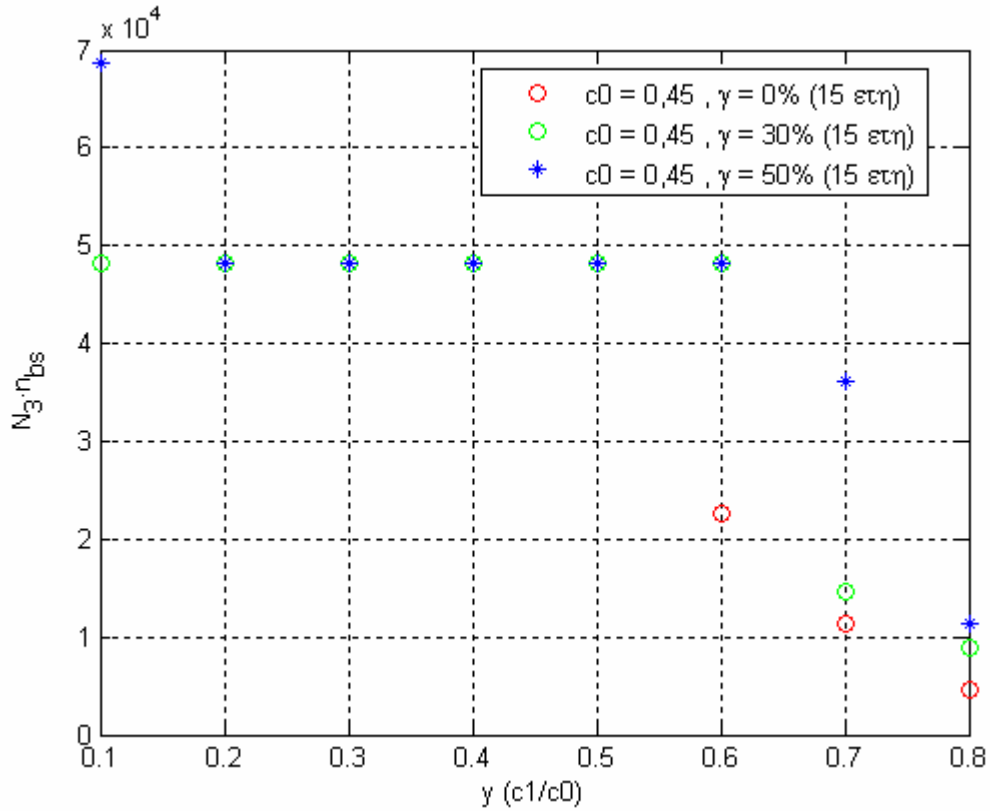
Σχήμα 8.36 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



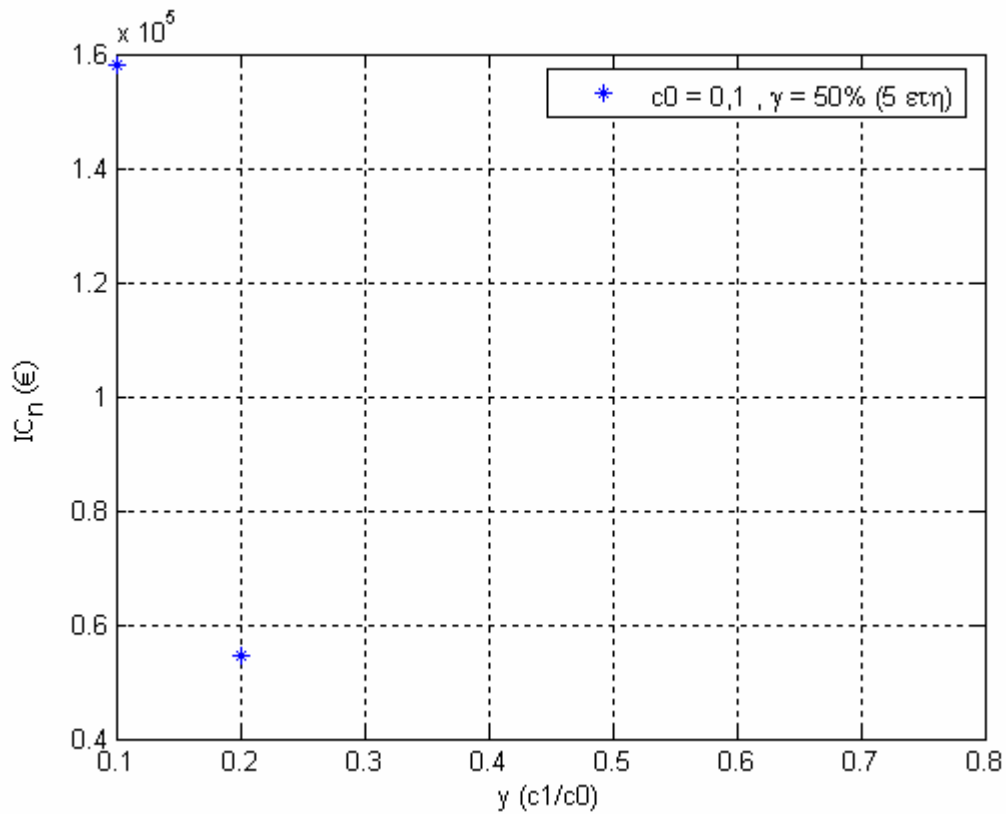
Σχήμα 8.37 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



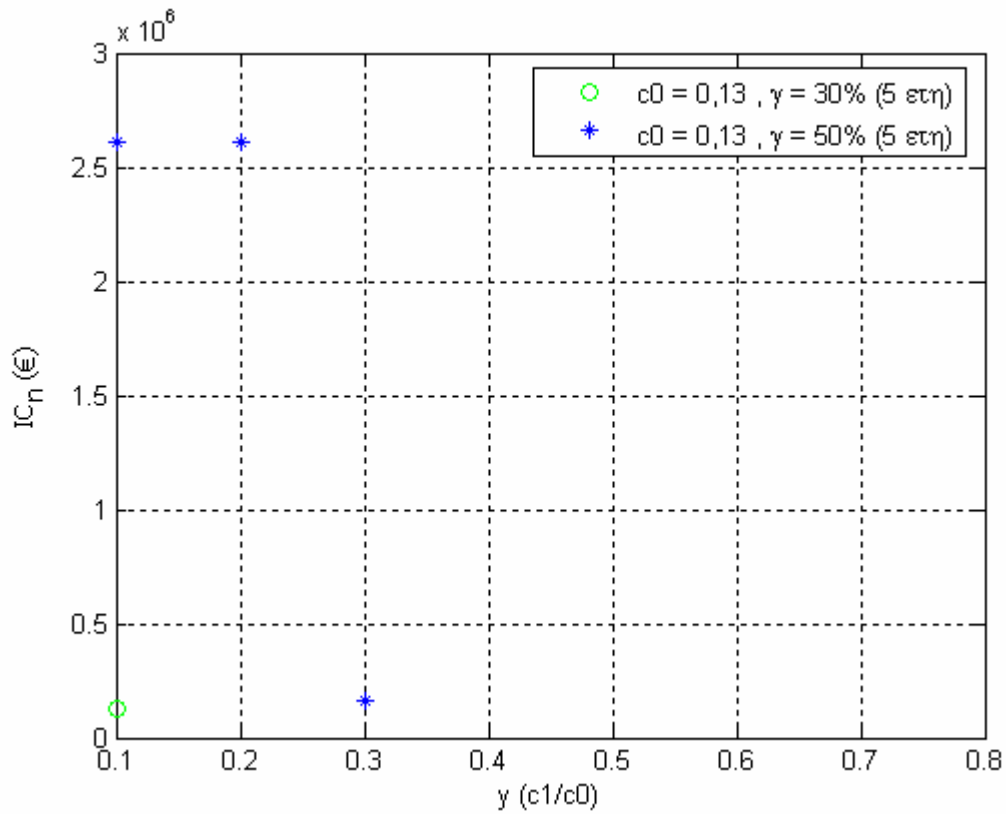
Σχήμα 8.38 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



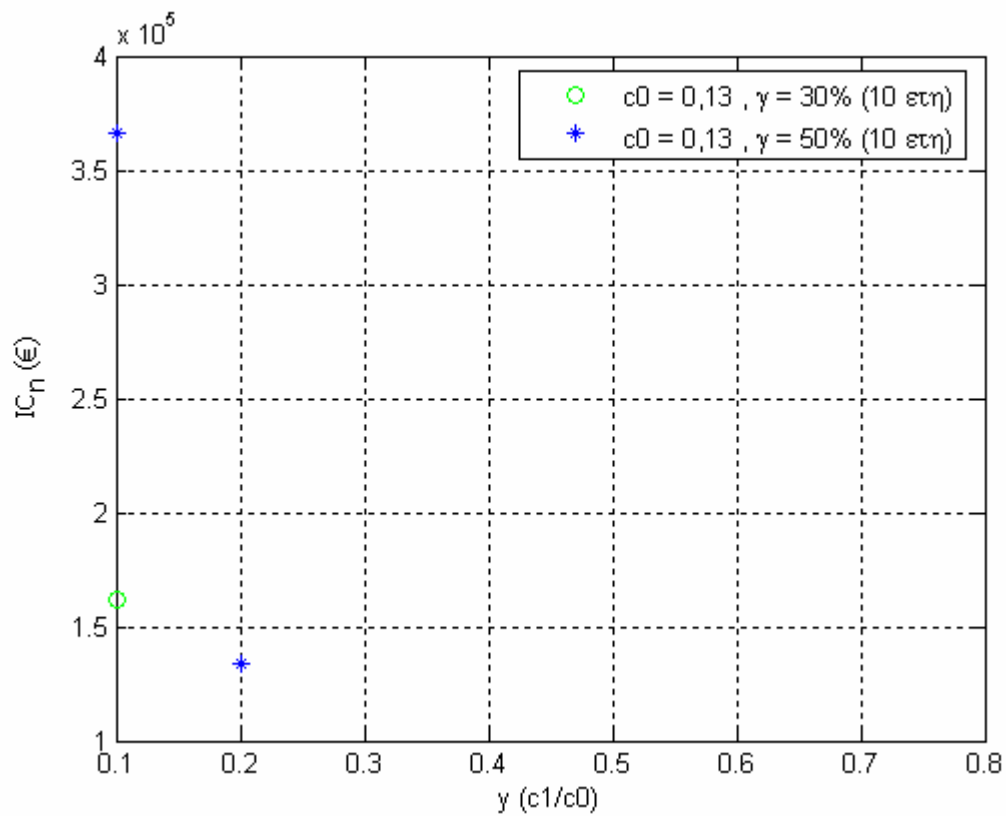
Σχήμα 8.39 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



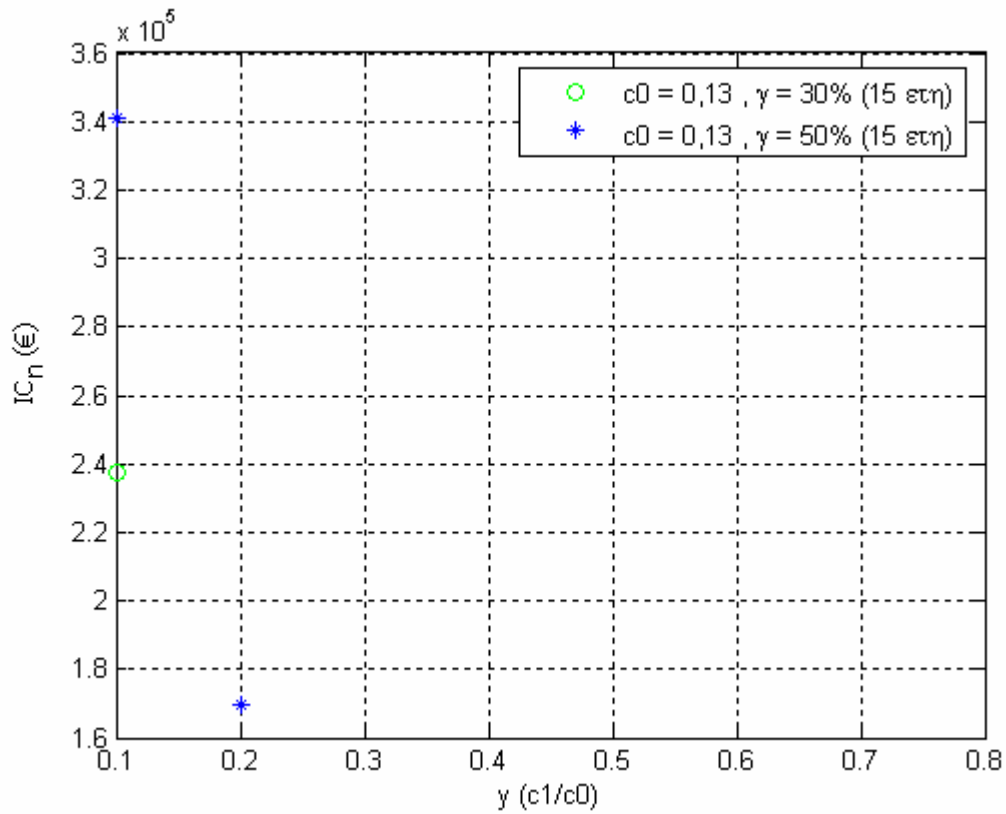
Σχήμα 8.40 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



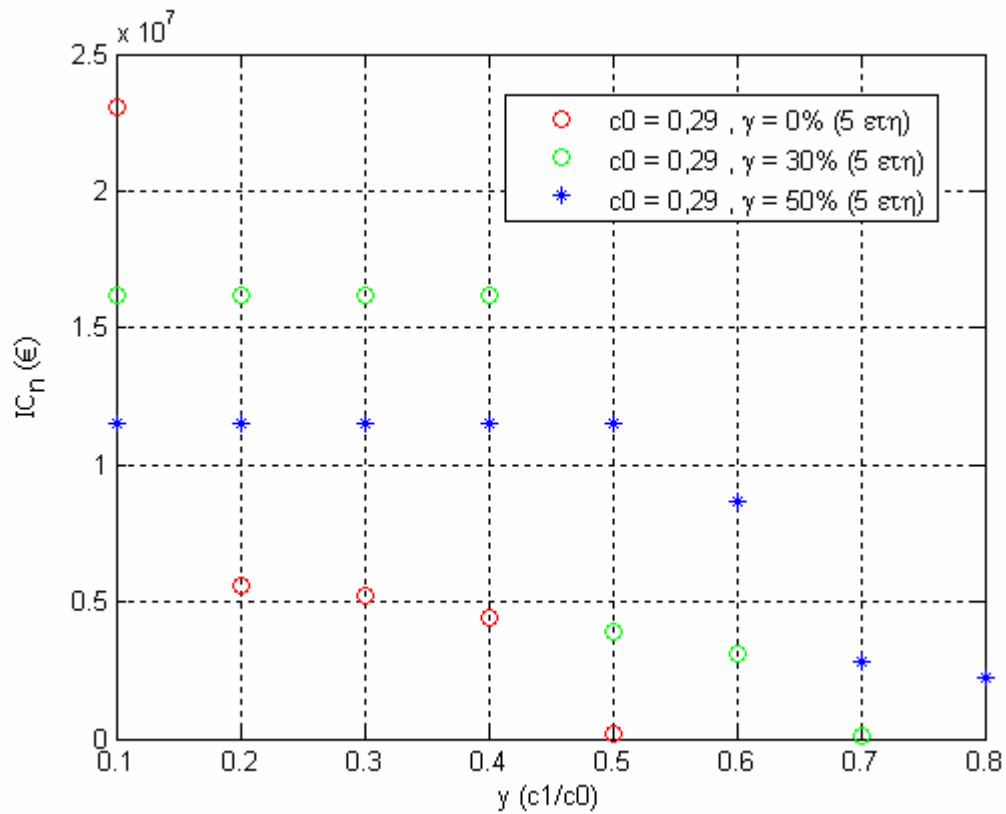
Σχήμα 8.41 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



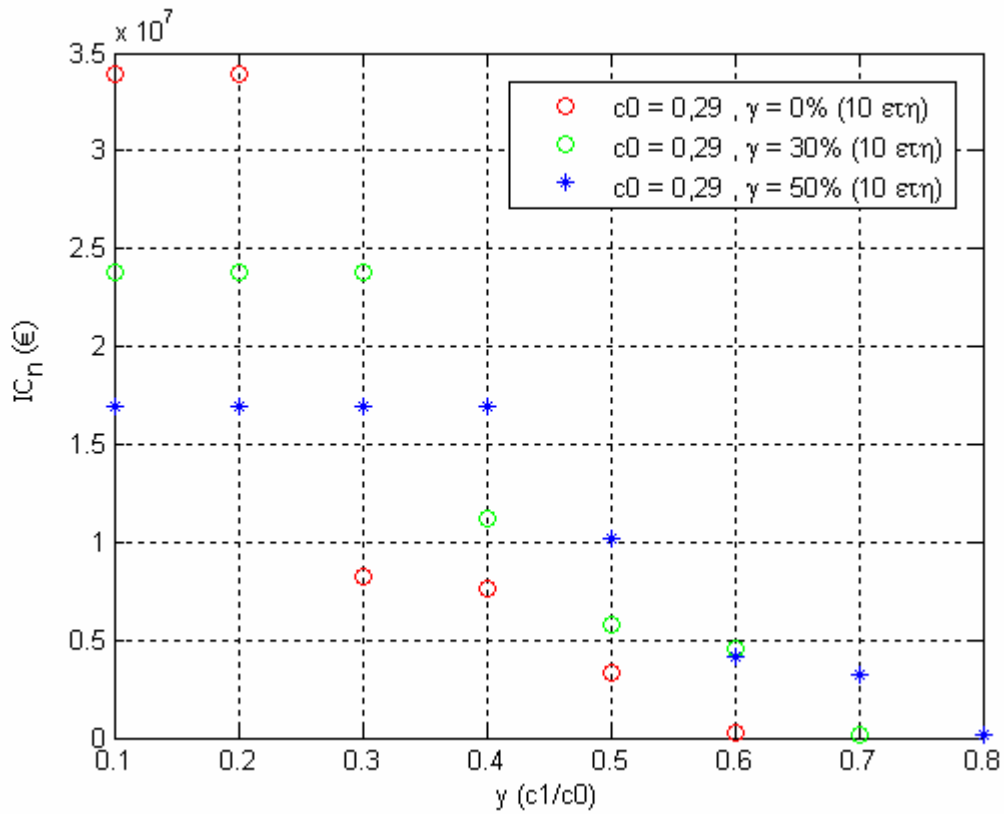
Σχήμα 8.42 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



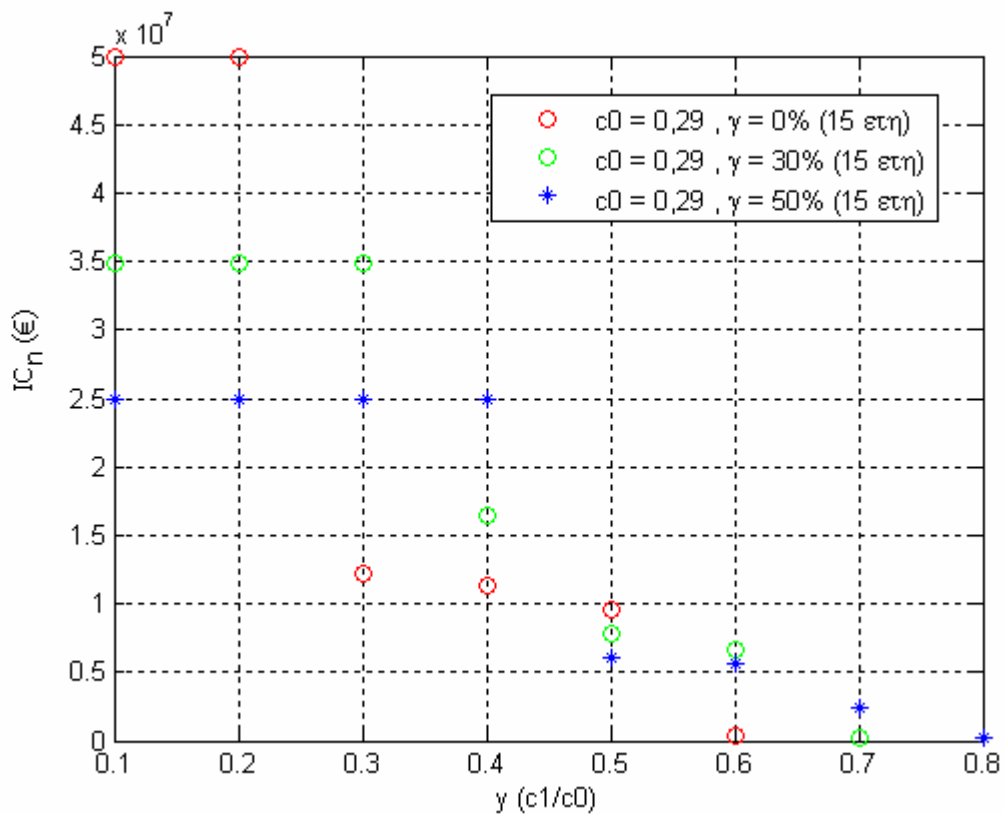
Σχήμα 8.43 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



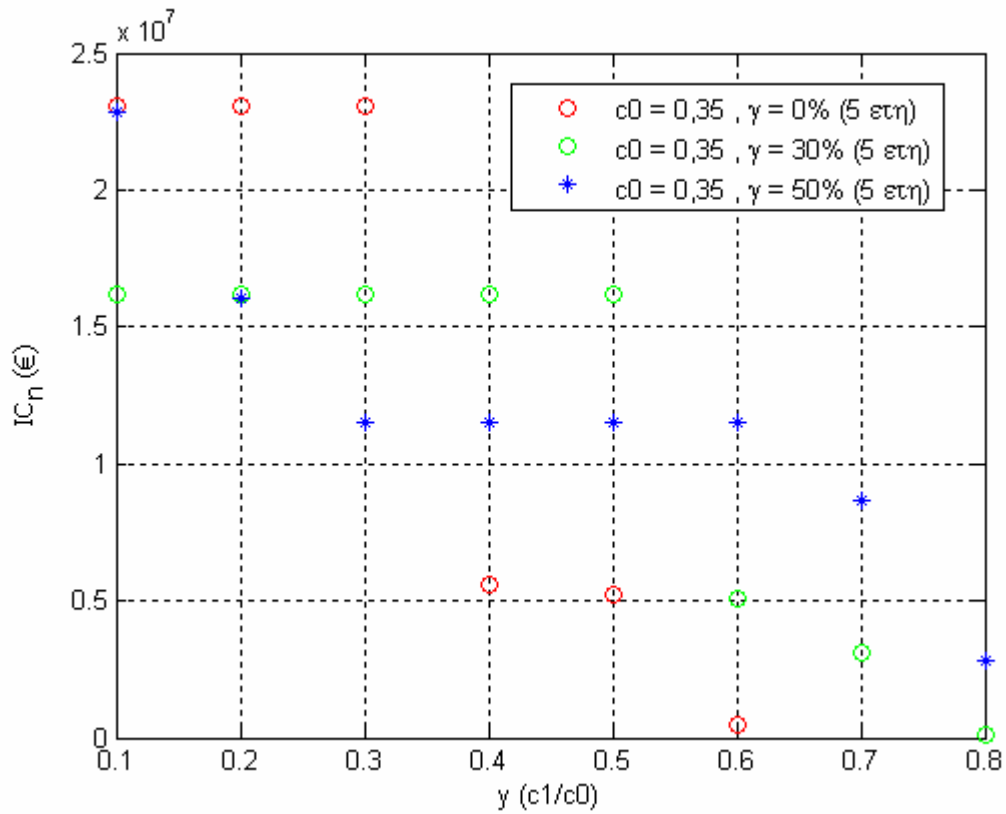
Σχήμα 8.44 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



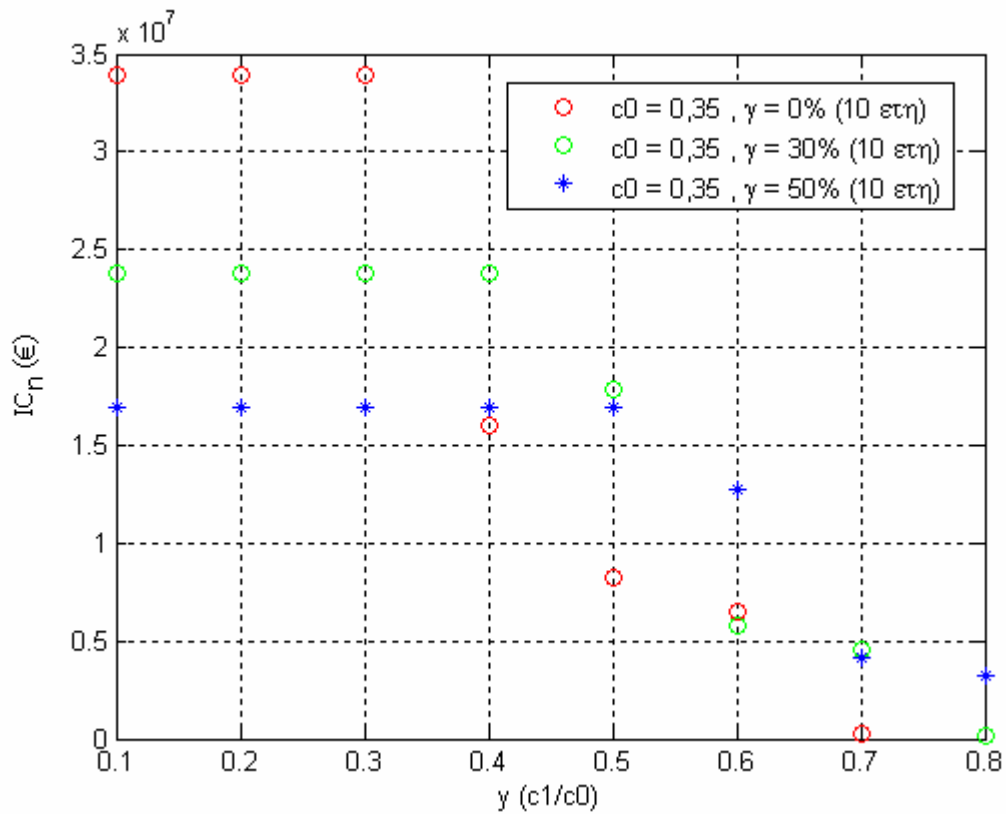
Σχήμα 8.45 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,29€/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



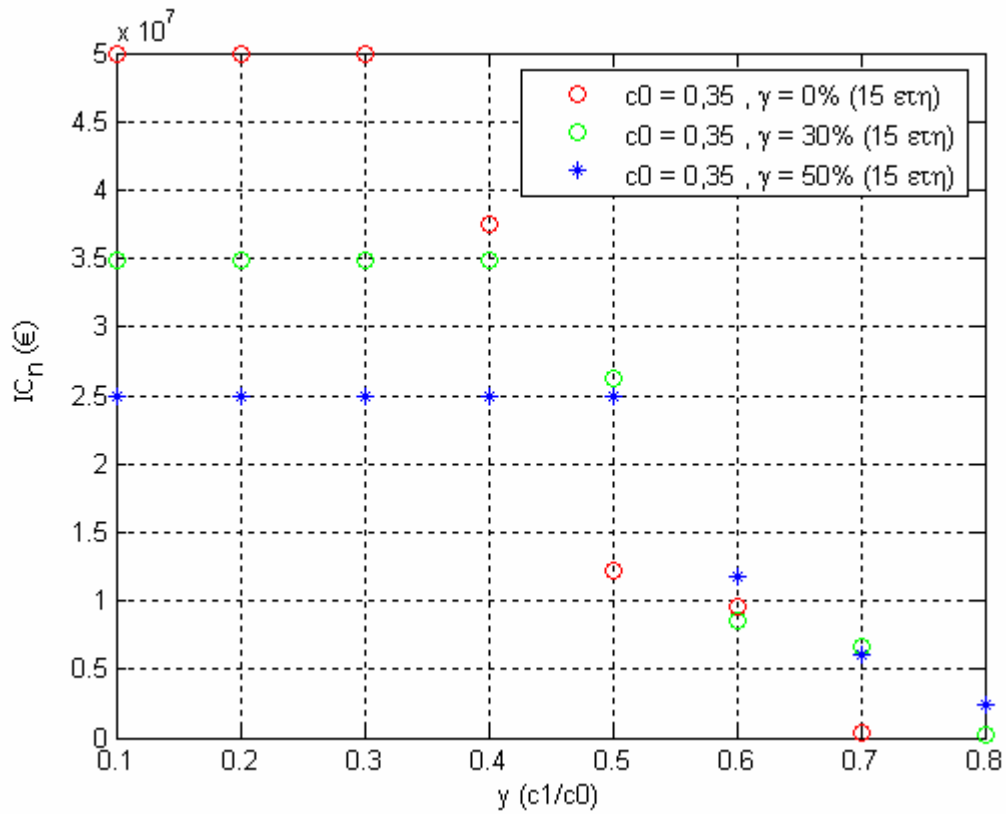
Σχήμα 8.46 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



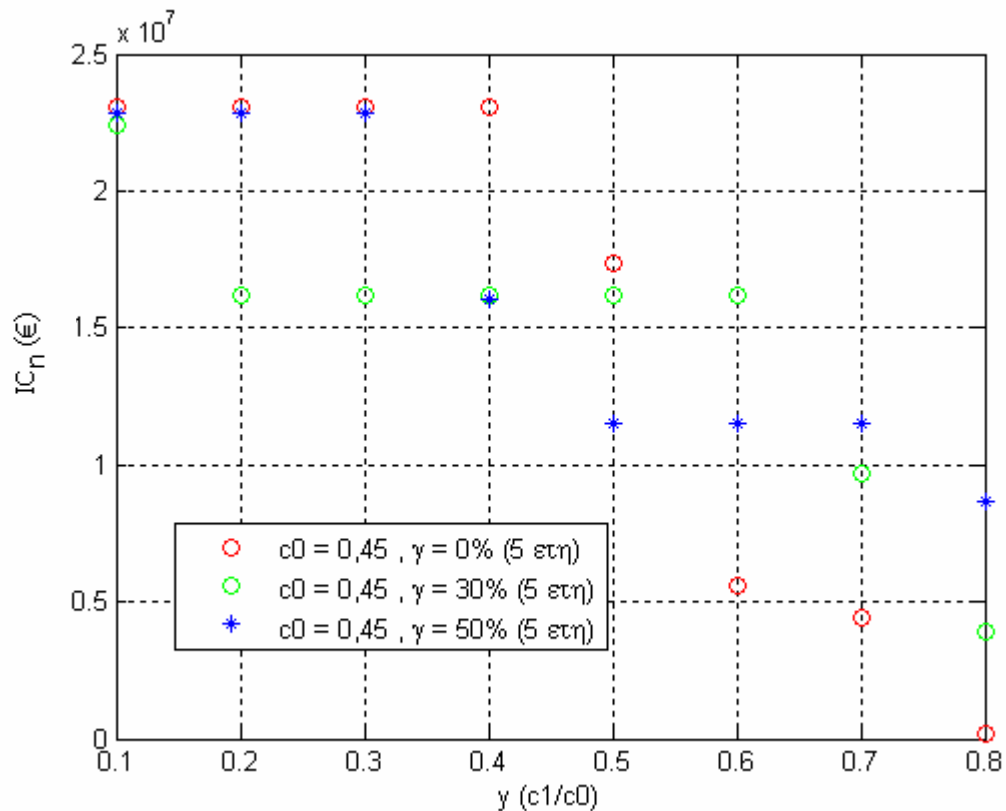
Σχήμα 8.47 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



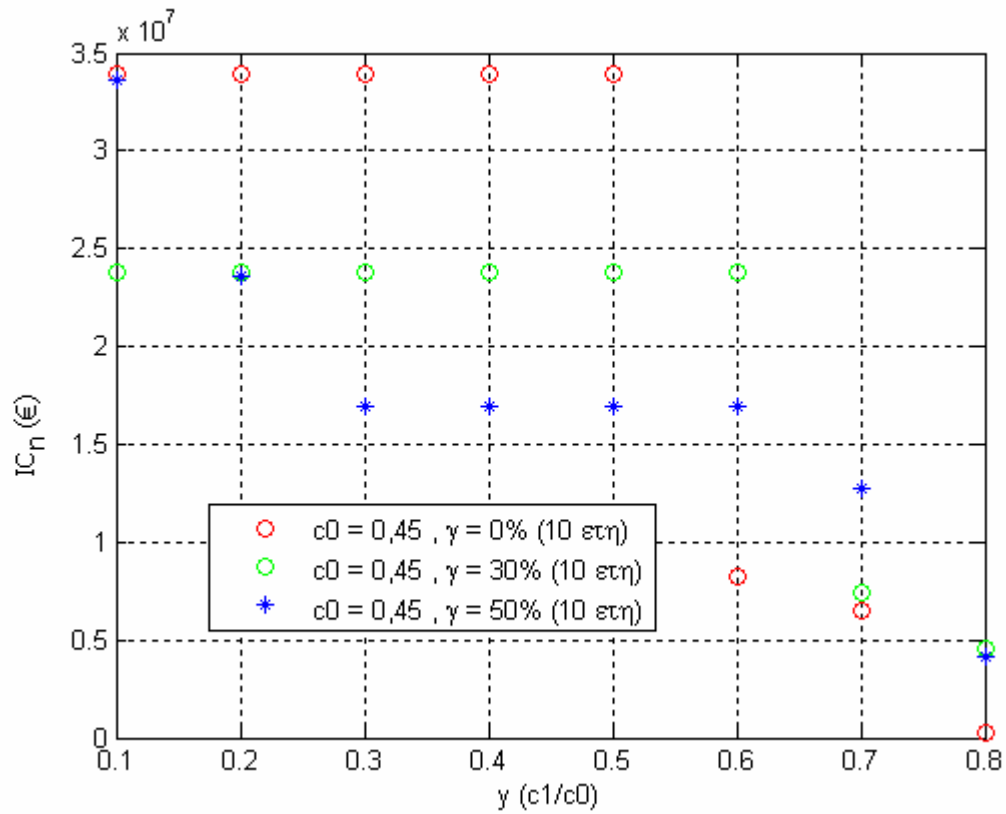
Σχήμα 8.48 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



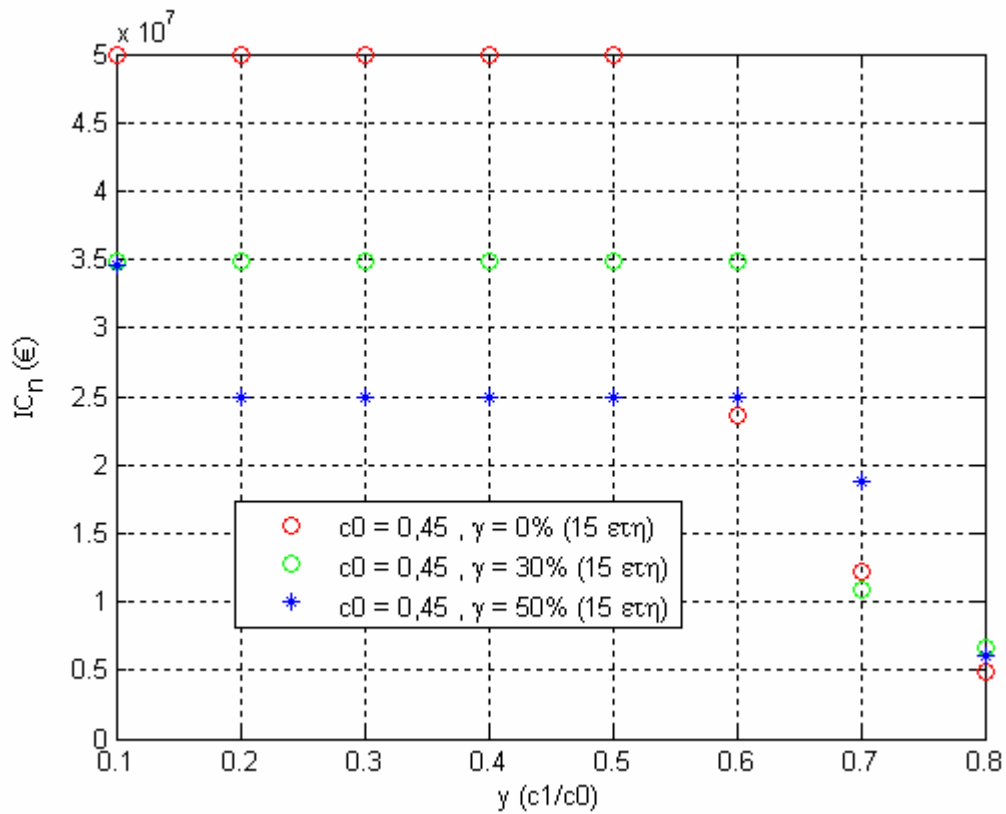
Σχήμα 8.49 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



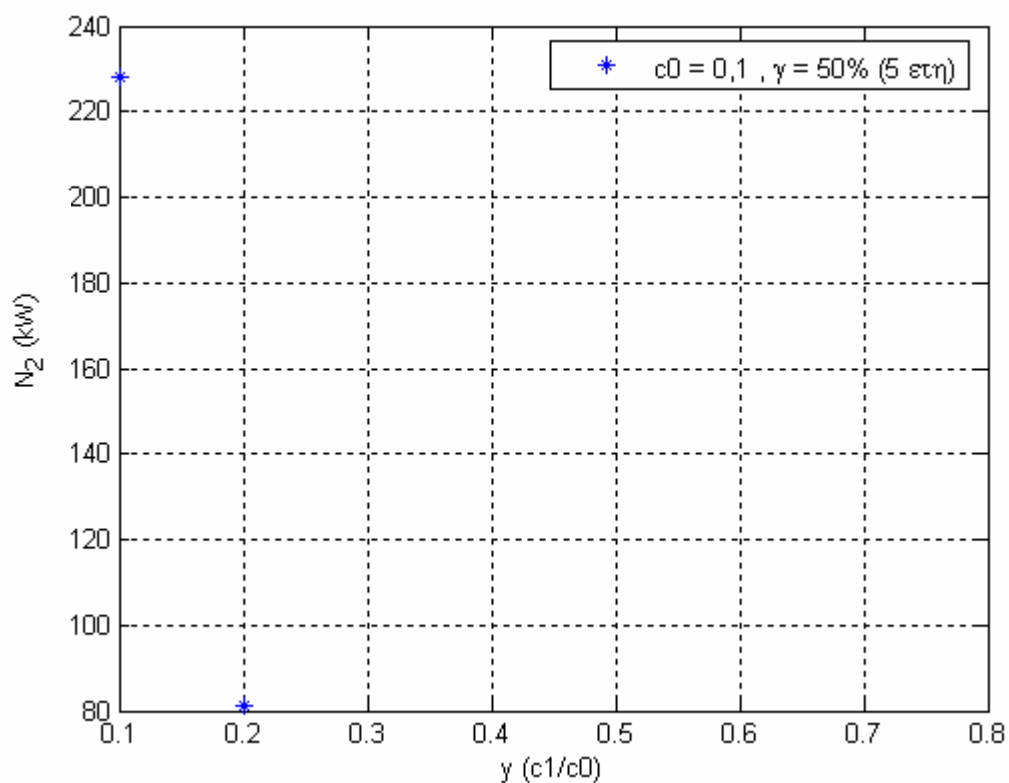
Σχήμα 8.50 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



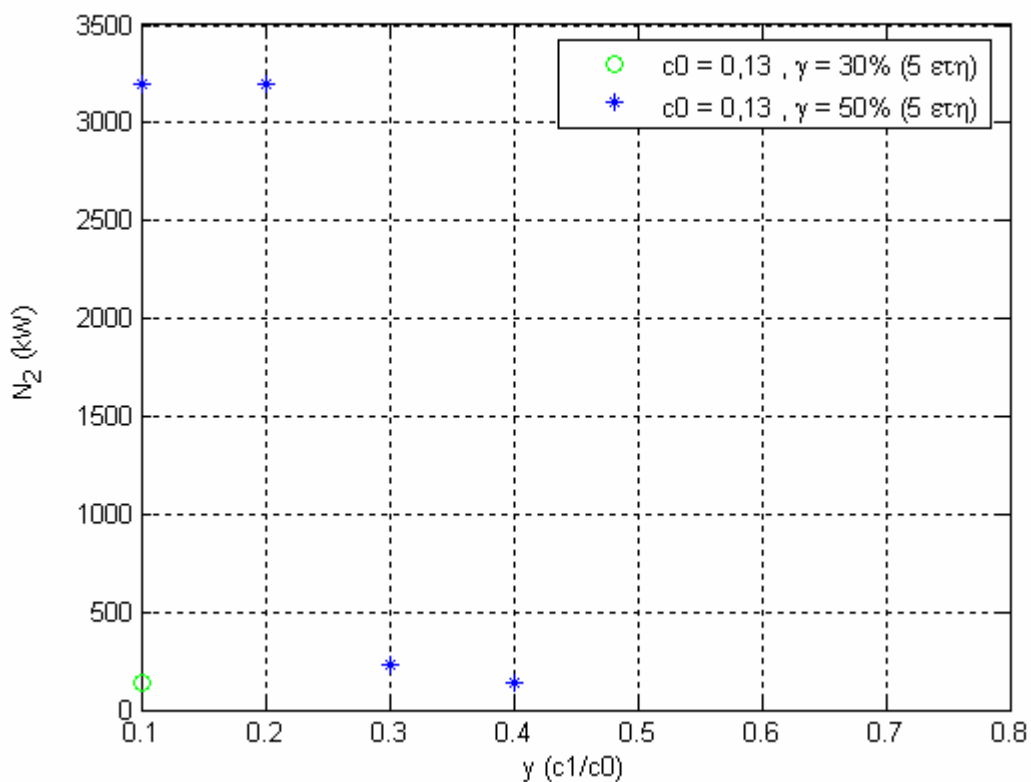
Σχήμα 8.51 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



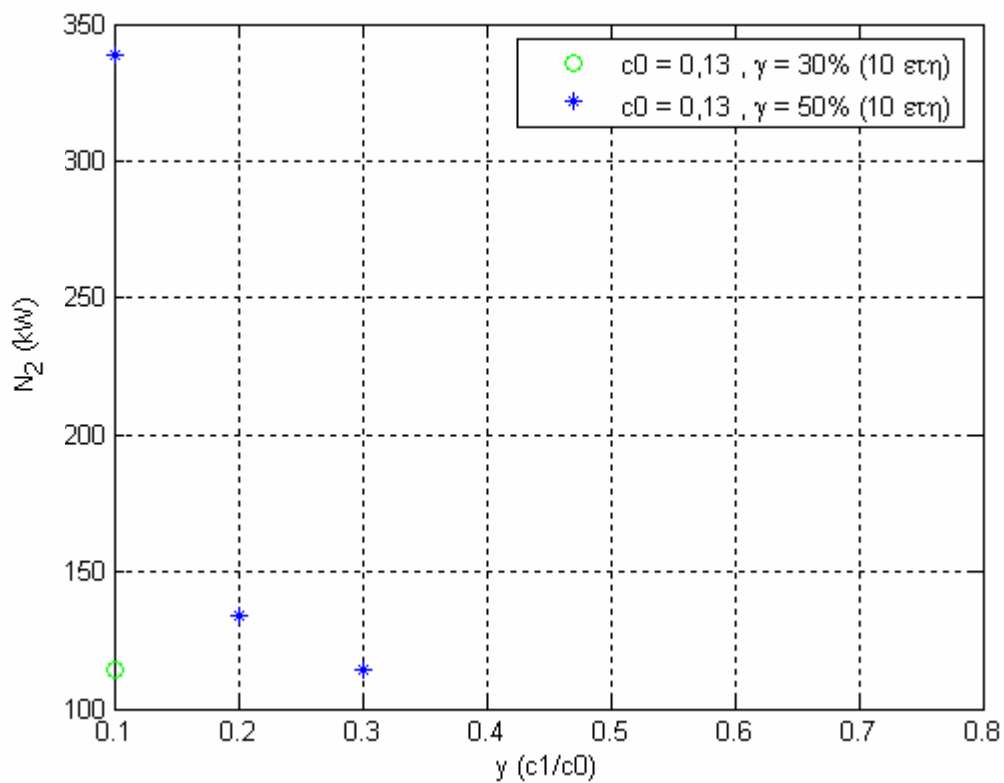
Σχήμα 8.52 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



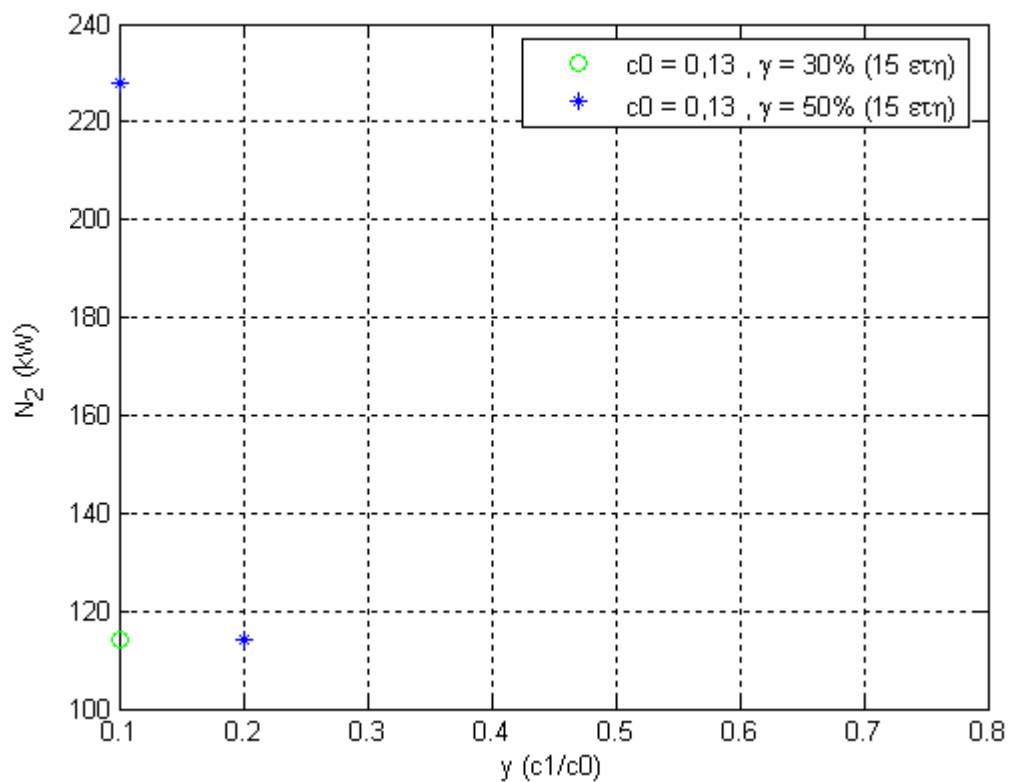
Σχήμα 8.53 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



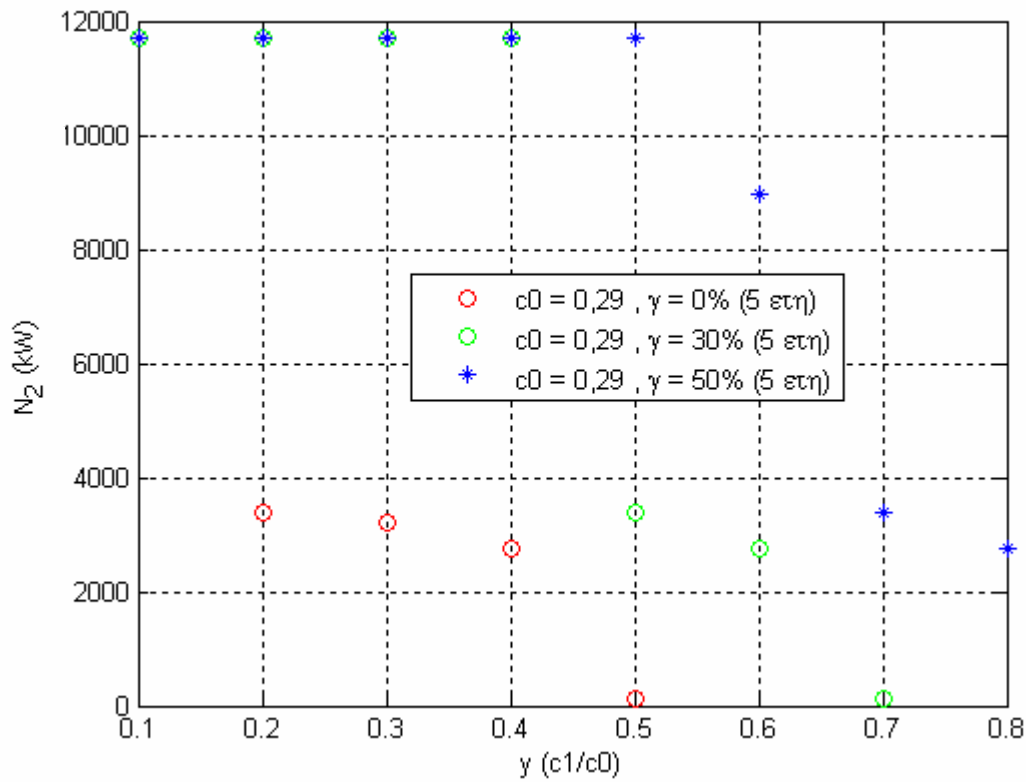
Σχήμα 8.54 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



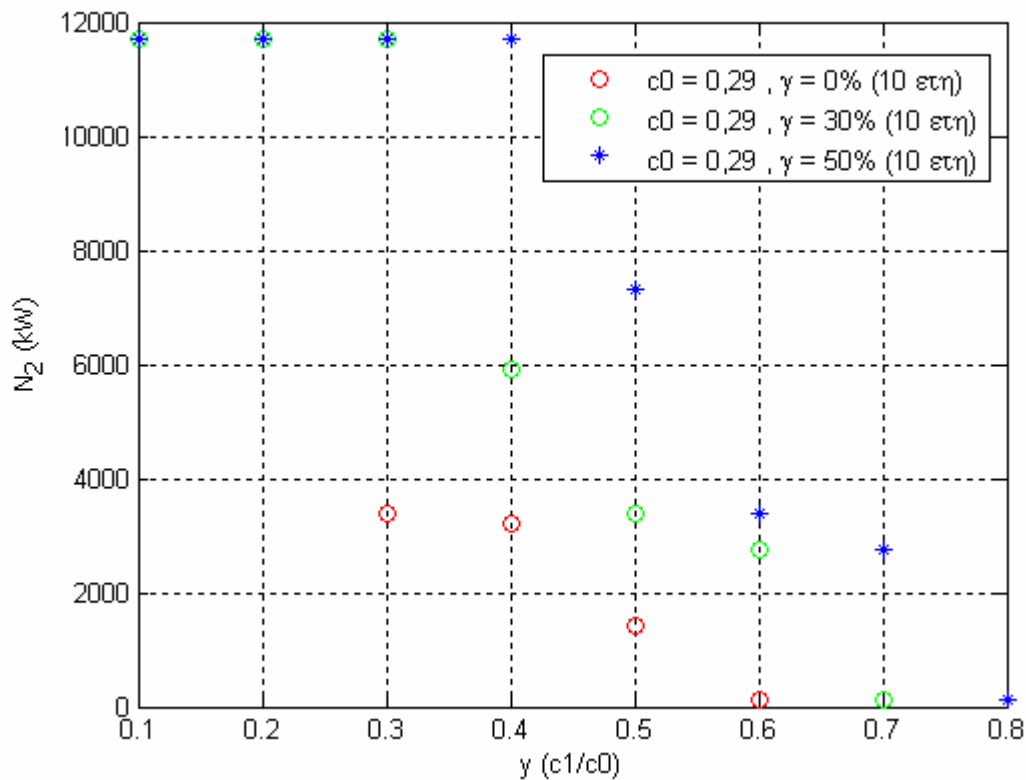
Σχήμα 8.55 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



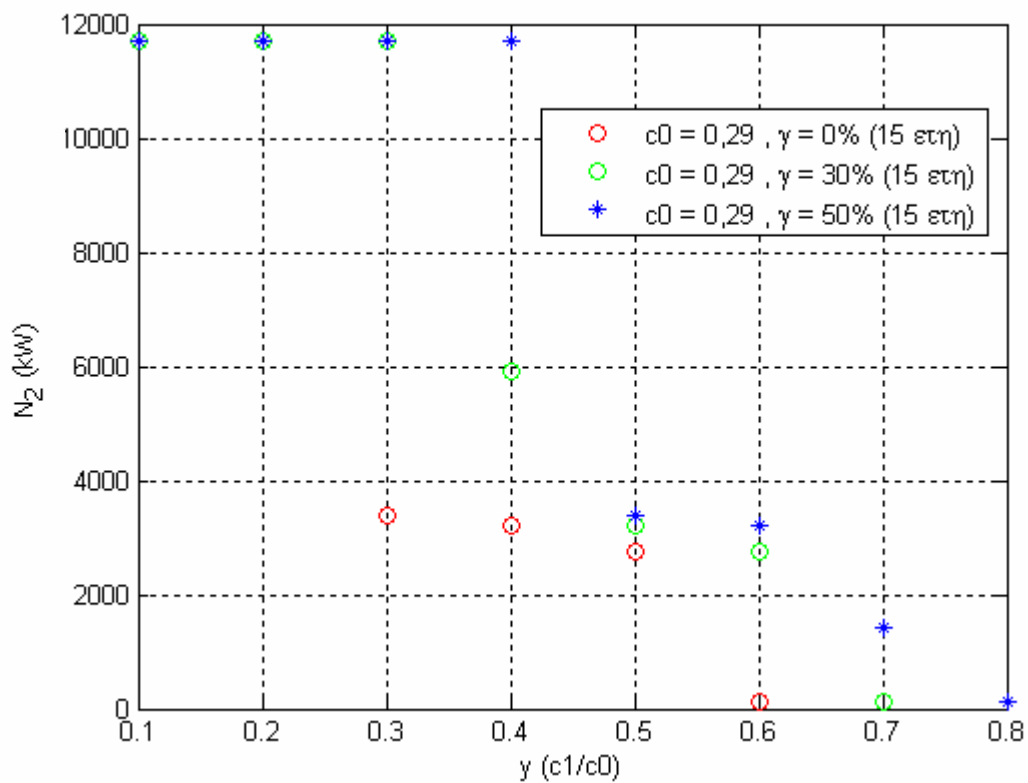
Σχήμα 8.56 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



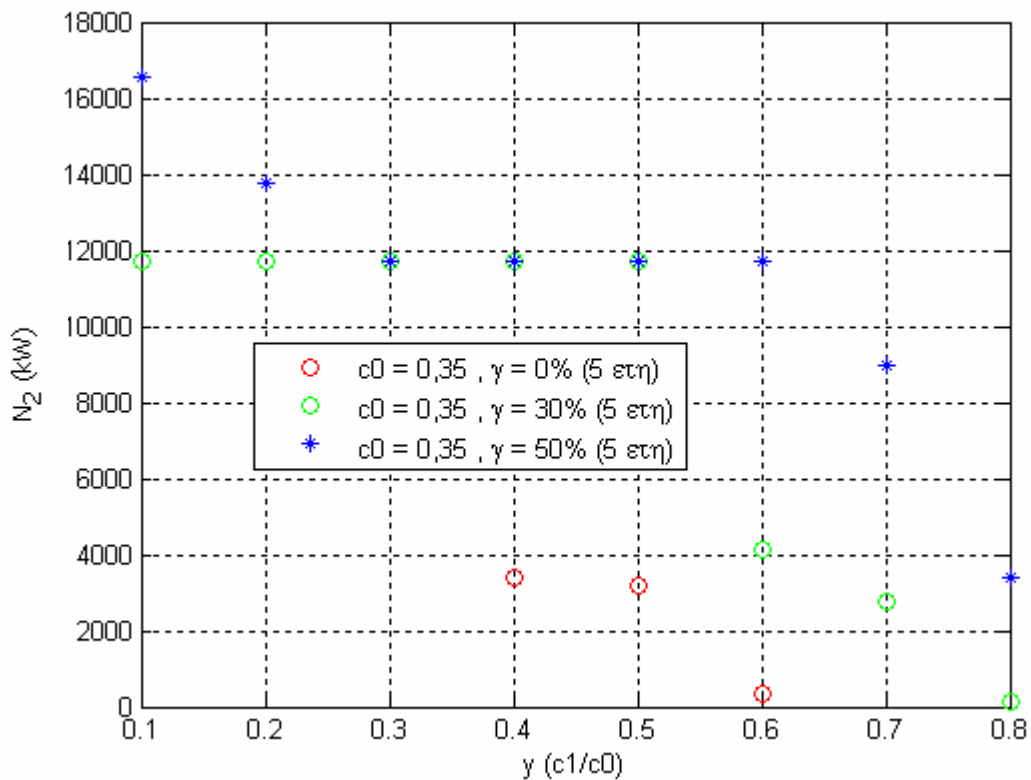
Σχήμα 8.57 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



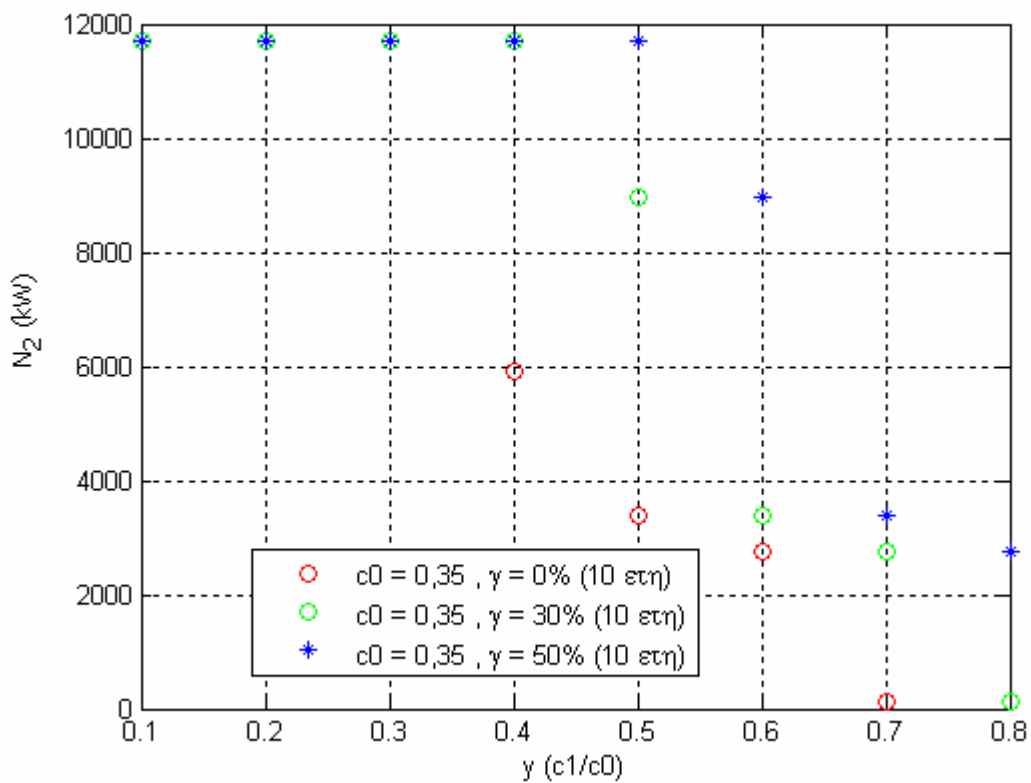
Σχήμα 8.58 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



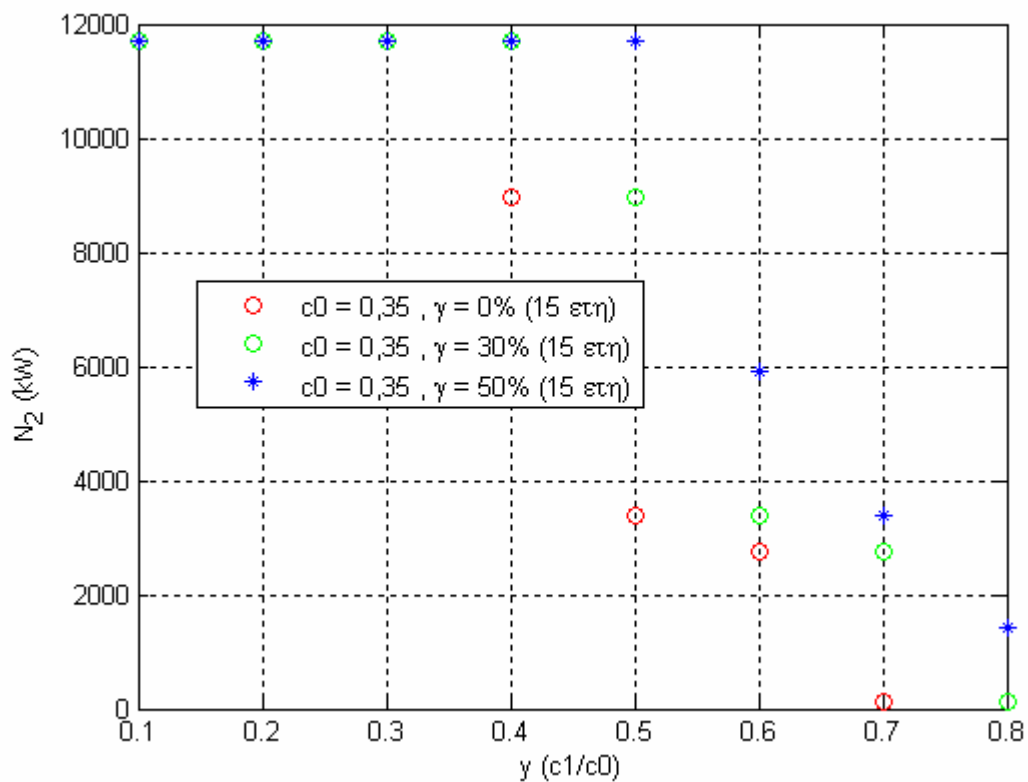
Σχήμα 8.59 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



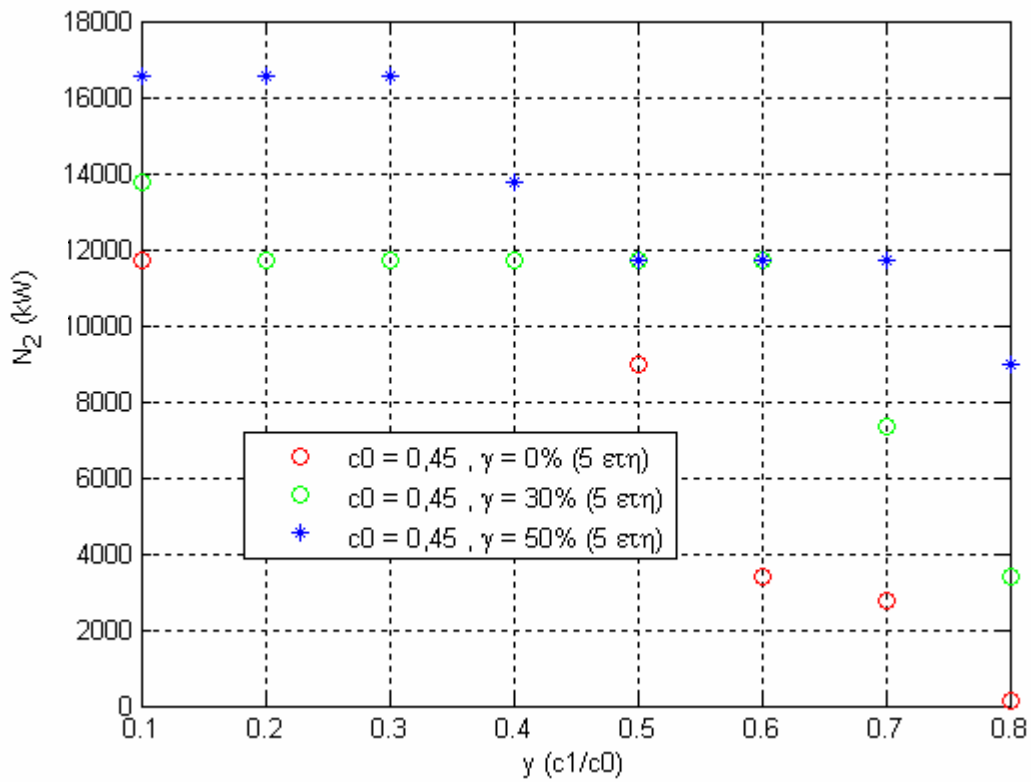
Σχήμα 8.60 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,35€/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



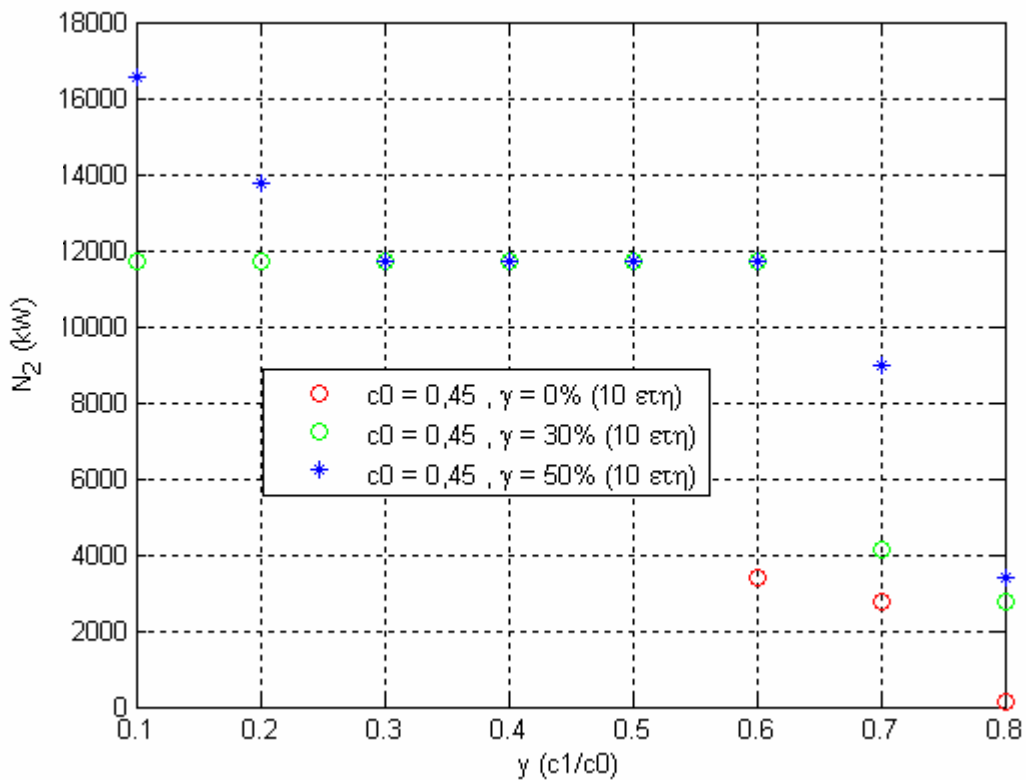
Σχήμα 8.61 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,35€/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



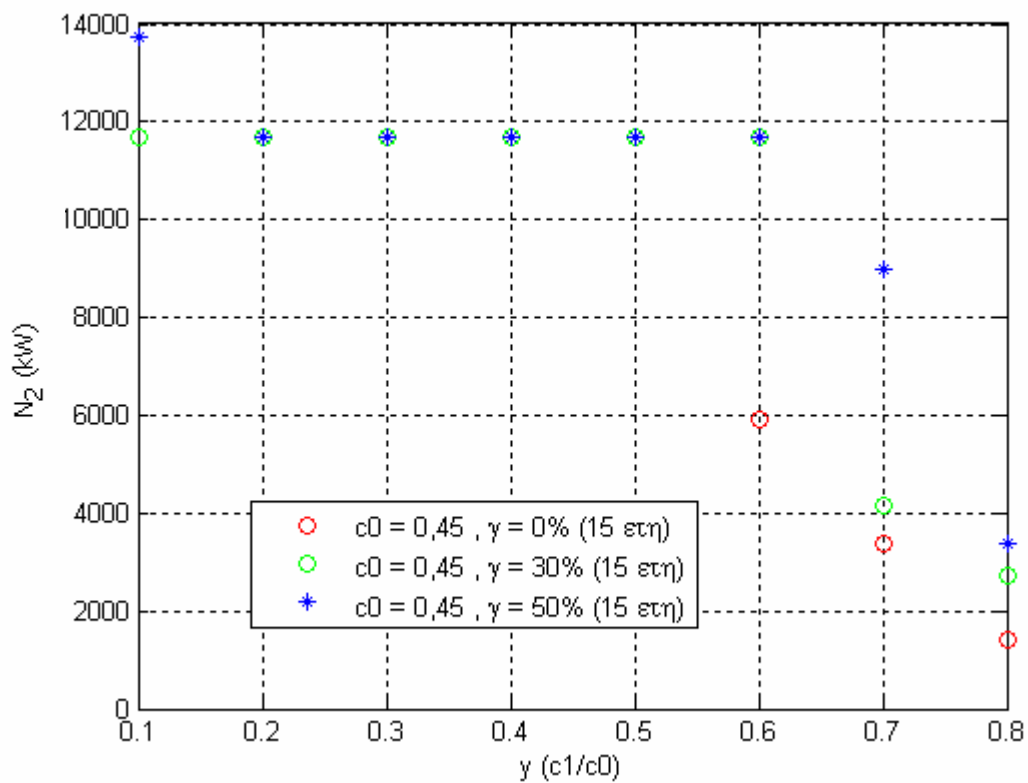
Σχήμα 8.62 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



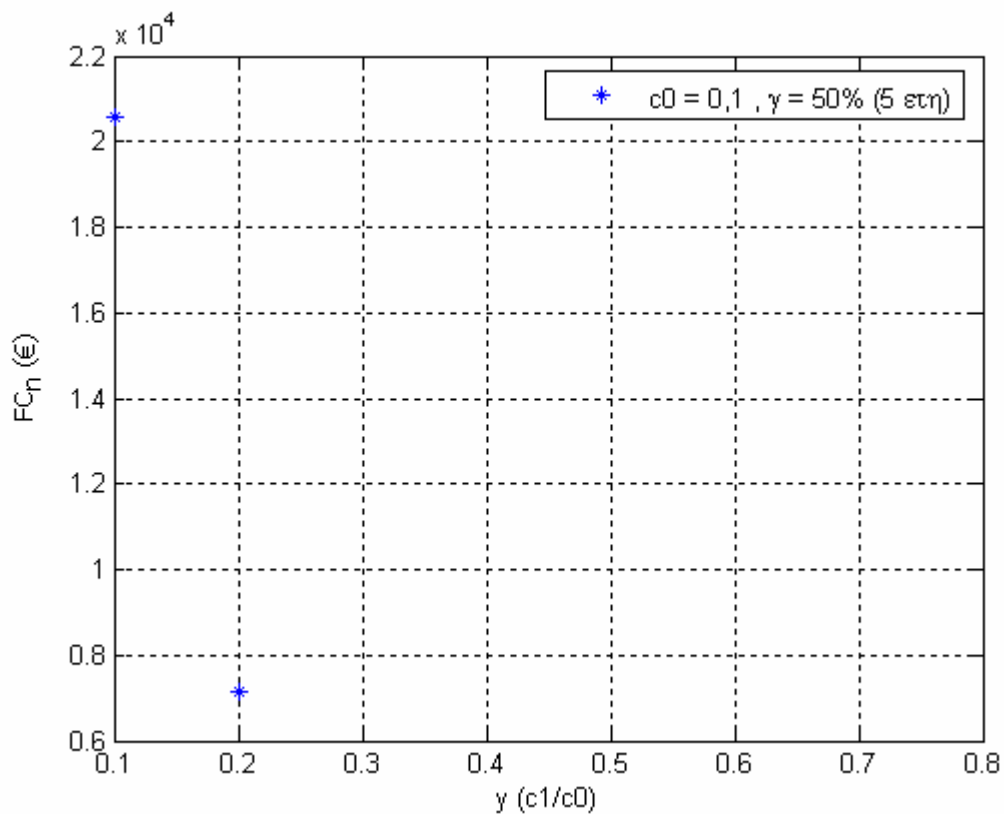
Σχήμα 8.63 Εγγυημένη ισχύς (N₂) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



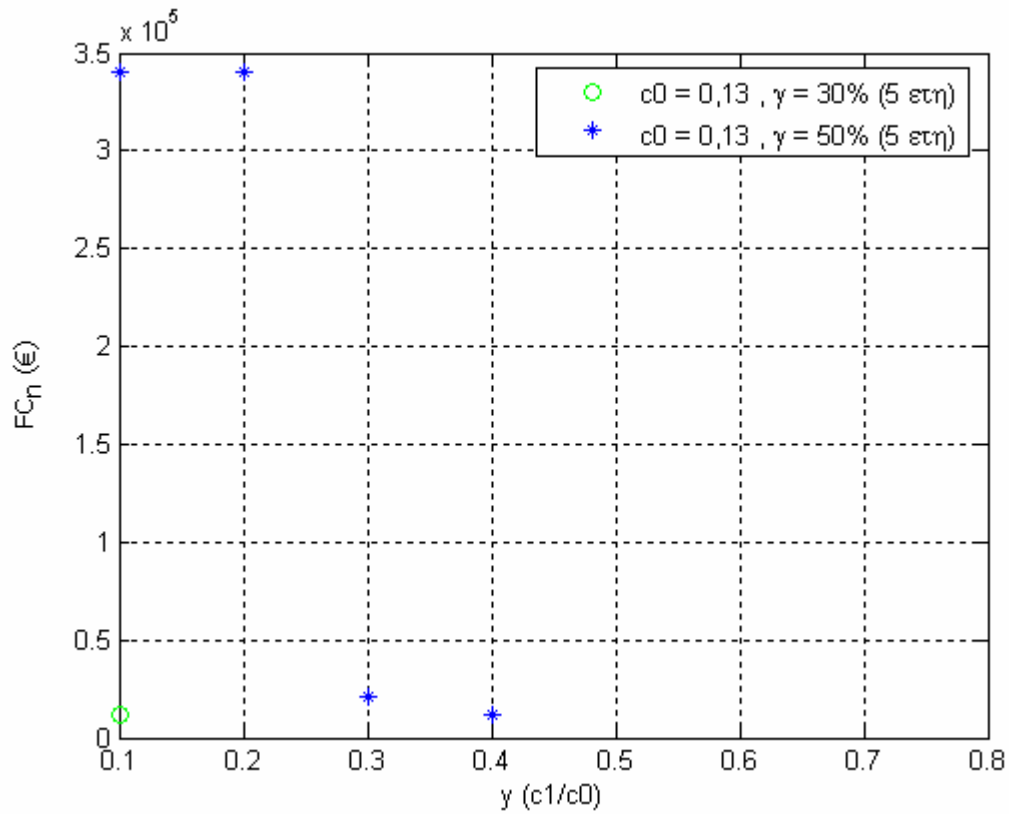
Σχήμα 8.64 Εγγυημένη ισχύς (N₂) για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



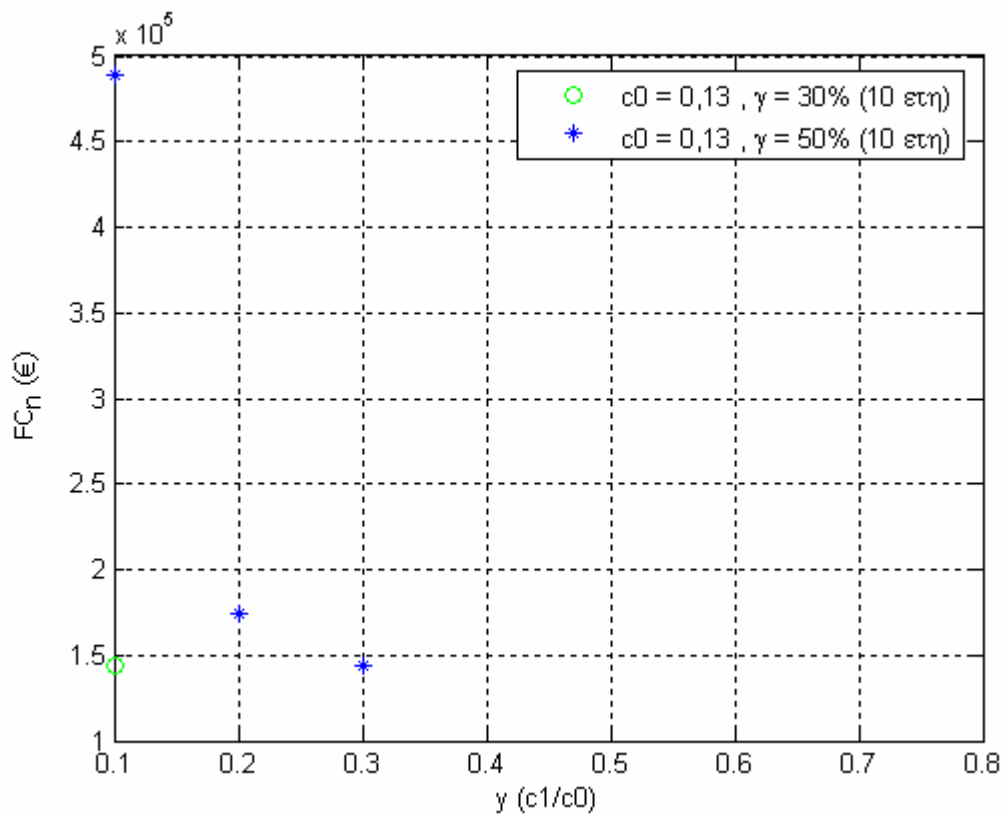
Σχήμα 8.65 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορα ποσά επιδότησης



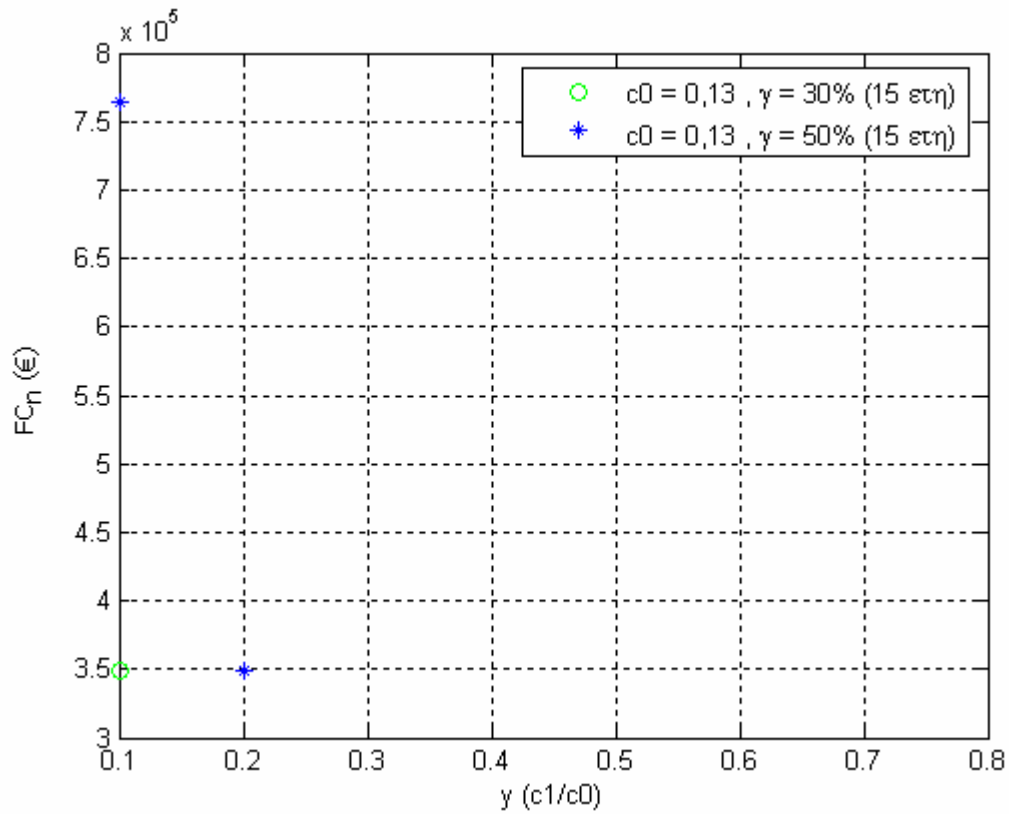
Σχήμα 8.66 Κόστος συντήρησης (F_{c_n}) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



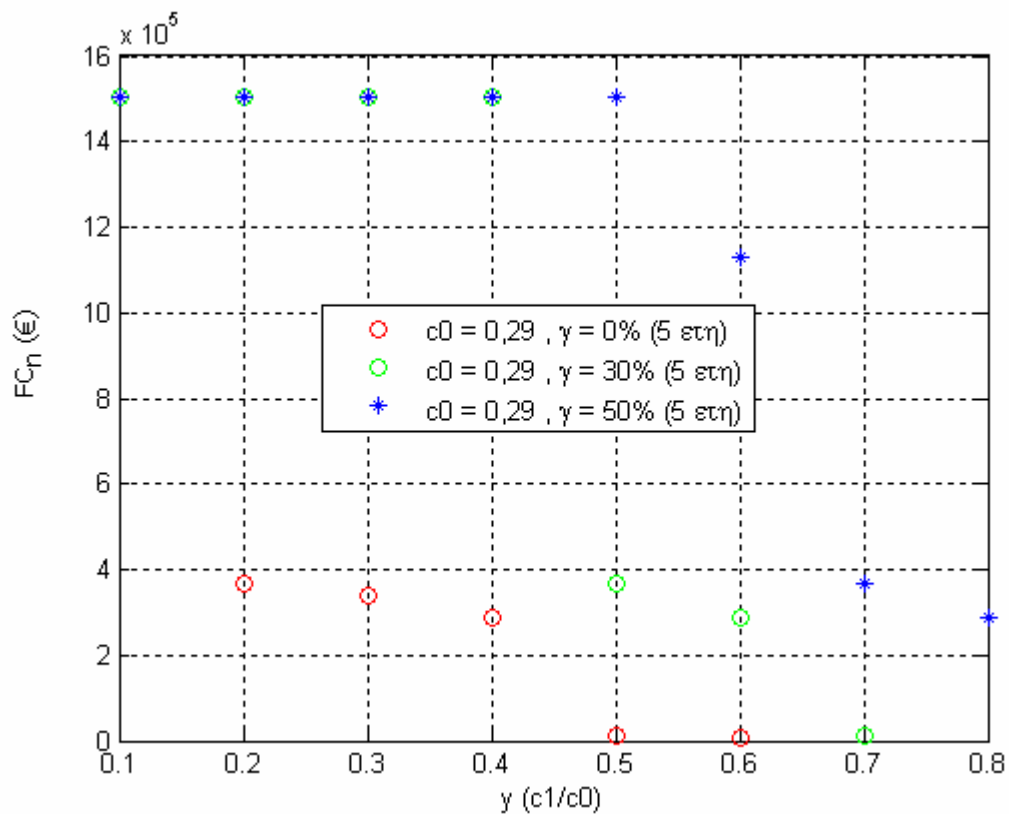
Σχήμα 8.67 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



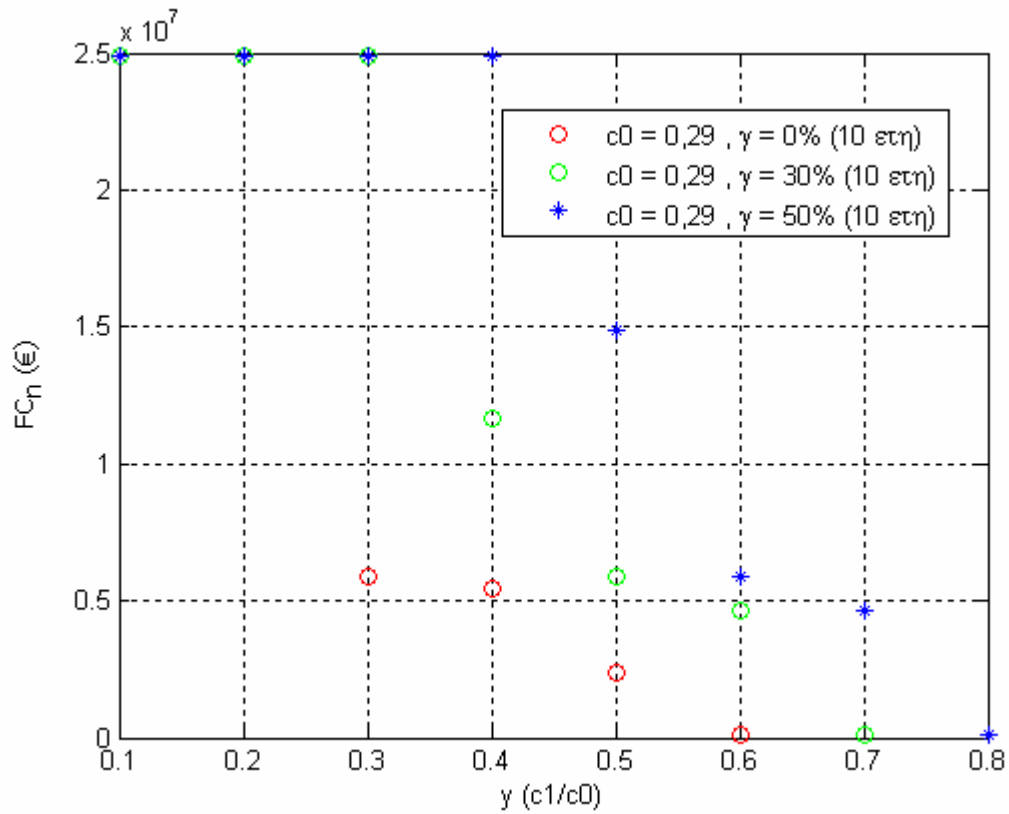
Σχήμα 8.68 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



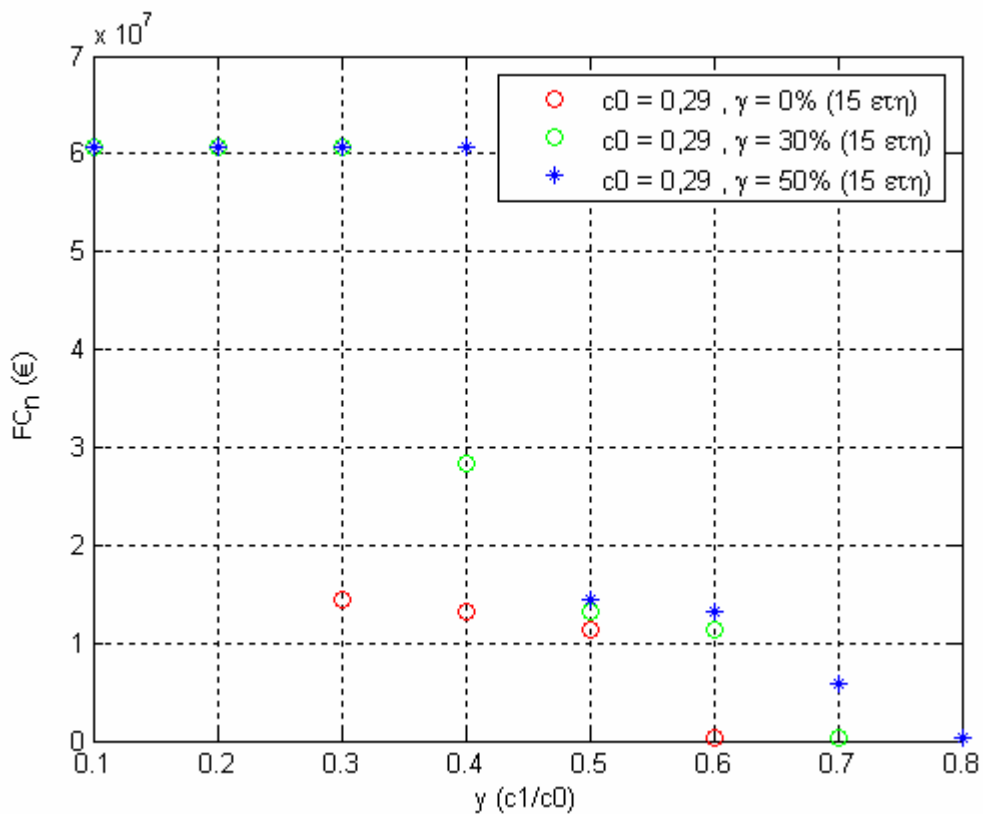
Σχήμα 8.69 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



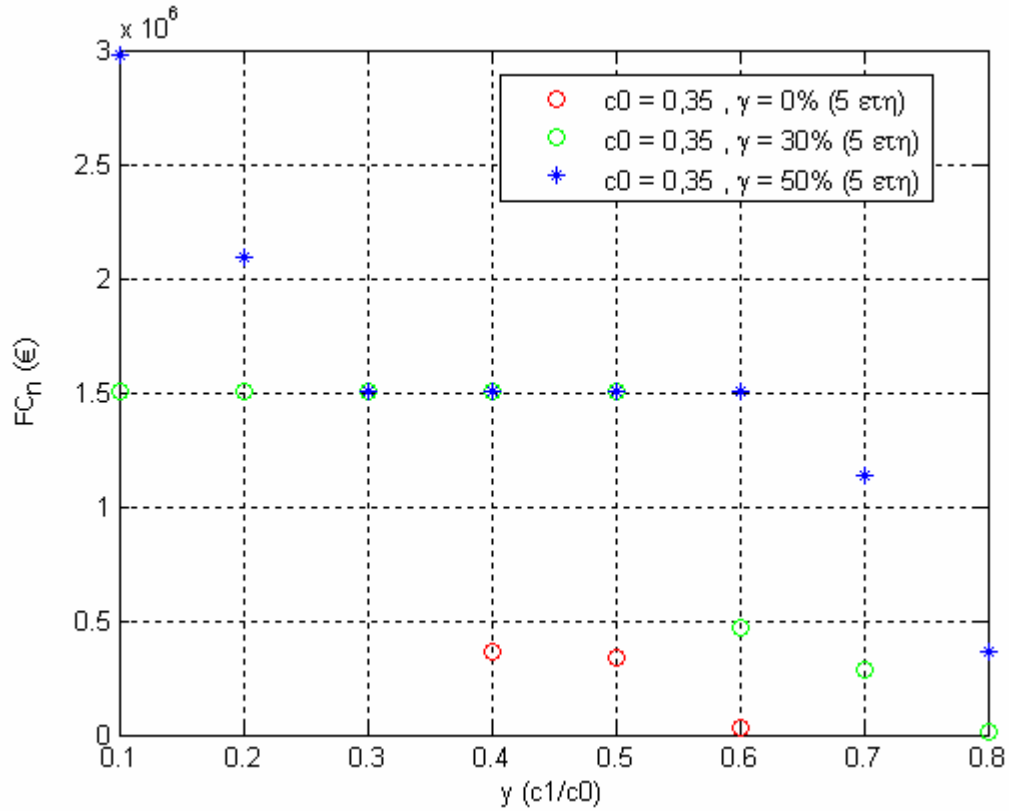
Σχήμα 8.70 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



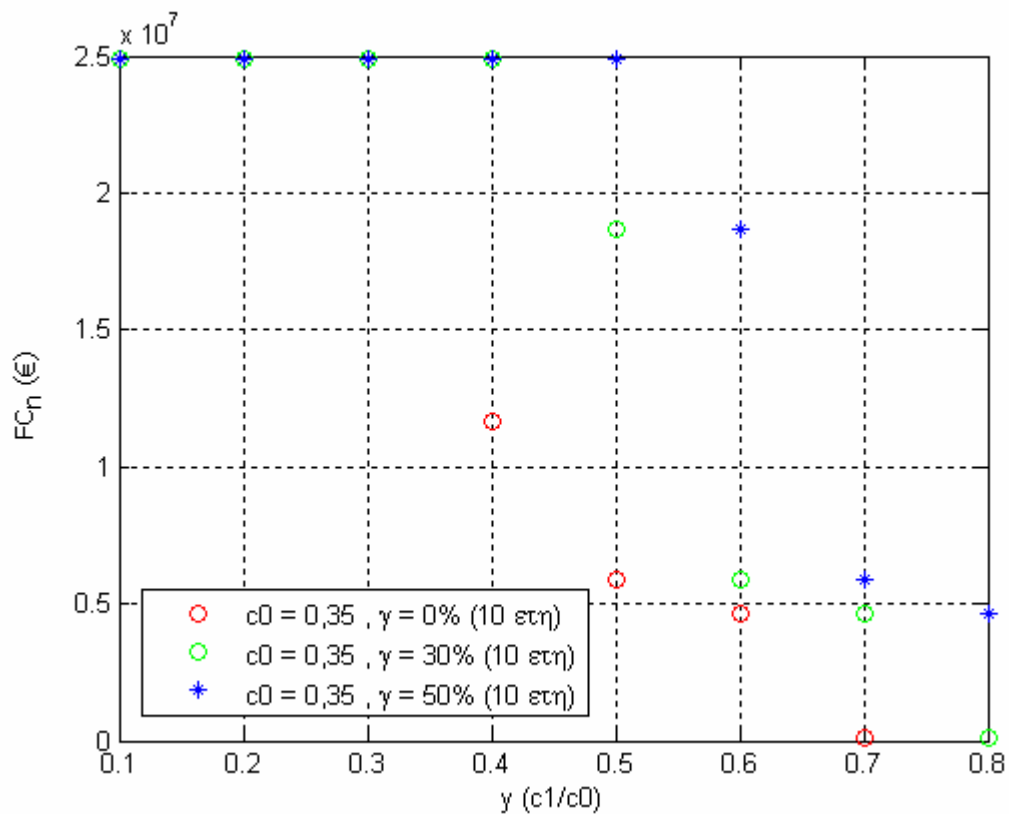
Σχήμα 8.71 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



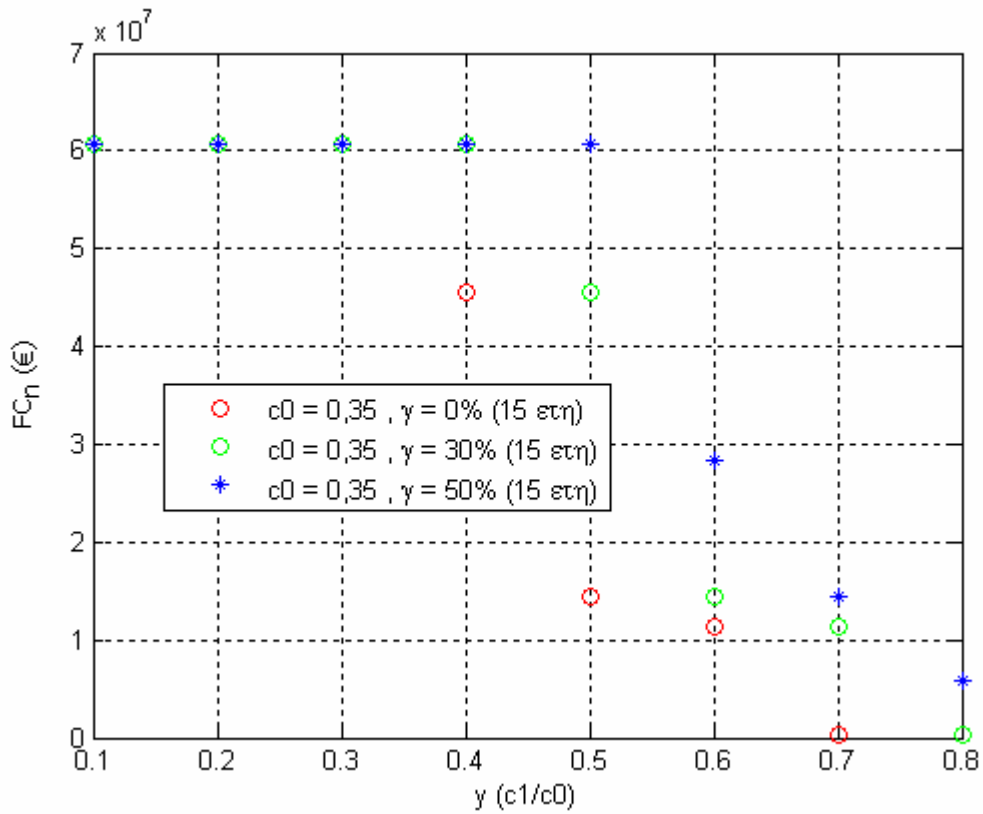
Σχήμα 8.72 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



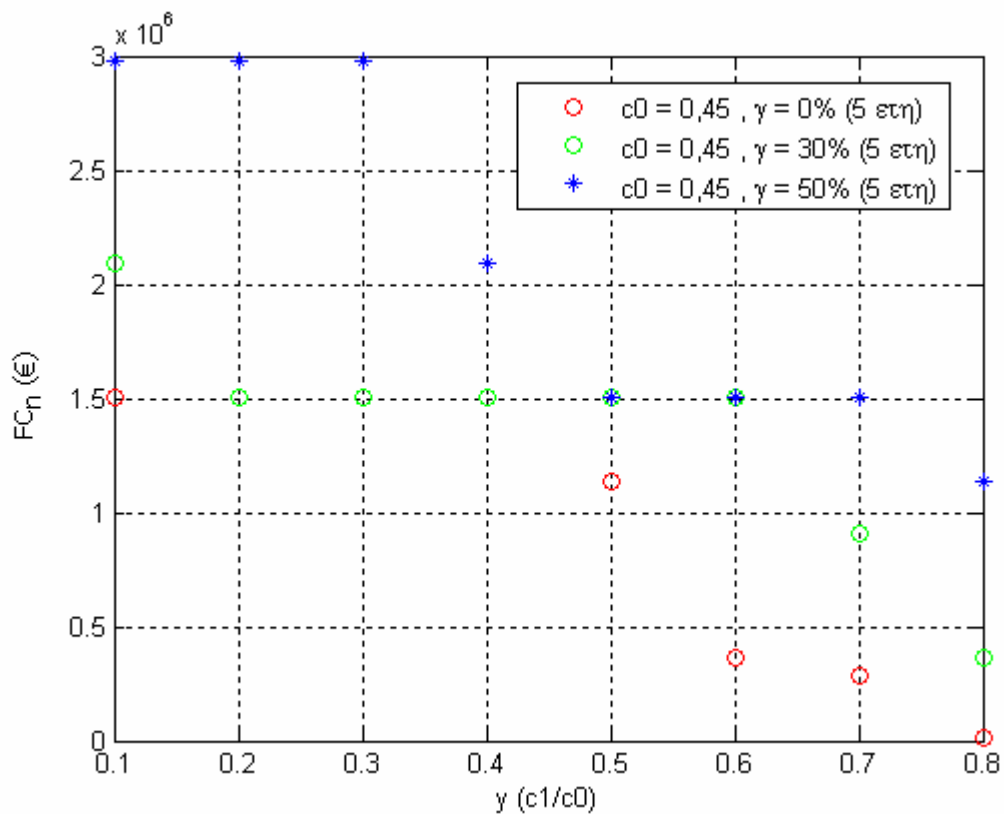
Σχήμα 8.73 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



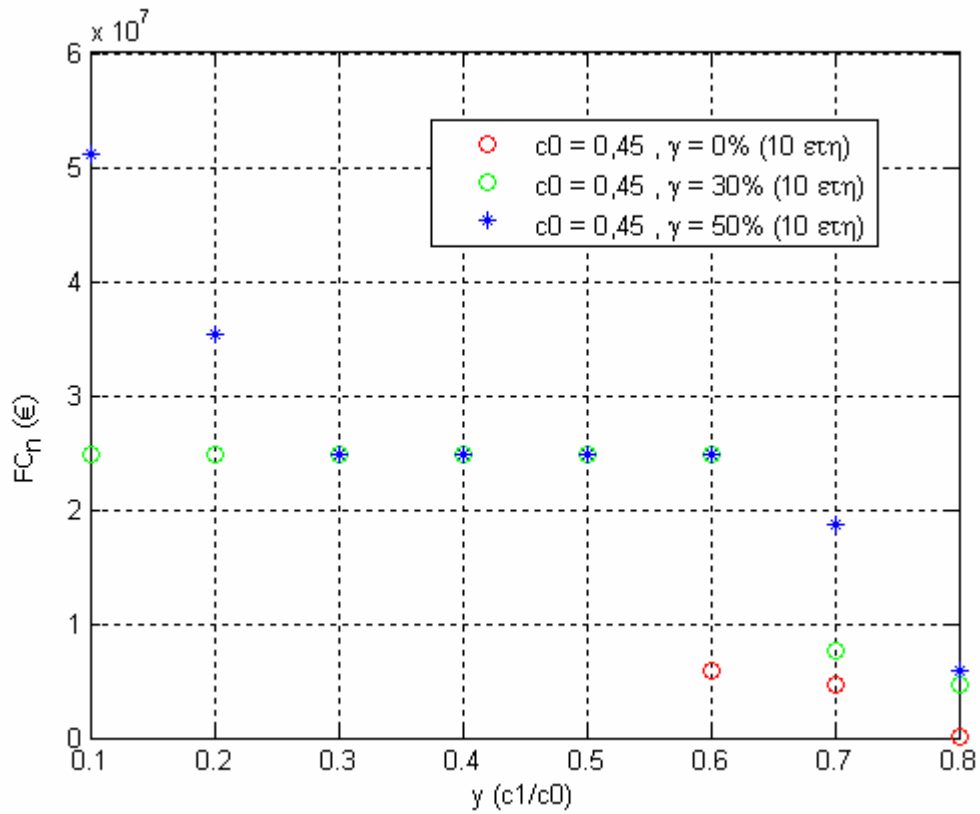
Σχήμα 8.74 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



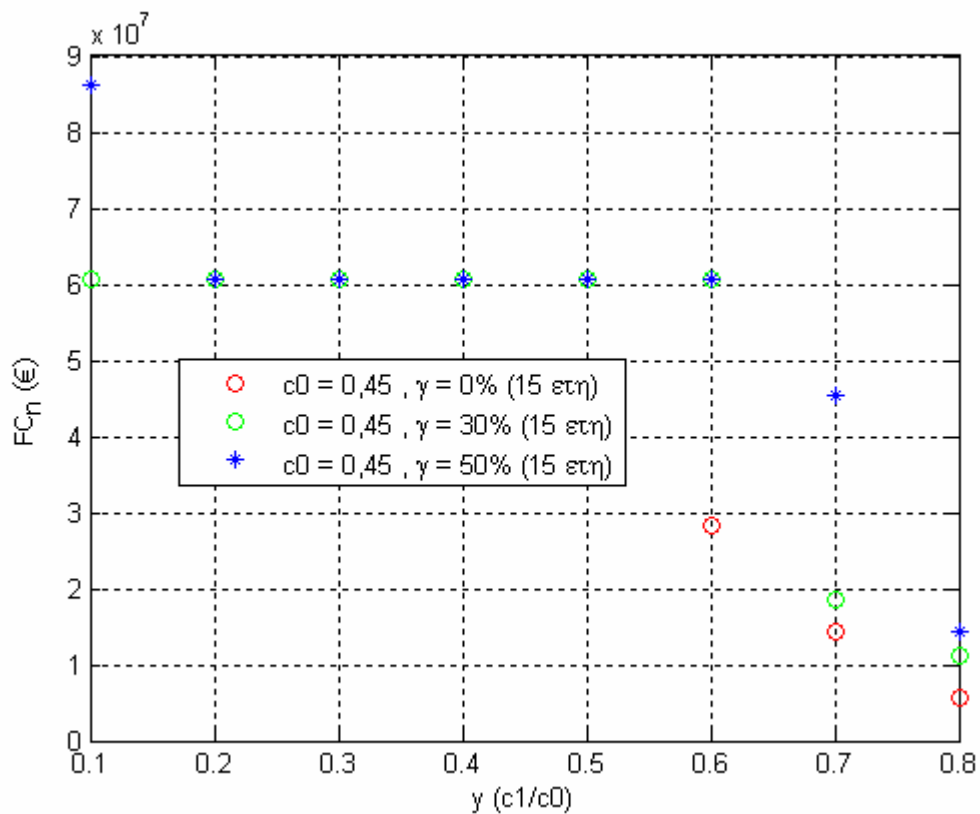
Σχήμα 8.75 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



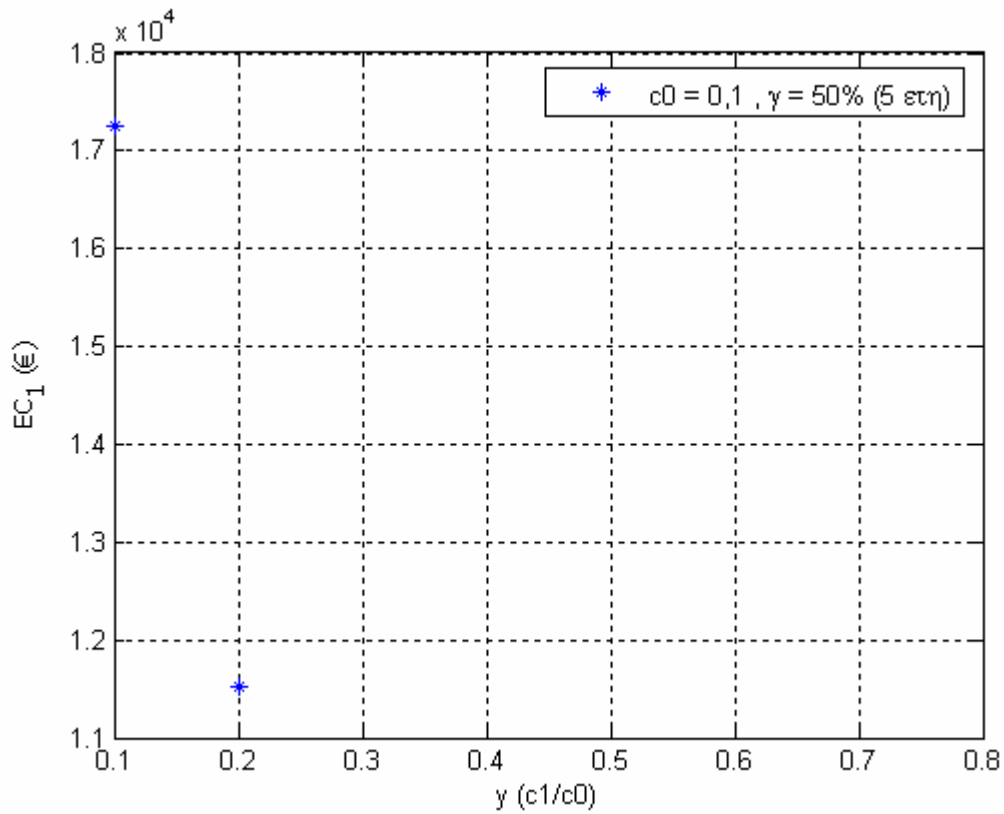
Σχήμα 8.76 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



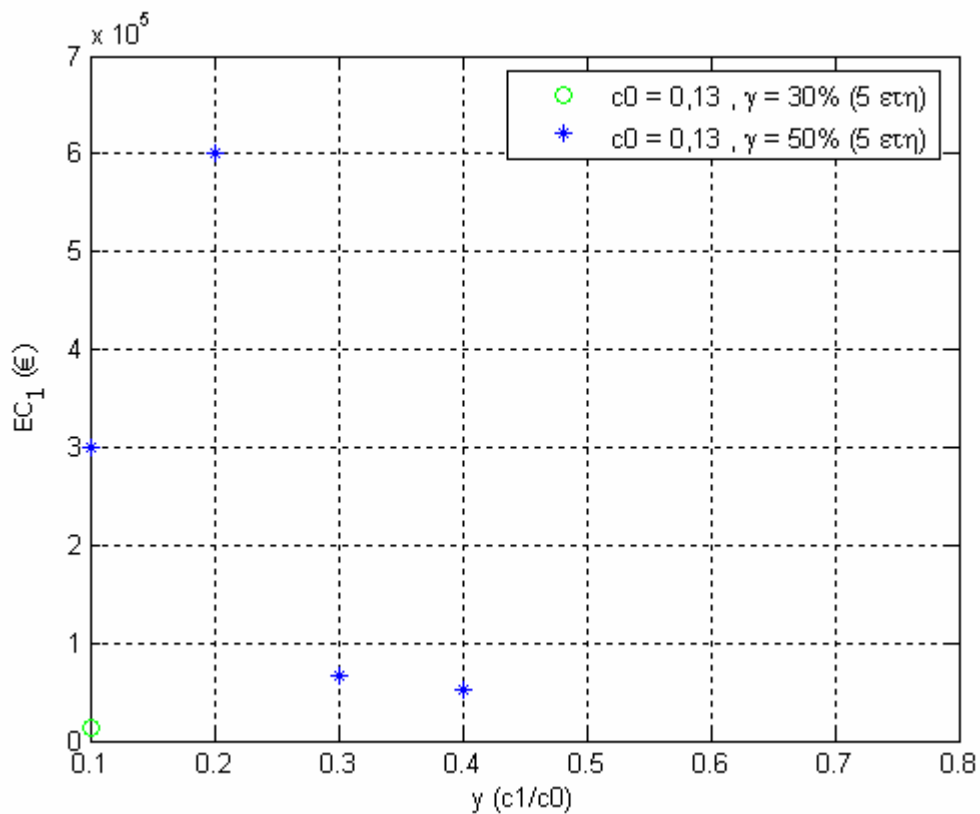
Σχήμα 8.77 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



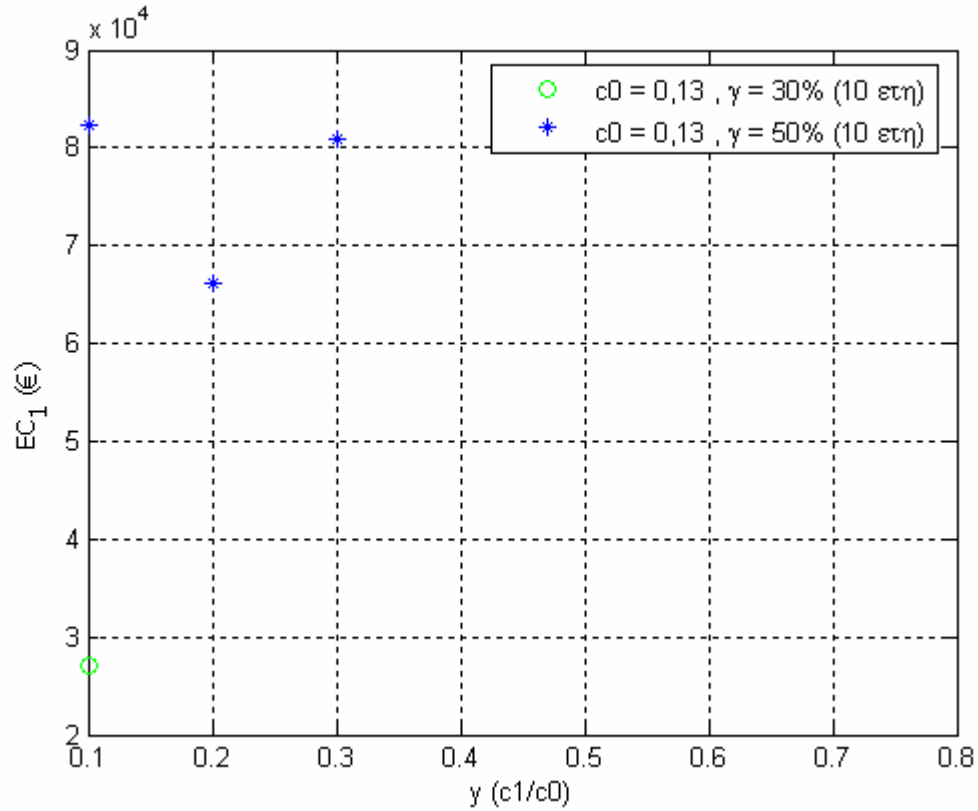
Σχήμα 8.78 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



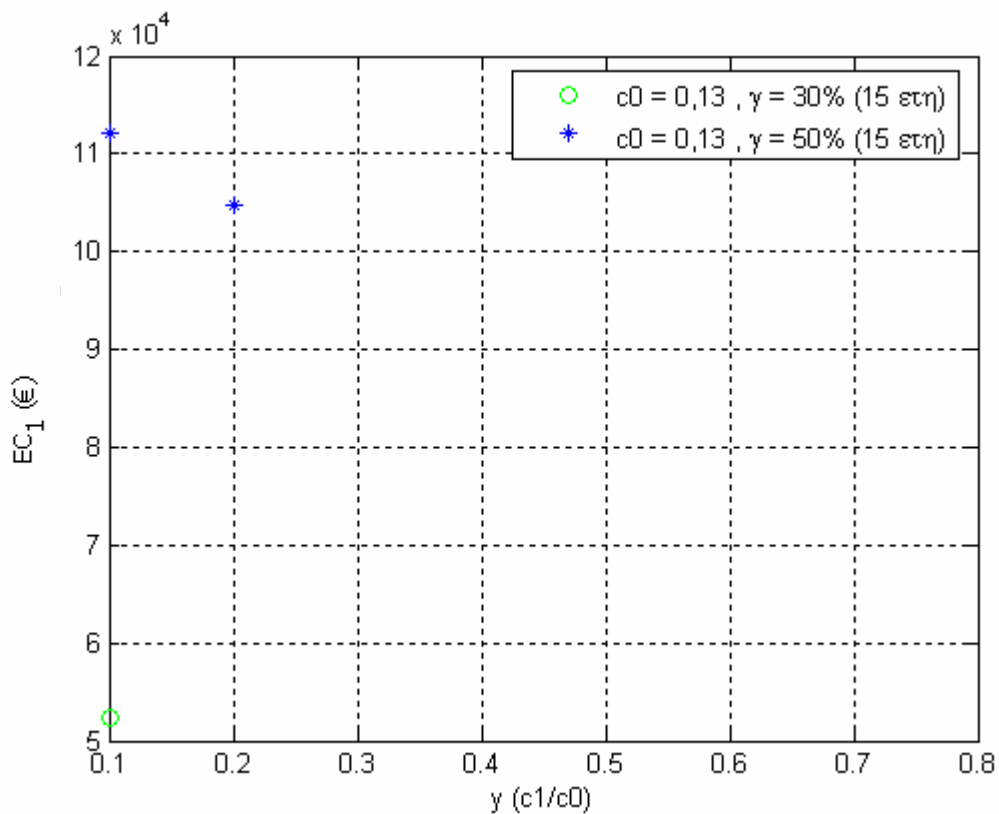
Σχήμα 8.79 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



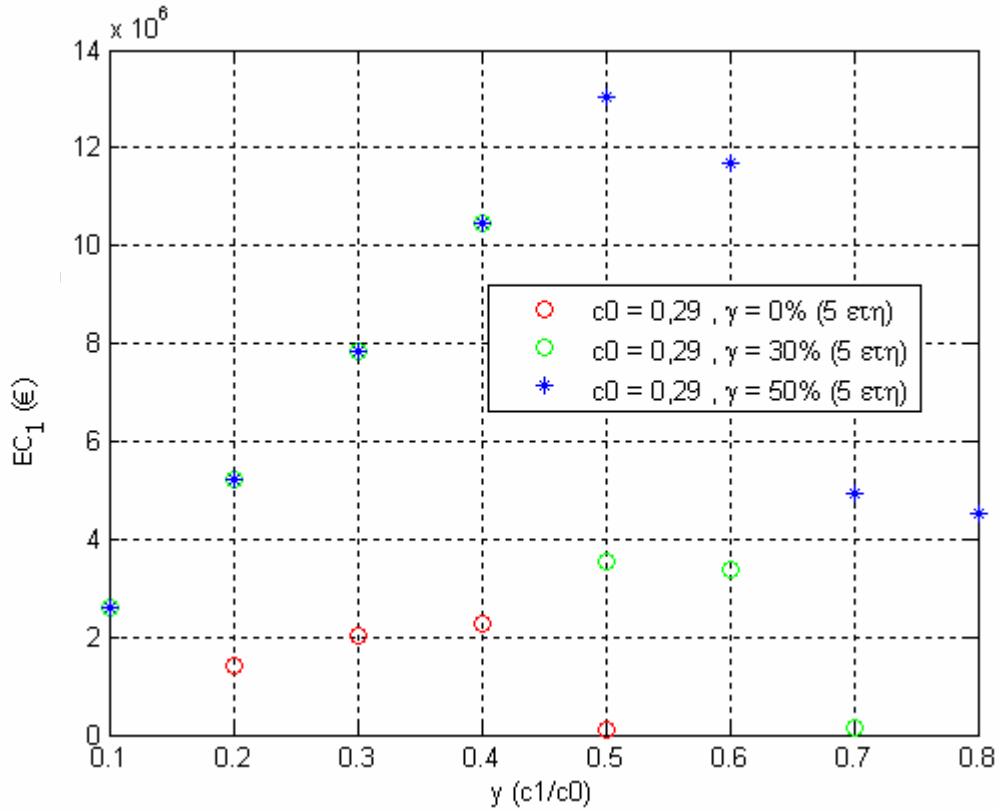
Σχήμα 8.80 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



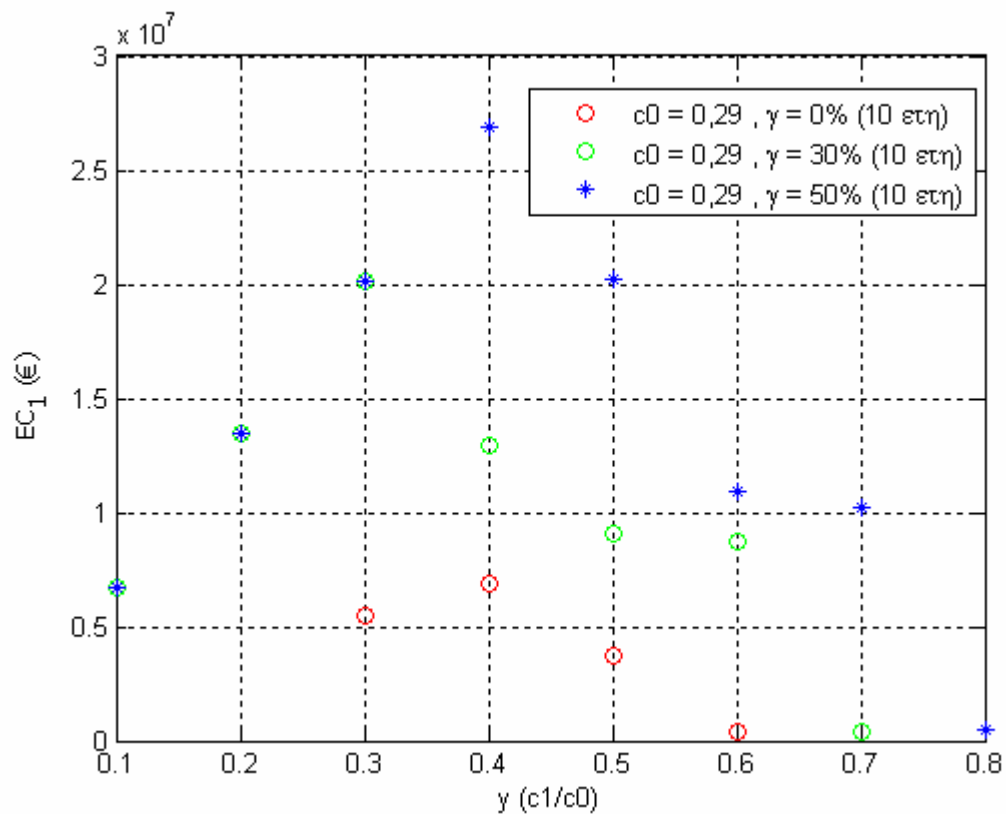
Σχήμα 8.81 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



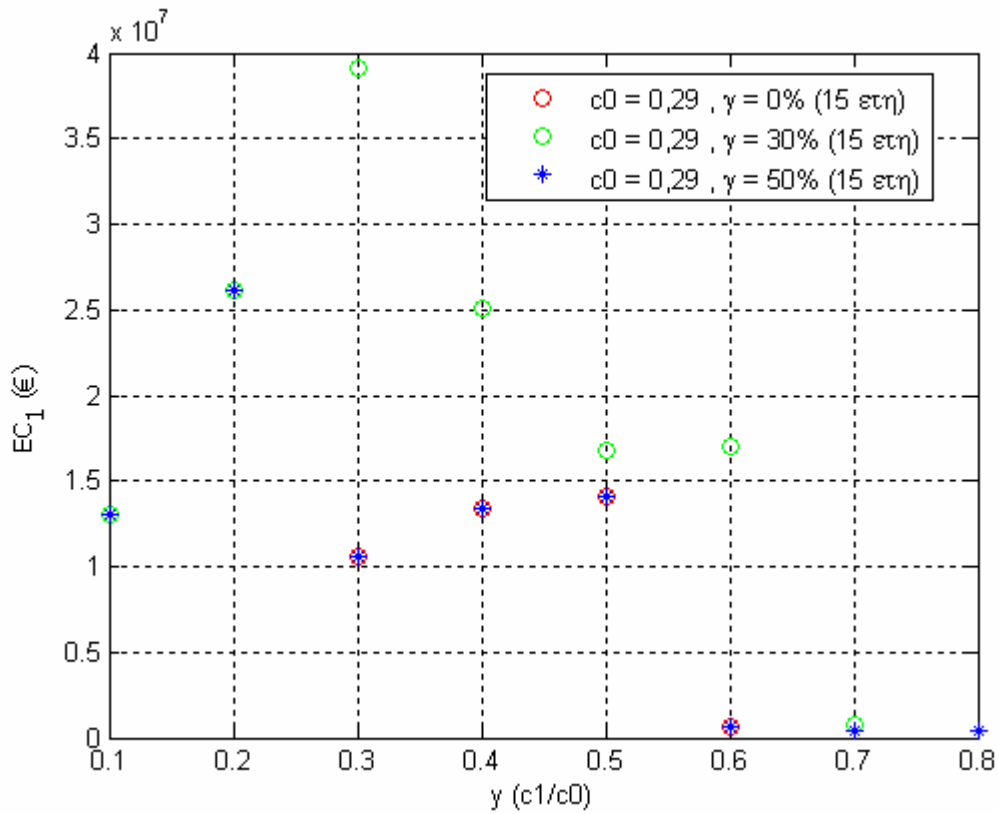
Σχήμα 8.82 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



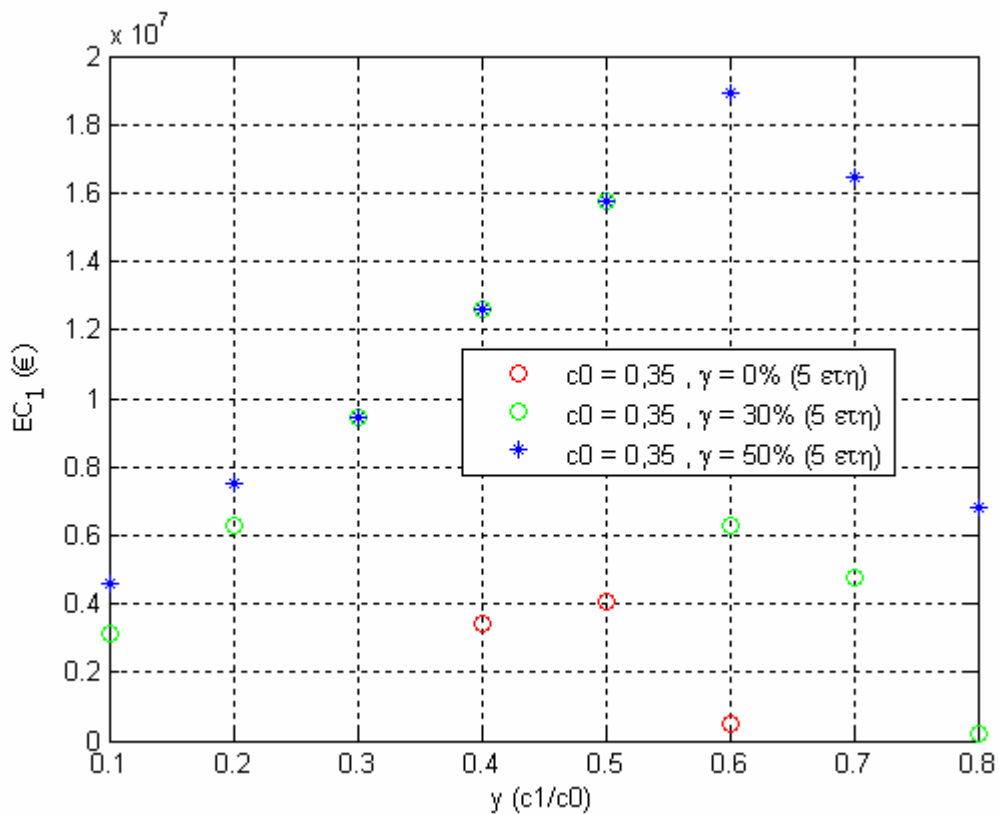
Σχήμα 8.83 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



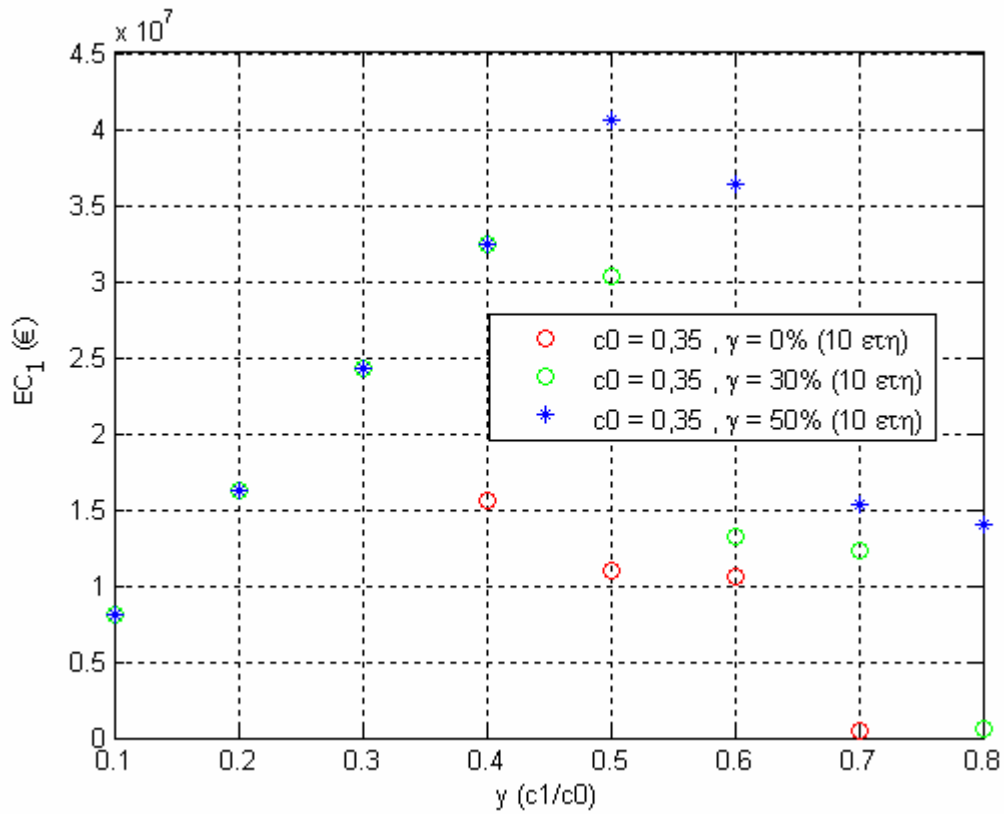
Σχήμα 8.84 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



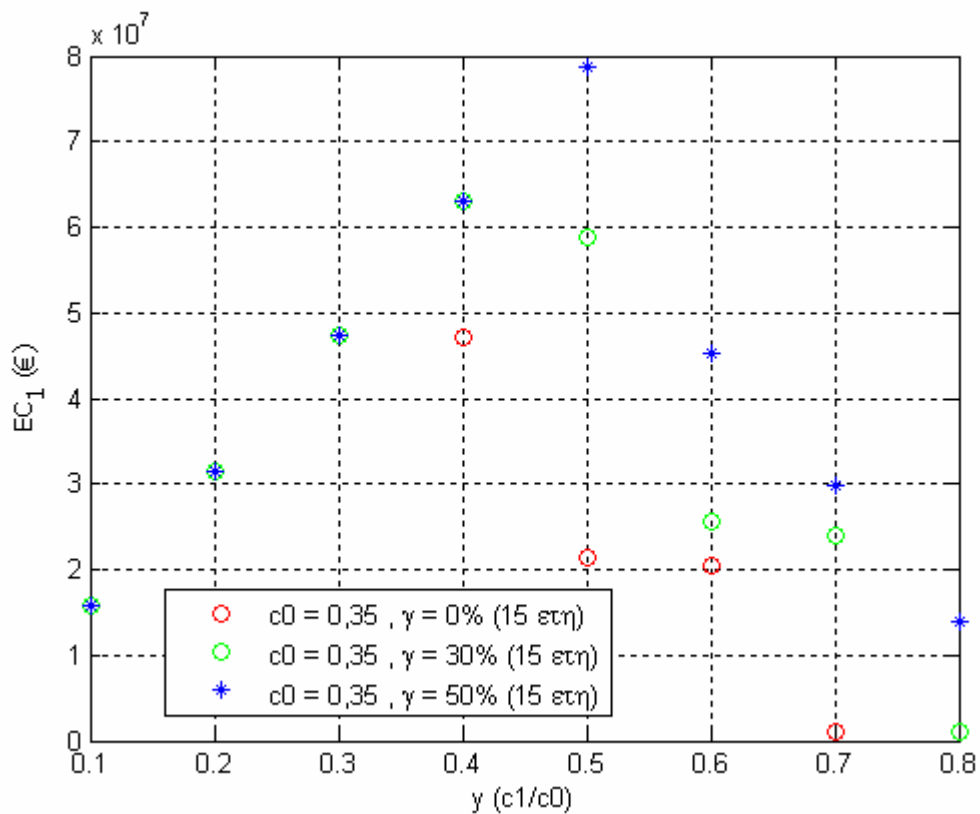
Σχήμα 8.85 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



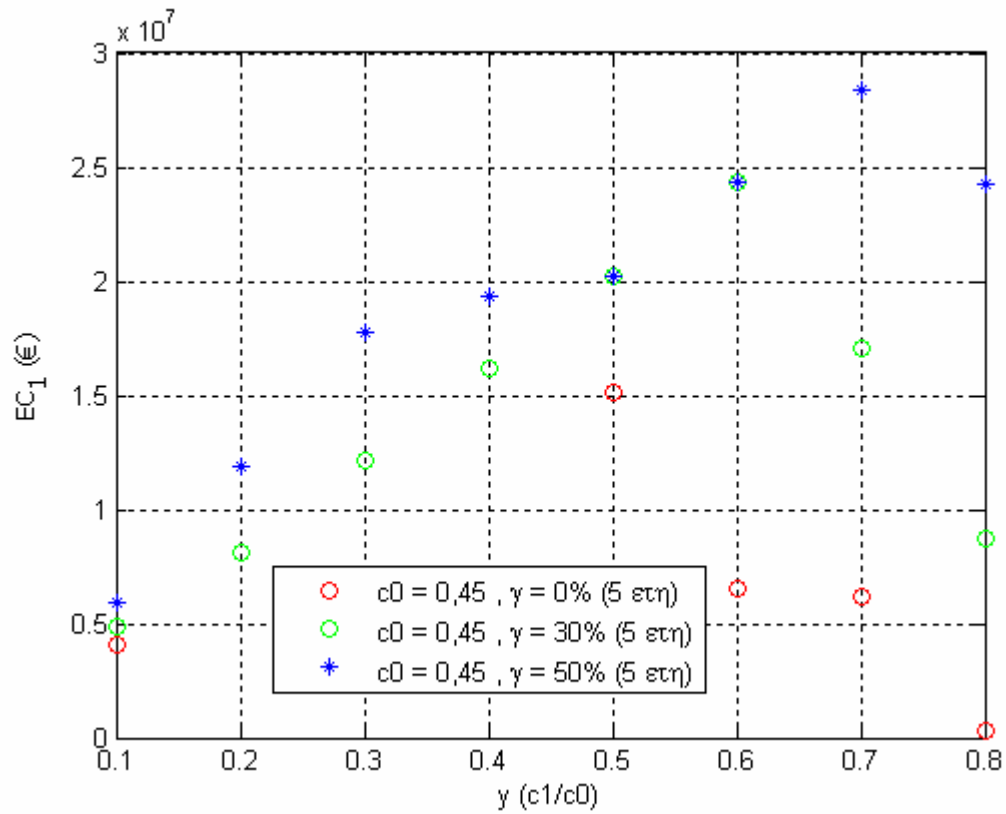
Σχήμα 8.86 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



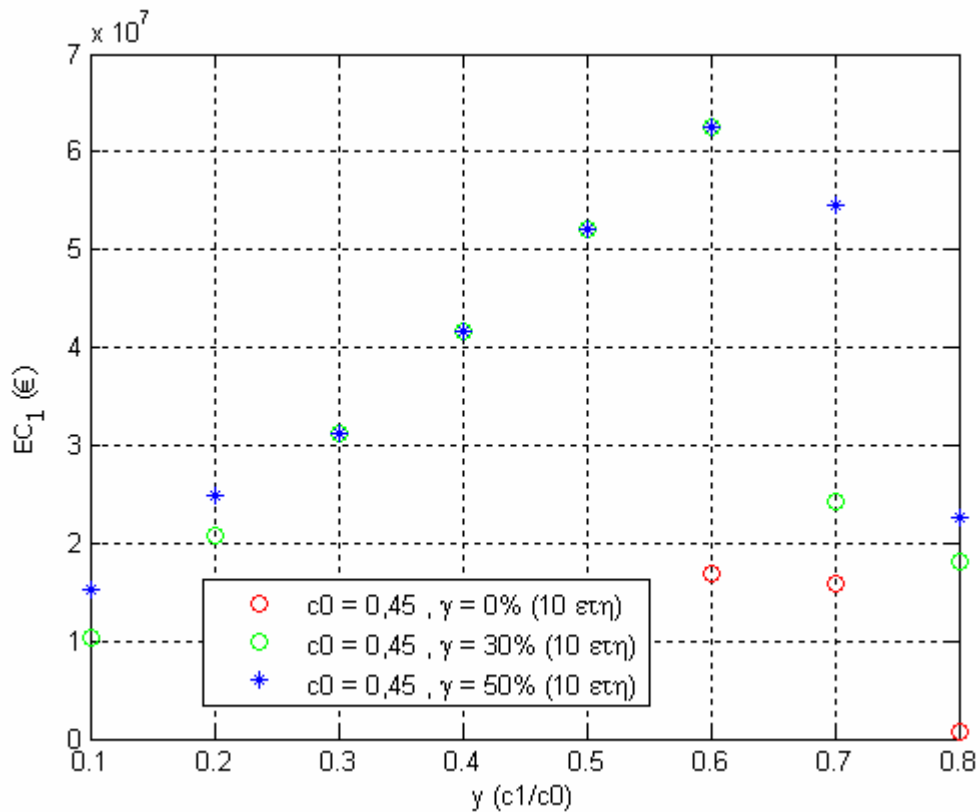
Σχήμα 8.87 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



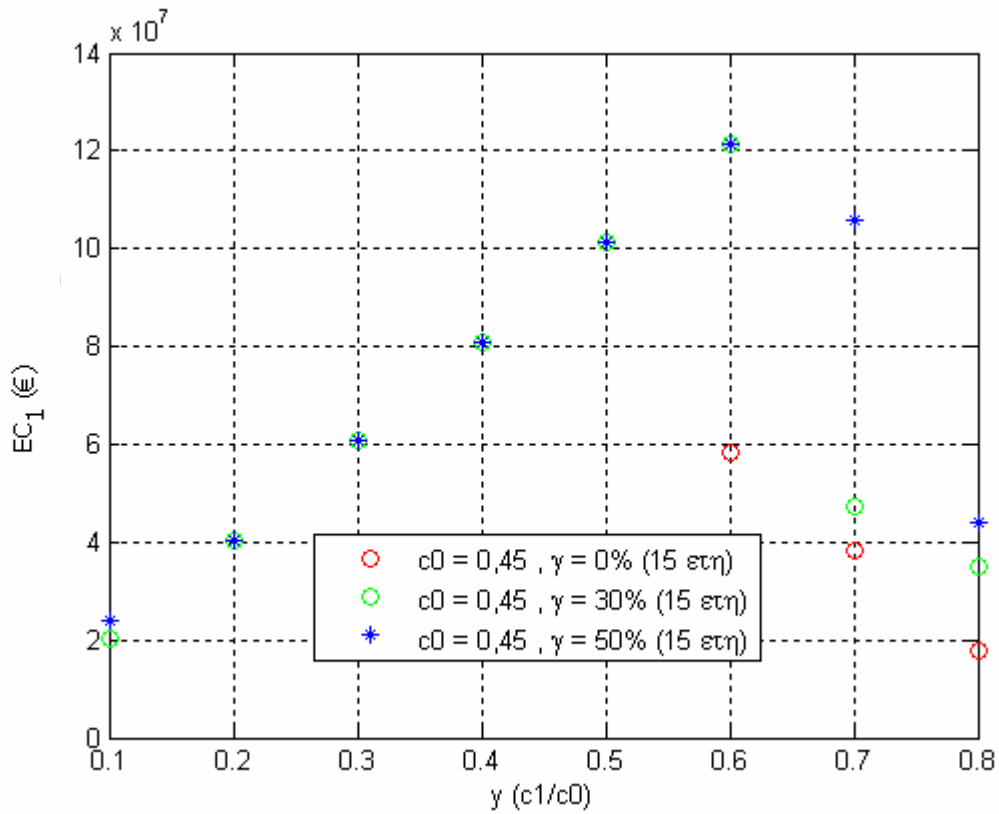
Σχήμα 8.88 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



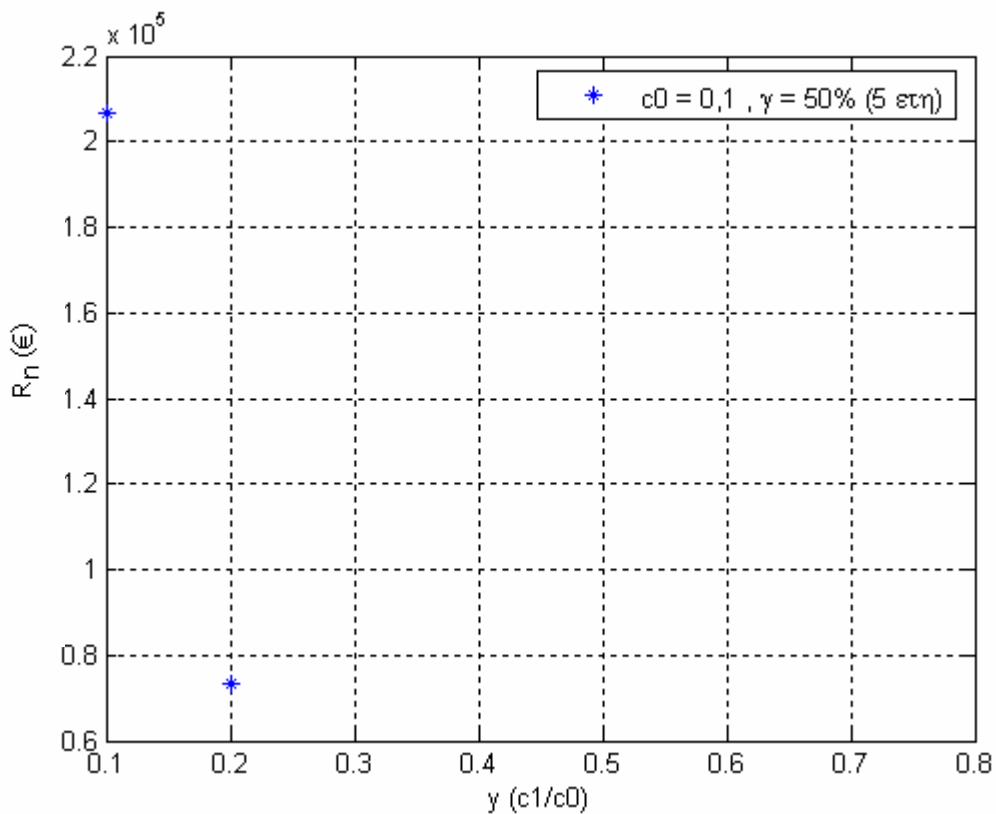
Σχήμα 8.89 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



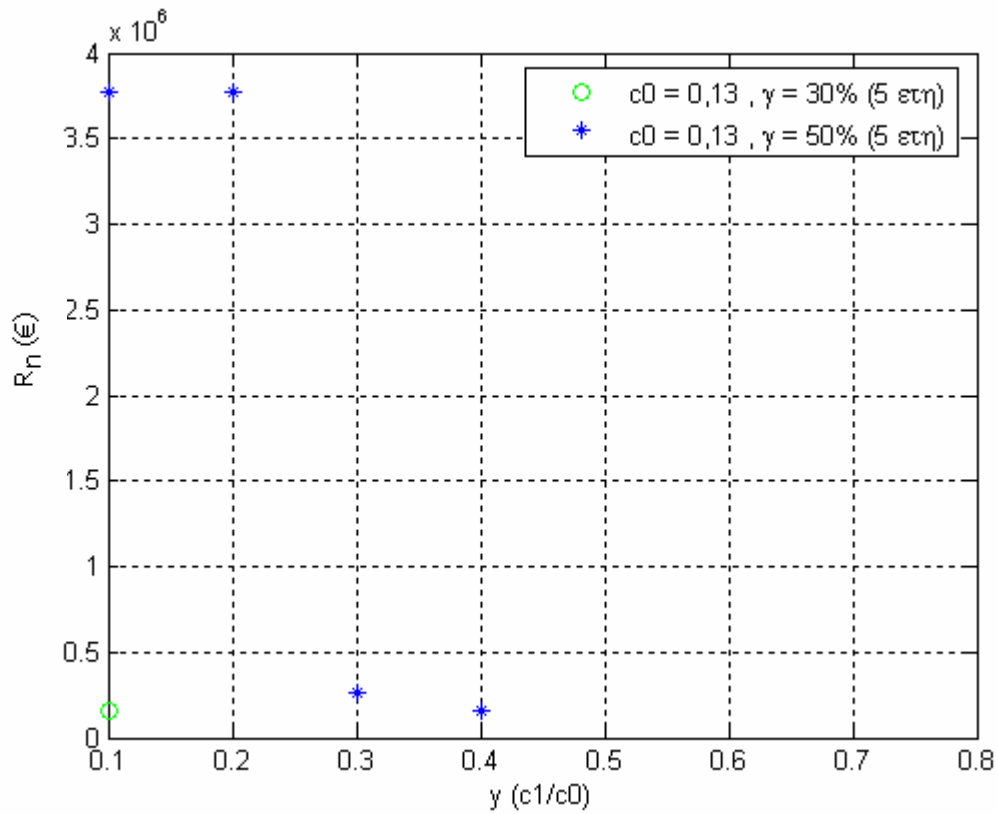
Σχήμα 8.90 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



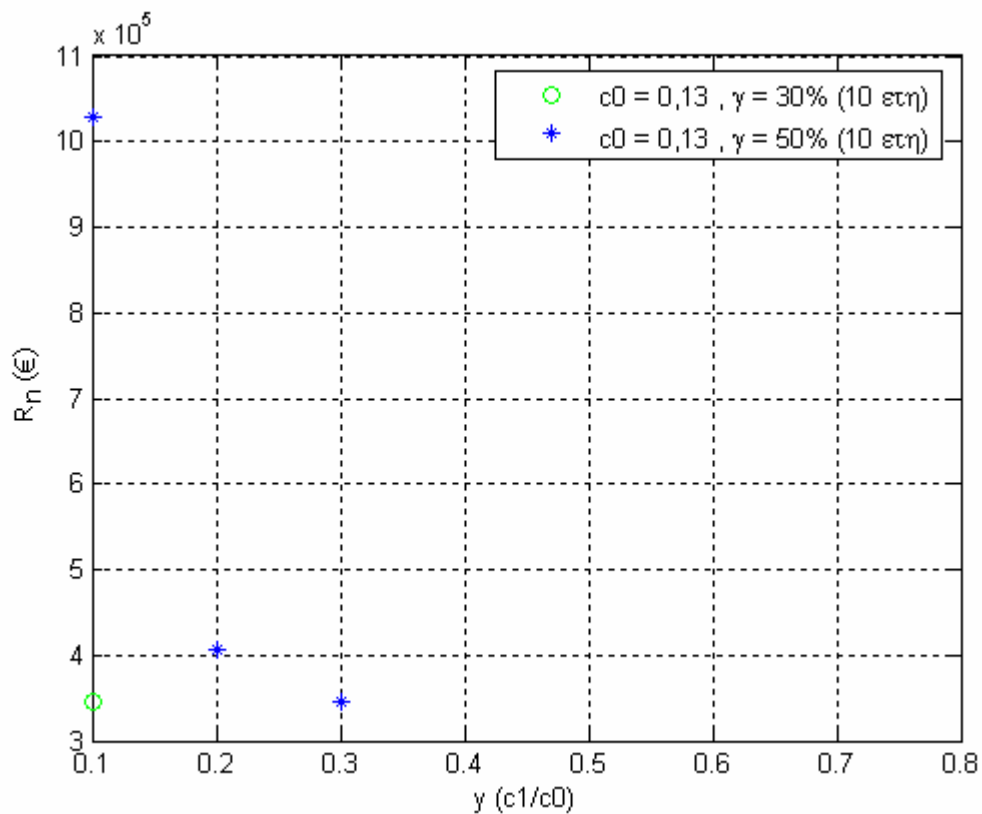
Σχήμα 8.91 Κόστος εισαγόμενης ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



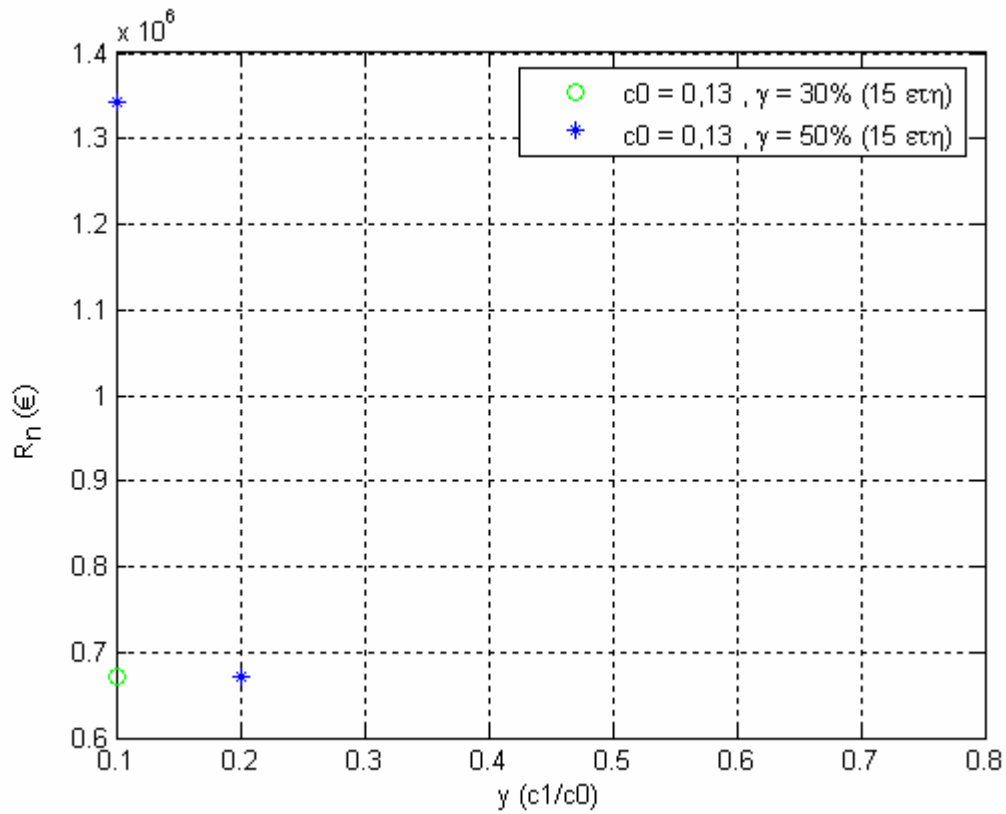
Σχήμα 8.92 Κέρδη R_n για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



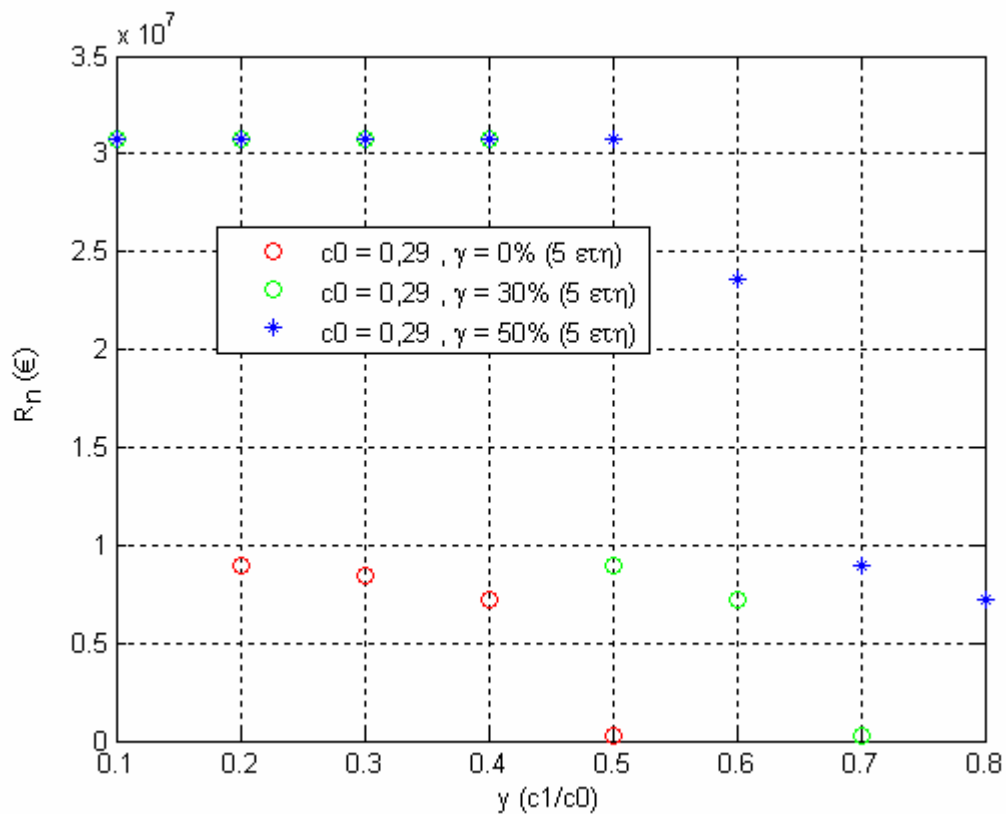
Σχήμα 8.93 Κέρδη R_n για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



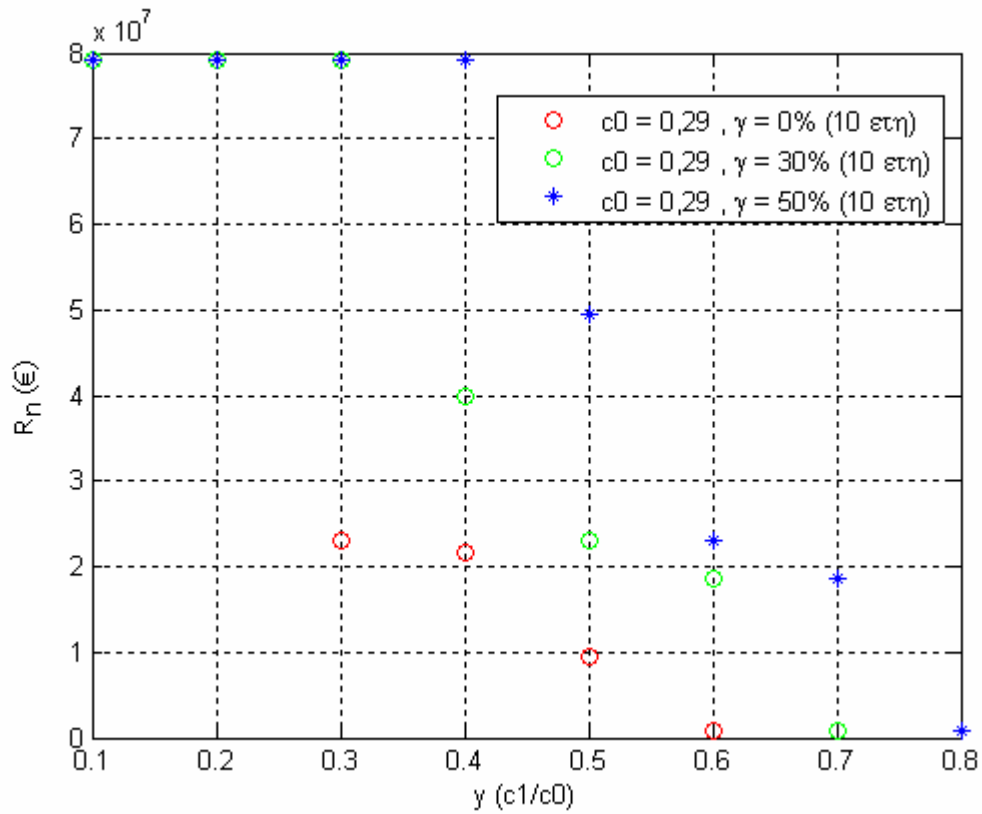
Σχήμα 8.94 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



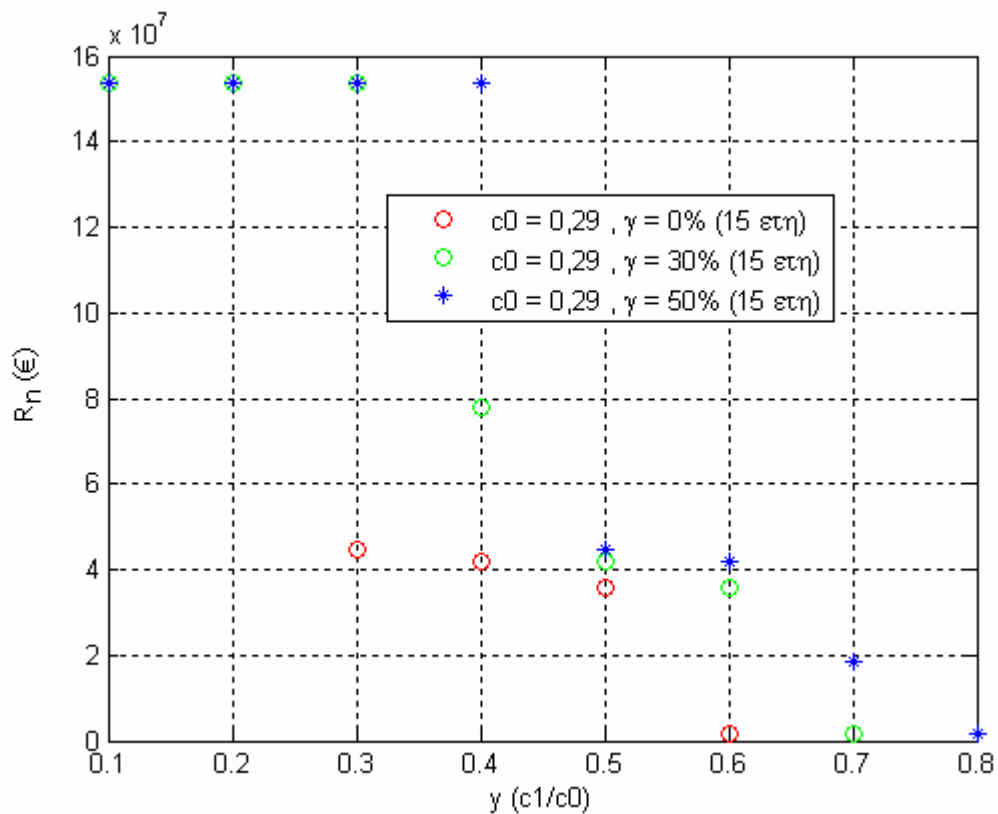
Σχήμα 8.95 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



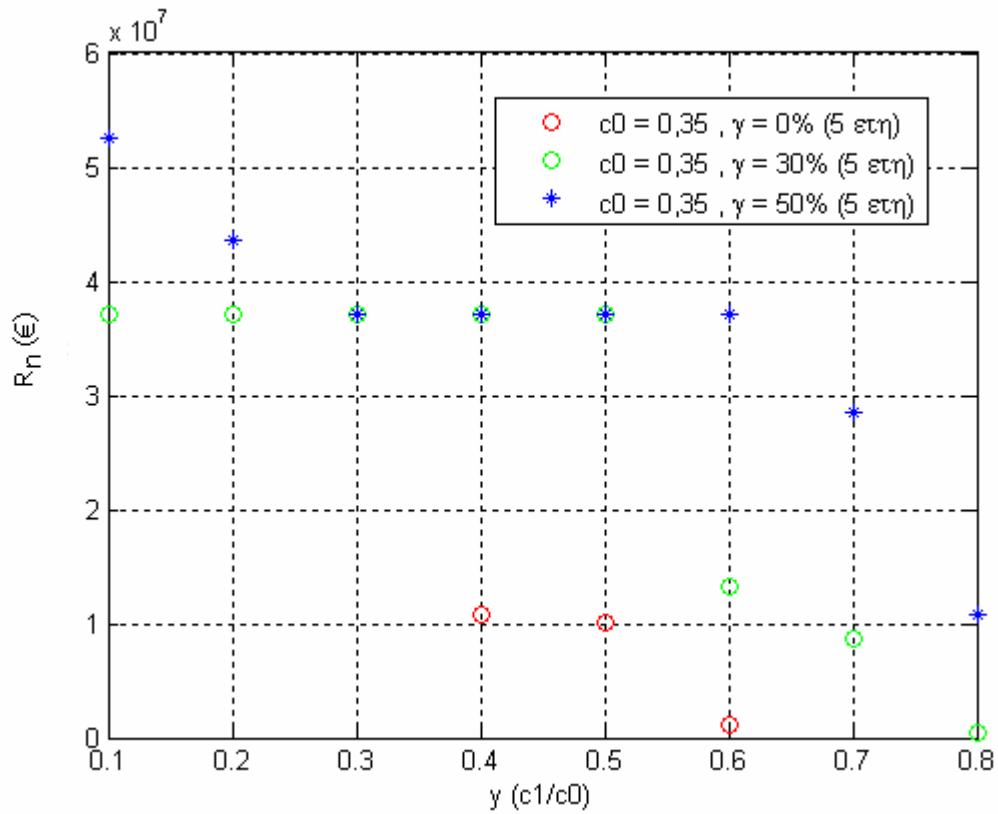
Σχήμα 8.96 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



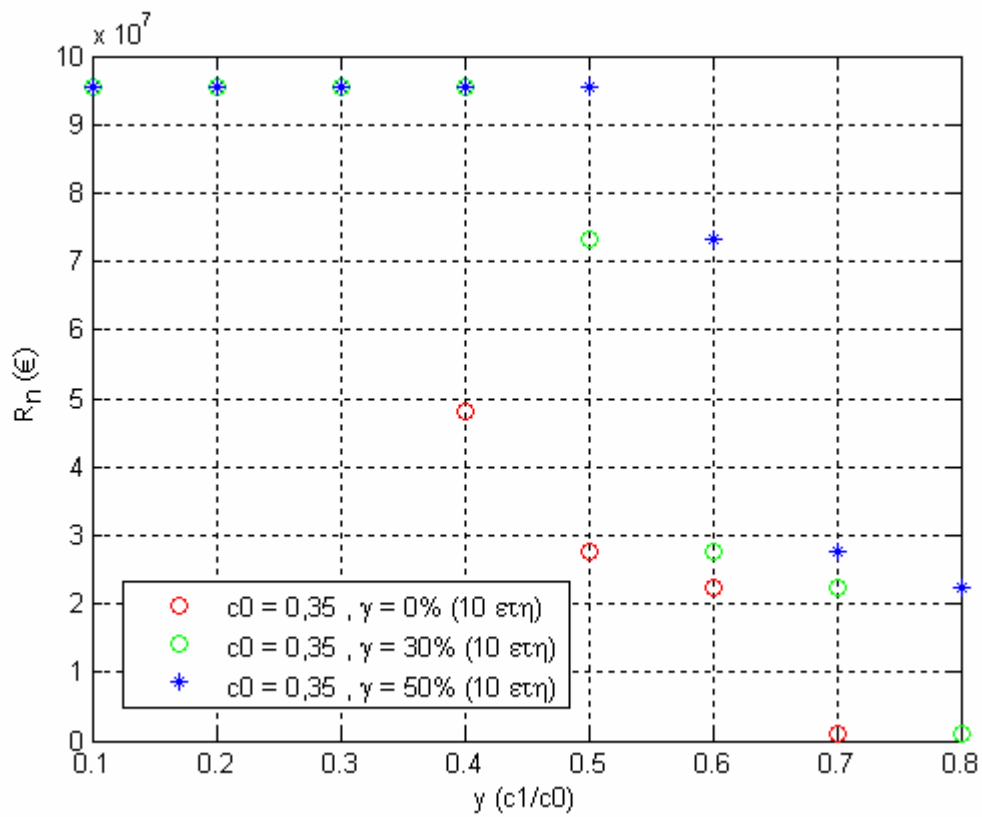
Σχήμα 8.97 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



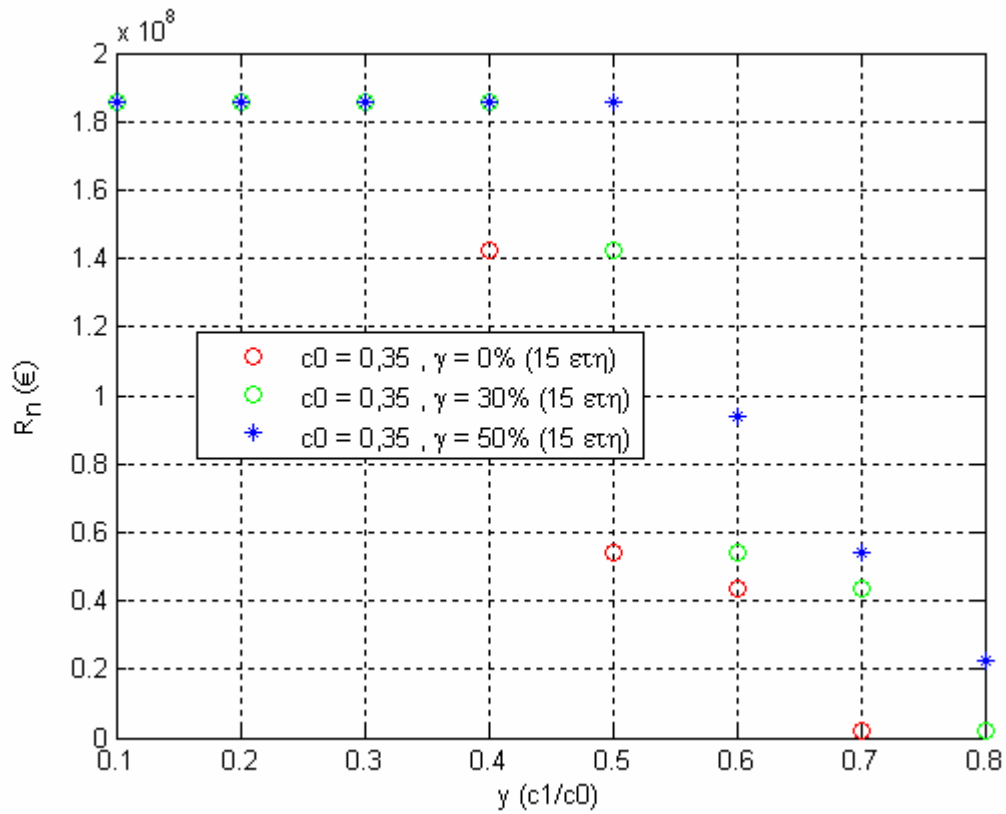
Σχήμα 8.98 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



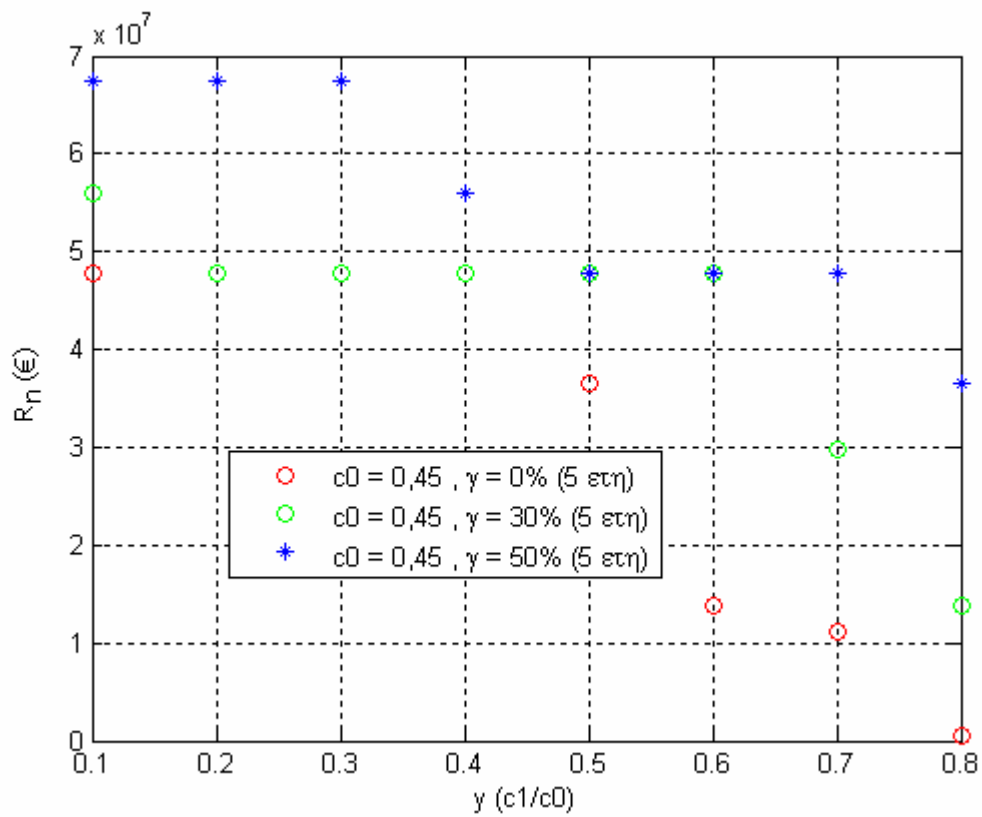
Σχήμα 8.99 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



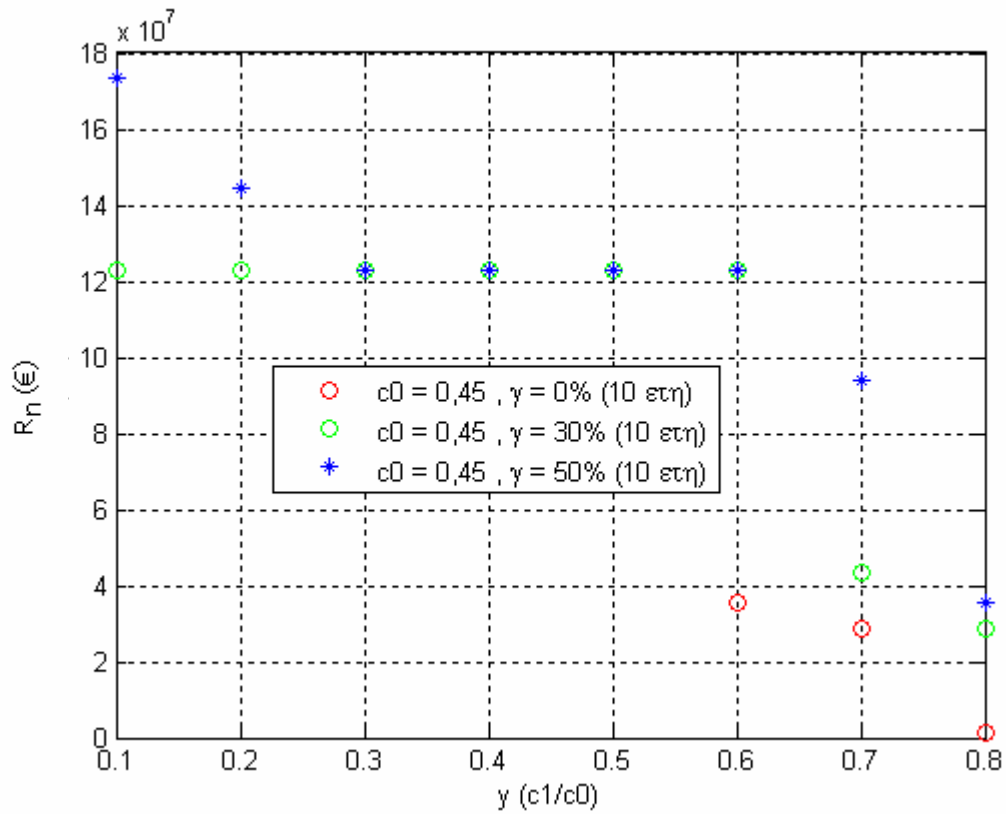
Σχήμα 8.100 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



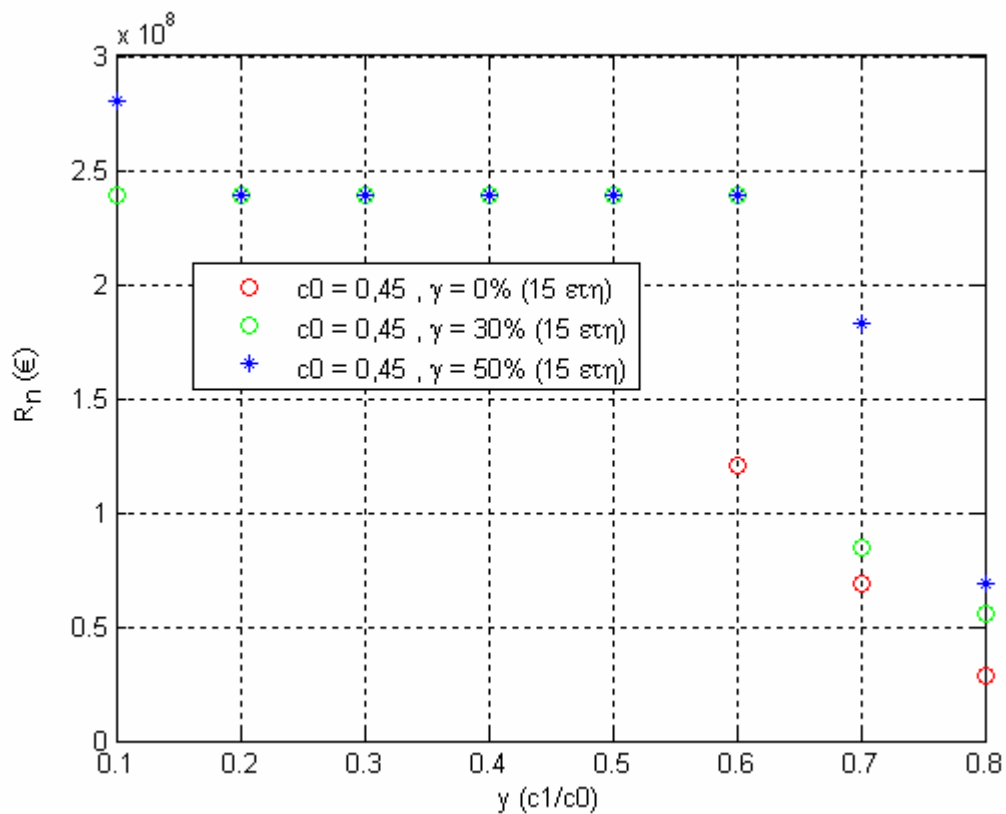
Σχήμα 8.101 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



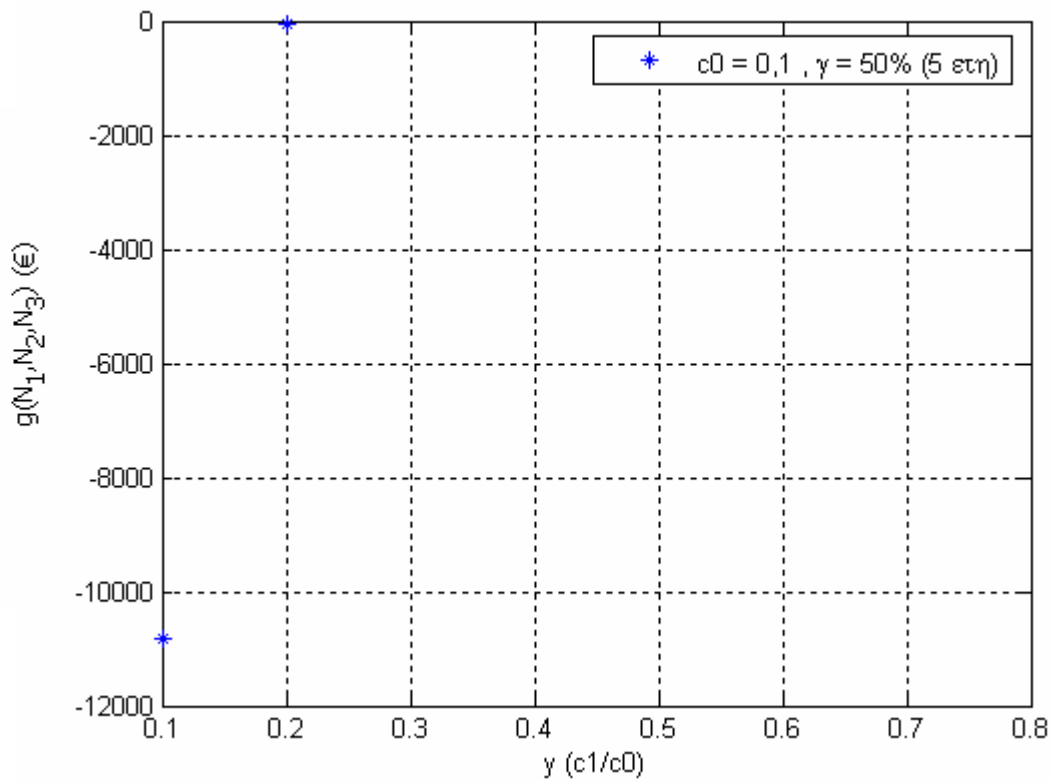
Σχήμα 8.102 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



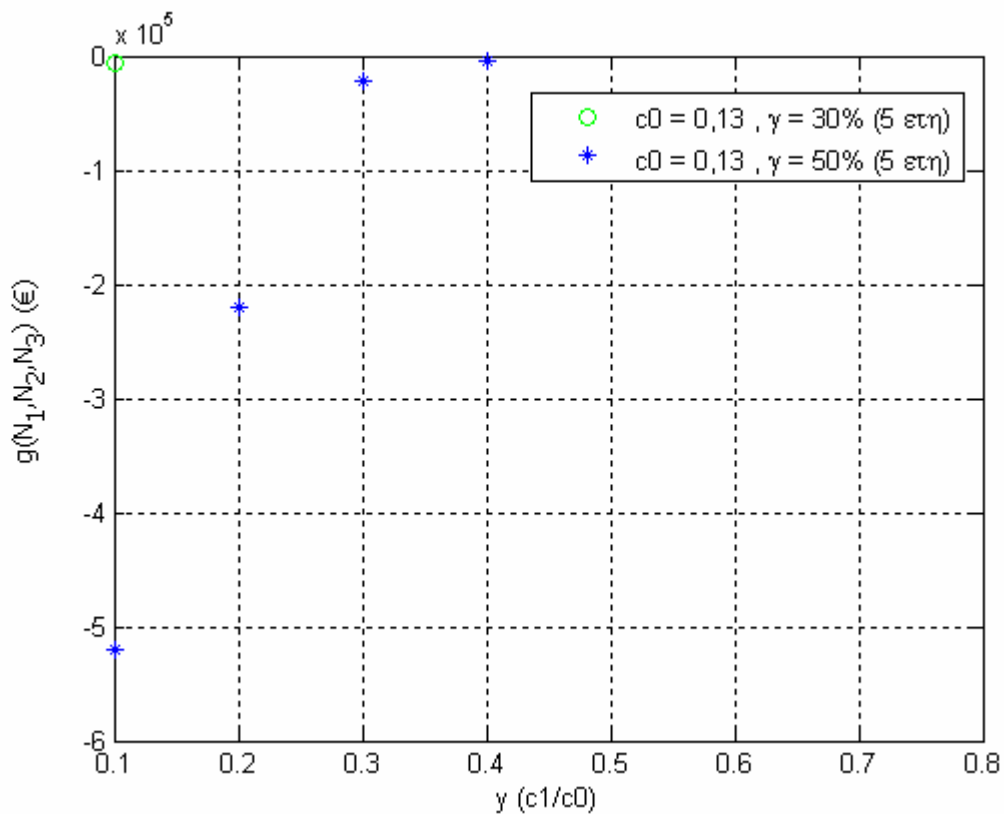
Σχήμα 8.103 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



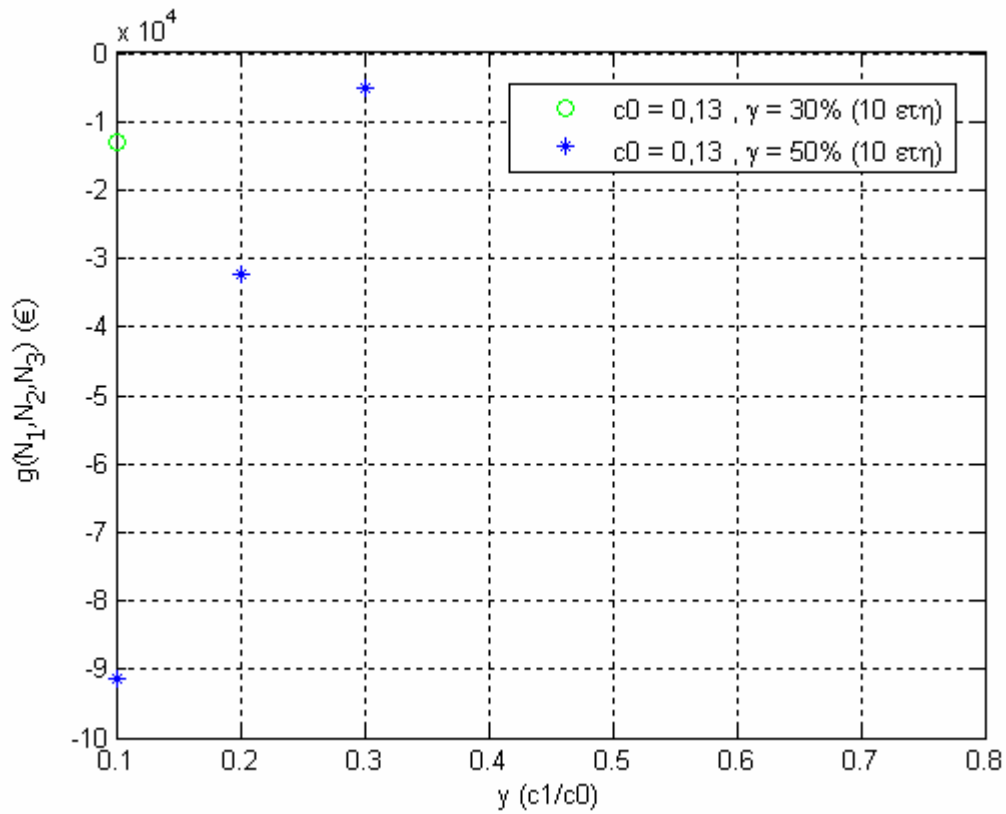
Σχήμα 8.104 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



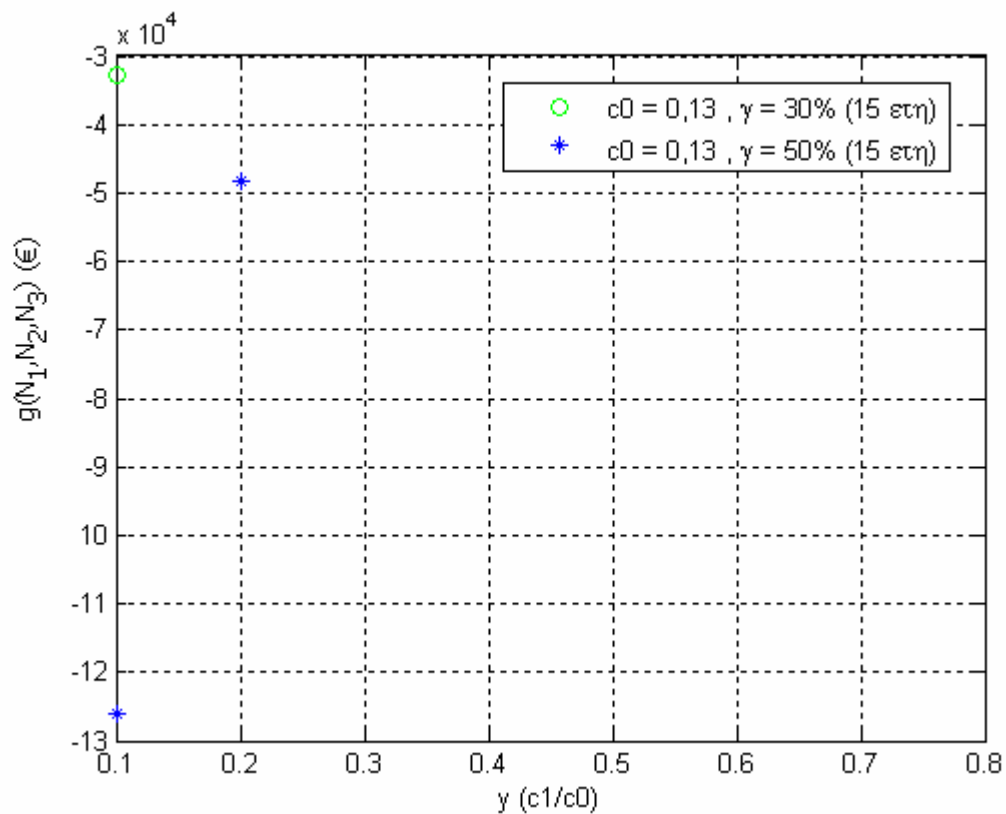
Σχήμα 8.105 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



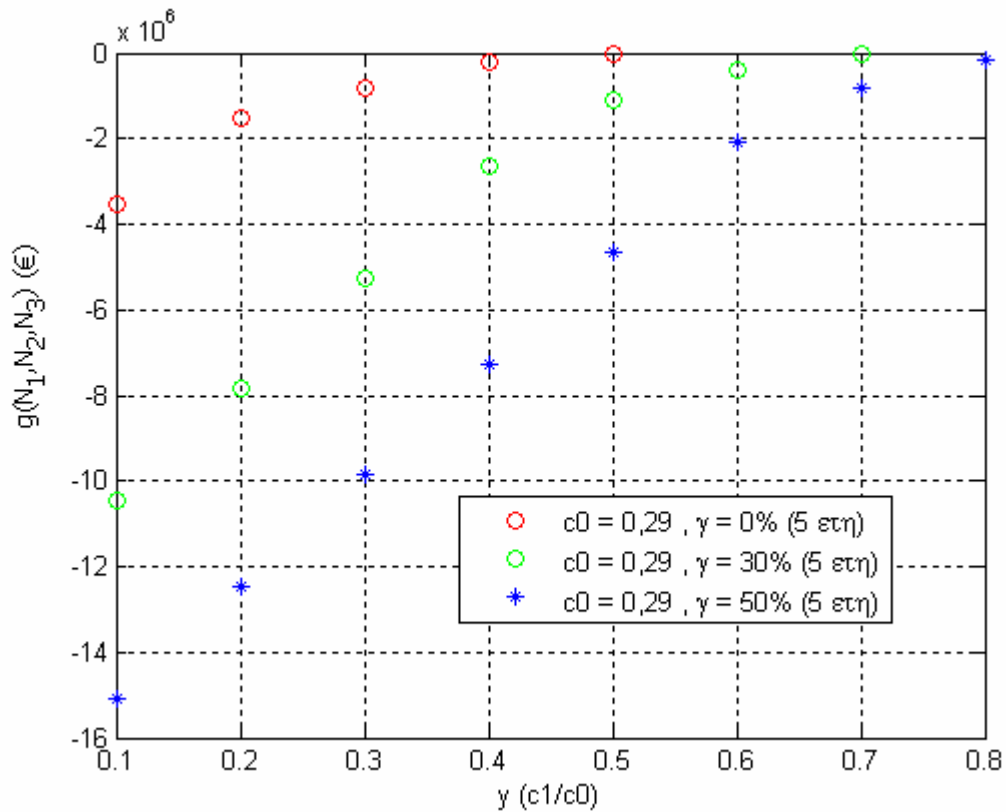
Σχήμα 8.106 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



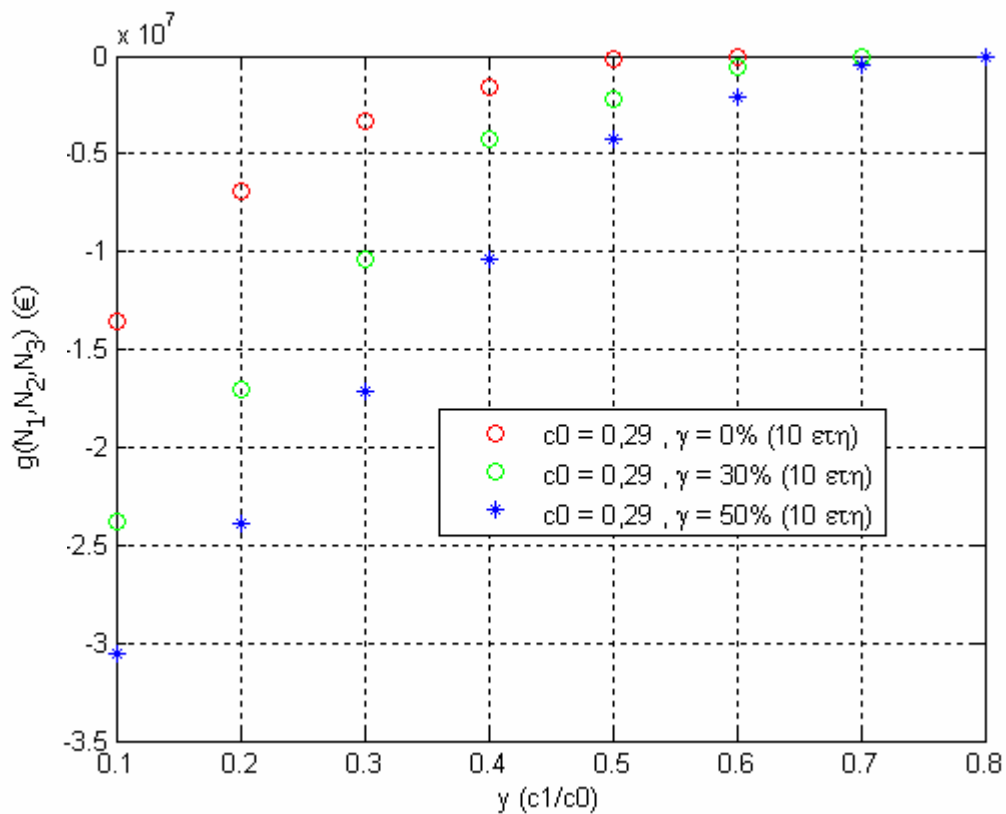
Σχήμα 8.107 Συνολικό κόστος εγκατάστασης $[g(N_1, N_2, N_3)]$ για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



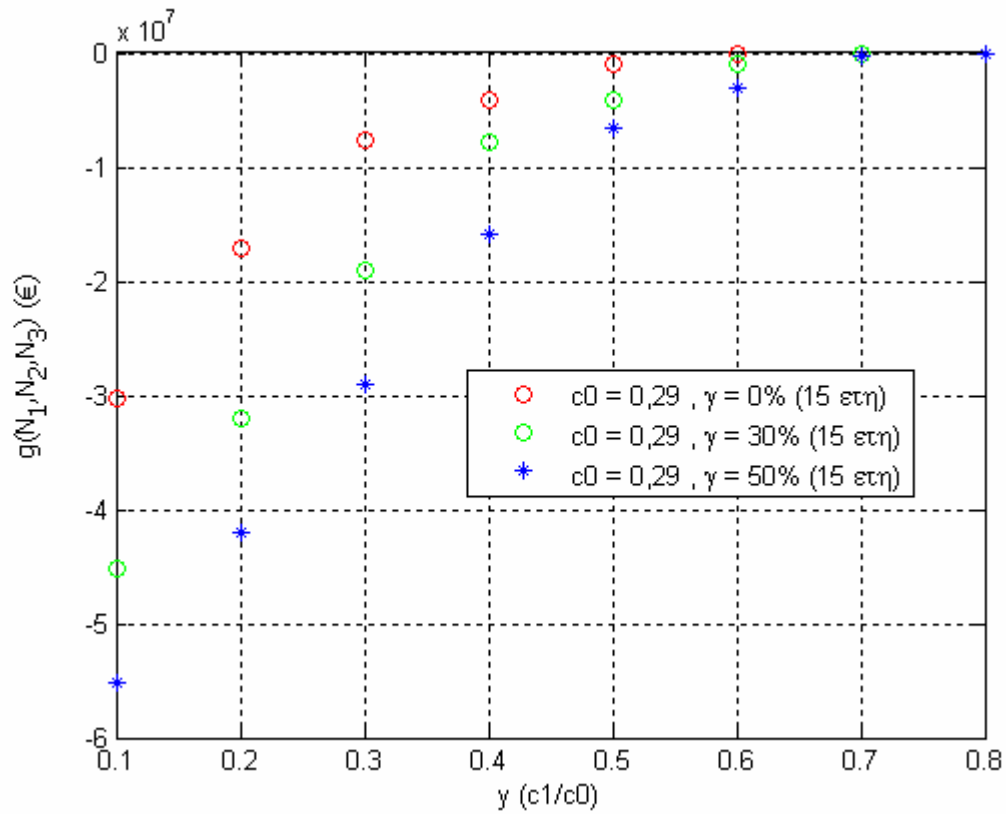
Σχήμα 8.108 Συνολικό κόστος εγκατάστασης $[g(N_1, N_2, N_3)]$ για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



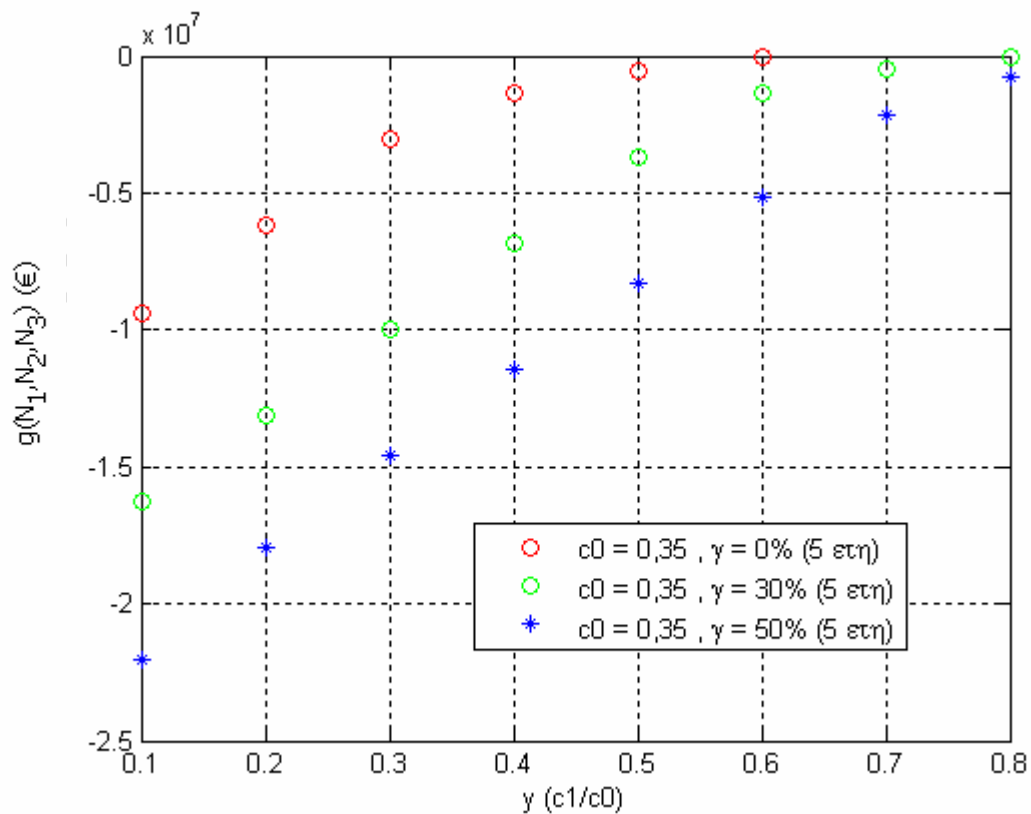
Σχήμα 8.109 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



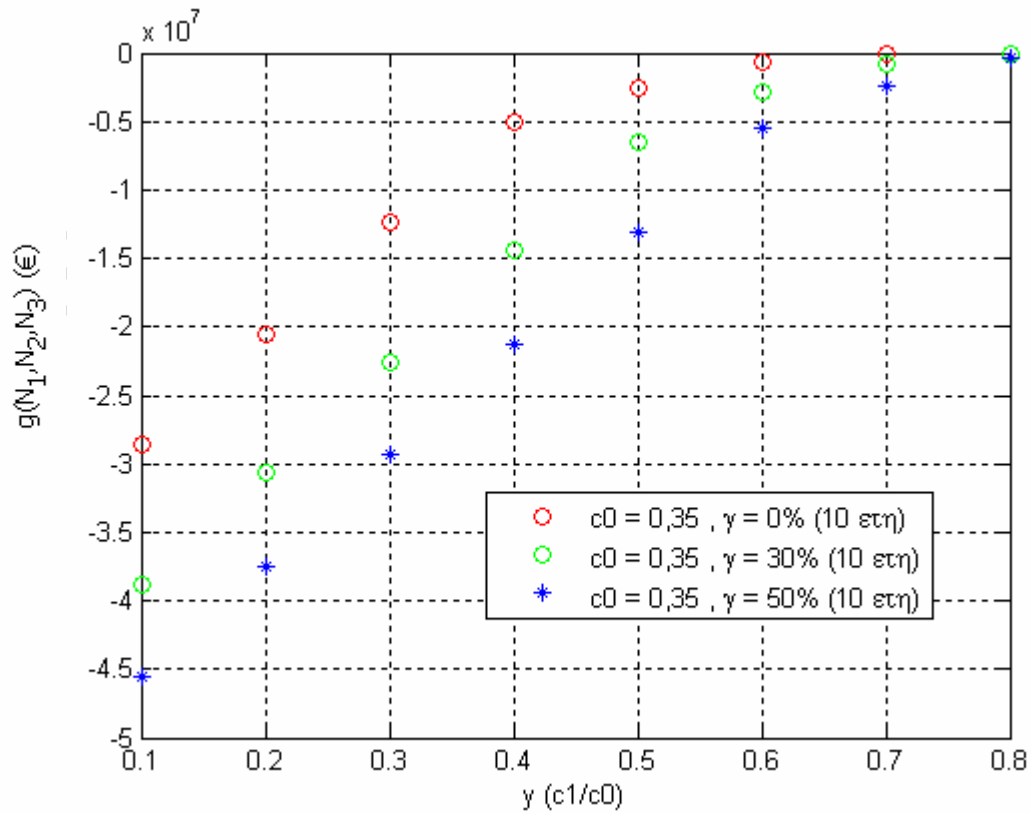
Σχήμα 8.110 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



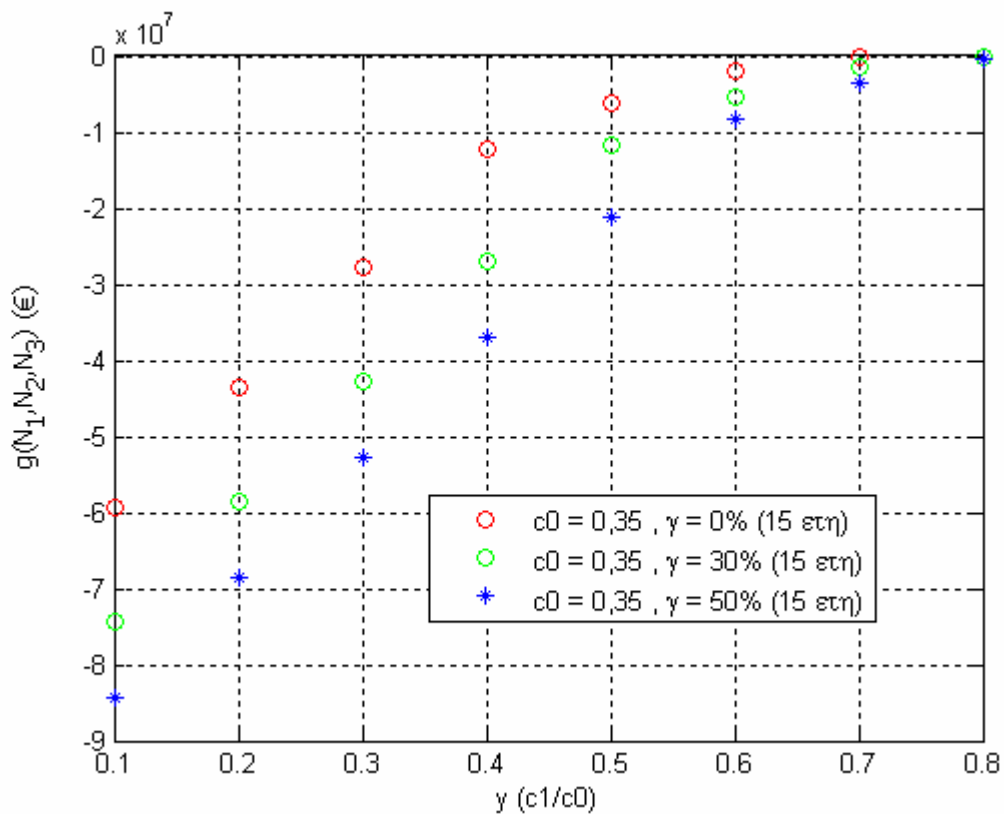
Σχήμα 8.111 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



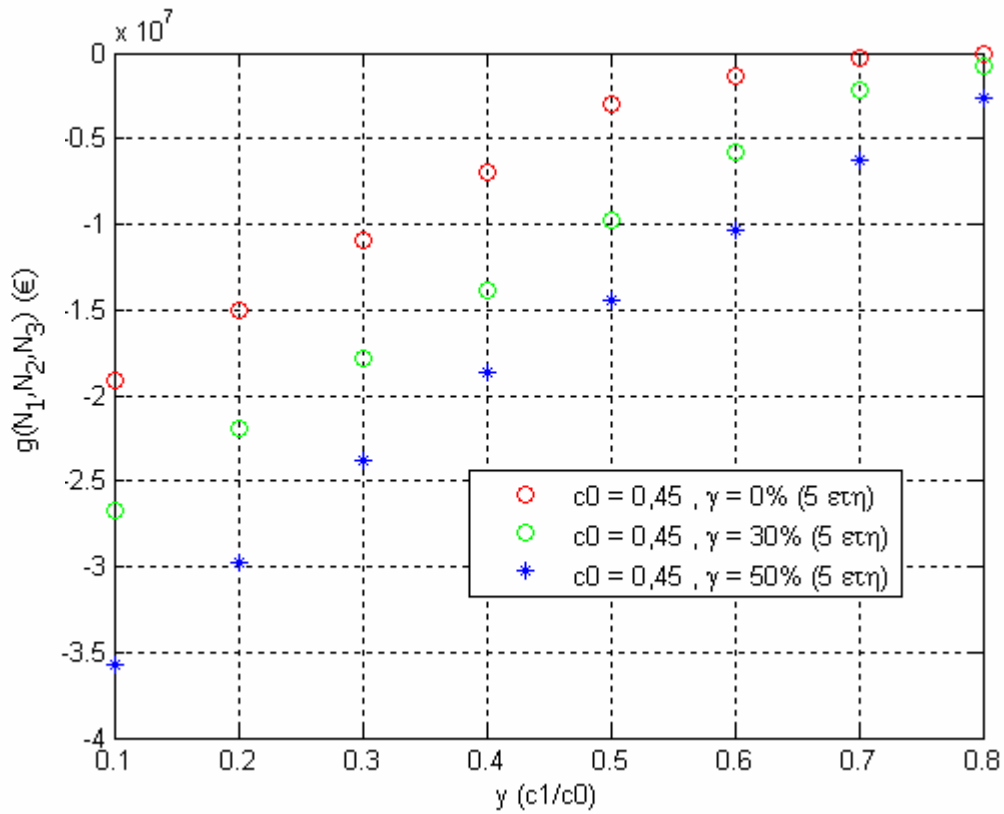
Σχήμα 8.112 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



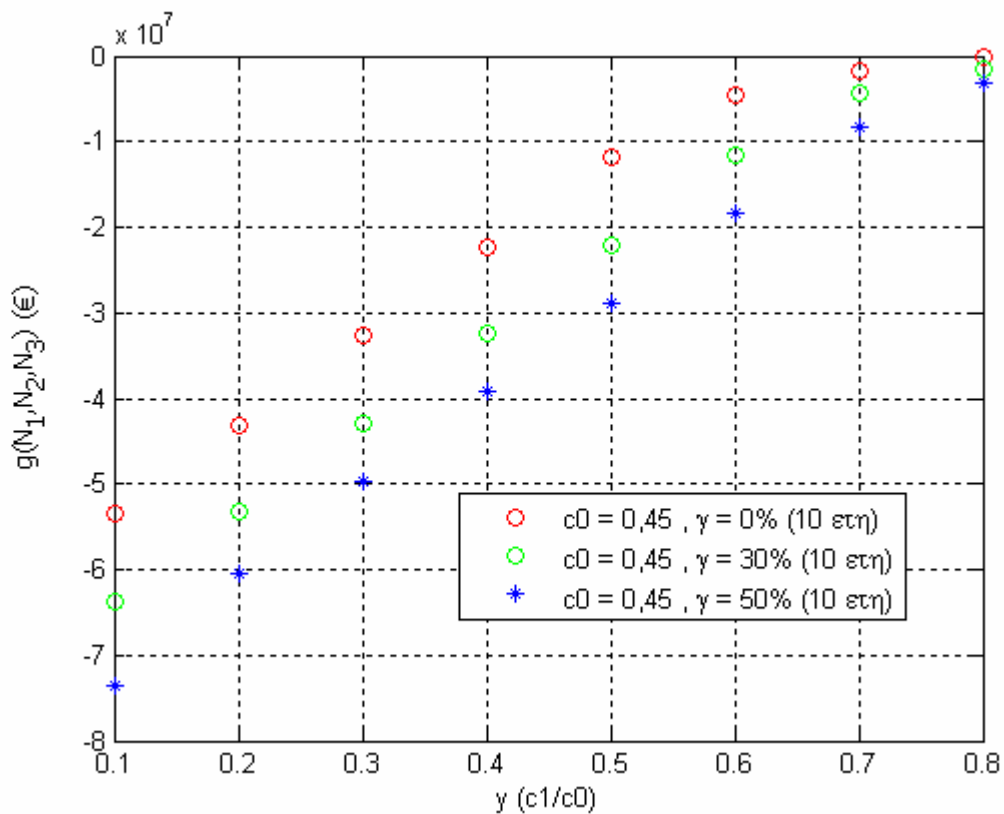
Σχήμα 8.113 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



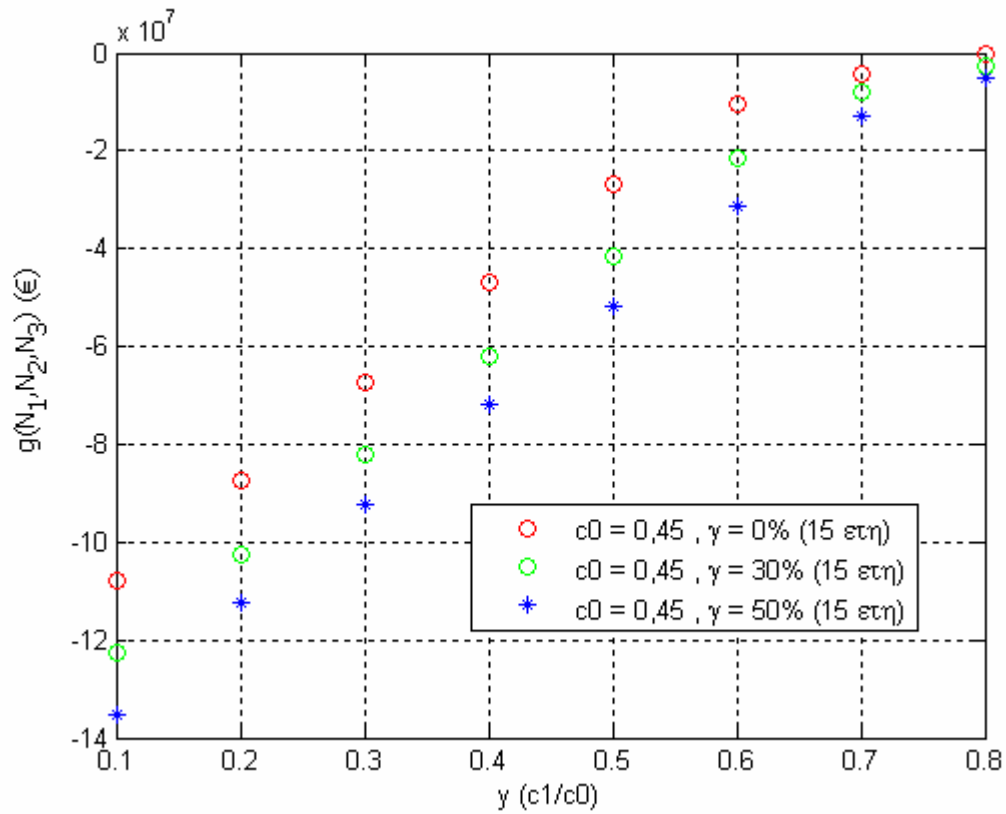
Σχήμα 8.114 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



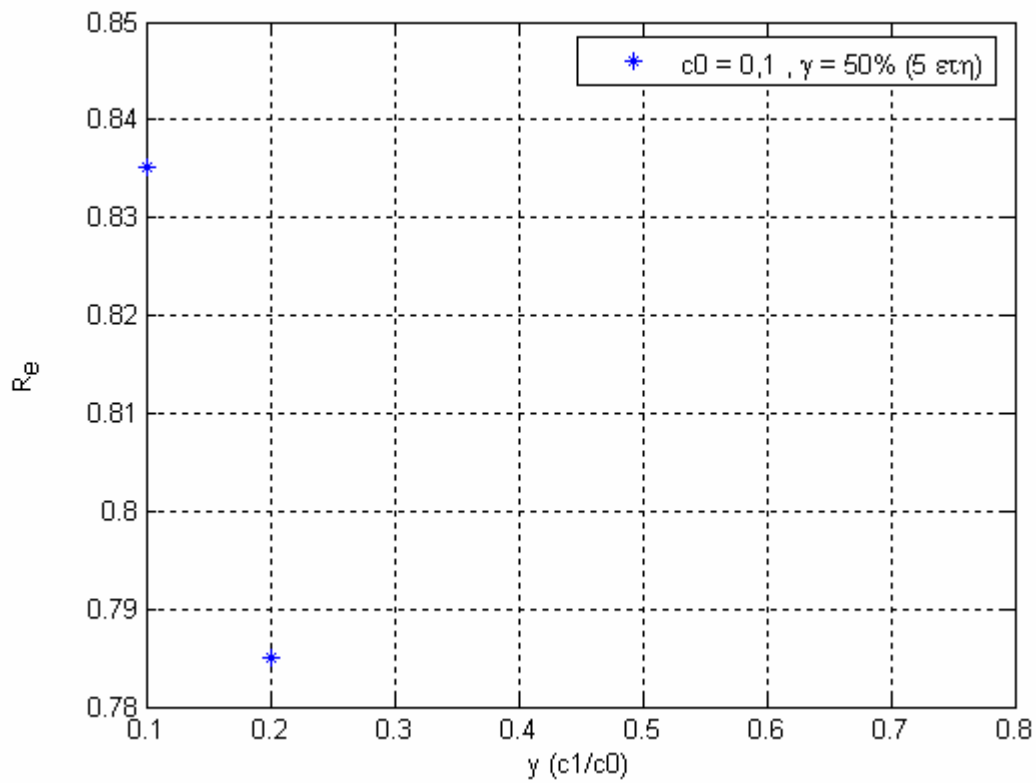
Σχήμα 8.115 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



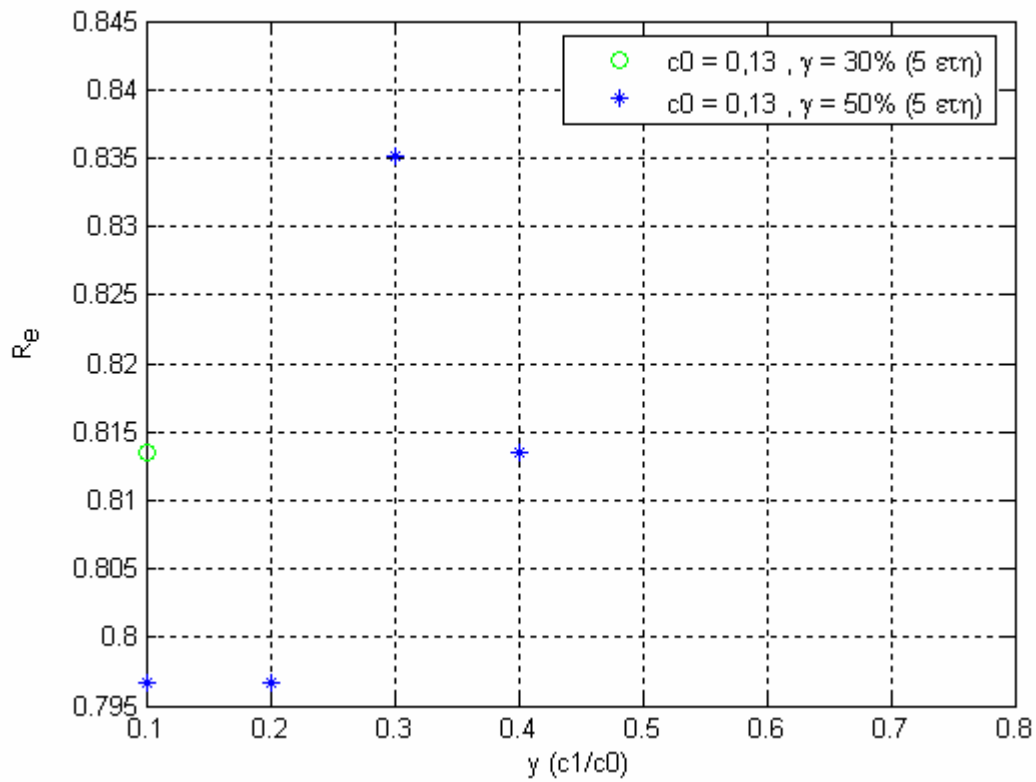
Σχήμα 8.116 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



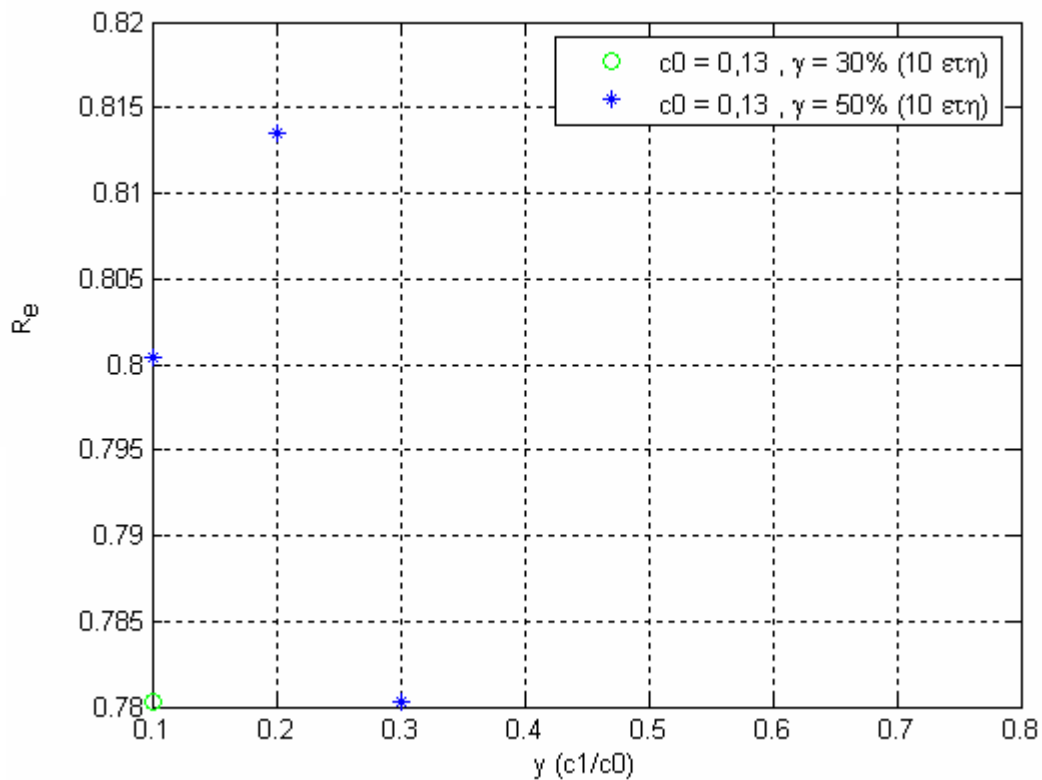
Σχήμα 8.117 Συνολικό κόστος εγκατάστασης [$g(N_1, N_2, N_3)$] για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



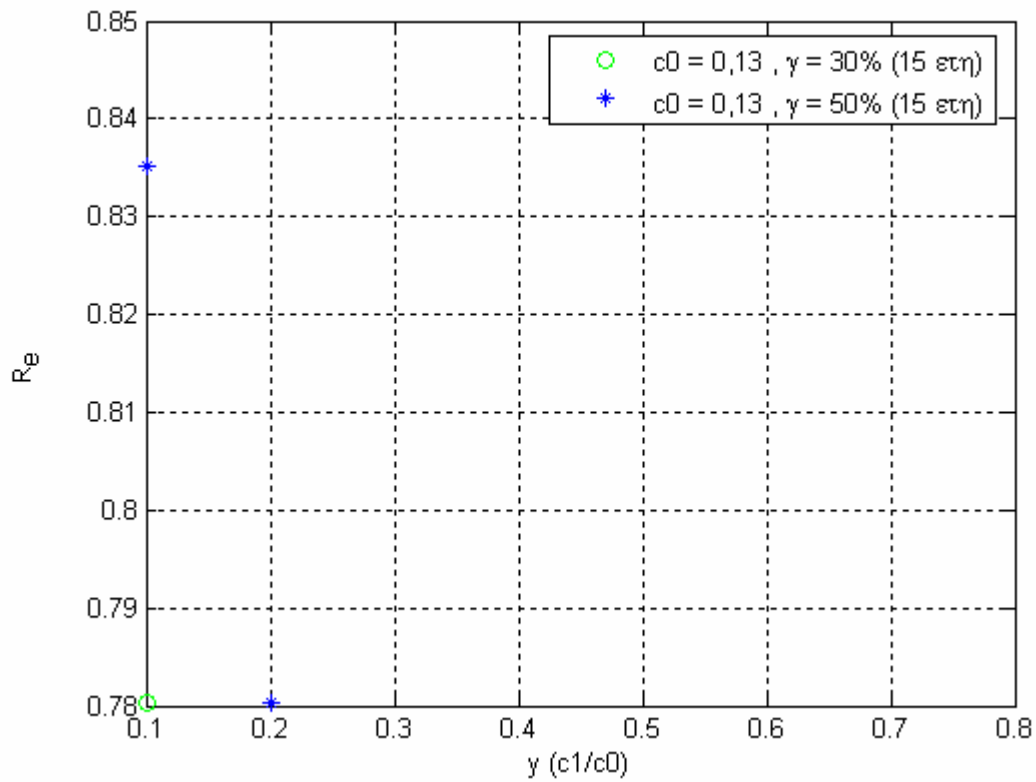
Σχήμα 8.118 Λόγος R_e για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,1 €/kWh



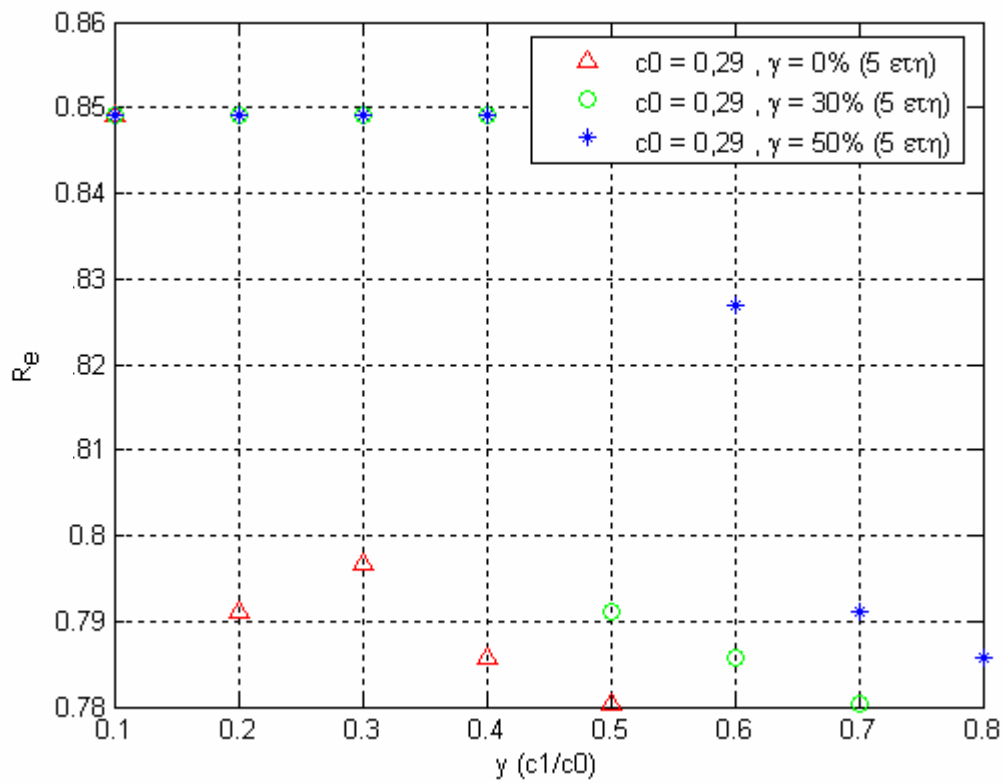
Σχήμα 8.119 Λόγος R_e για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



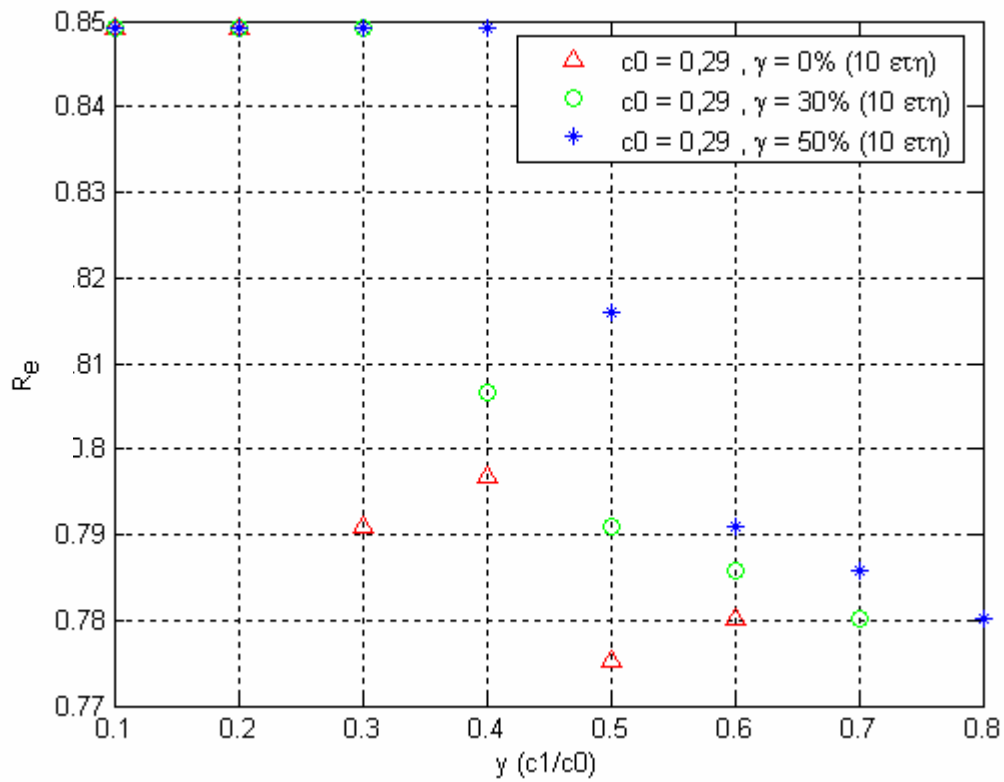
Σχήμα 8.120 Λόγος R_e για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



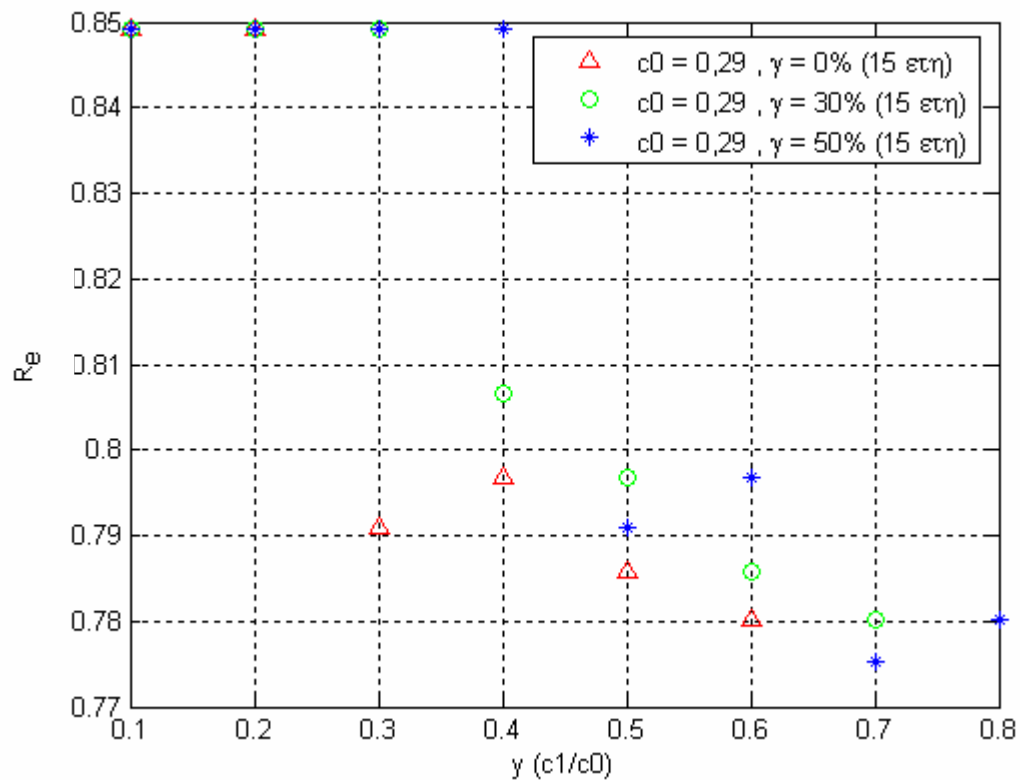
Σχήμα 8.121 Λόγος R_e για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



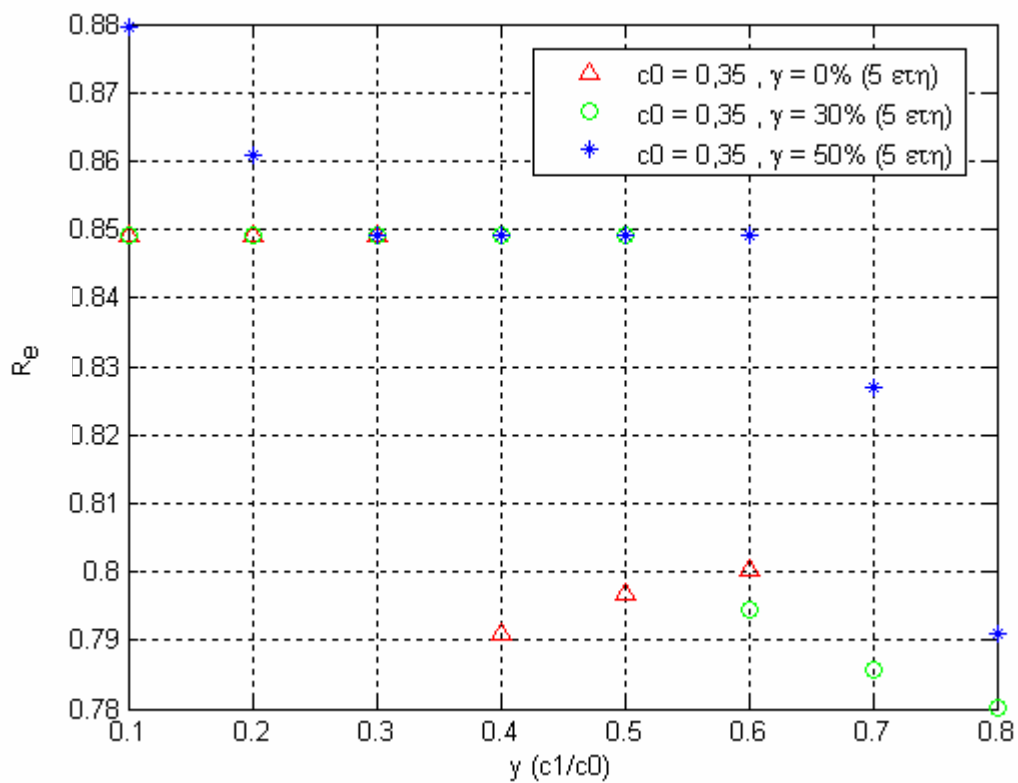
Σχήμα 8.122 Λόγος R_e για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



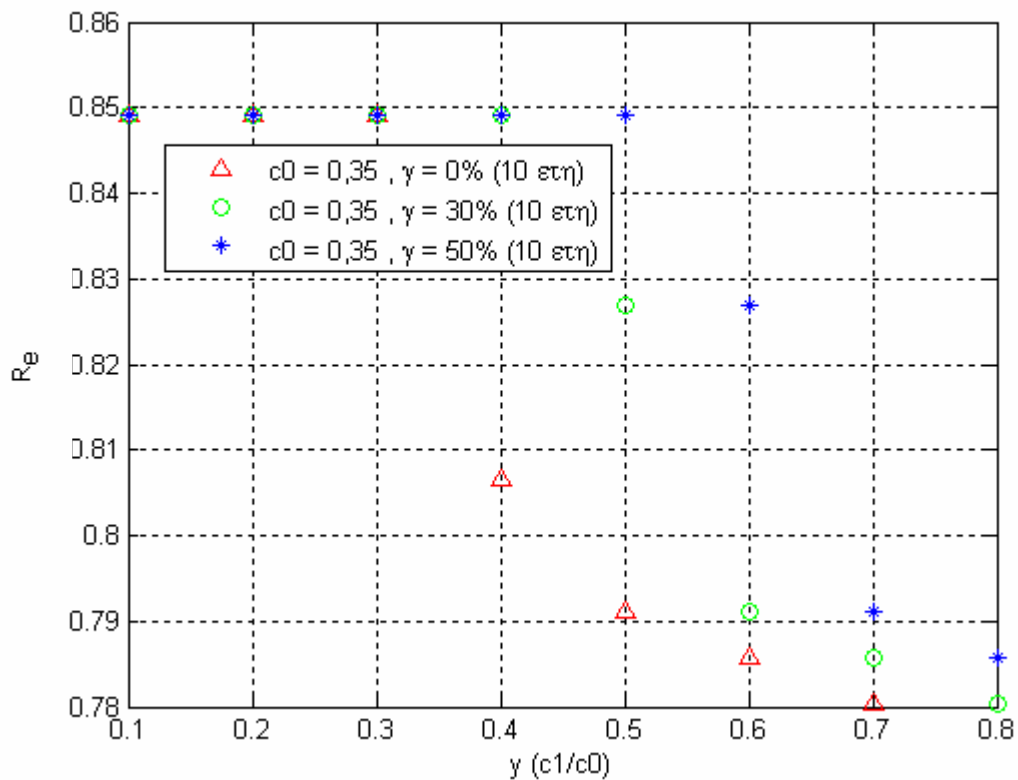
Σχήμα 8.123 Λόγος R_e για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



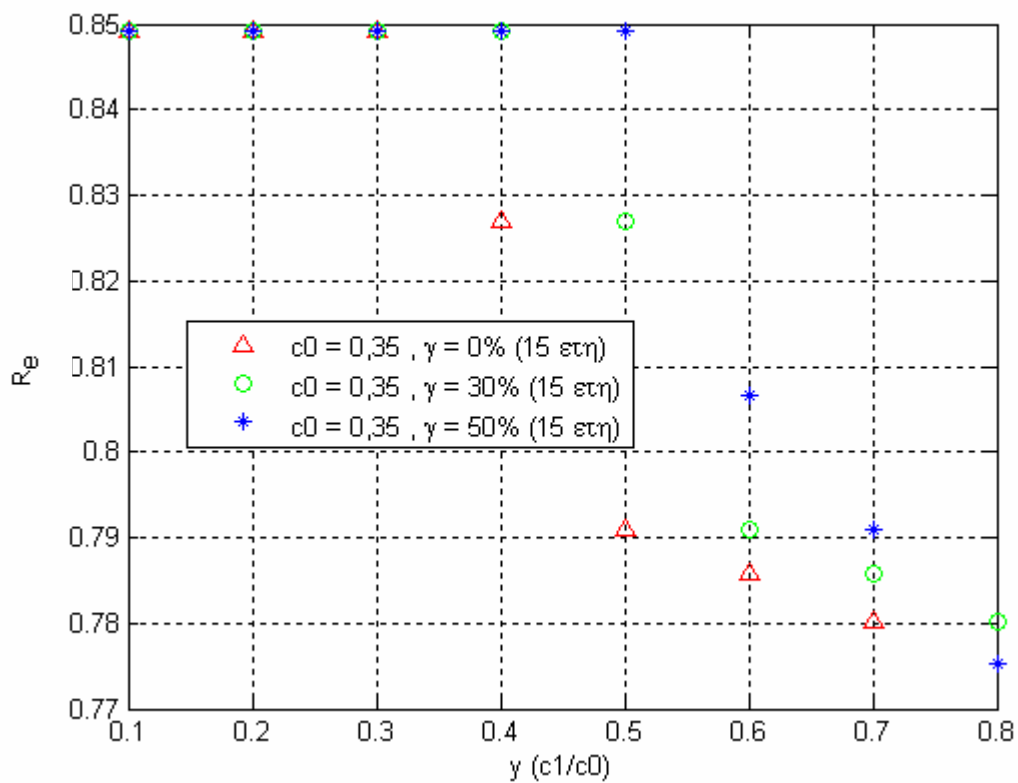
Σχήμα 8.124 Λόγος R_e για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



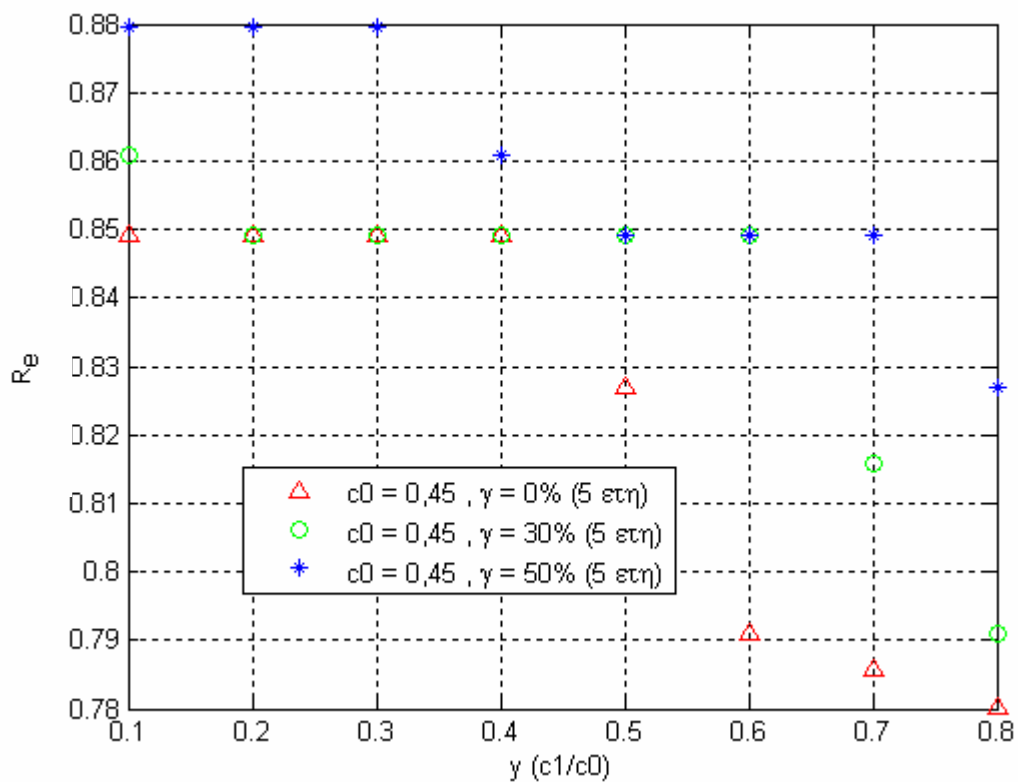
Σχήμα 8.125 Λόγος R_e για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



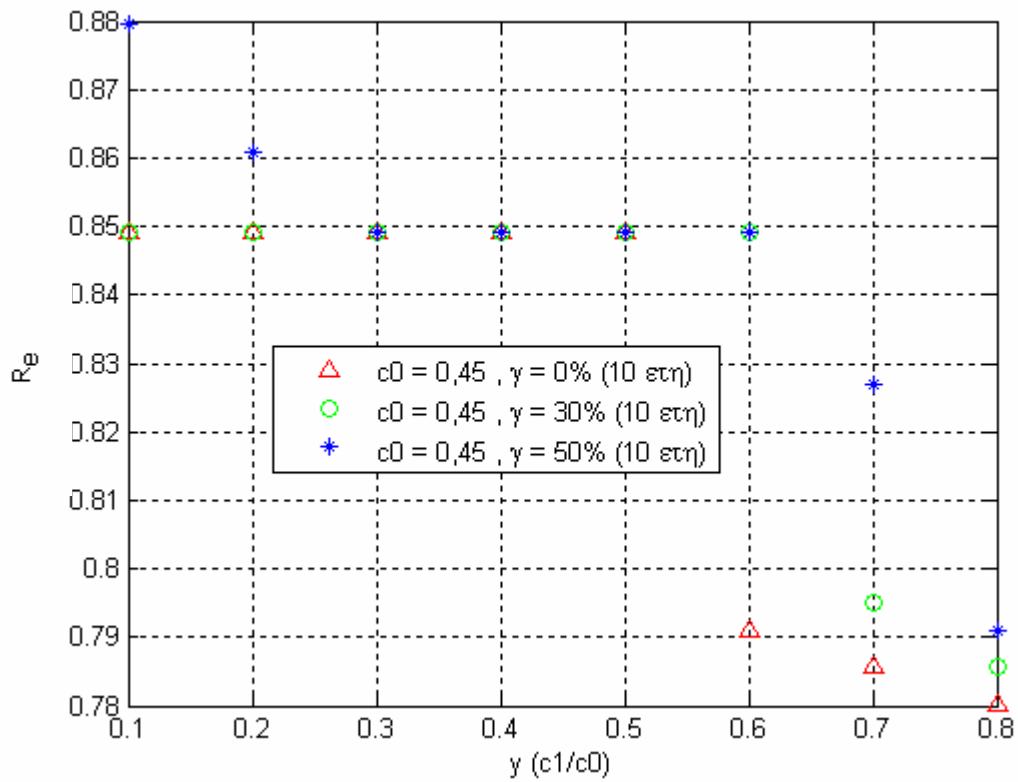
Σχήμα 8.126 Λόγος R_e για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



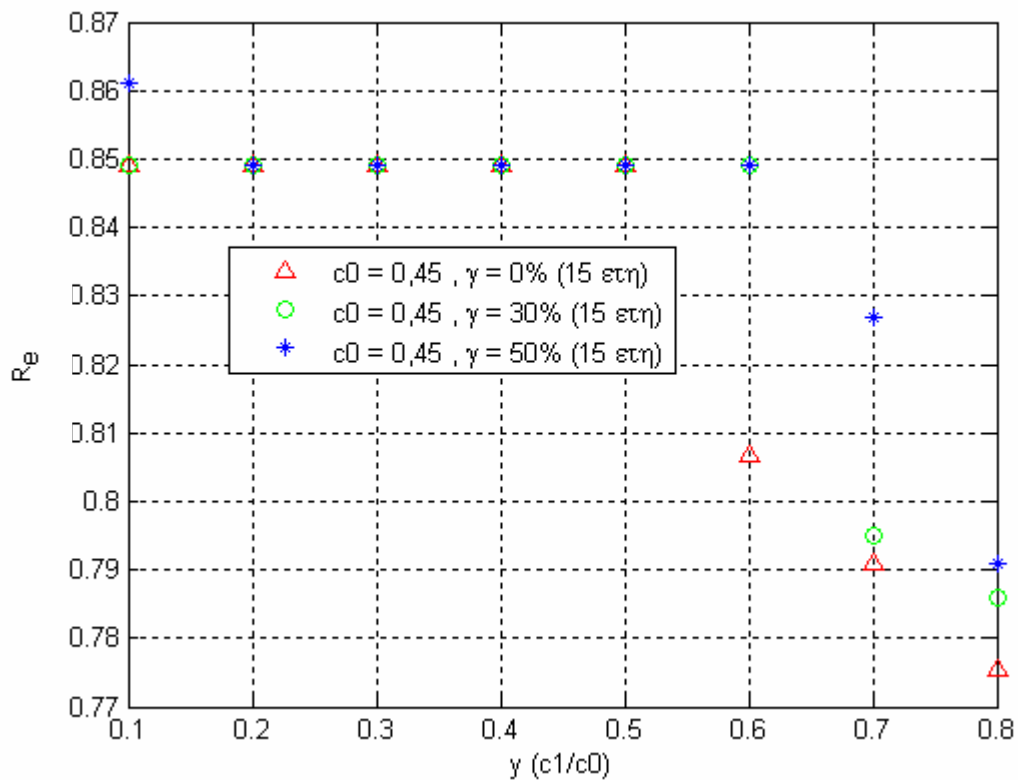
Σχήμα 8.127 Λόγος R_e για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



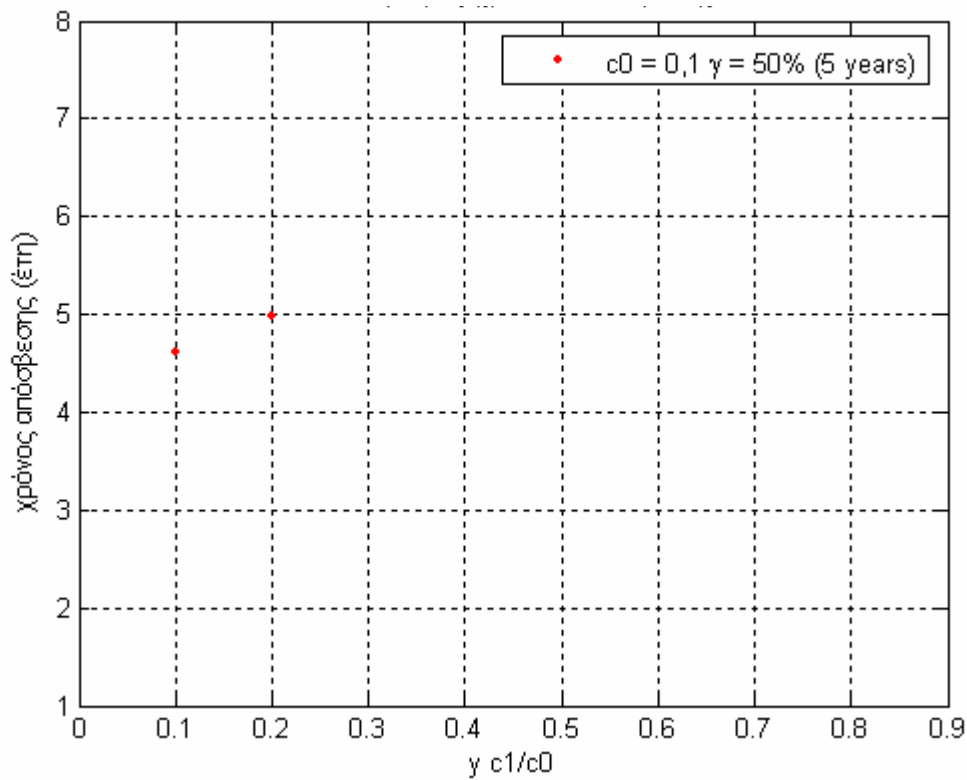
Σχήμα 8.128 Λόγος R_e για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



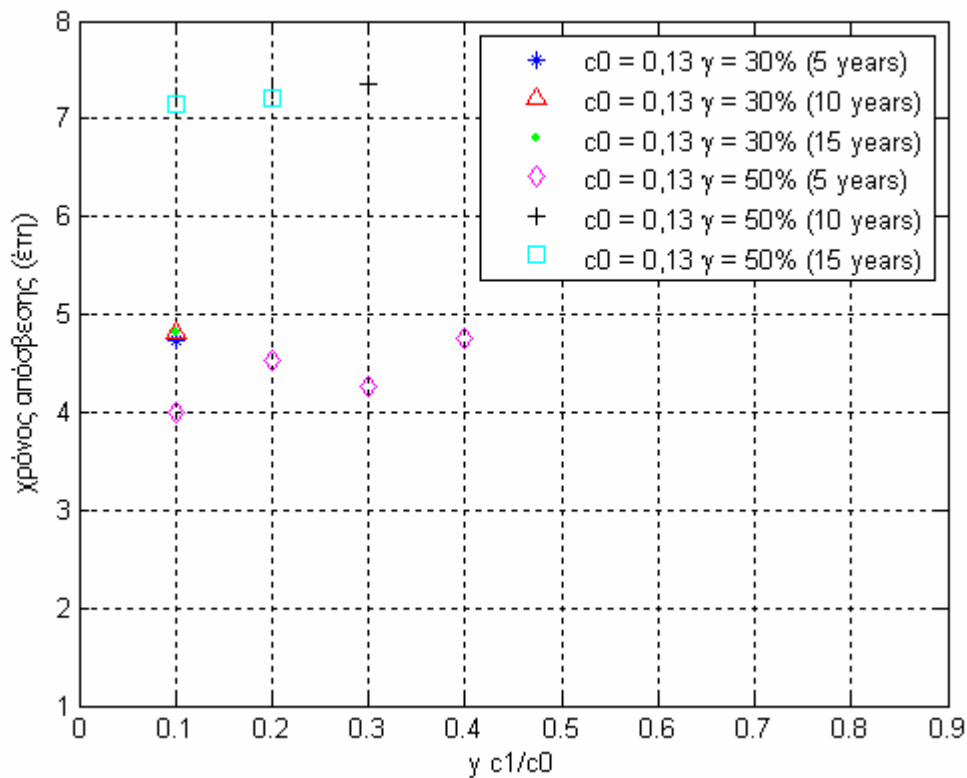
Σχήμα 8.129 Λόγος R_e για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



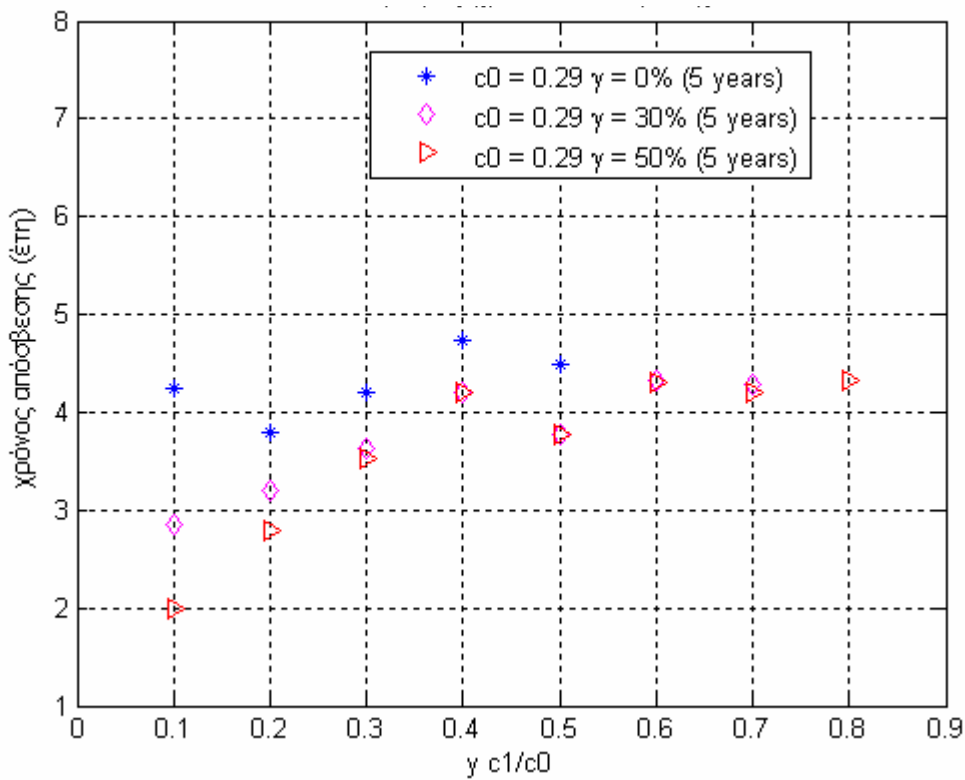
Σχήμα 8.130 Λόγος R_e για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



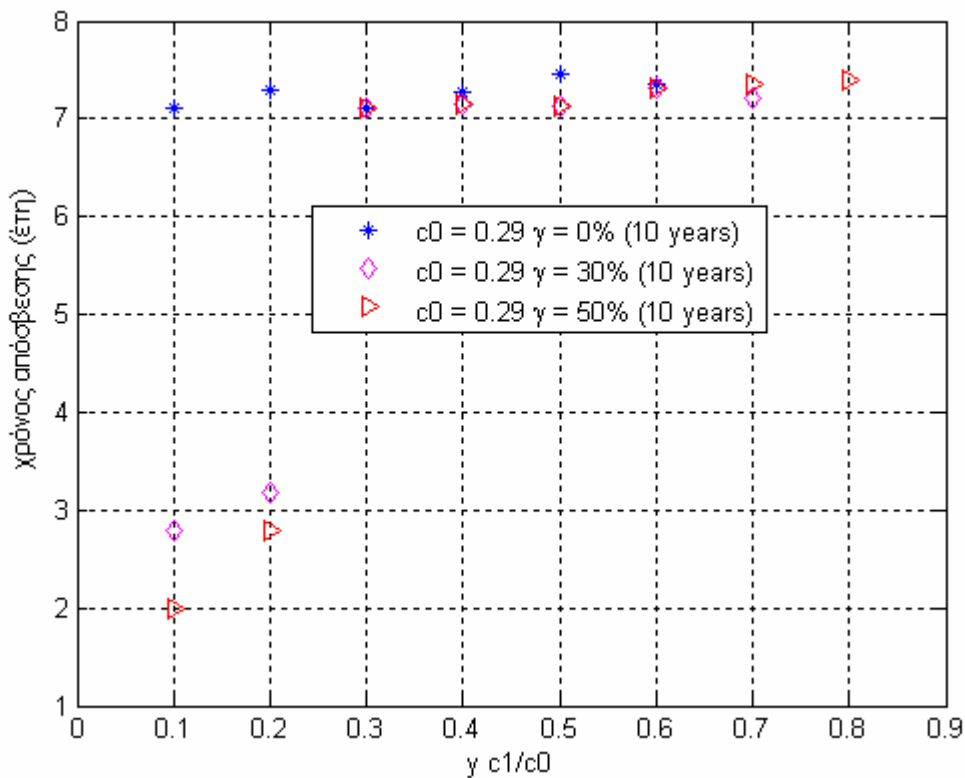
Σχήμα 8.131 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για τιμή πώλησης 0,1 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



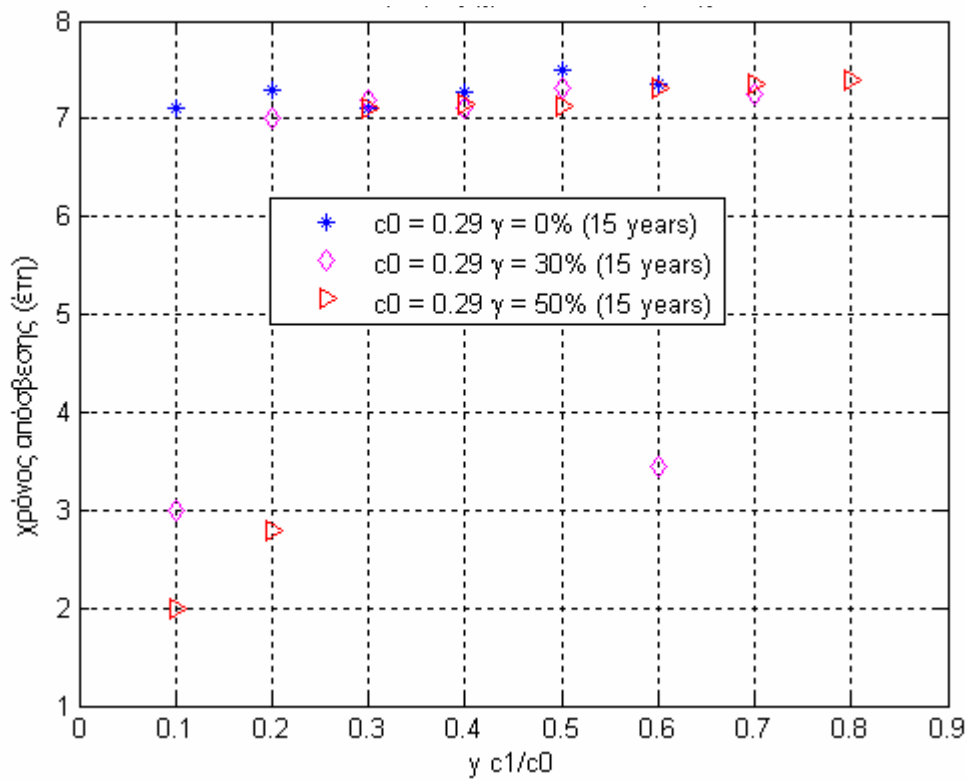
Σχήμα 8.132 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



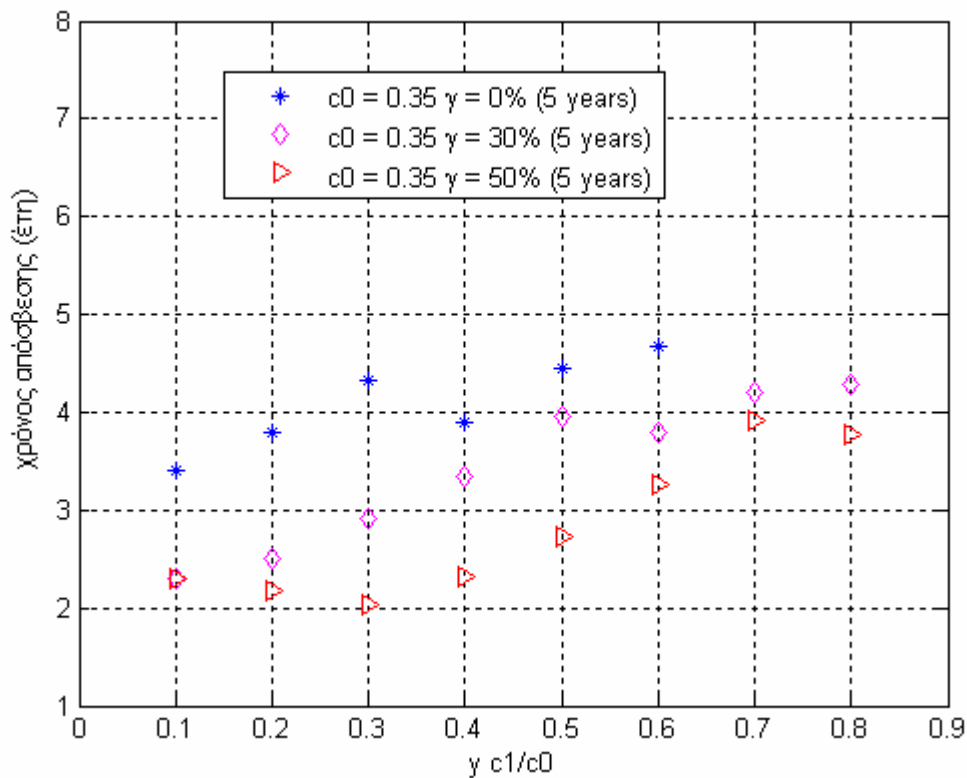
Σχήμα 8.133 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



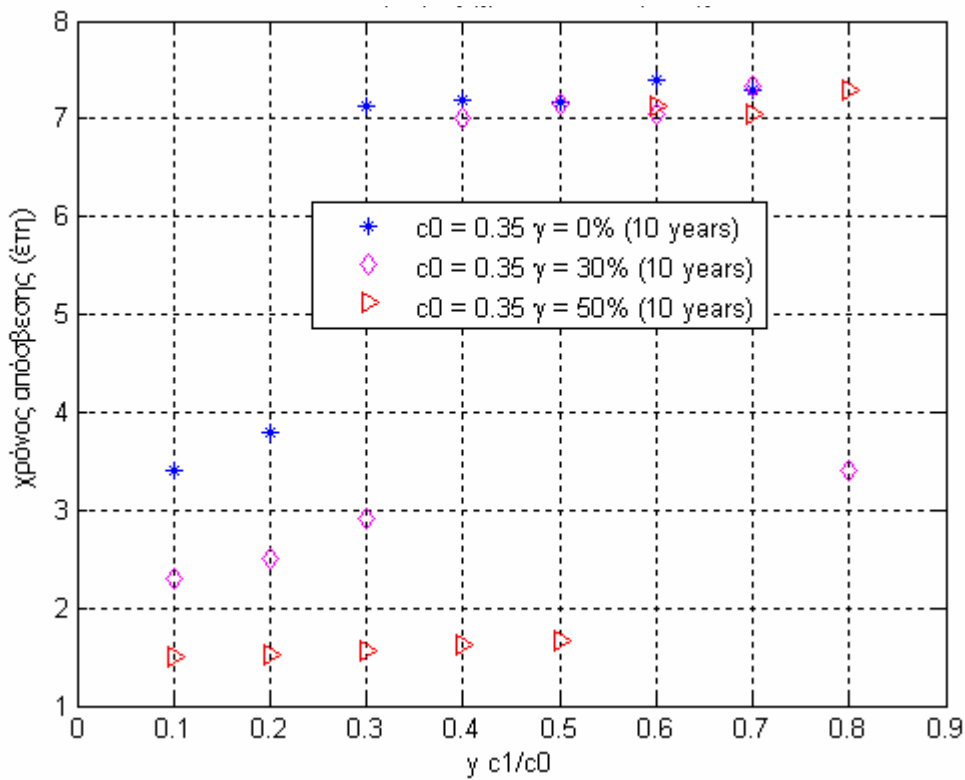
Σχήμα 8.134 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



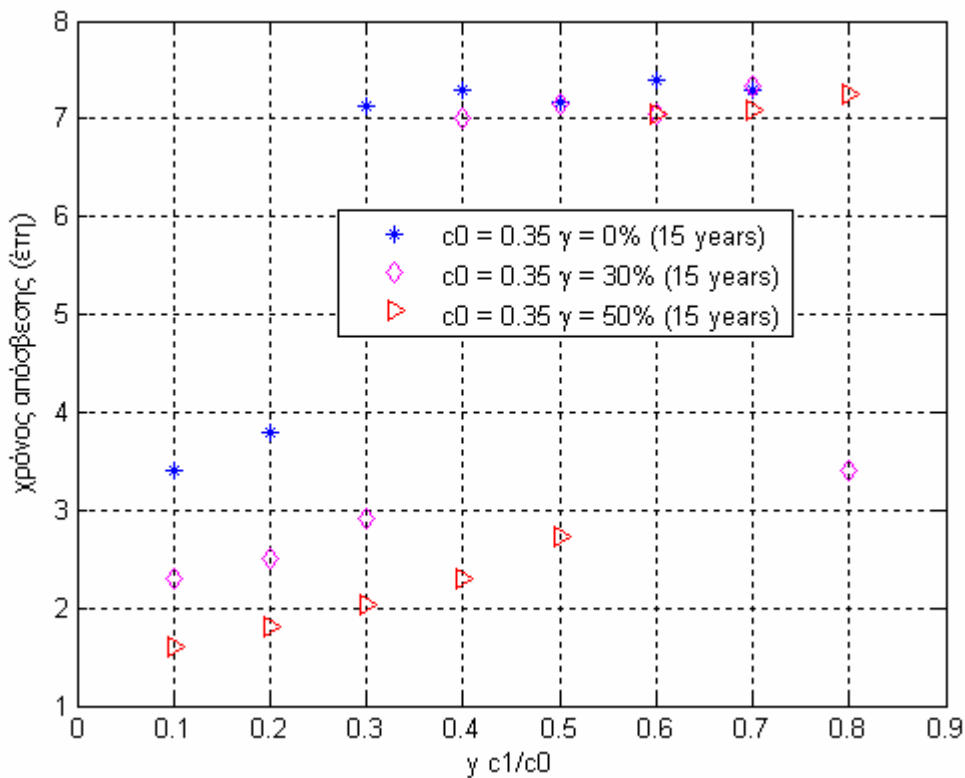
Σχήμα 8.135 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



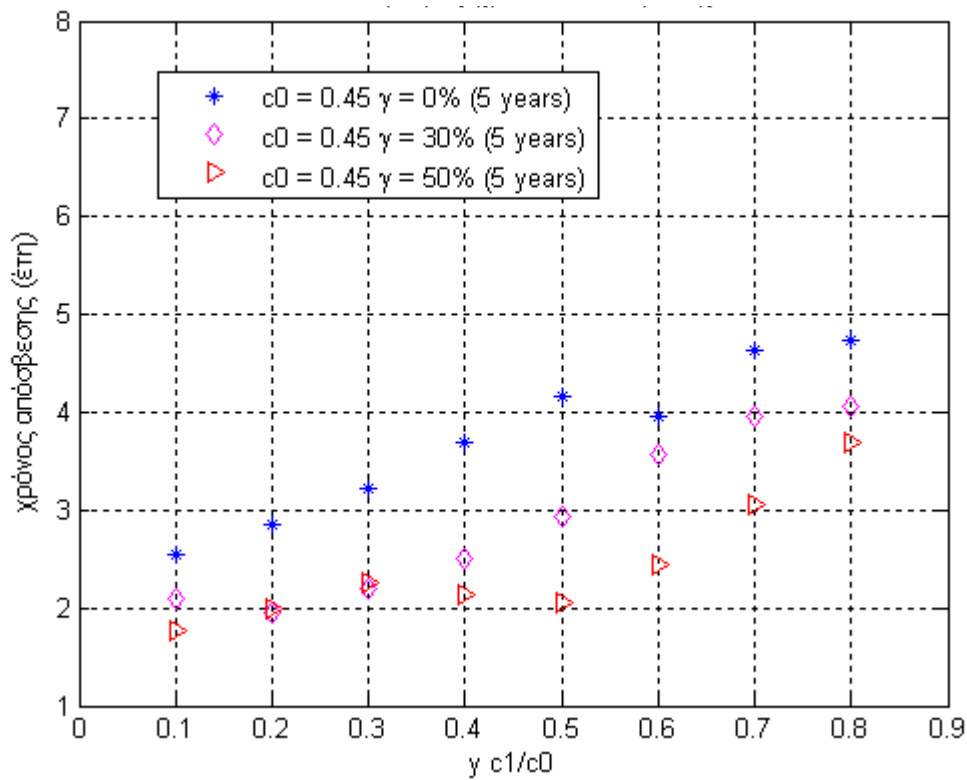
Σχήμα 8.136 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



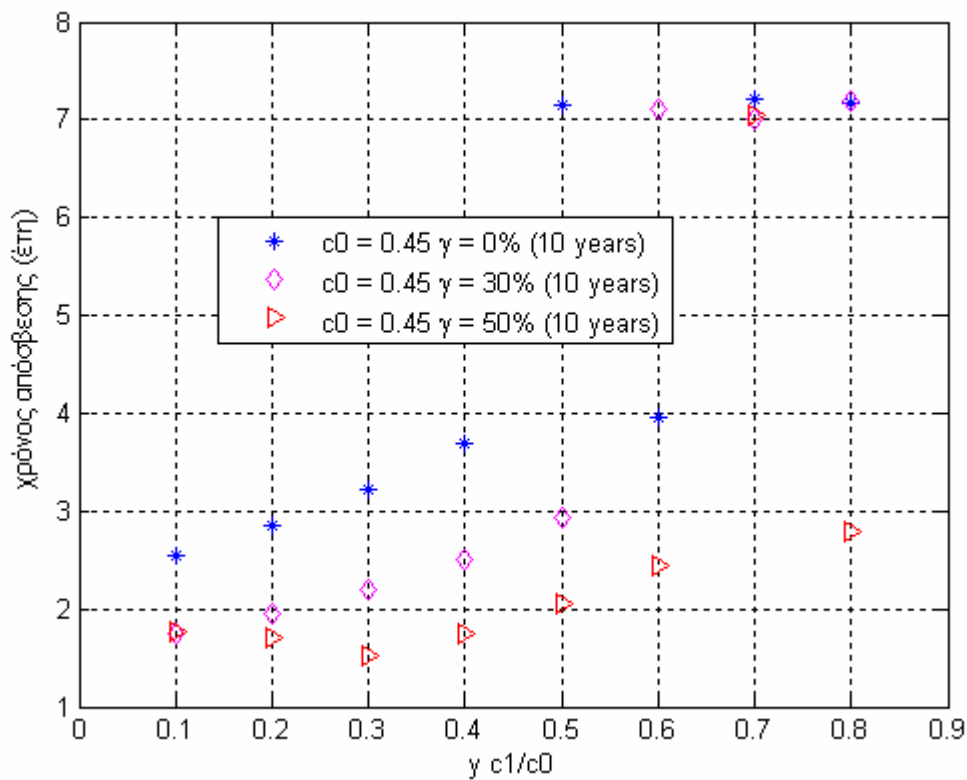
Σχήμα 8.137 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



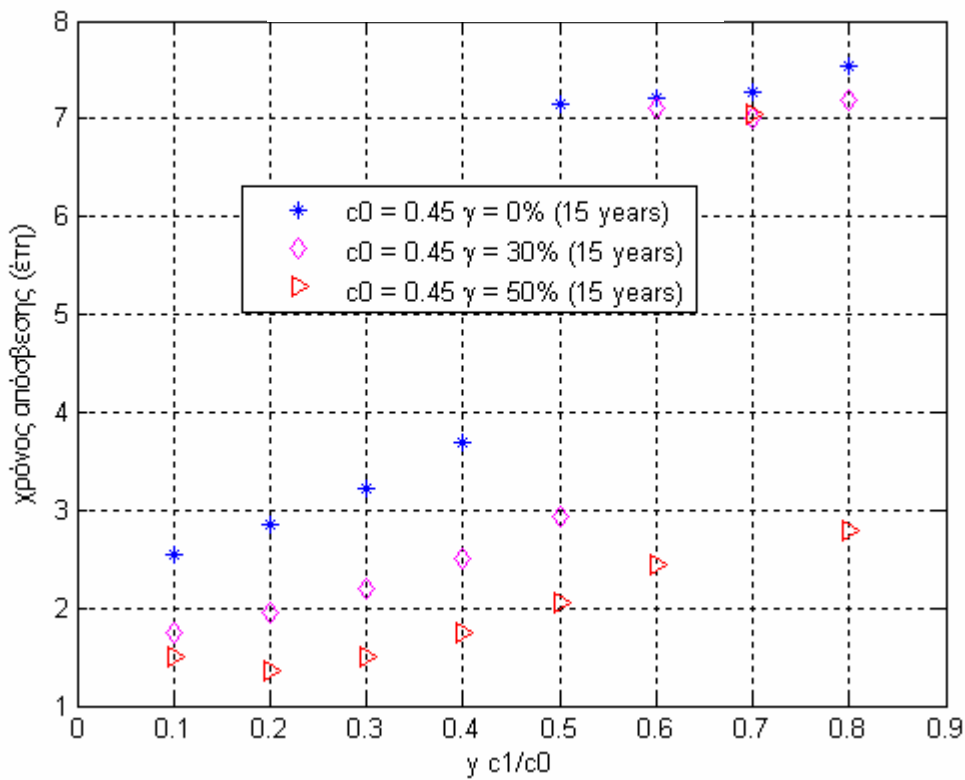
Σχήμα 8.138 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



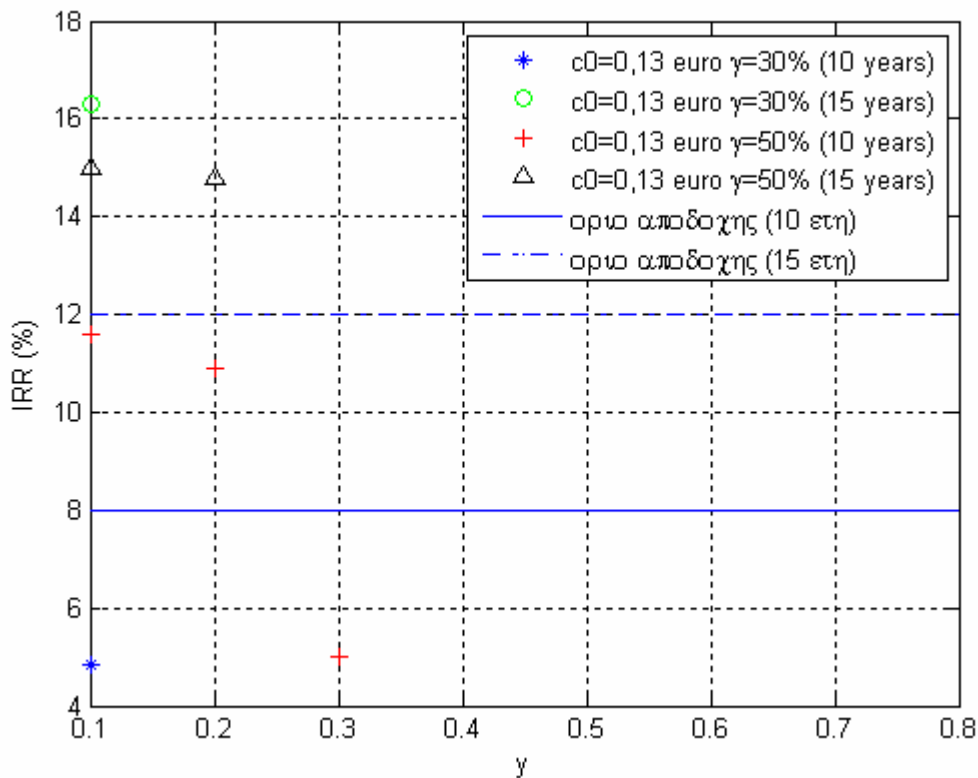
Σχήμα 8.139 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



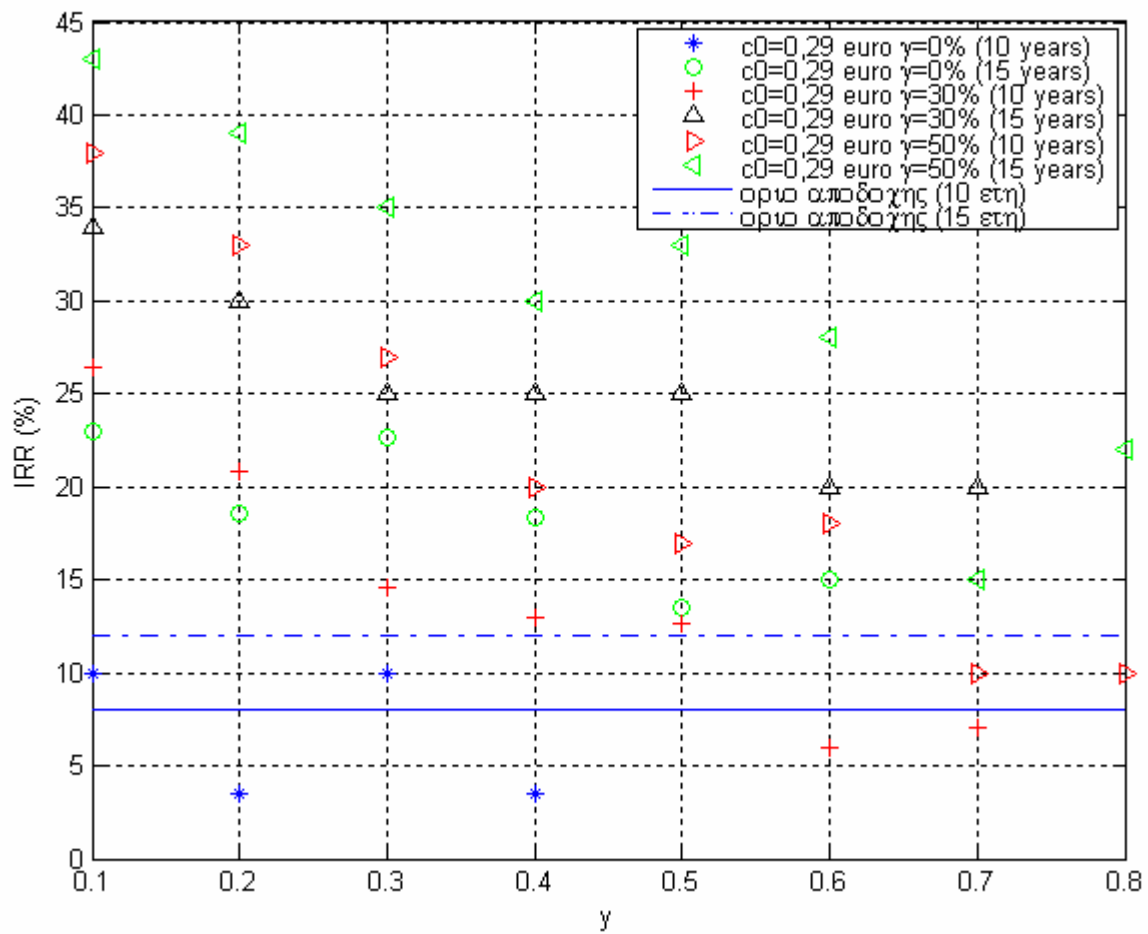
Σχήμα 8.140 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



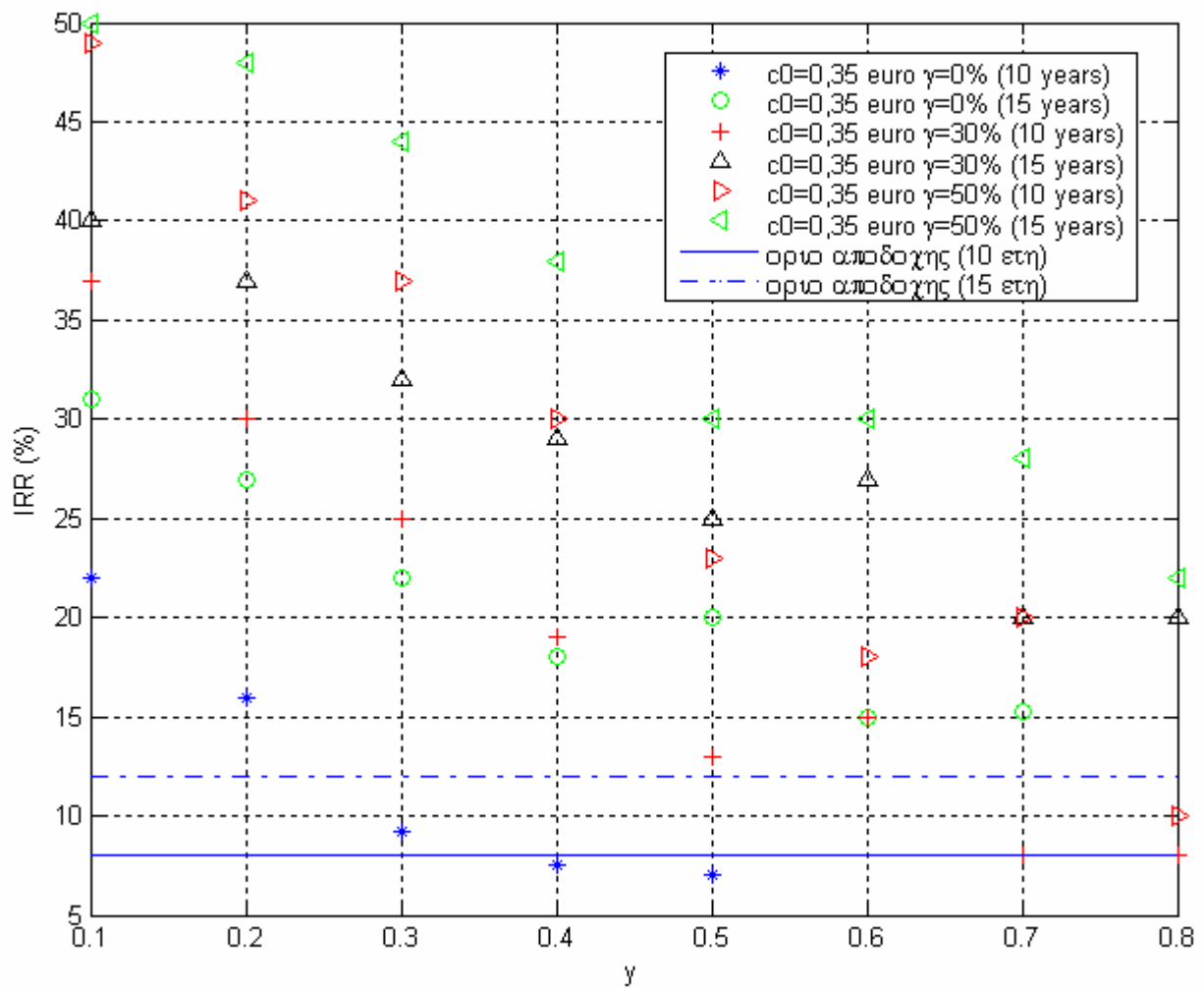
Σχήμα 8.141 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



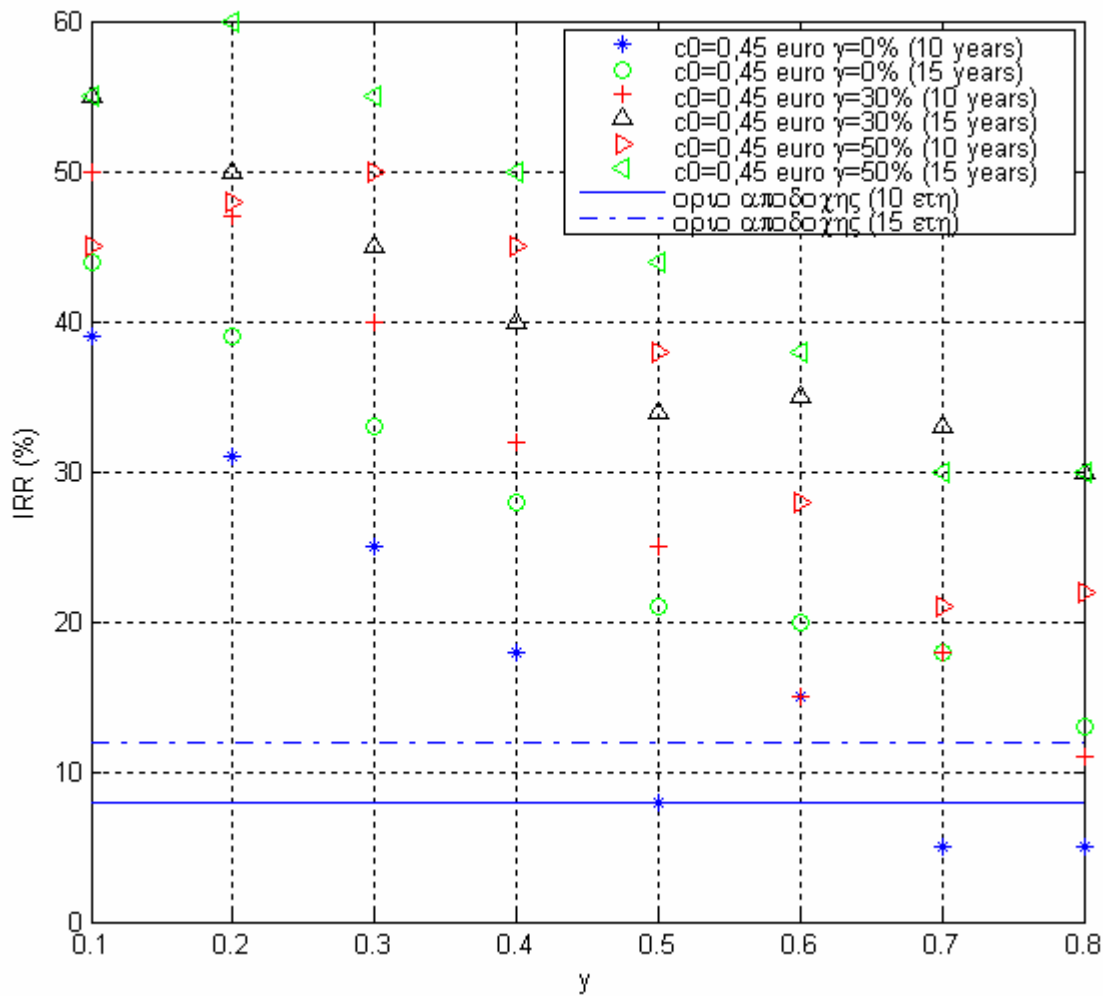
Σχήμα 8.142 Υπολογισμός εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,13 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.143 Υπολογισμός εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.144 Υπολογισμός εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.145 Υπολογισμός εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης

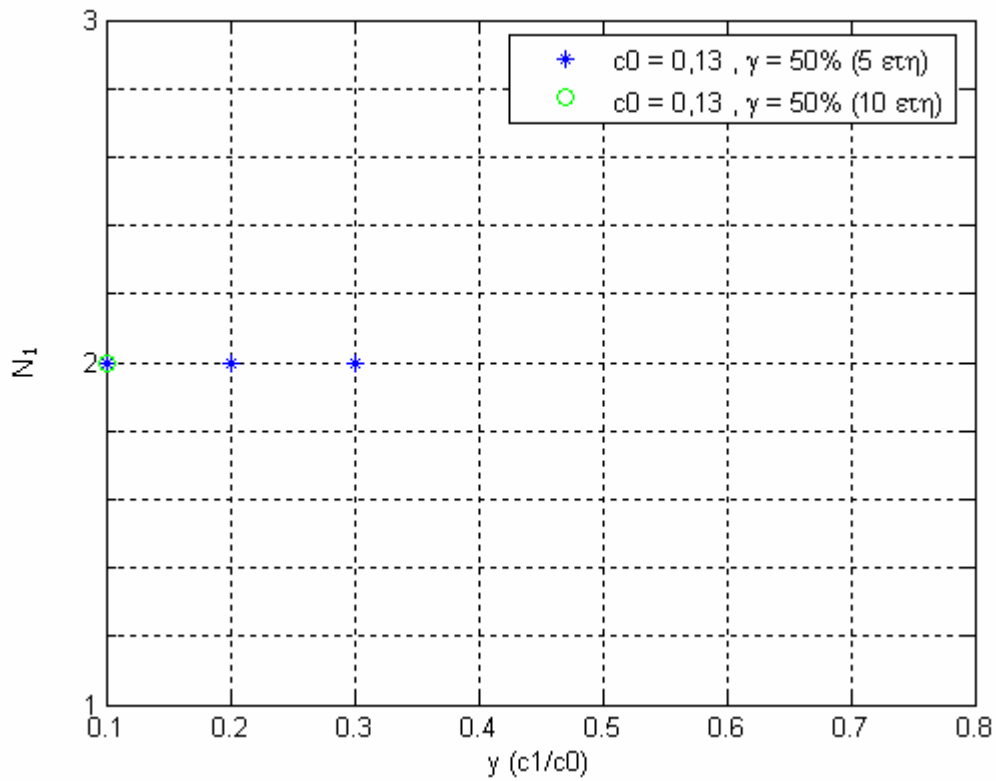
8.3 Αποτελέσματα για το μη-αυτόνομο σύστημα και βελτιστοποίηση του λόγου Ετήσια προμηθευόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια

8.3.1 Αποτελέσματα για μετατροπέα ισχύος 100KVA

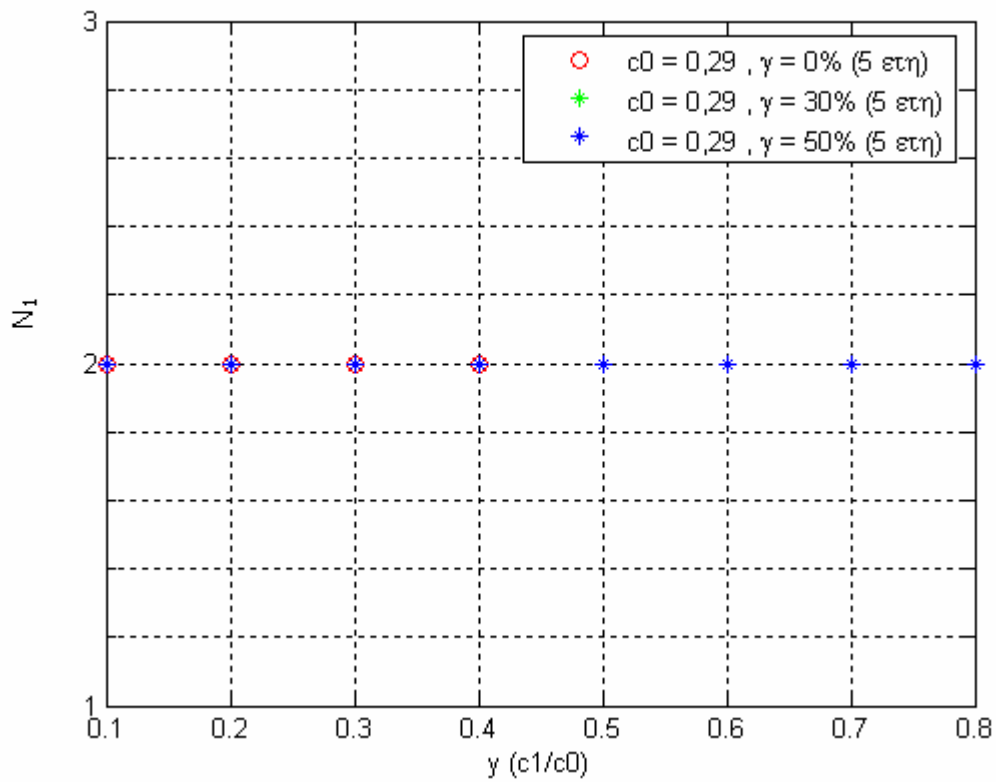
Στην παρακάτω διαστασιολόγηση χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος 100kVA με τάση εισόδου 360VDC και συσσωρευτές μολύβδου οξέος χωρητικότητας 185Ah με ονομαστική τάση λειτουργίας 12V. Στα σχήματα 8.146-8.155 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων ισχύος (N_1) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες

τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.156-8.165 παρουσιάζεται η τιμή του κόστους εγκατάστασης (IC_n) συμπεριλαμβανομένου του κόστους του χρήματος για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Το κόστος εγκατάστασης (IC_n) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (7.2). Στα σχήματα 8.166-8.175 φαίνεται η τιμή της ωριαίας εγγυημένης ισχύος (N_2) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στα σχήματα 8.176-8.185 παρουσιάζεται το κόστος συντήρησης (FC_n) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Το κόστος συντήρησης (FC_n) υπολογίζεται από τη σχέση (7.4). Στα σχήματα 8.186-8.195 παρουσιάζεται το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας (EC_1) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Το κόστος της προμηθευόμενης ενέργειας (EC_1) υπολογίζεται από την εξίσωση (7.12). Στα σχήματα 8.196-8.205 φαίνονται τα έντοκα κέρδη (R_n) από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Τα έντοκα κέρδη (R_n) από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζονται από τη σχέση (7.8). Στα σχήματα 8.206-8.215 φαίνεται το συνολικό κόστος της εγκατάστασης για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης υπολογίζεται από την εξίσωση (7.11). Στα σχήματα 8.216-8.225 παρουσιάζεται ο λόγος Ετήσια εισαγόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια, για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση βελτιστοποίησης, ο λόγος Ετήσια εισαγόμενη ενέργεια/Ετήσια παραγόμενη (εγγυημένη) ενέργεια είναι $g(N_2)$, όπου $g(N_2)$ είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και υπολογίζεται από την εξίσωση (7.13). Στα σχήματα 8.226-8.235 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης. Στα σχήματα 8.236-8.240 παρουσιάζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR). Τέλος στα

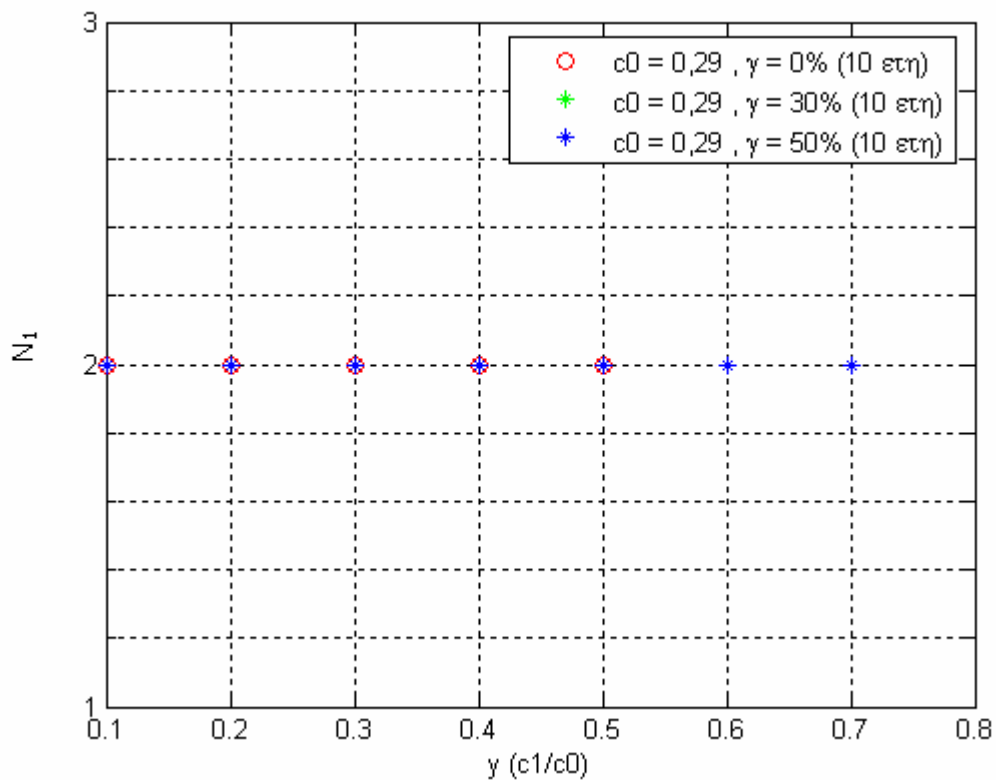
σχήματα 8.241-8.249 φαίνεται ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για όλες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα ποσοστά επιδότησης και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης.



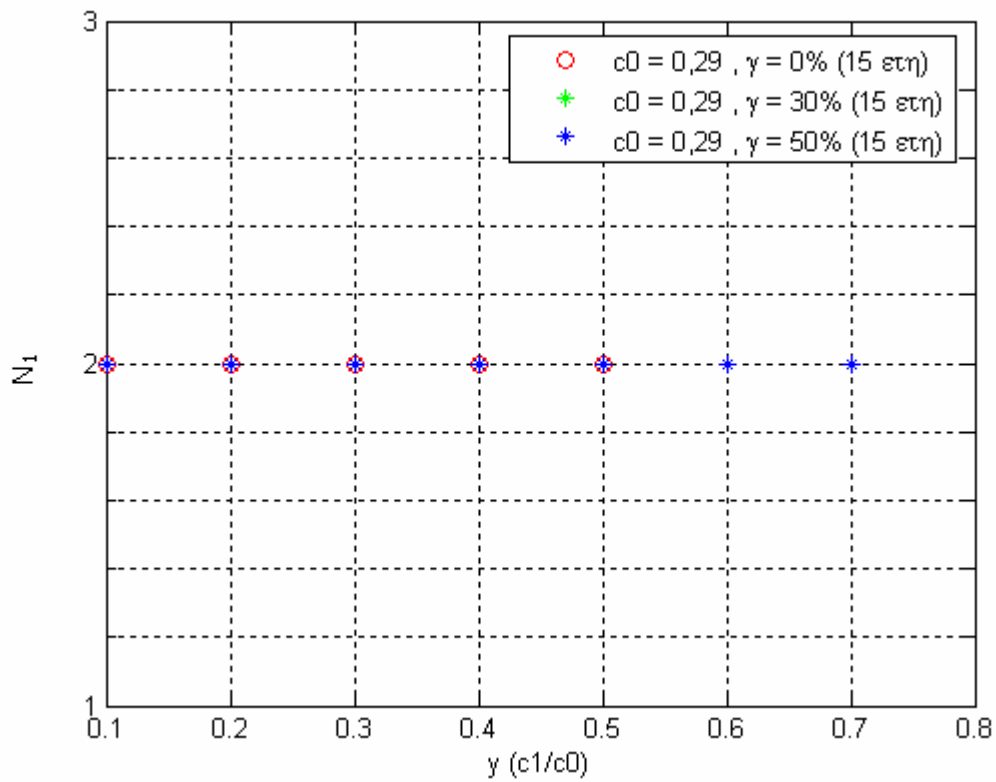
Σχήμα 8.146 Συνολικός αριθμός μετατροπέων ισχύος (N_1) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



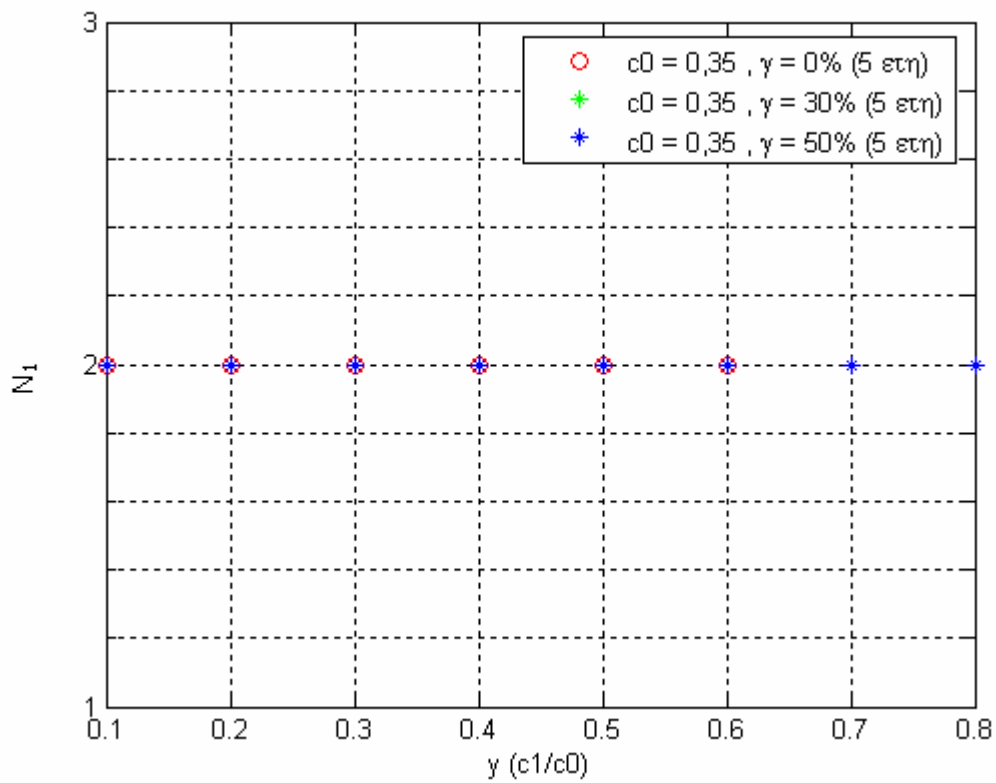
Σχήμα 8.147 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



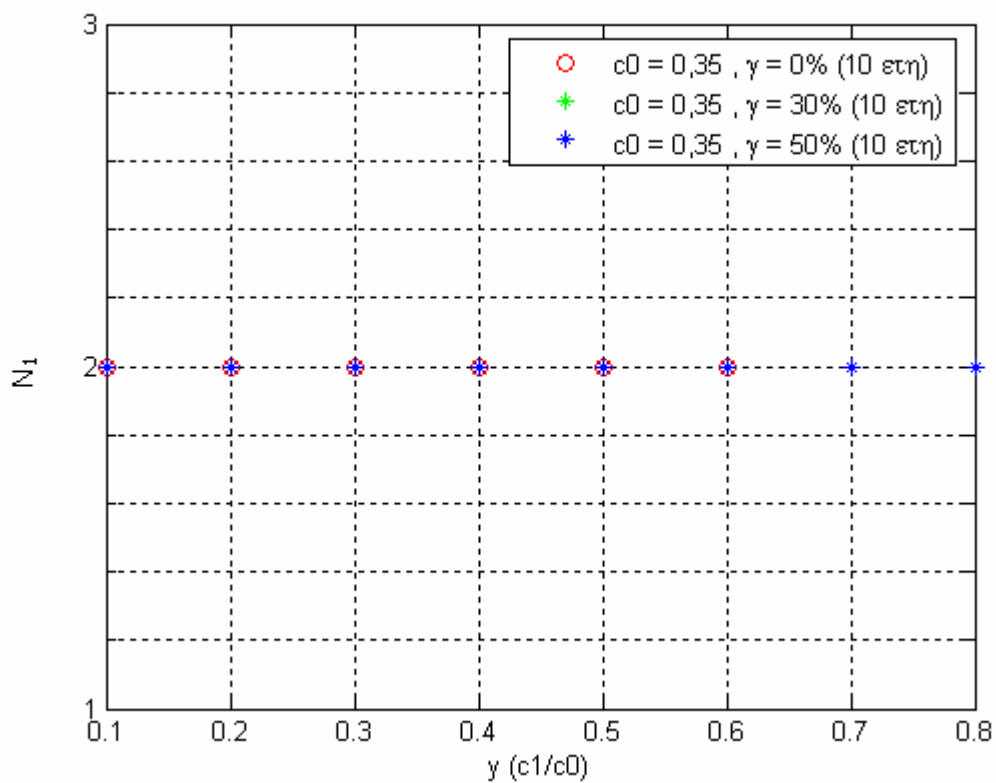
Σχήμα 8.148 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



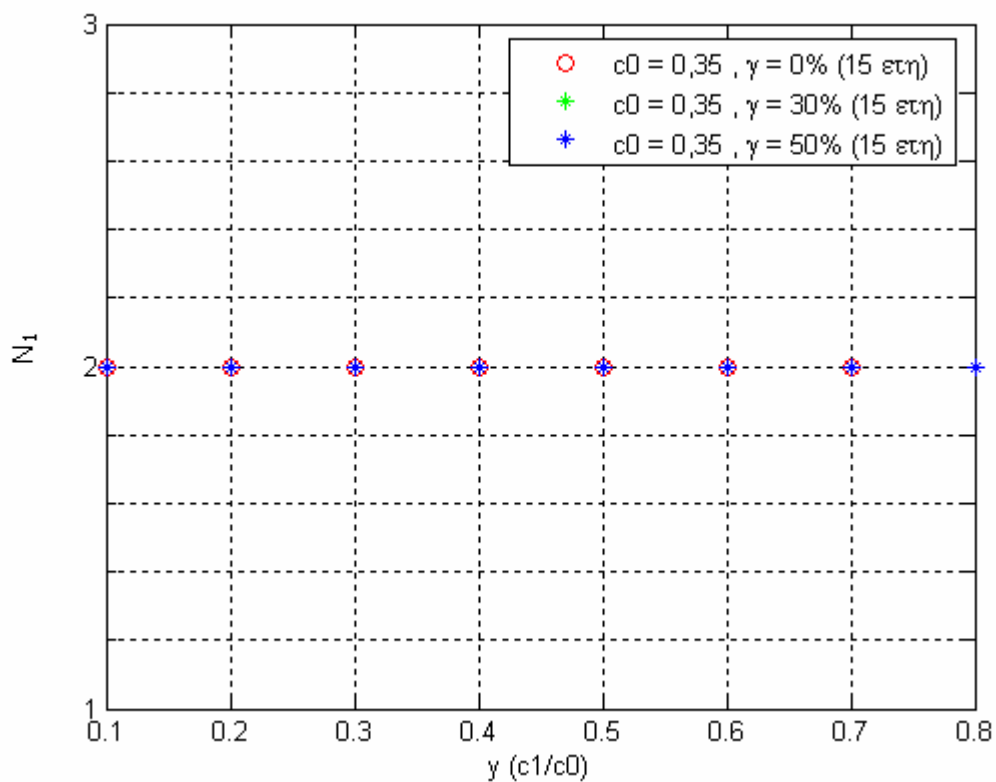
Σχήμα 8.149 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



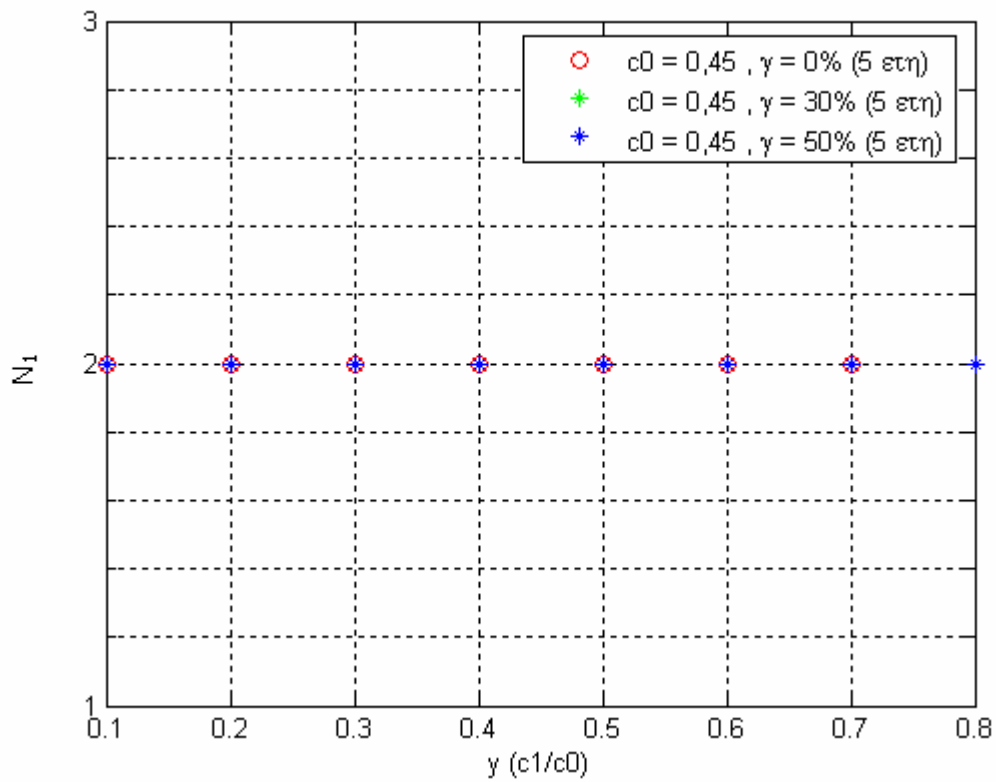
Σχήμα 8.150 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



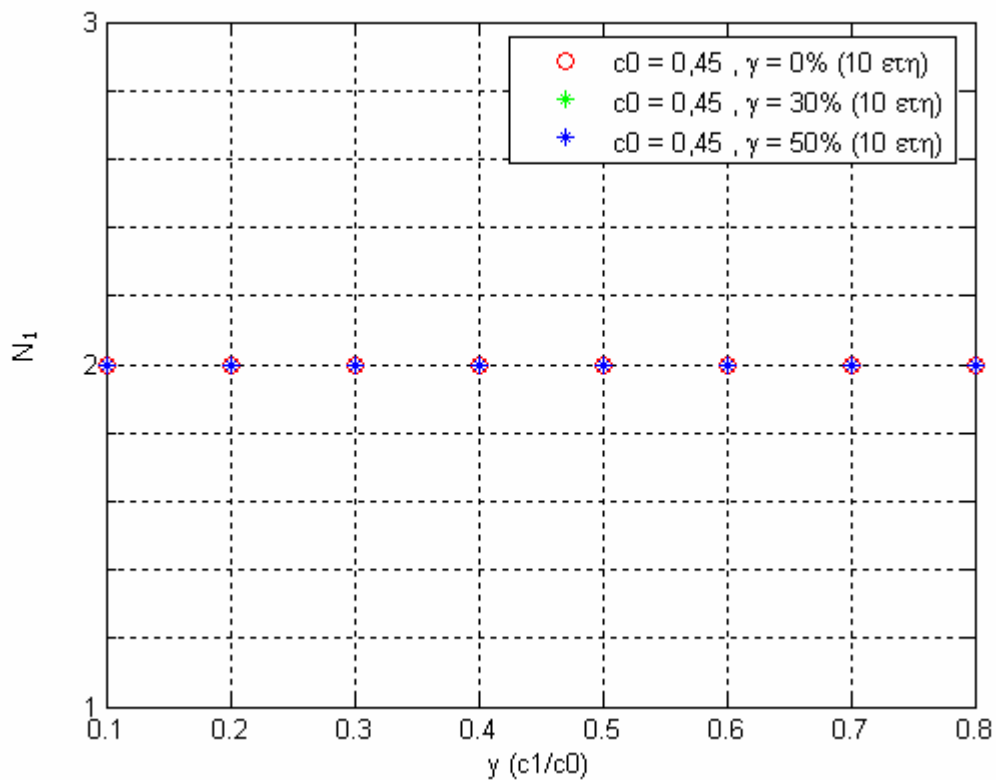
Σχήμα 8.151 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



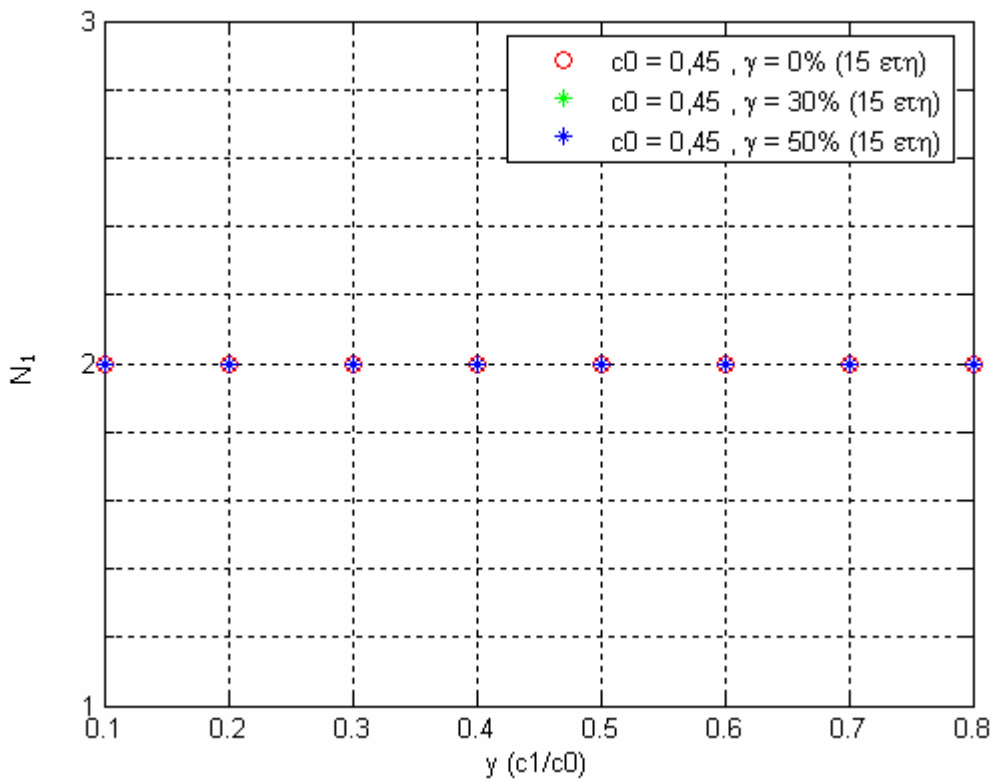
Σχήμα 8.152 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



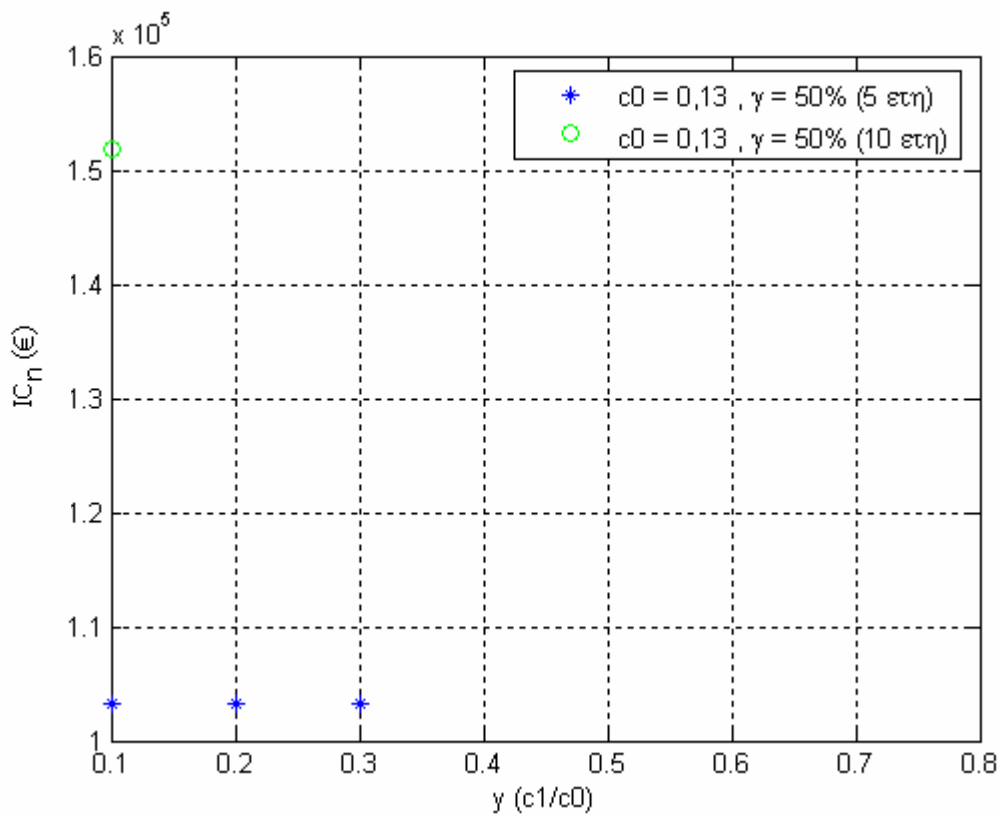
Σχήμα 8.153 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



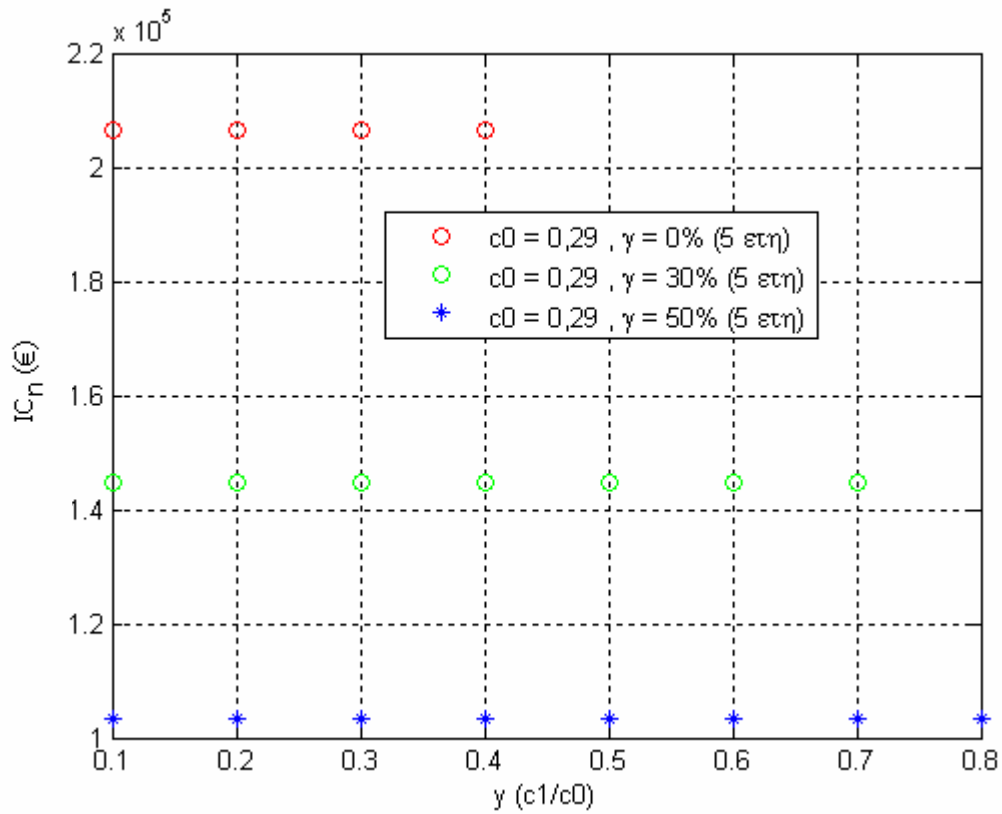
Σχήμα 8.154 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



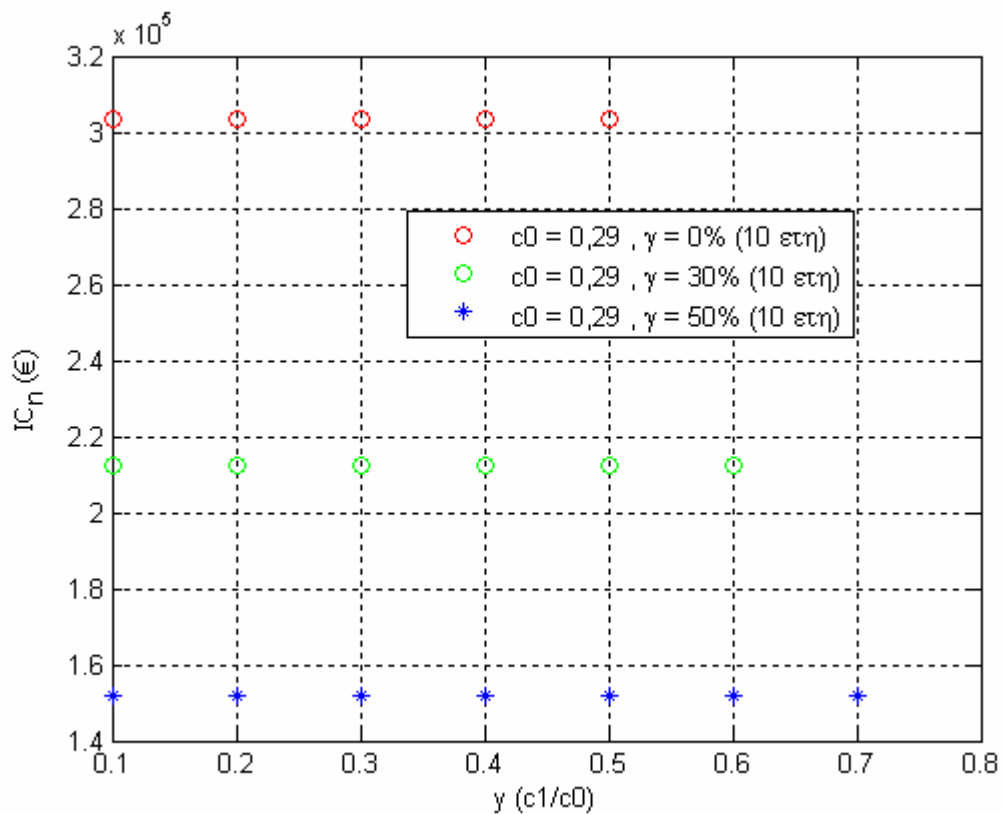
Σχήμα 8.155 Συνολικός αριθμός μετατροπών ισχύος (N_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



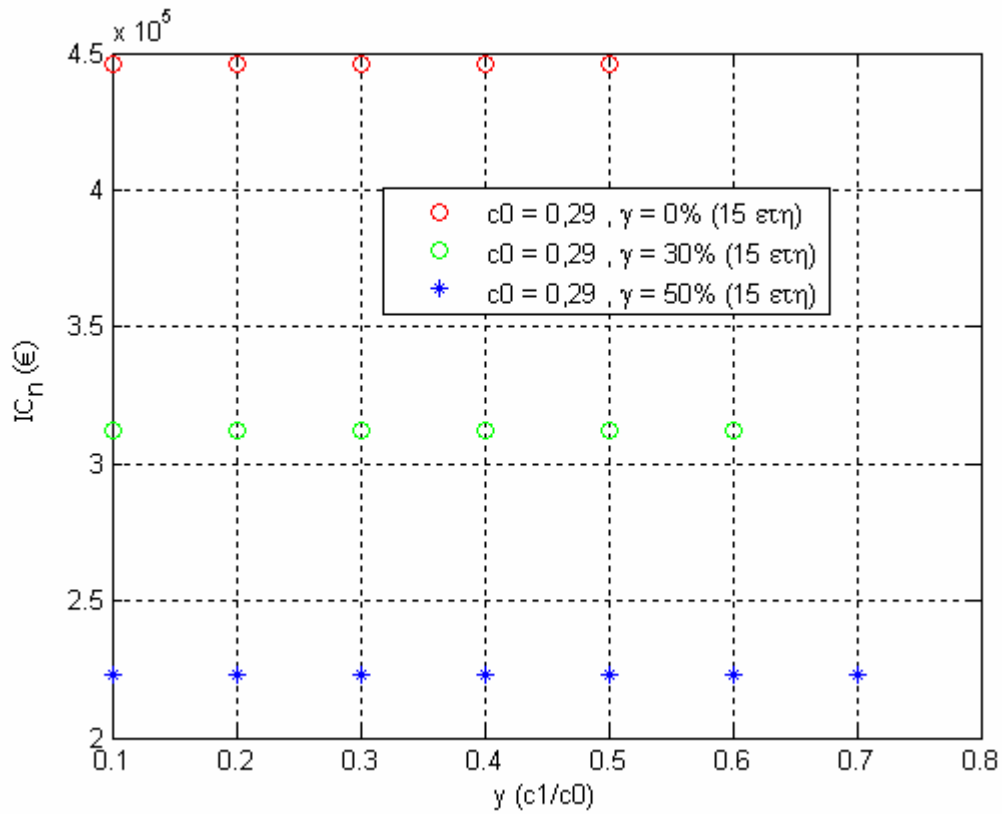
Σχήμα 8.156 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



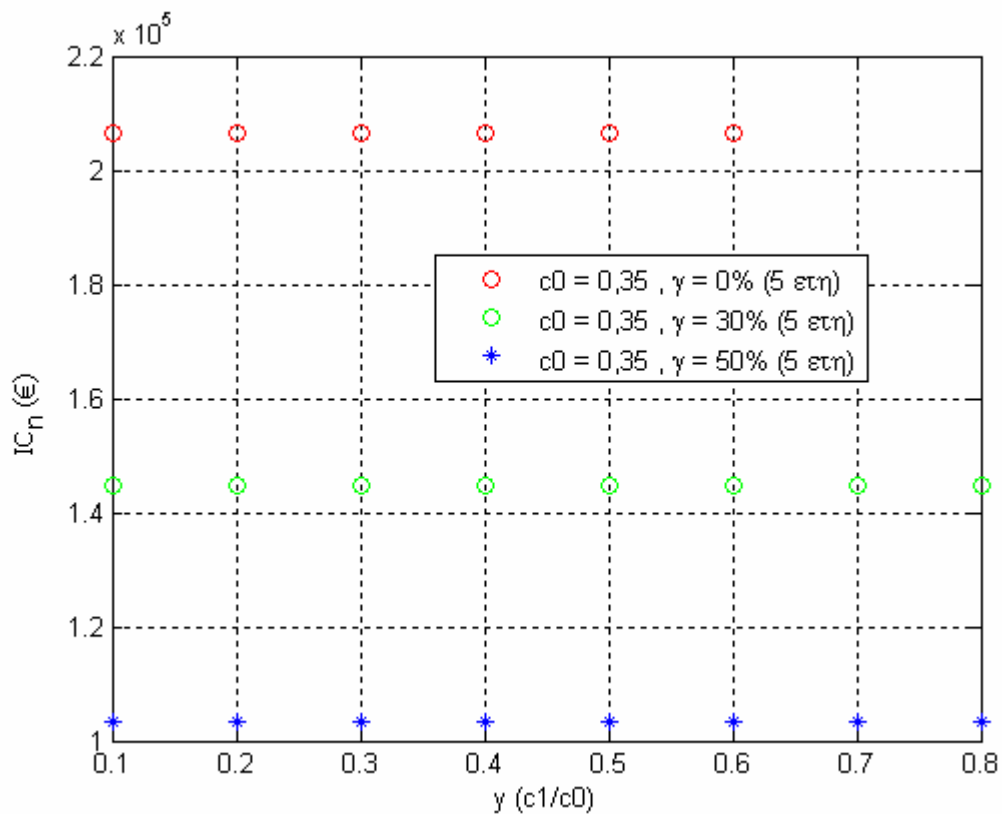
Σχήμα 8.157 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



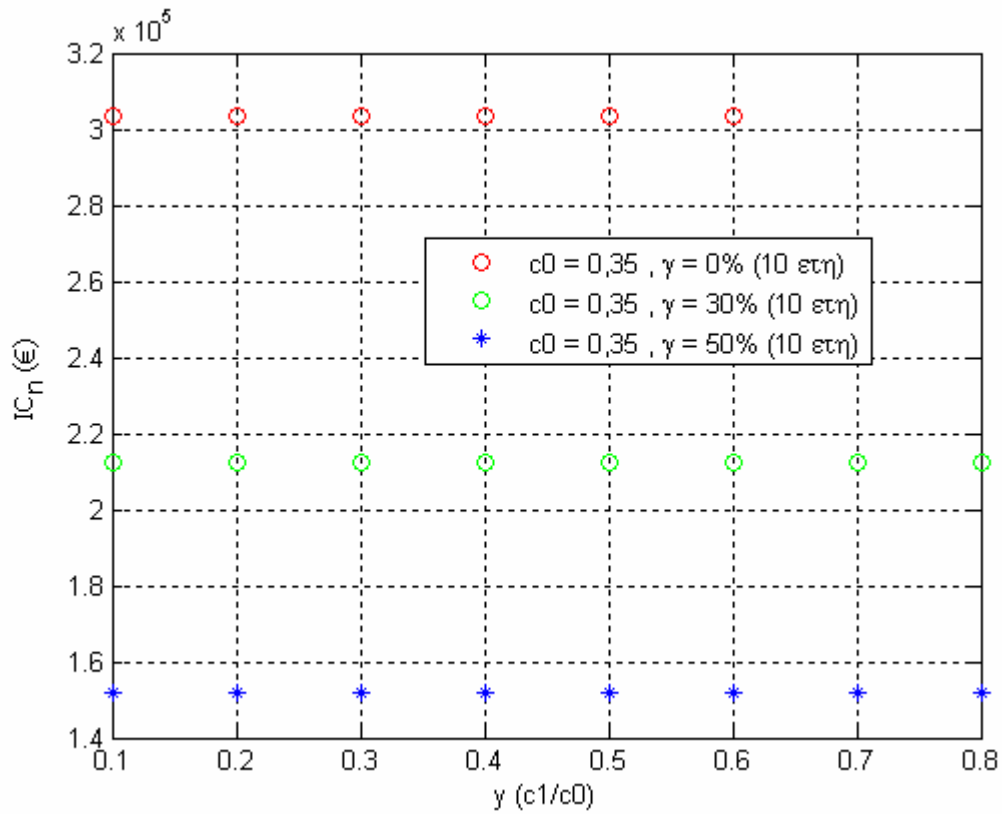
Σχήμα 8.158 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



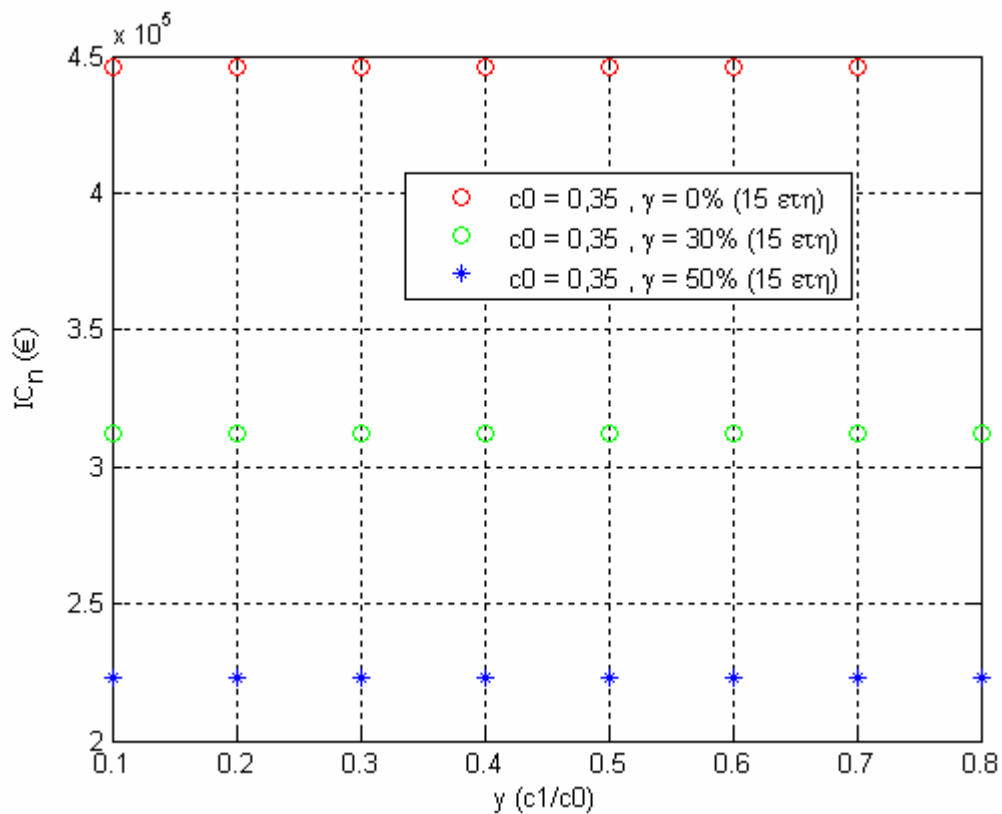
Σχήμα 8.159 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



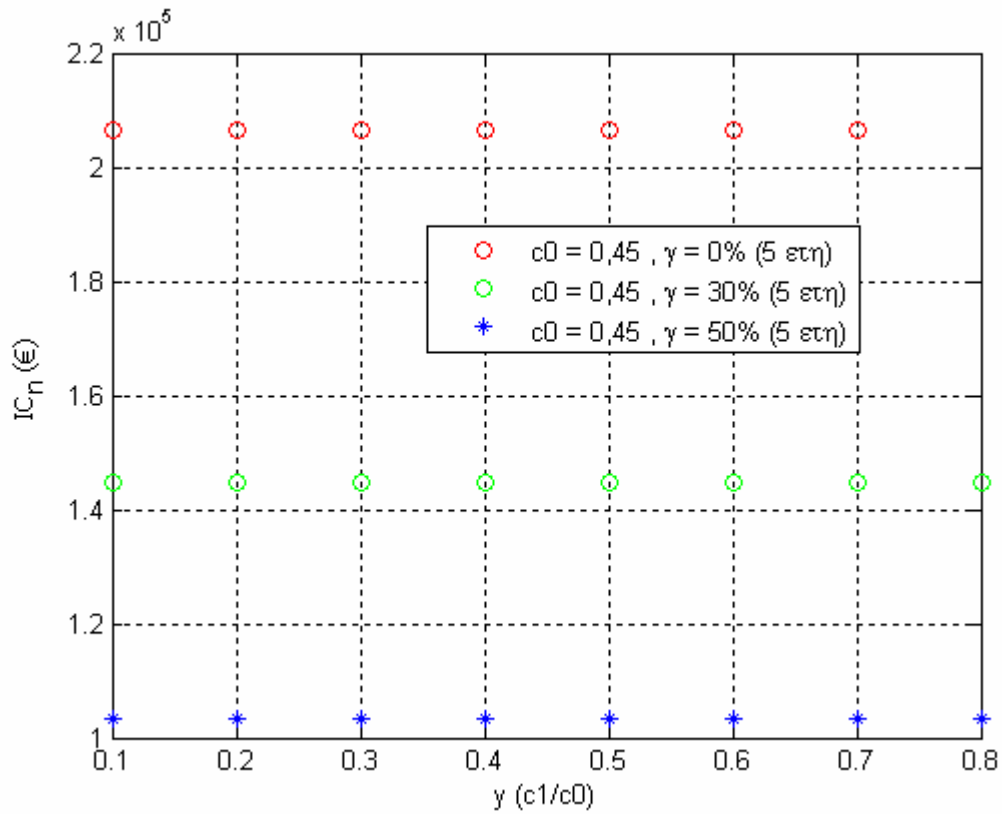
Σχήμα 8.160 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



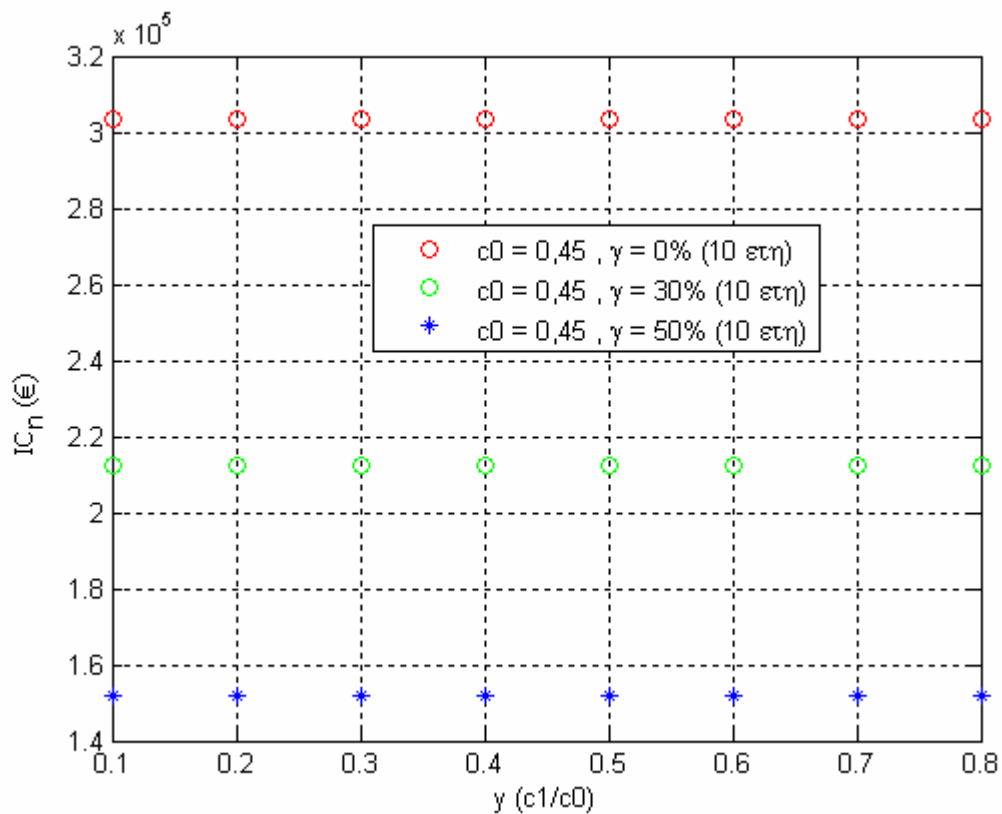
Σχήμα 8.161 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



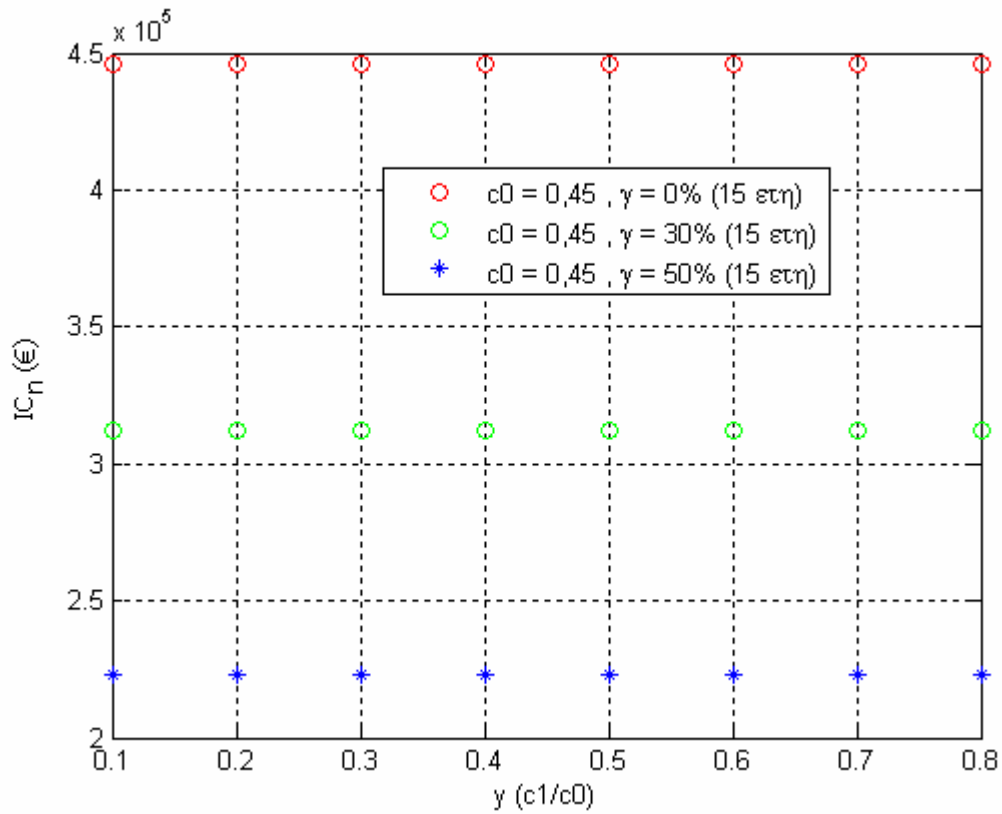
Σχήμα 8.162 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



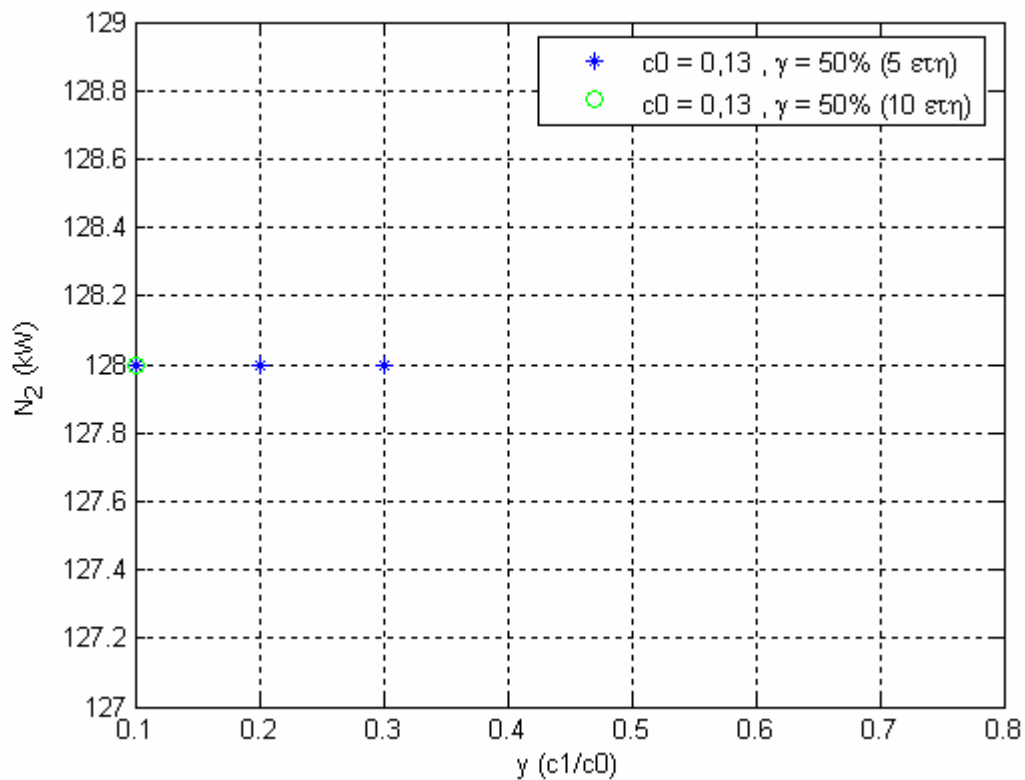
Σχήμα 8.163 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



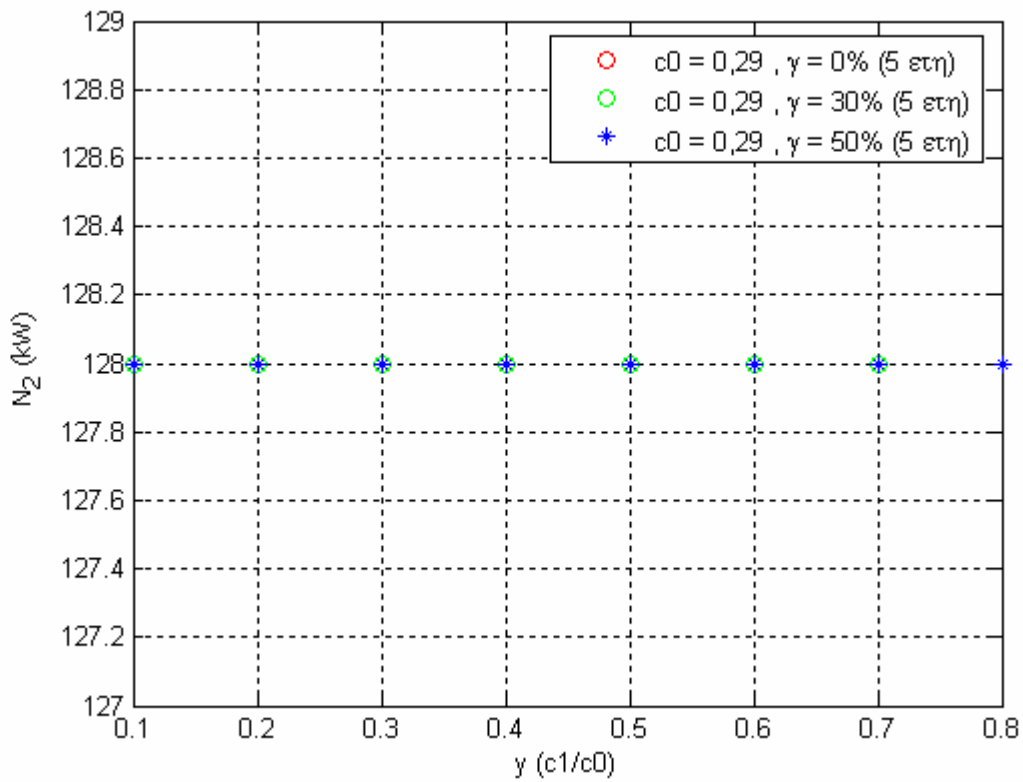
Σχήμα 8.164 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



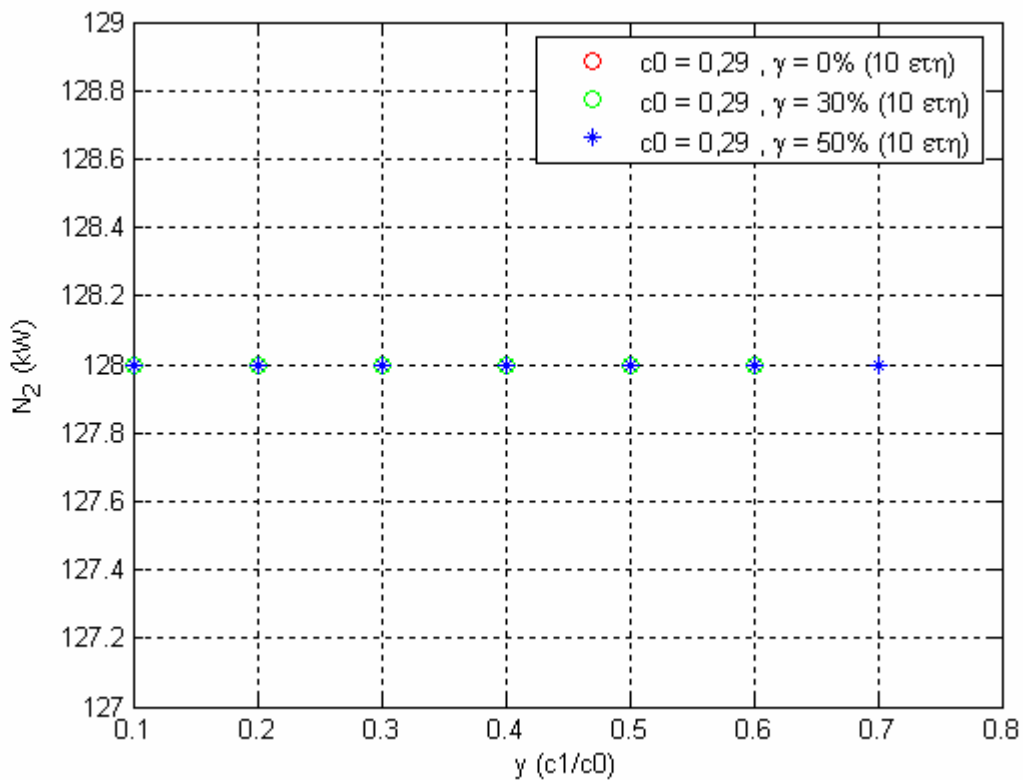
Σχήμα 8.165 Κόστος εγκατάστασης (IC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



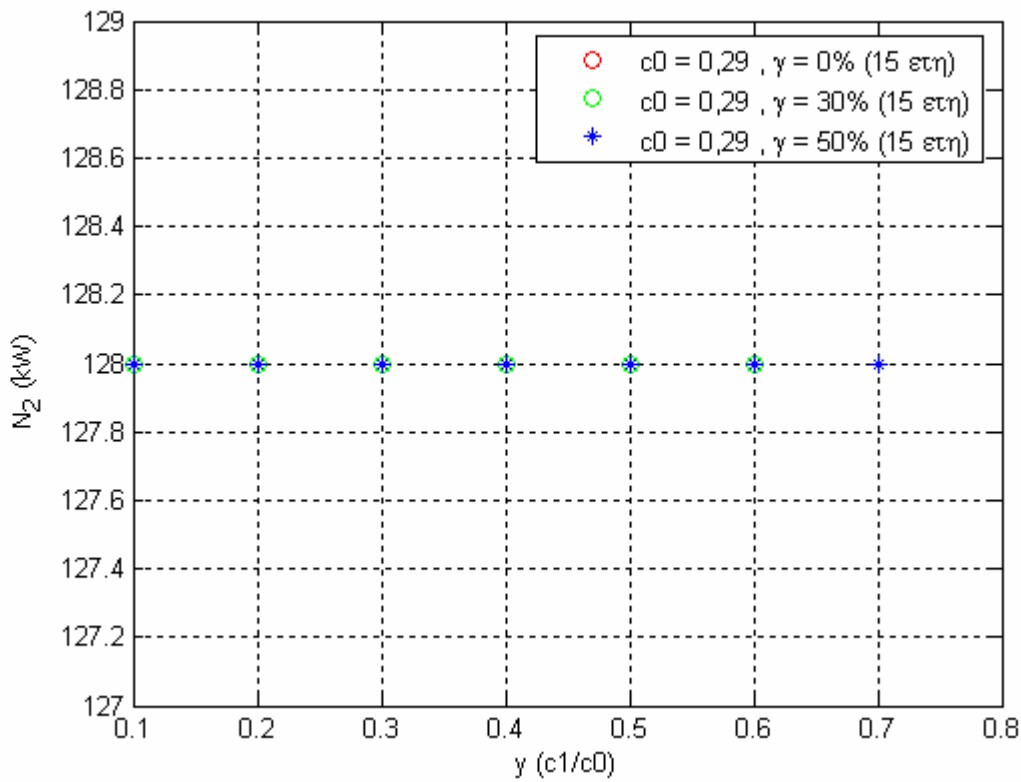
Σχήμα 8.166 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



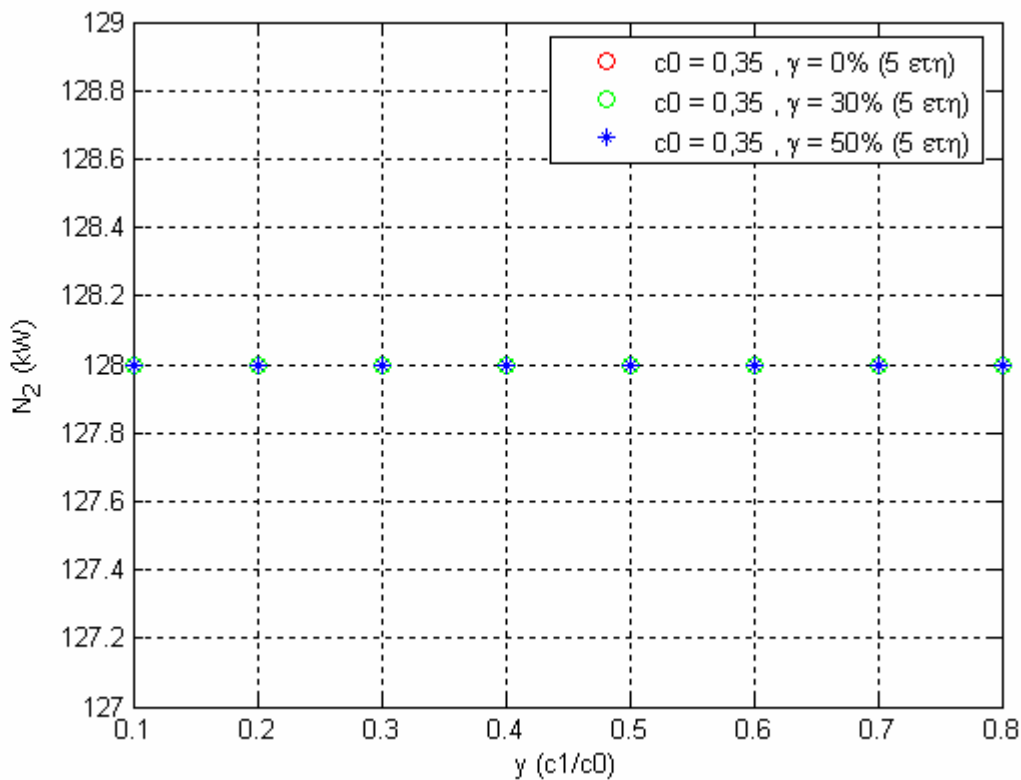
Σχήμα 8.167 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



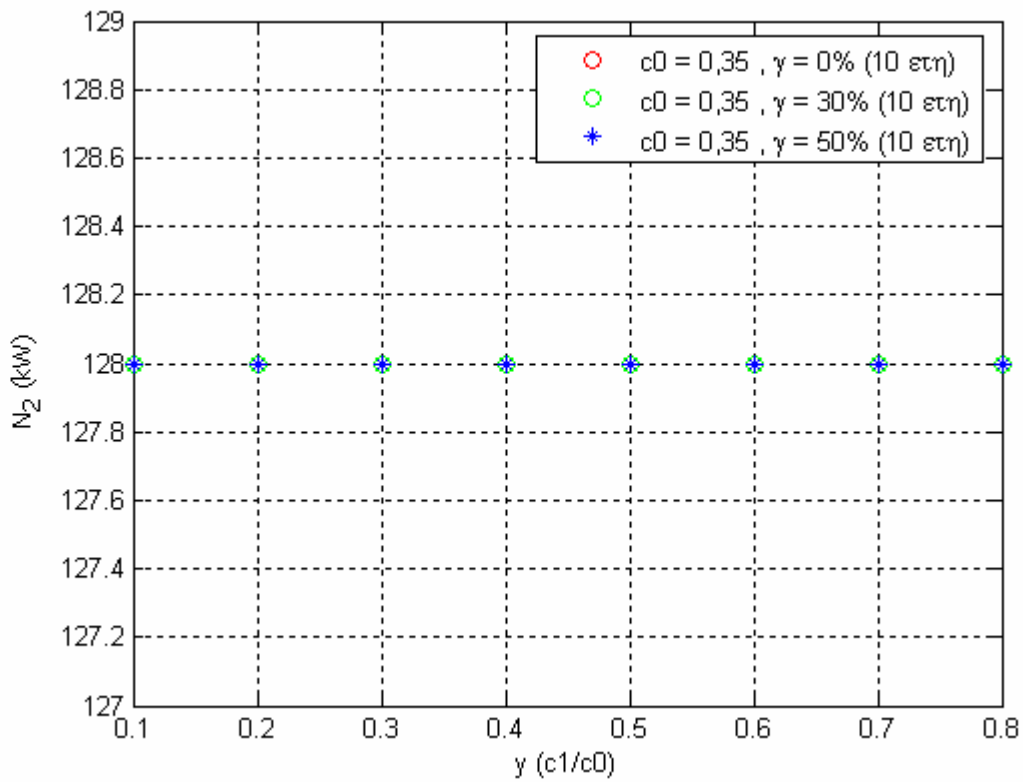
Σχήμα 8.168 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



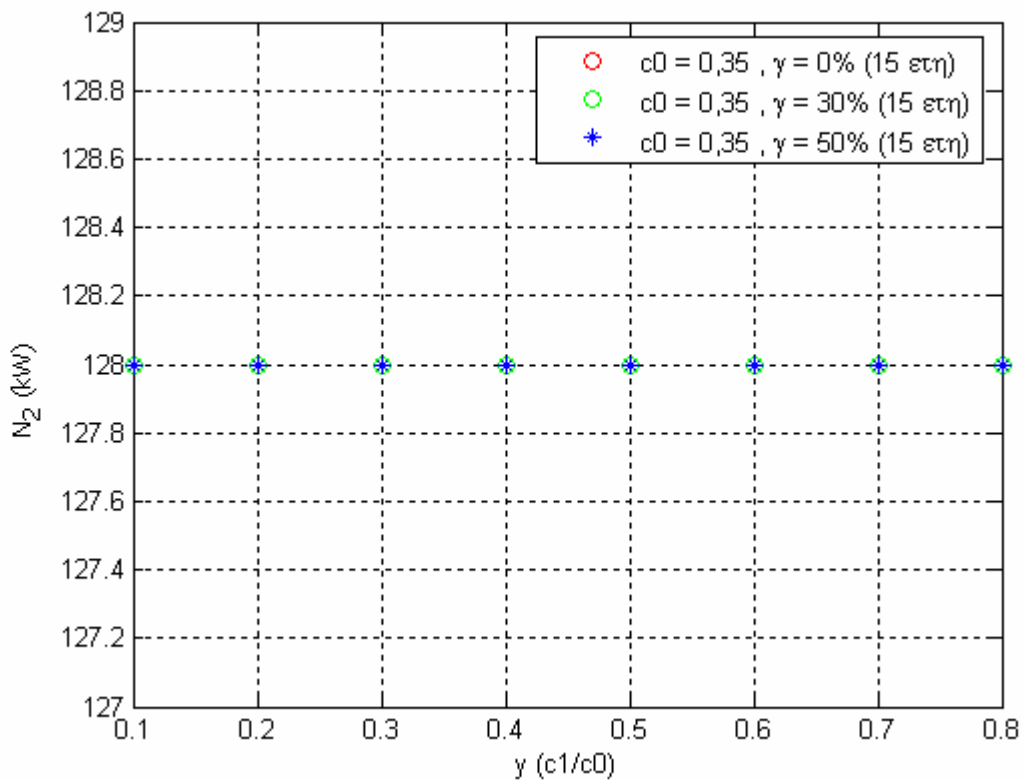
Σχήμα 8.169 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



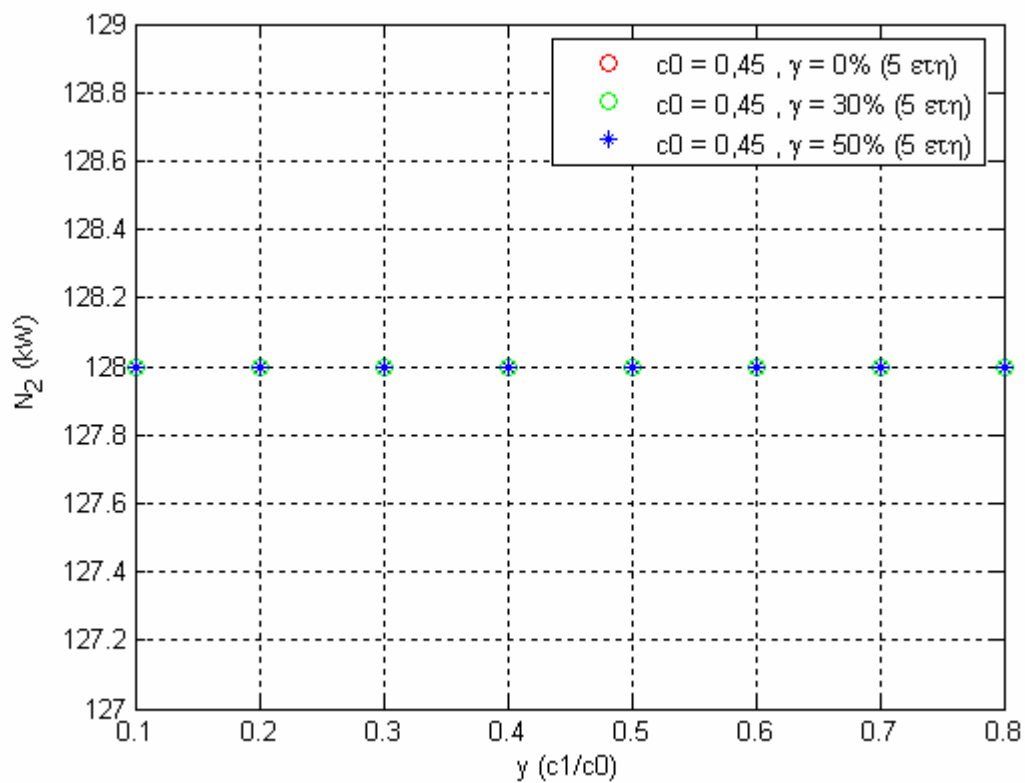
Σχήμα 8.170 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



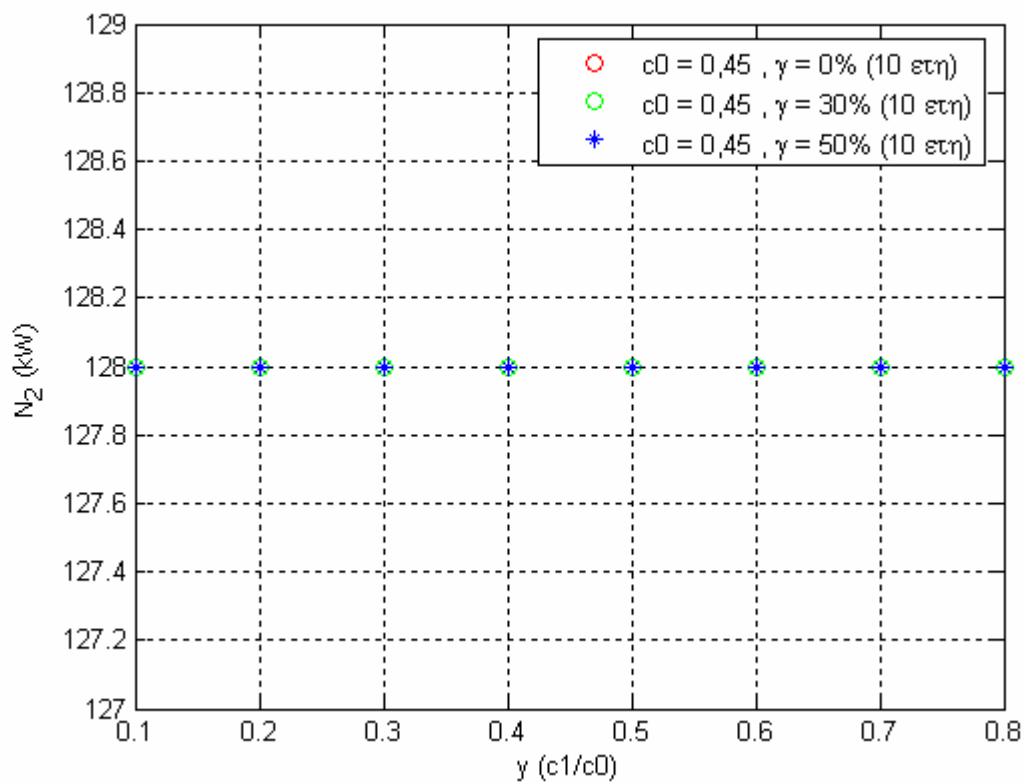
Σχήμα 8.171 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



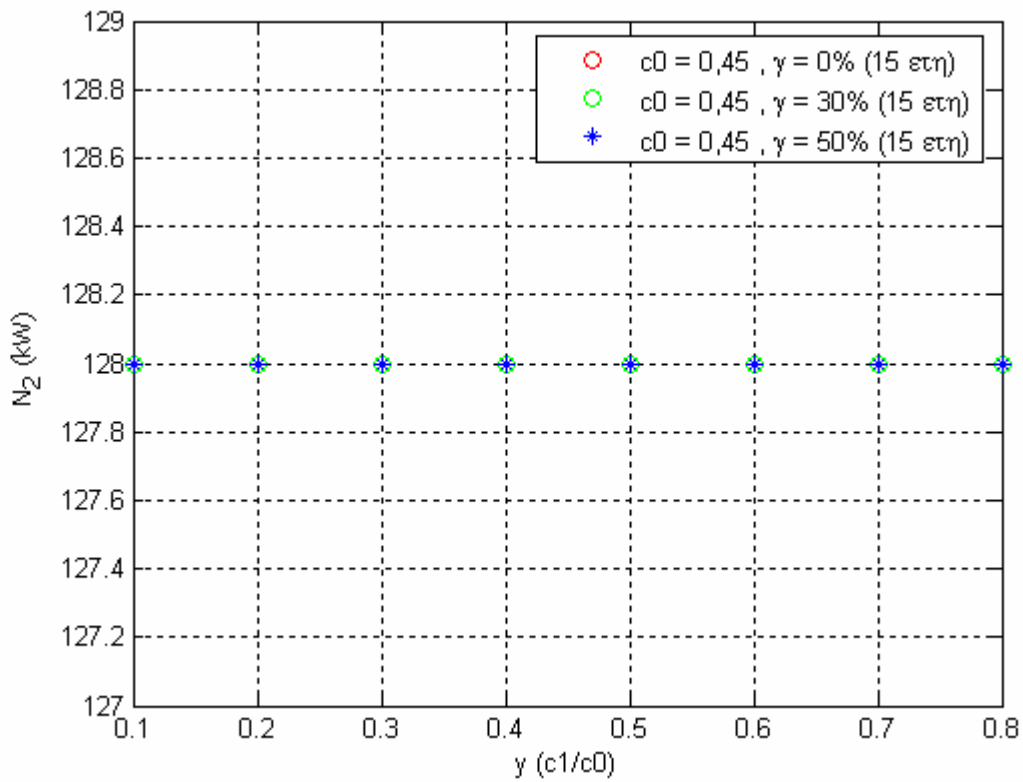
Σχήμα 8.172 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



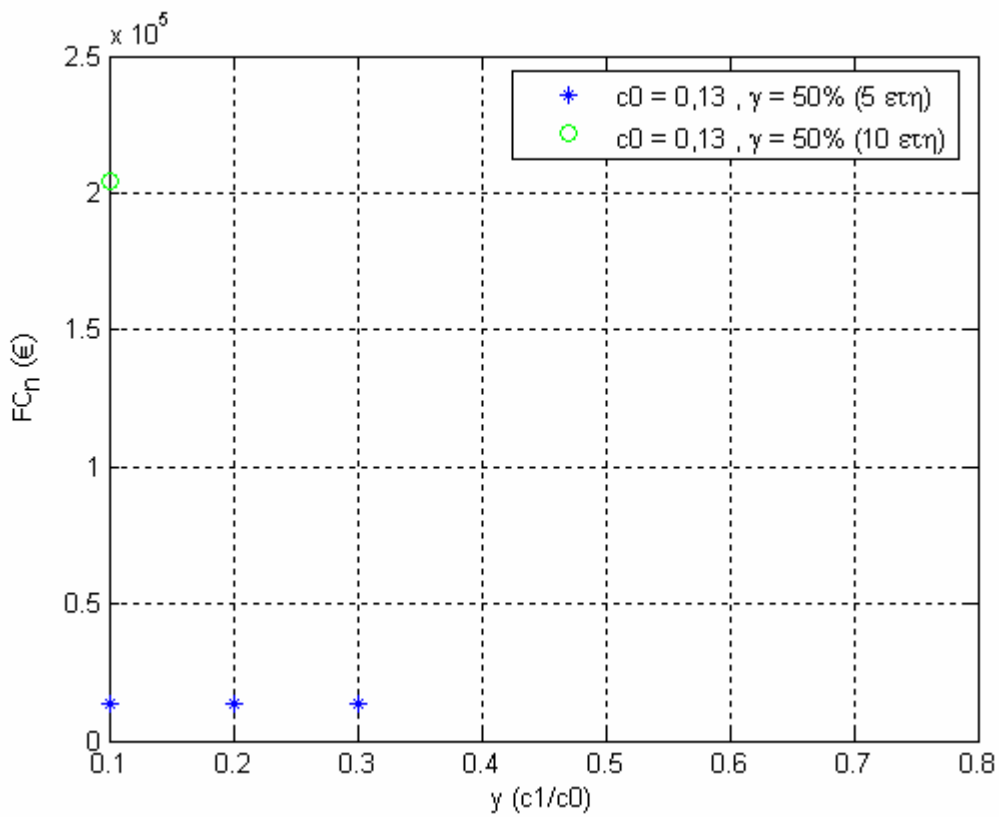
Σχήμα 8.173 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



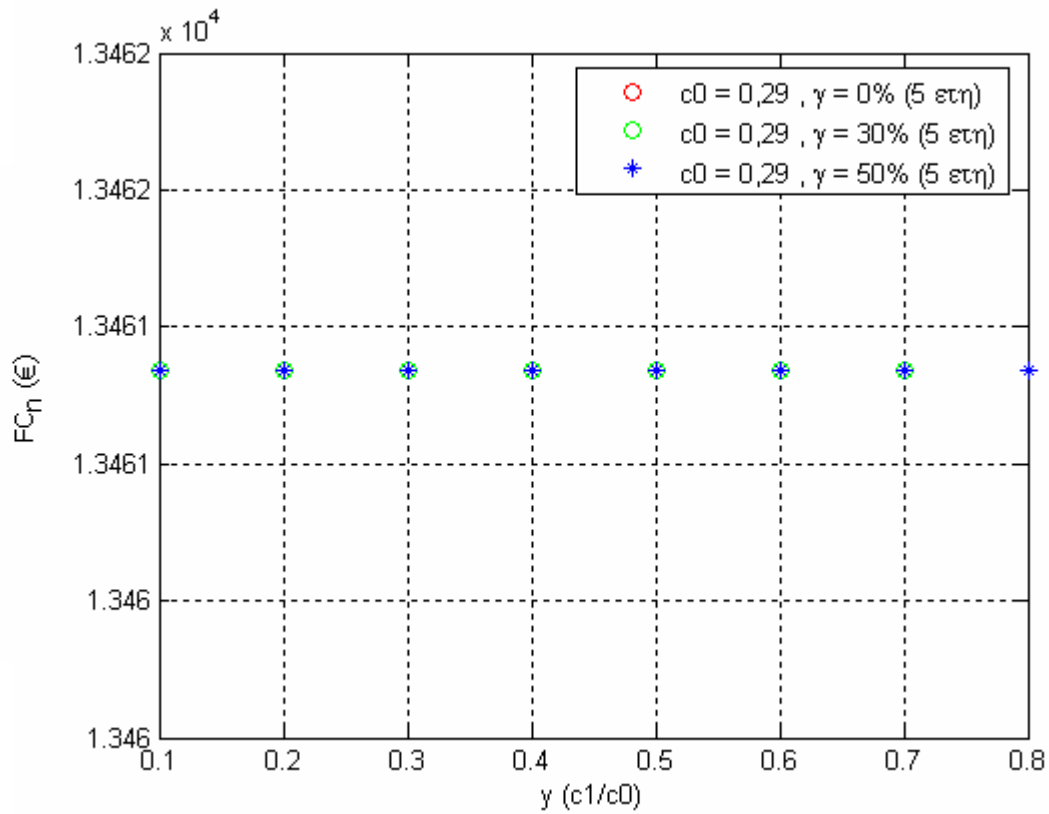
Σχήμα 8.174 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



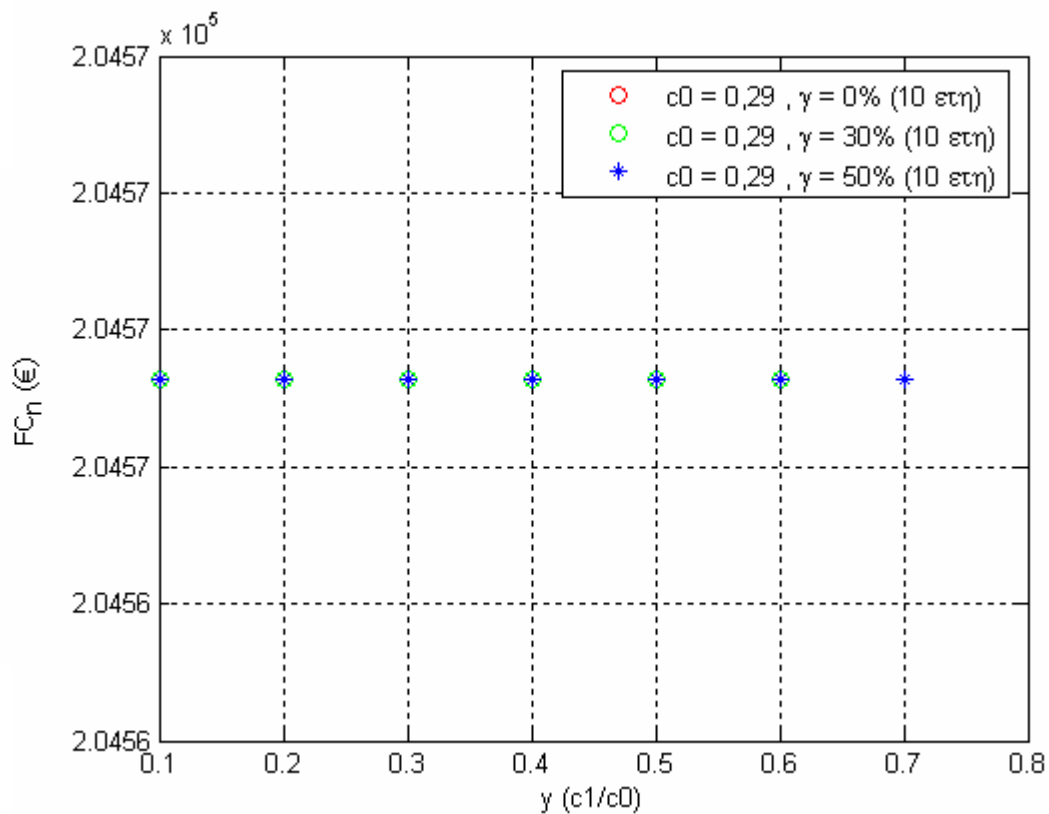
Σχήμα 8.175 Εγγυημένη ισχύς (N_2) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



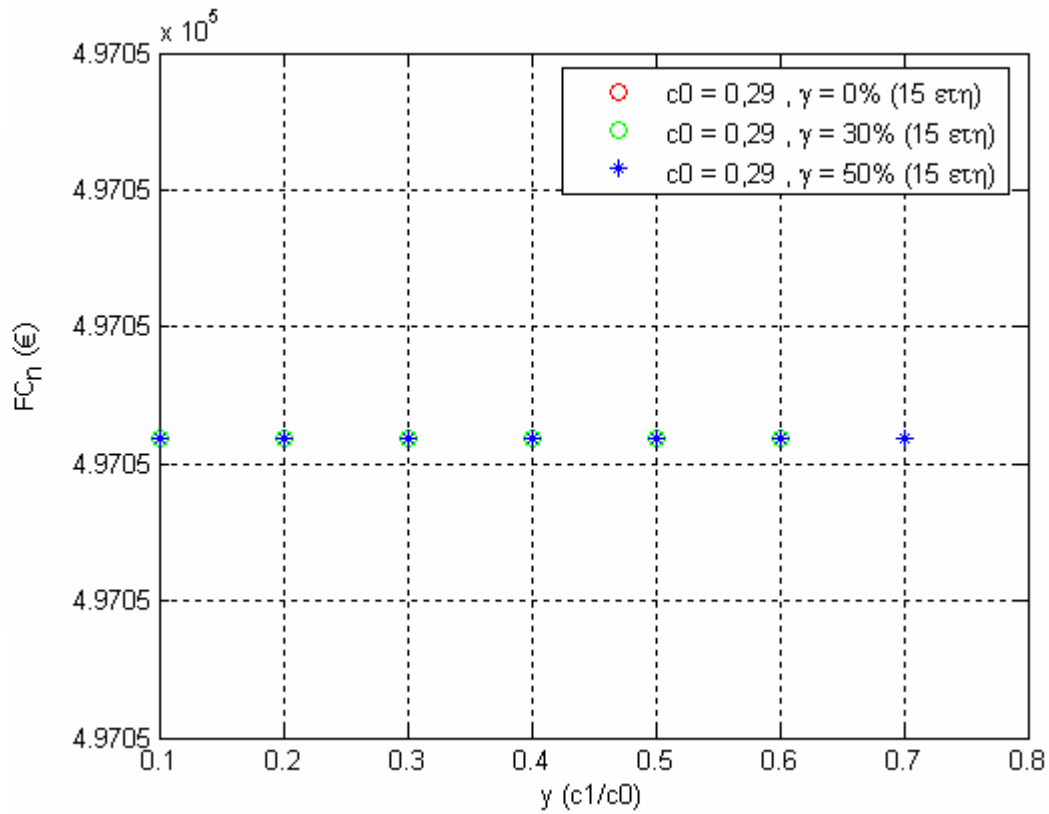
Σχήμα 8.176 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



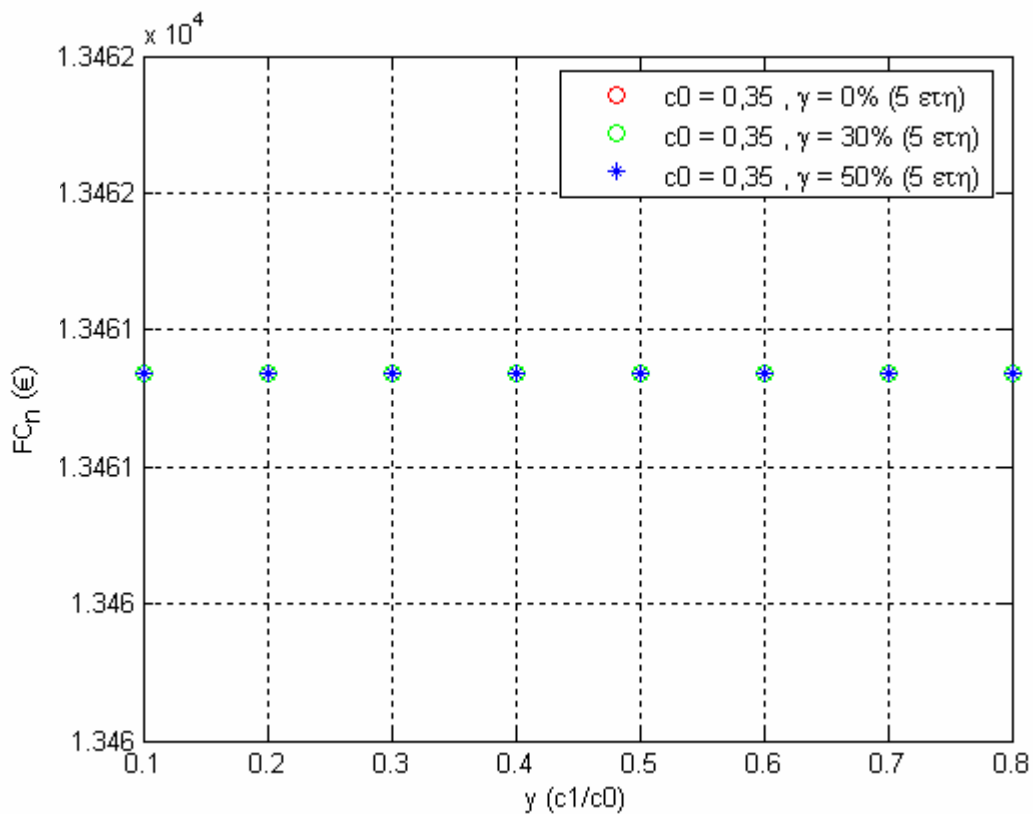
Σχήμα 8.177 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



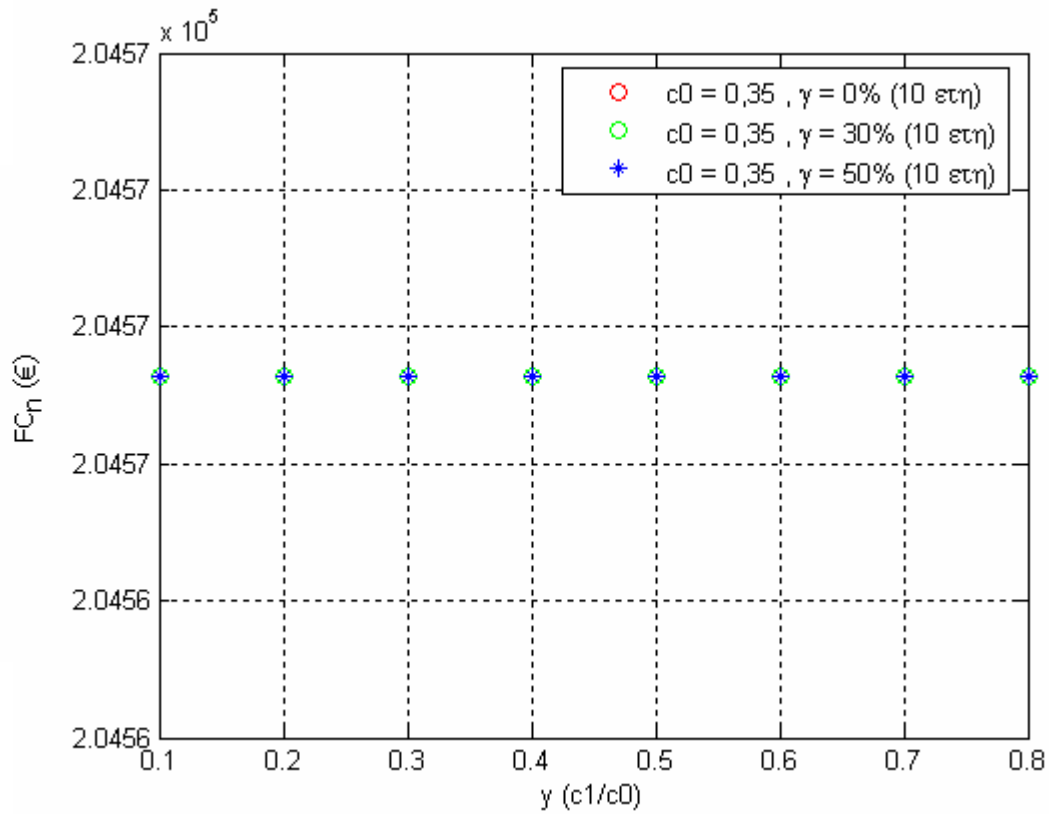
Σχήμα 8.178 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



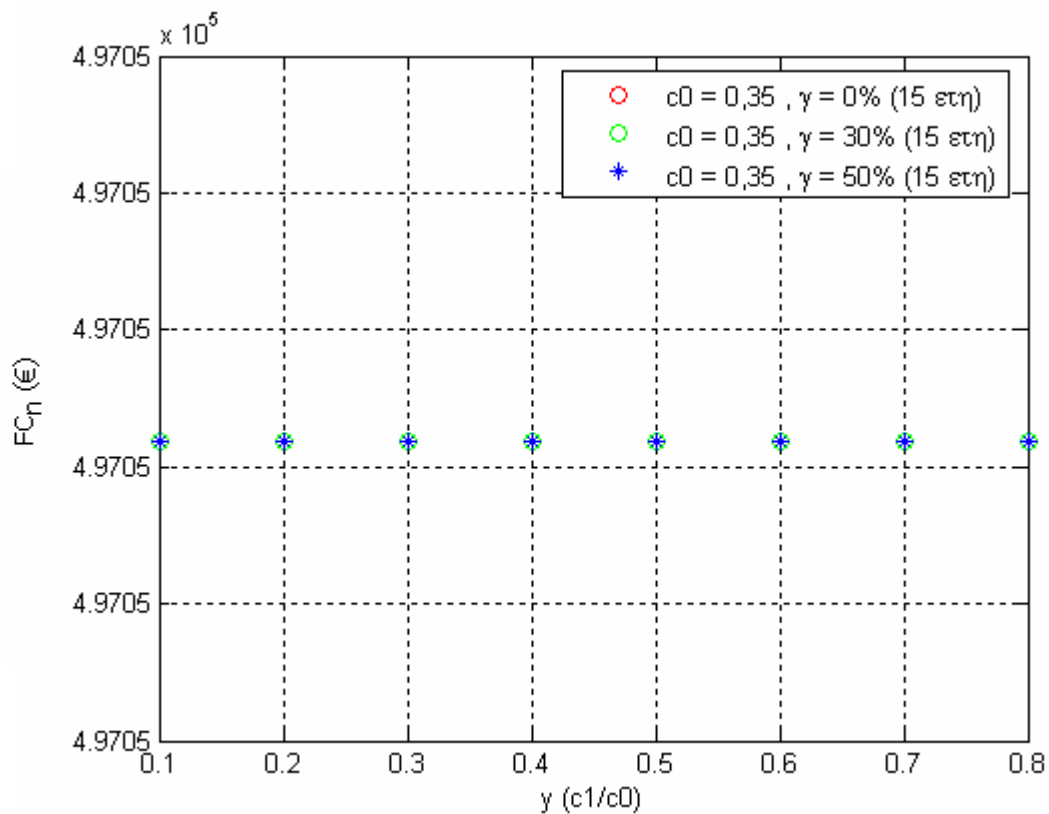
Σχήμα 8.179 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



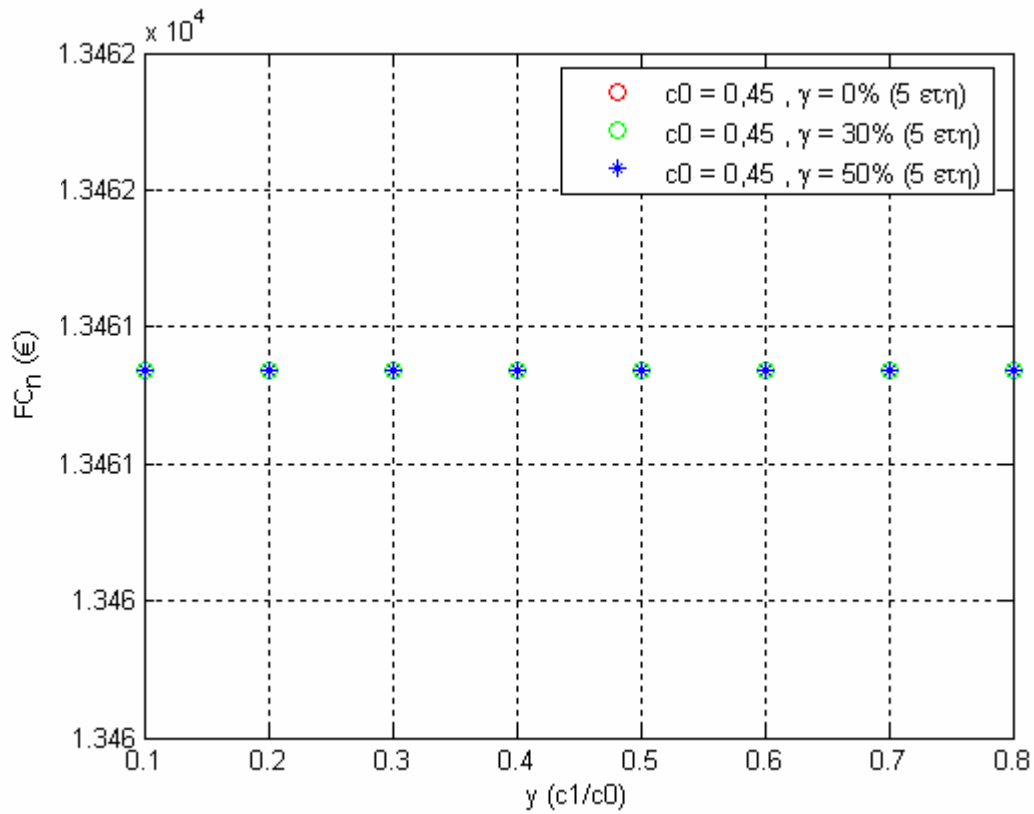
Σχήμα 8.180 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



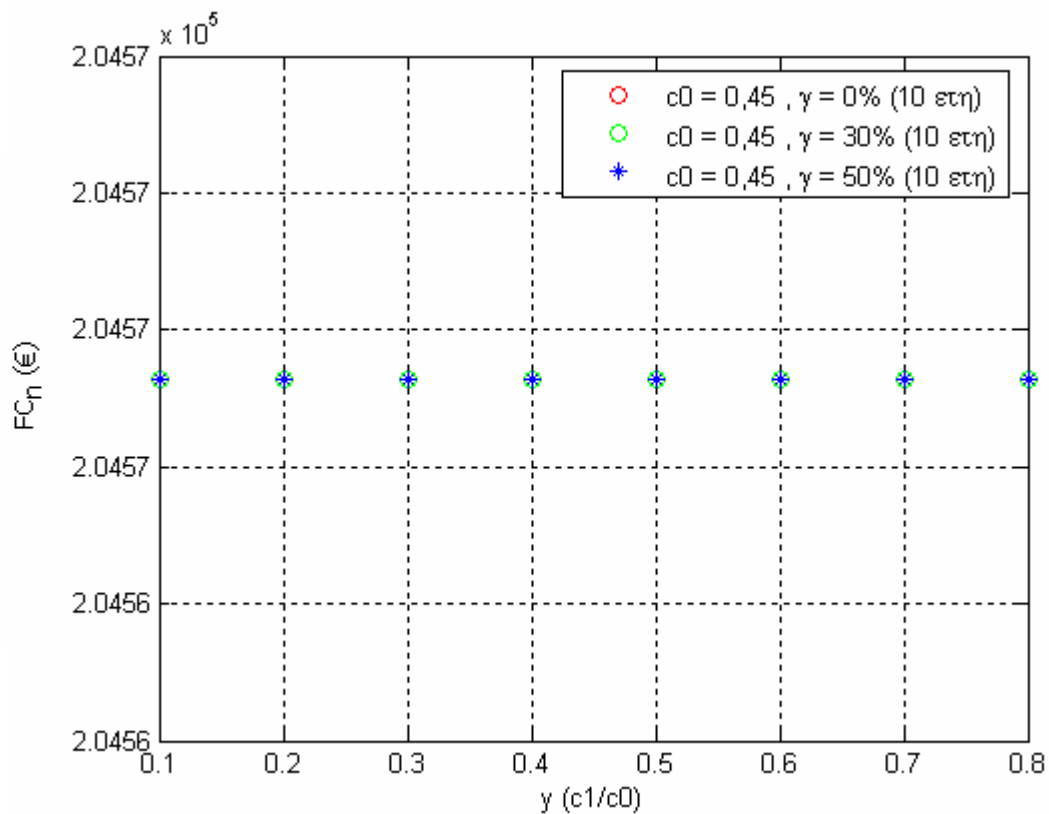
Σχήμα 8.181 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



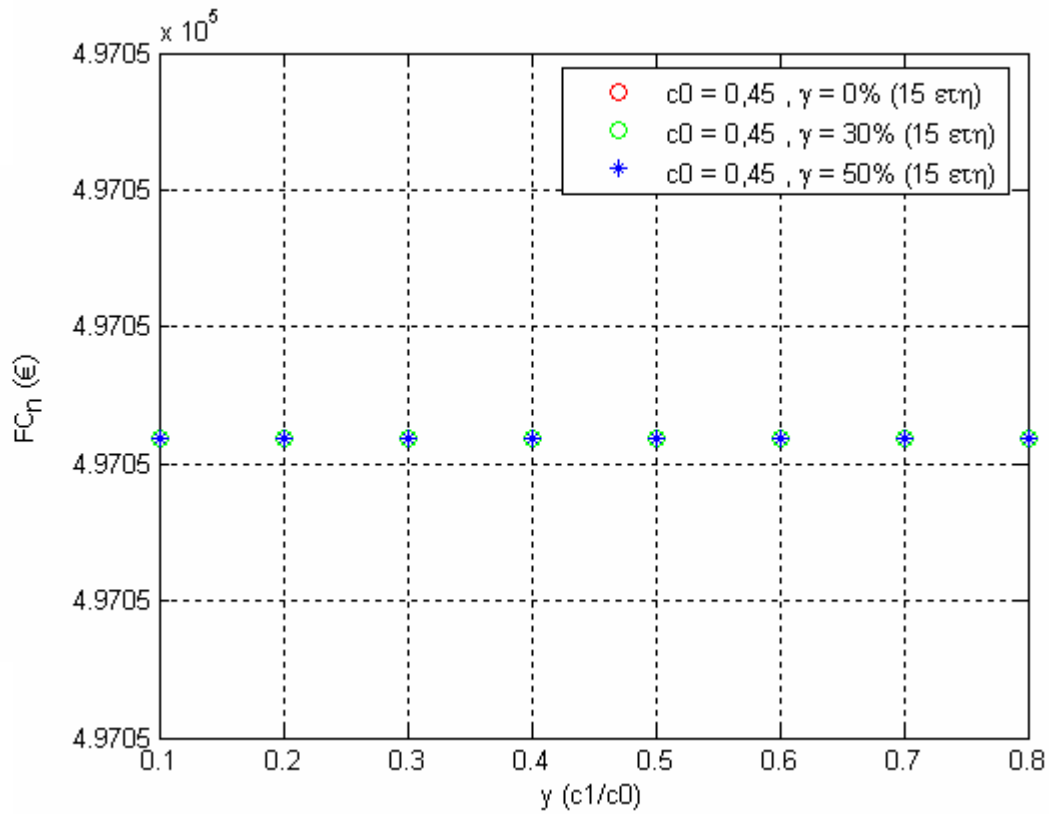
Σχήμα 8.182 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



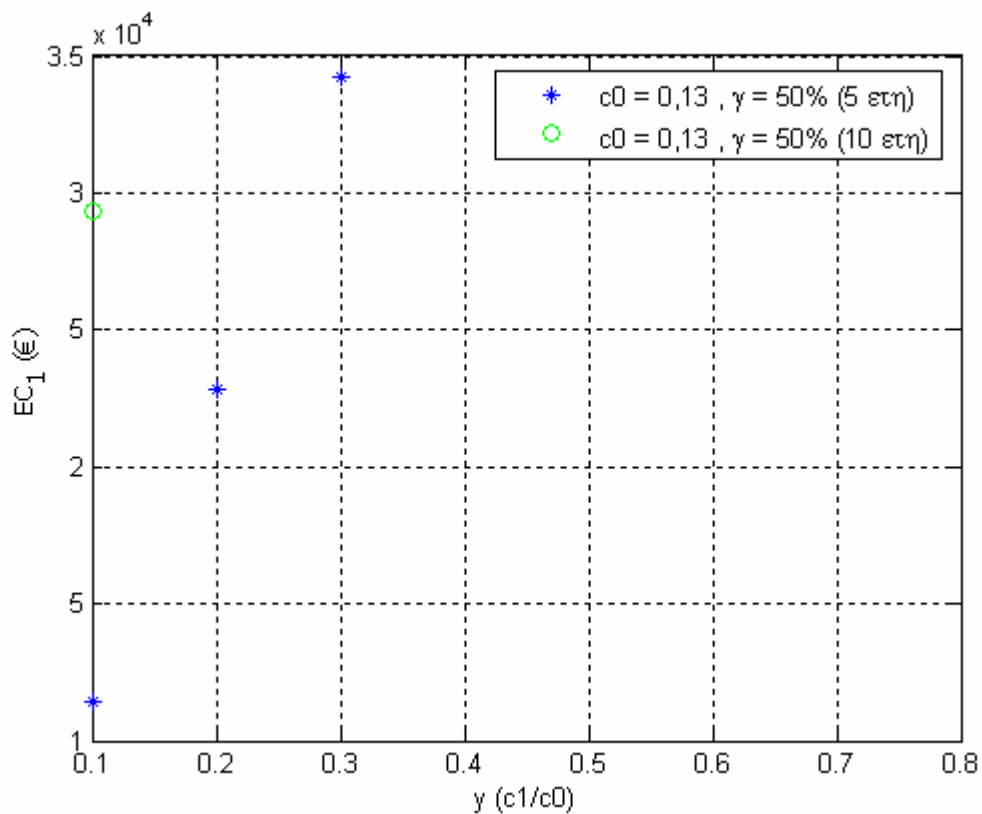
Σχήμα 8.183 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



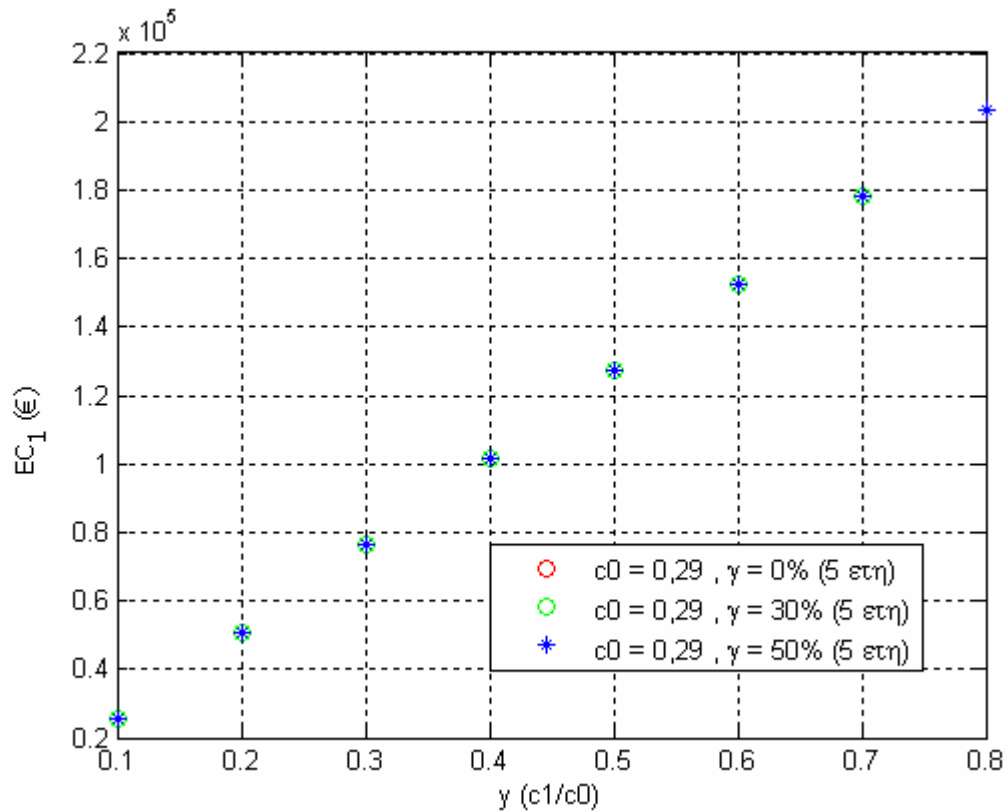
Σχήμα 8.184 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



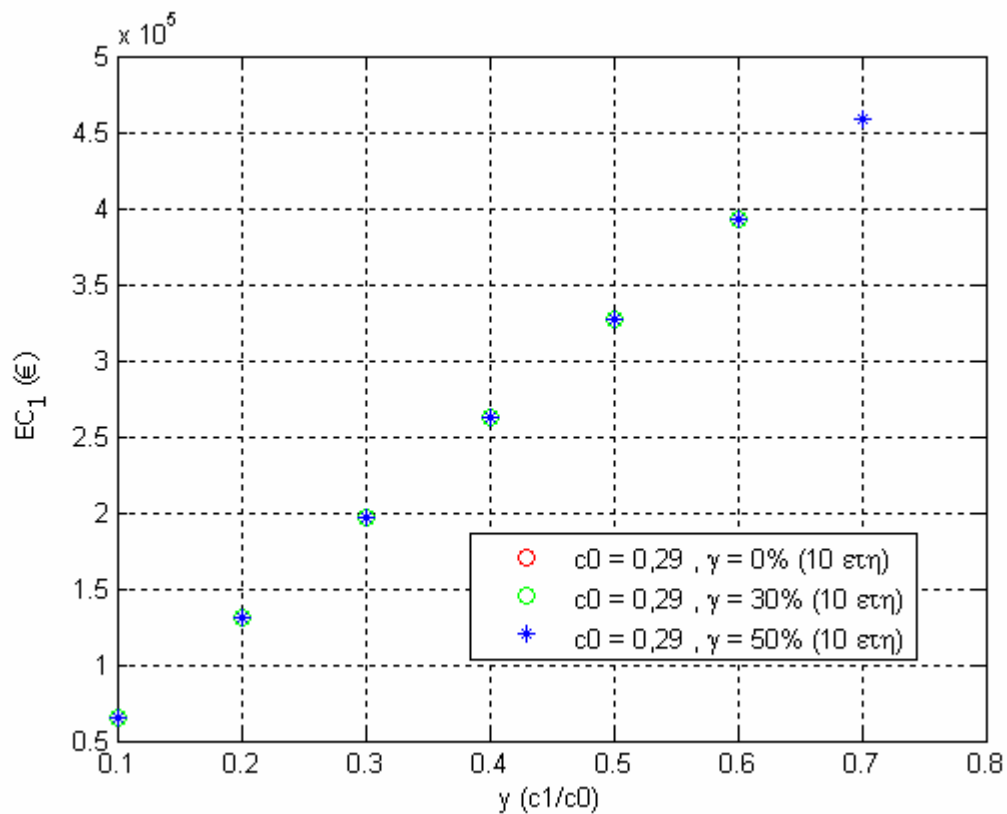
Σχήμα 8.185 Κόστος συντήρησης (FC_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



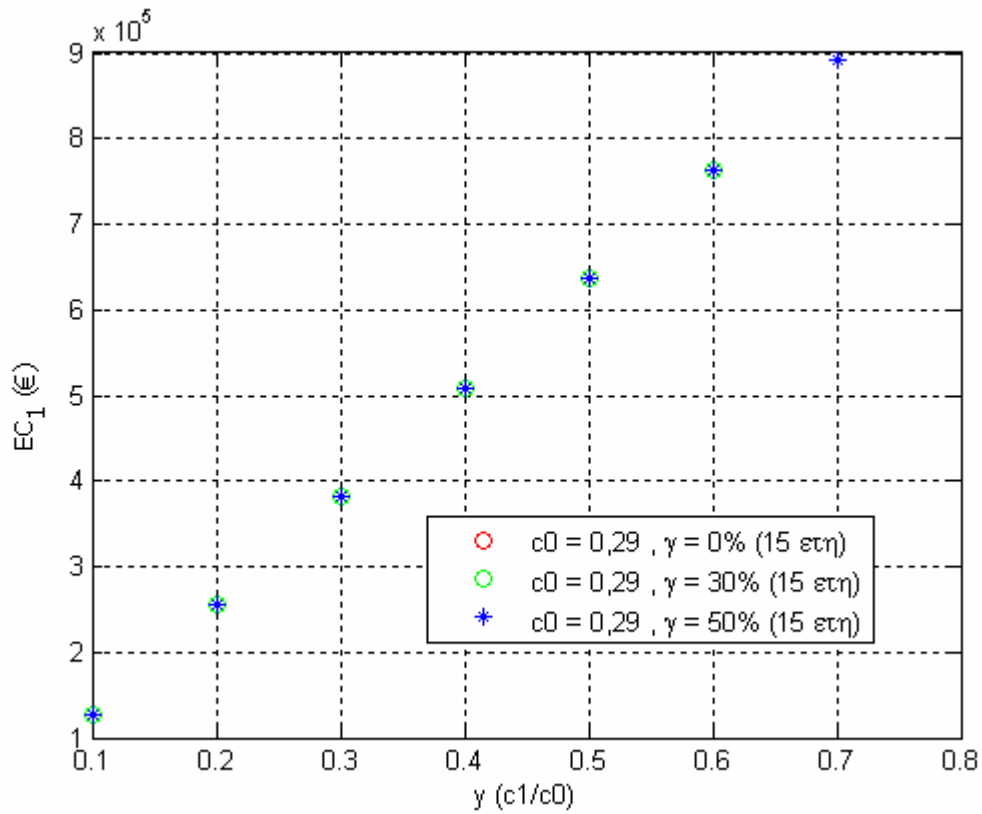
Σχήμα 8.186 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



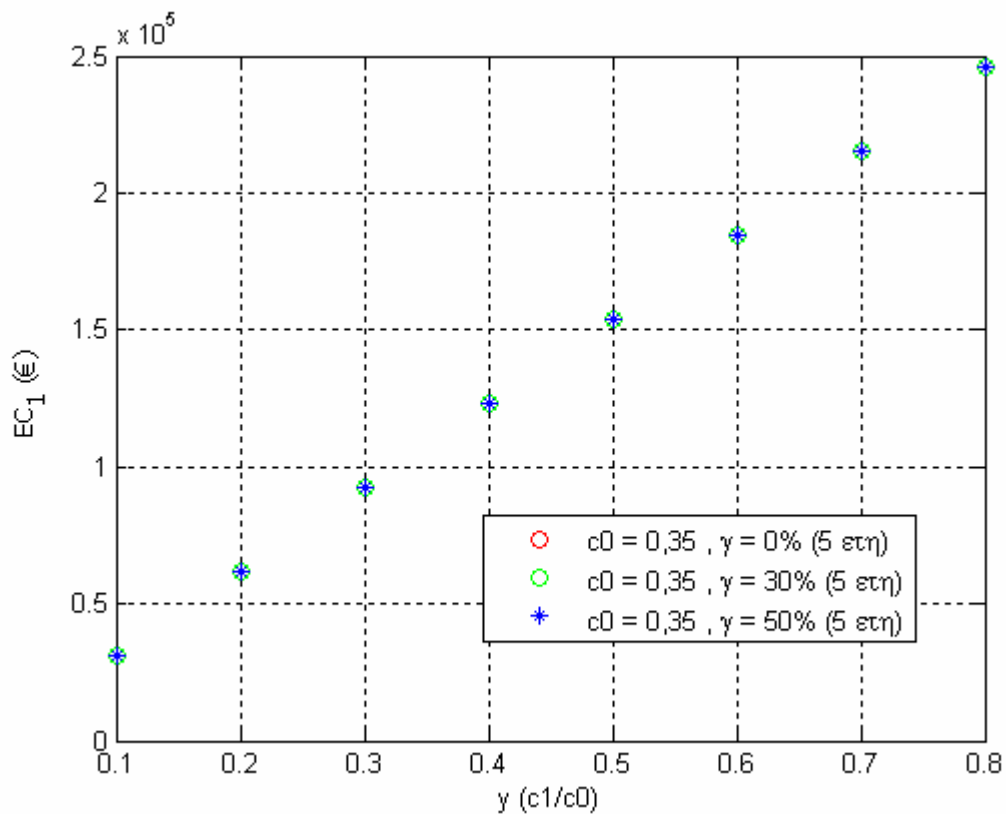
Σχήμα 8.187 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



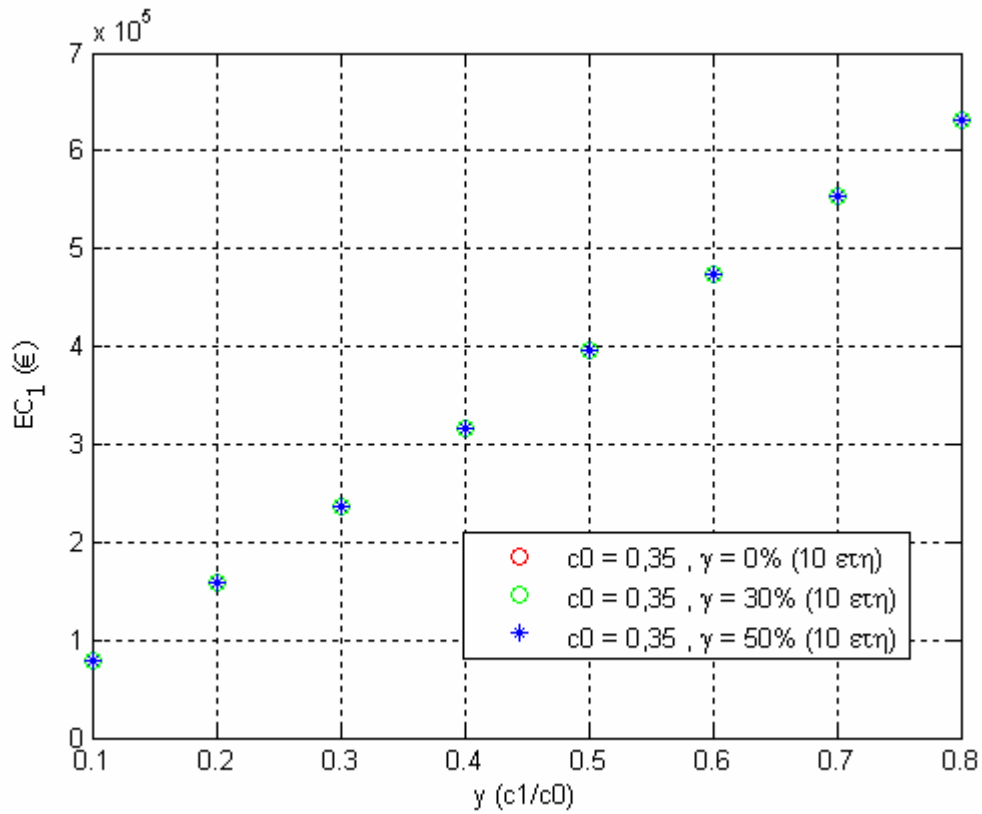
Σχήμα 8.188 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



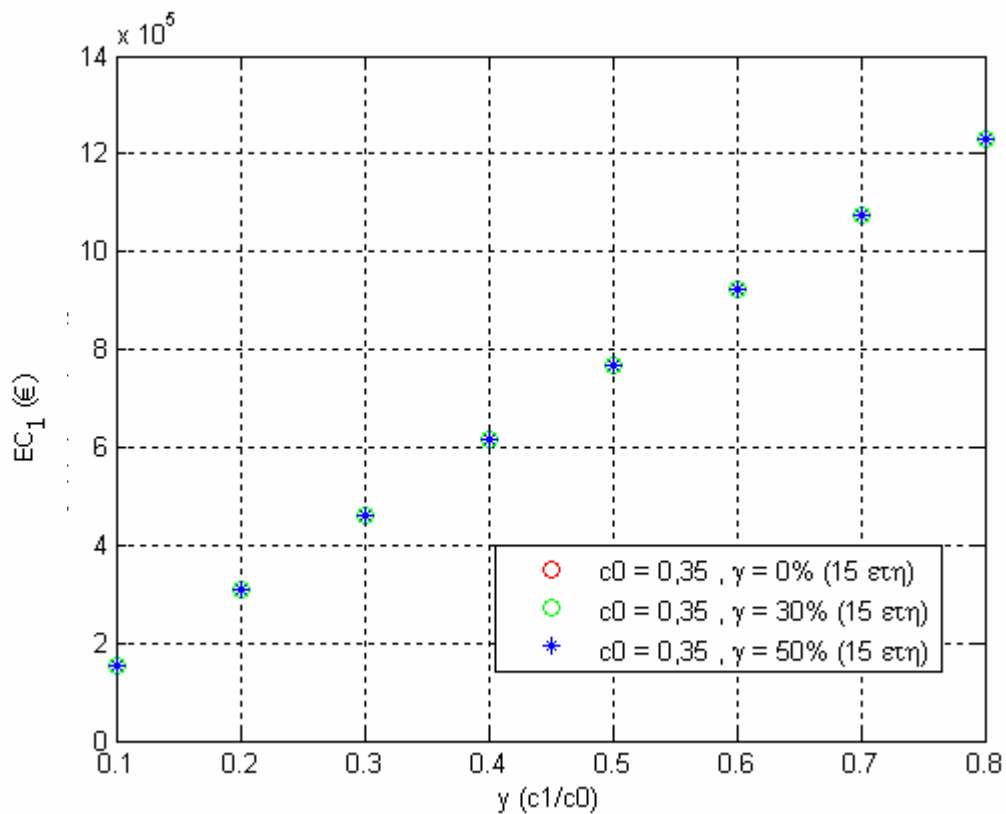
Σχήμα 8.189 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



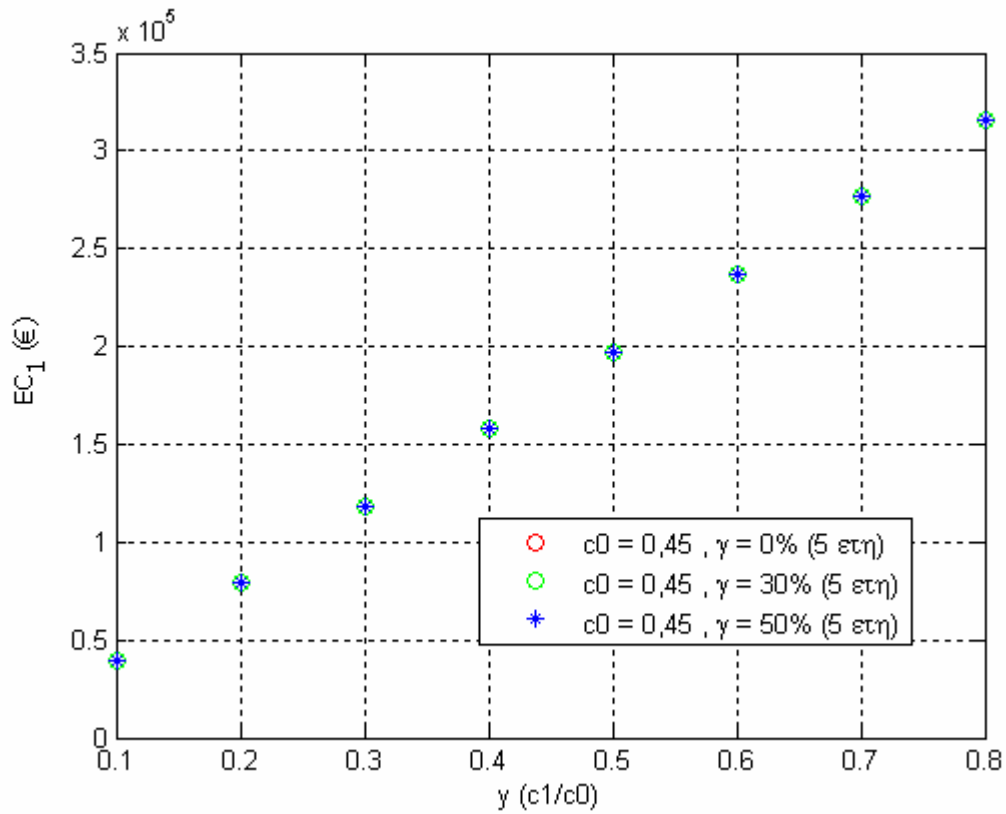
Σχήμα 8.190 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



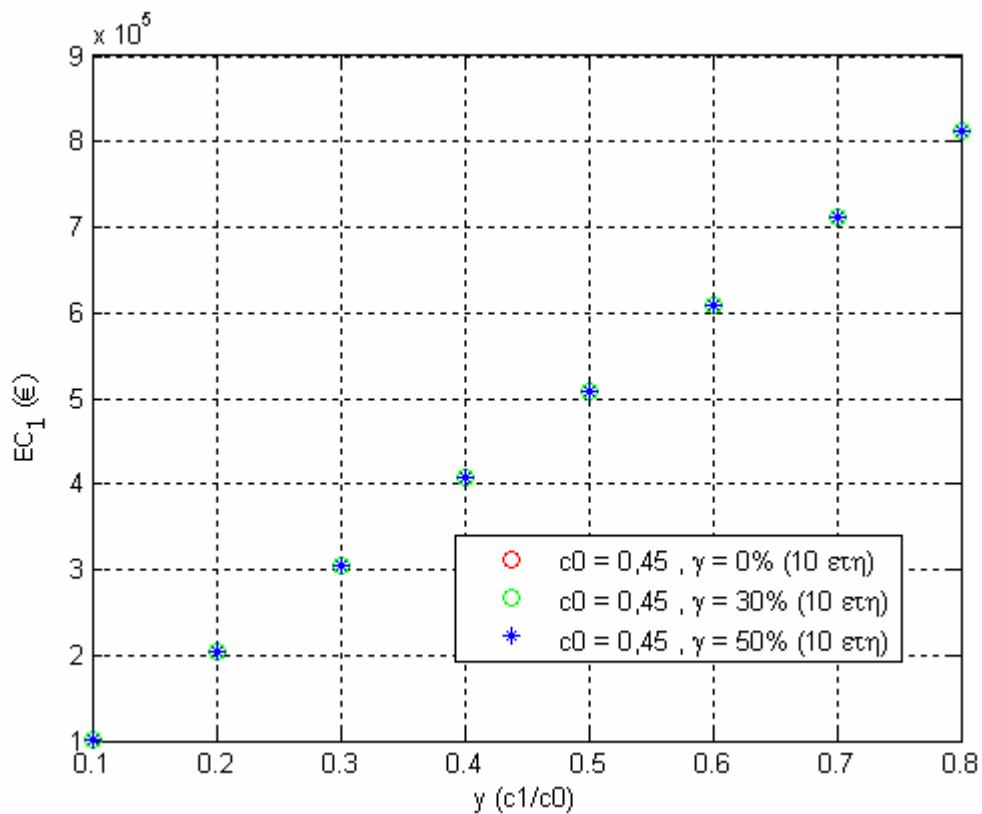
Σχήμα 8.191 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



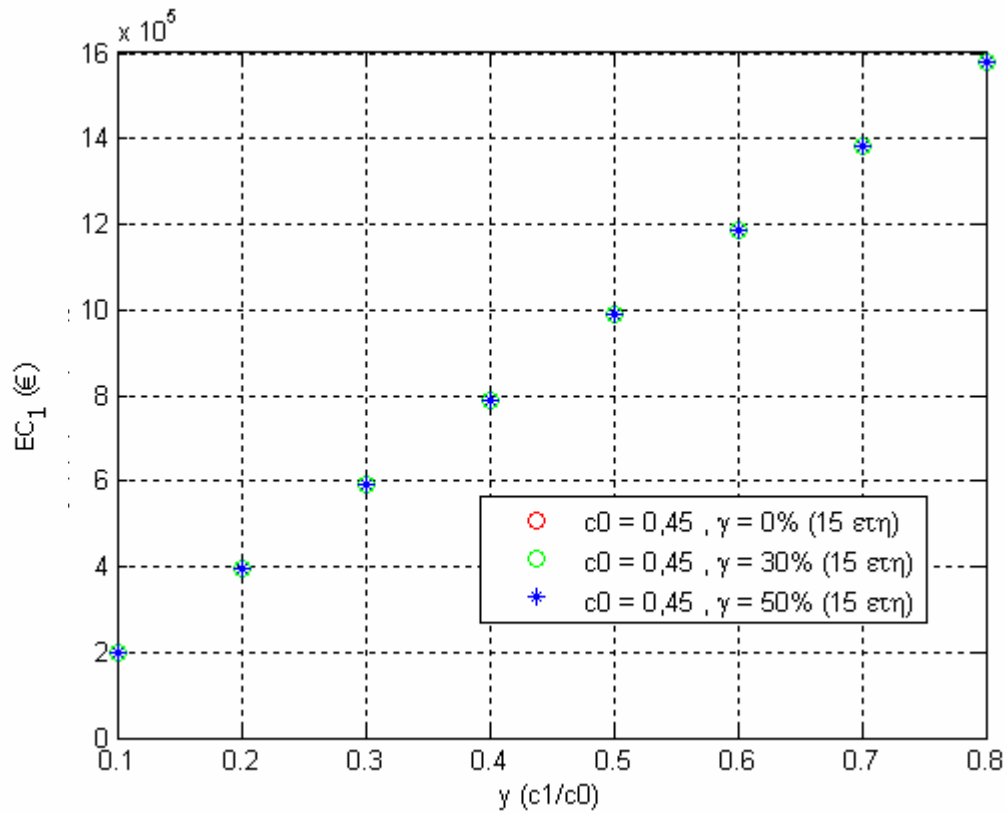
Σχήμα 8.192 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



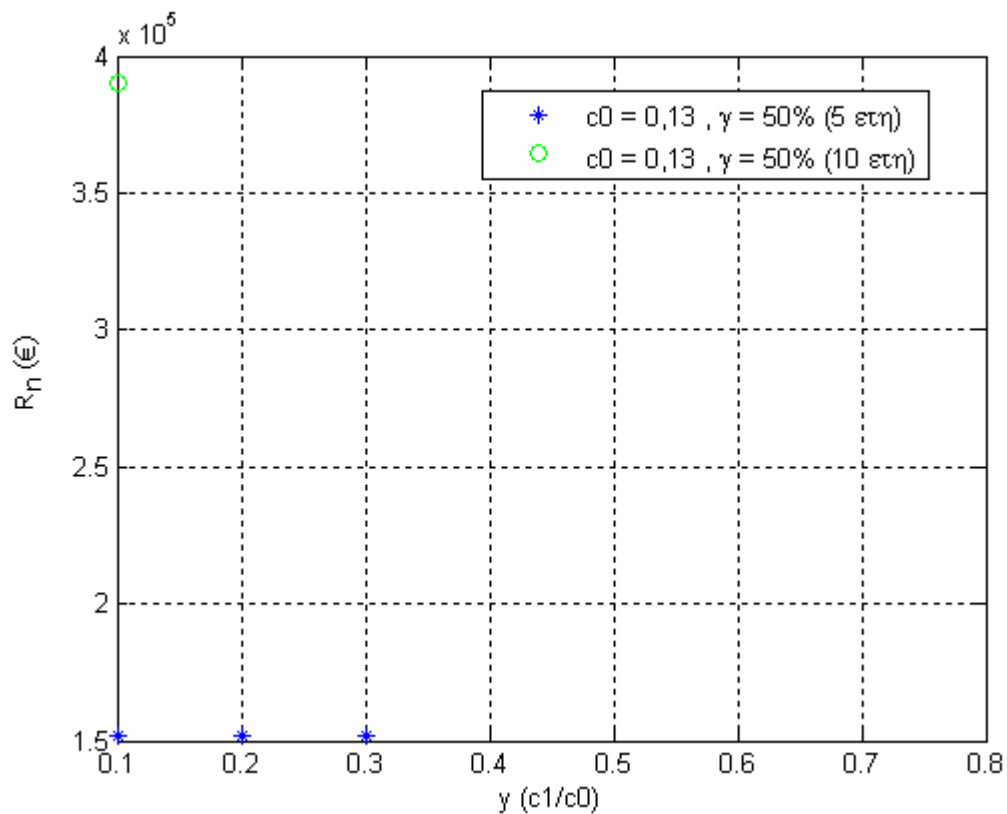
Σχήμα 8.193 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



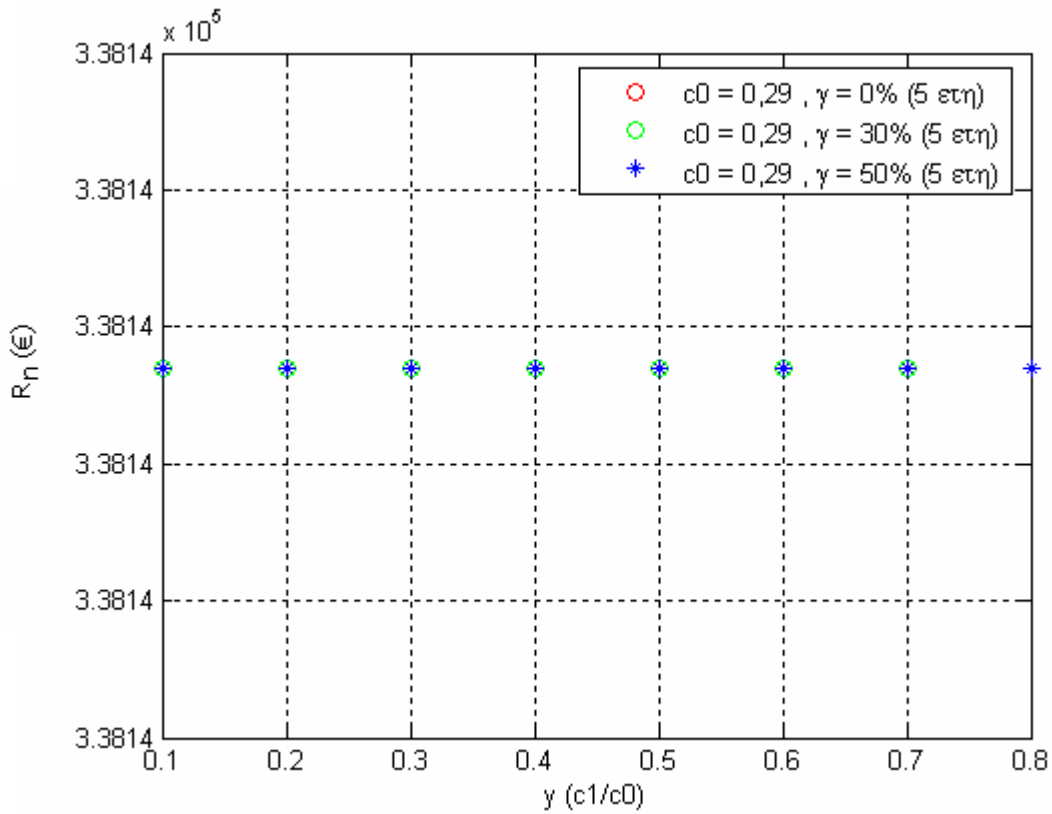
Σχήμα 8.194 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC_1) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



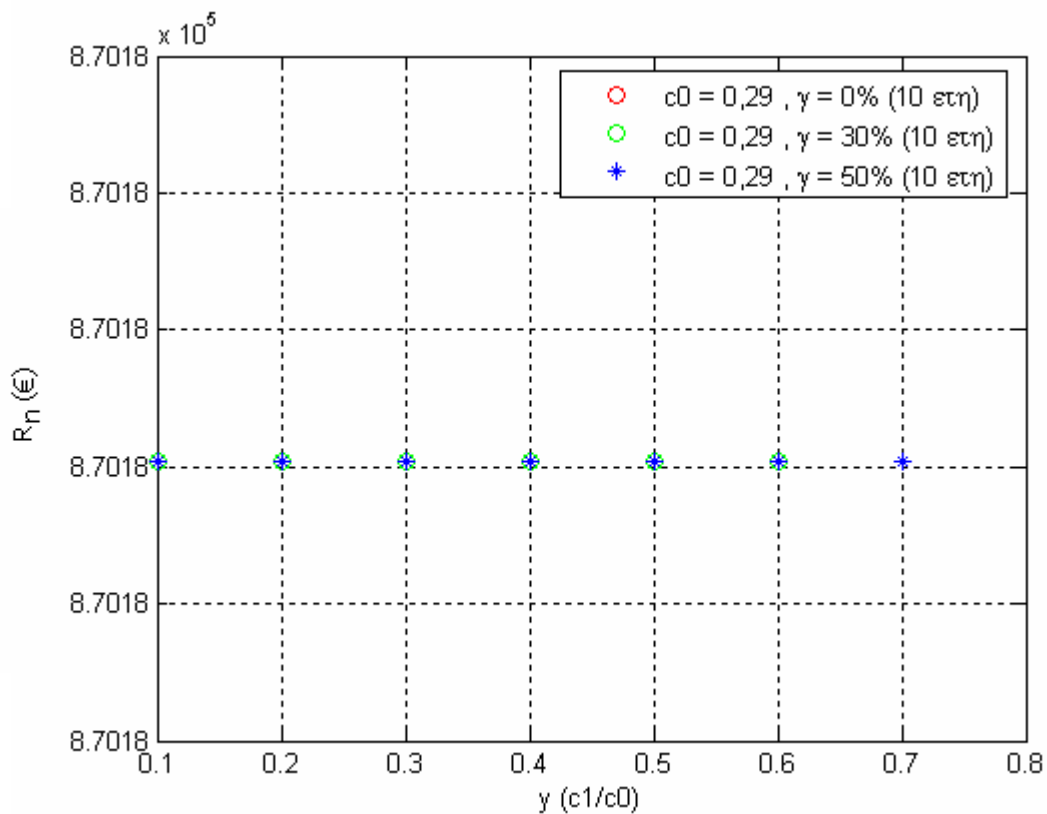
Σχήμα 8.195 Κόστος προμηθευόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (EC₁) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές πώλησης



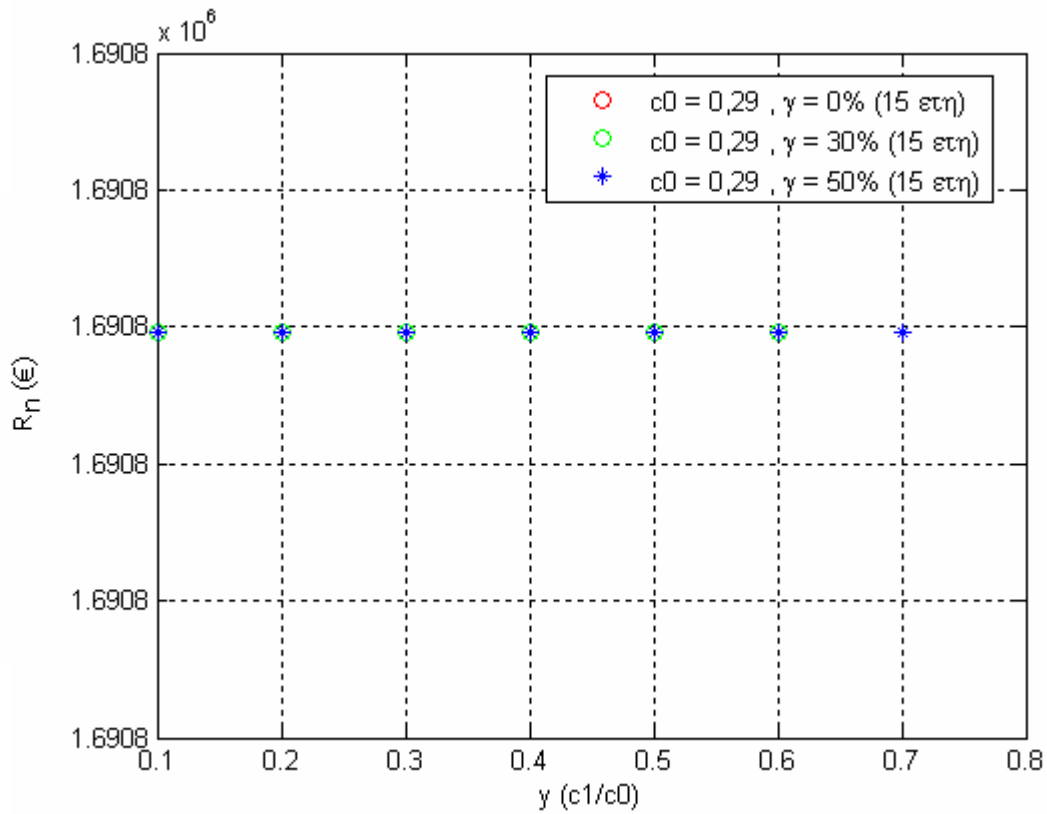
Σχήμα 8.196 Κέρδη (R_n) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



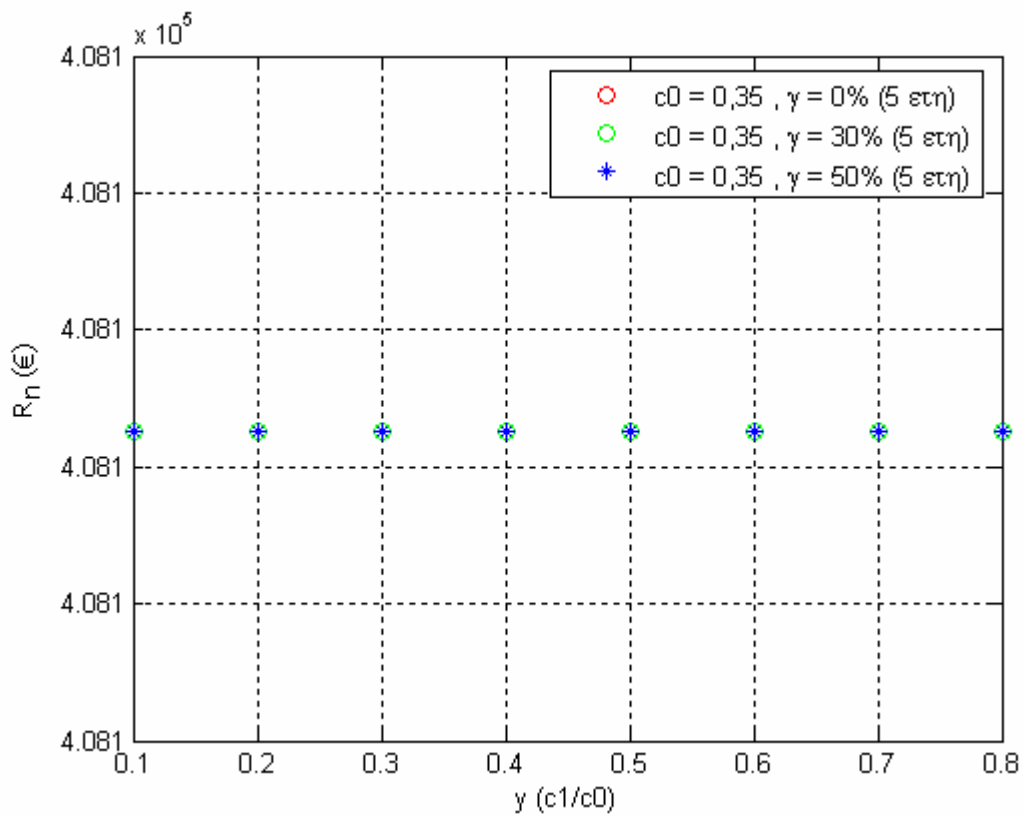
Σχήμα 8.197 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



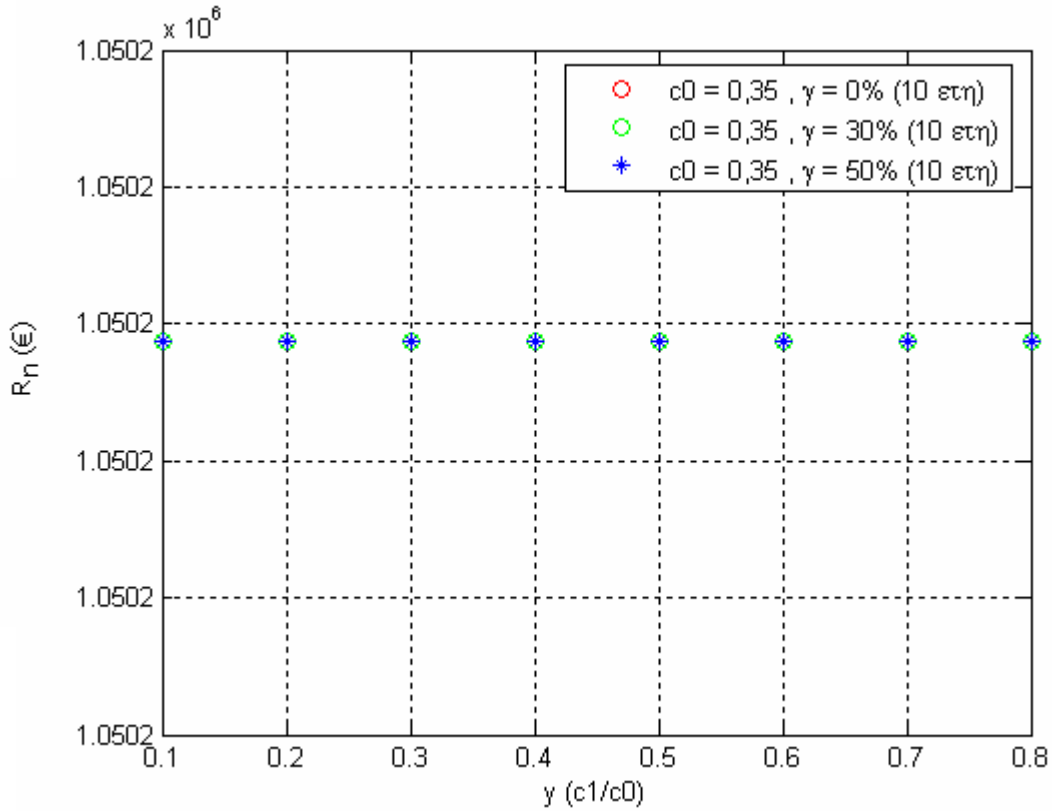
Σχήμα 8.198 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



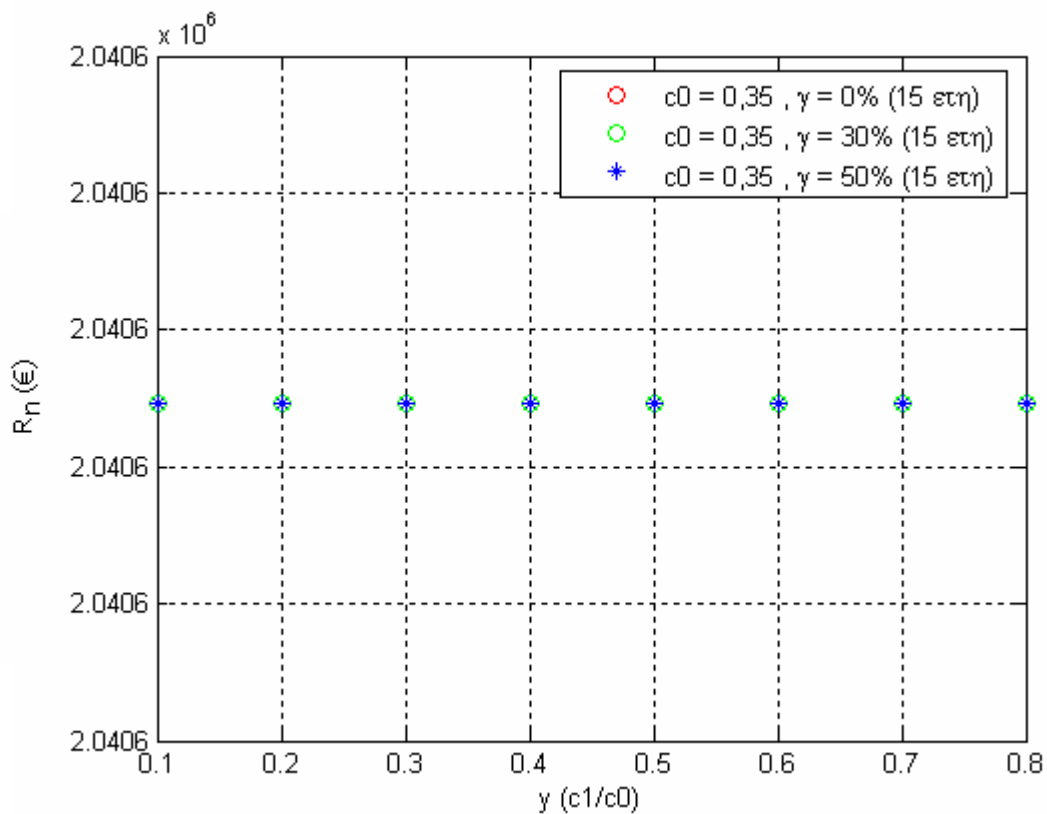
Σχήμα 8.199 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



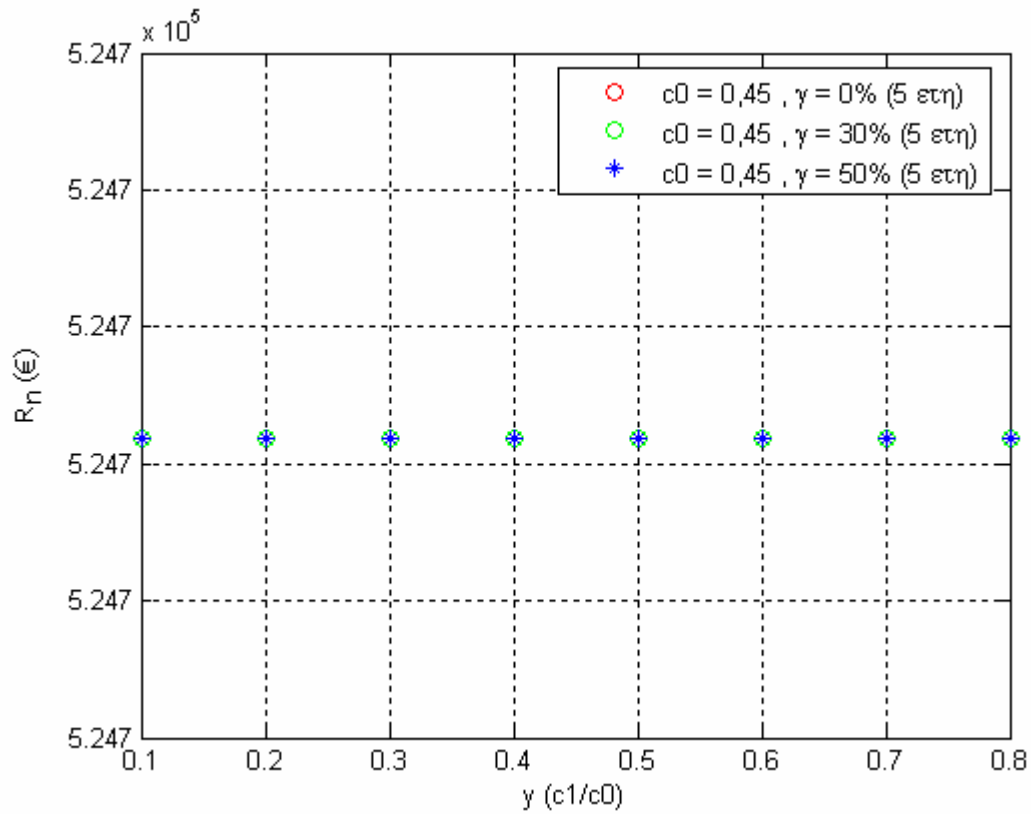
Σχήμα 8.200 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



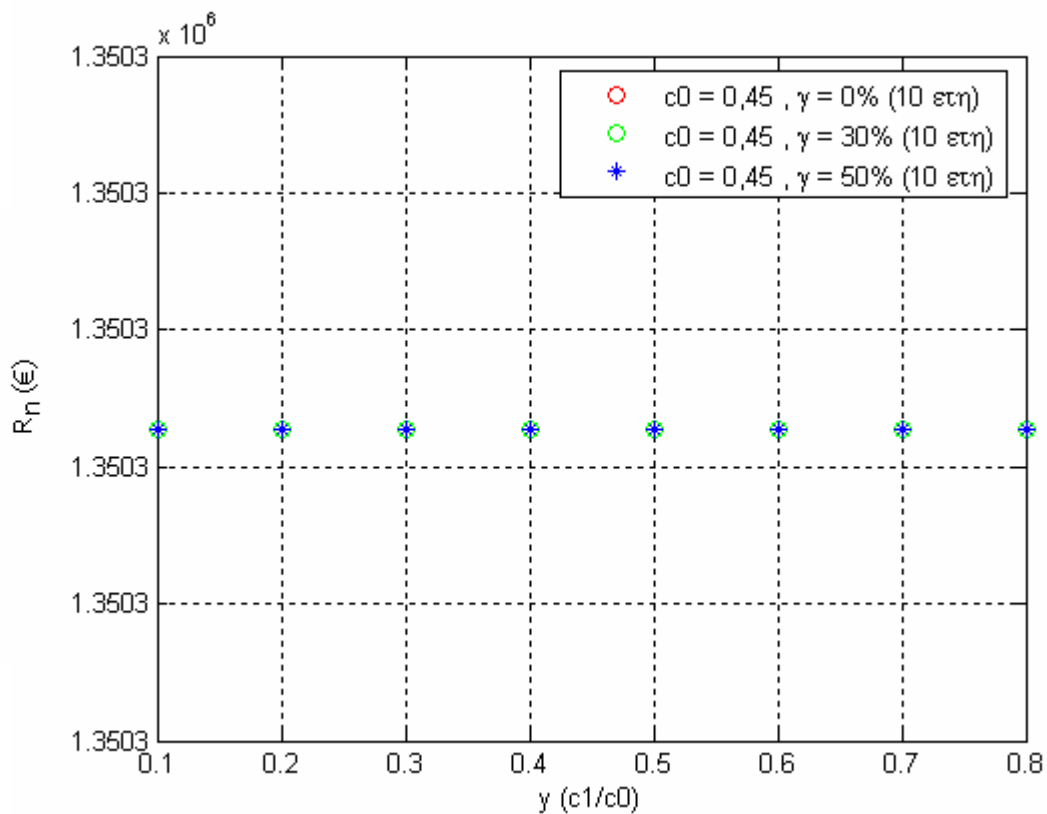
Σχήμα 8.201 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



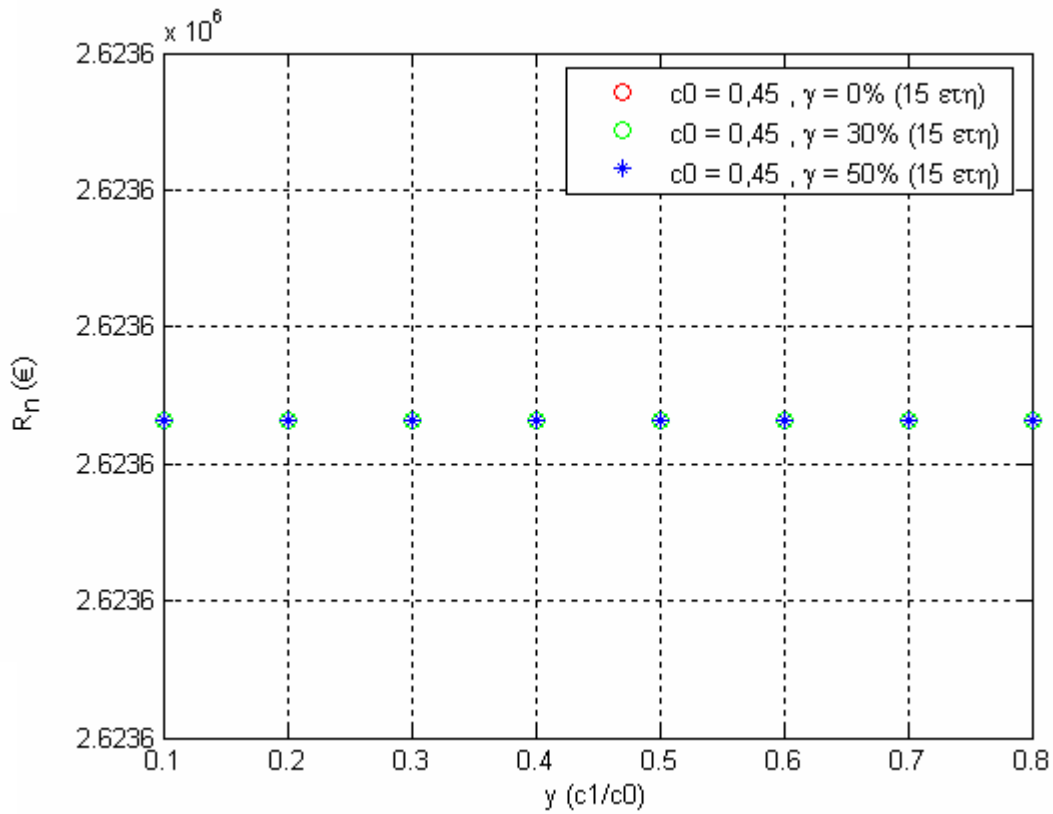
Σχήμα 8.202 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



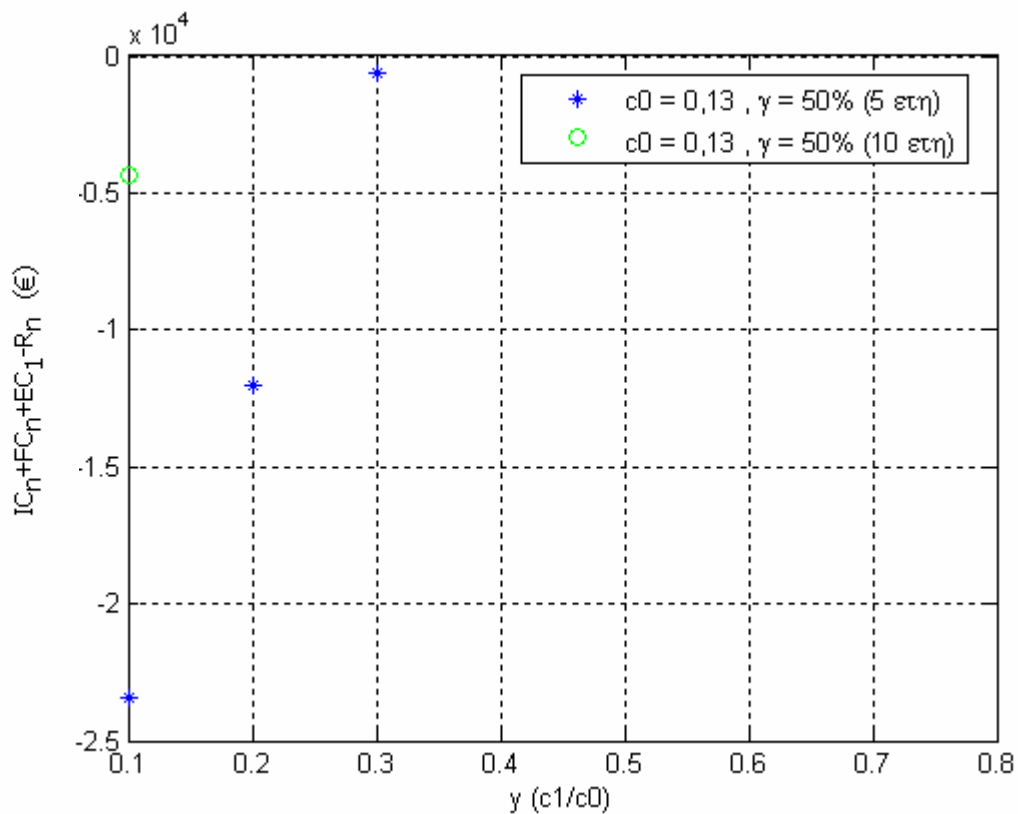
Σχήμα 8.203 Κέρδη (R_n) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



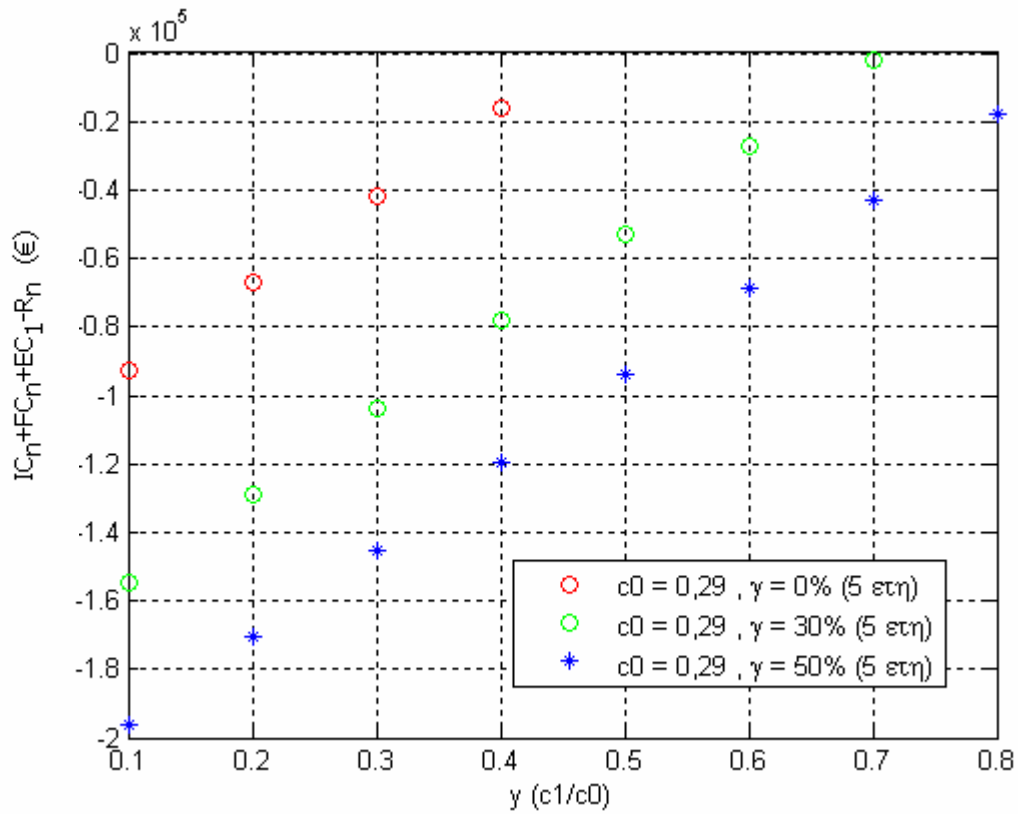
Σχήμα 8.204 Κέρδη (R_n) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



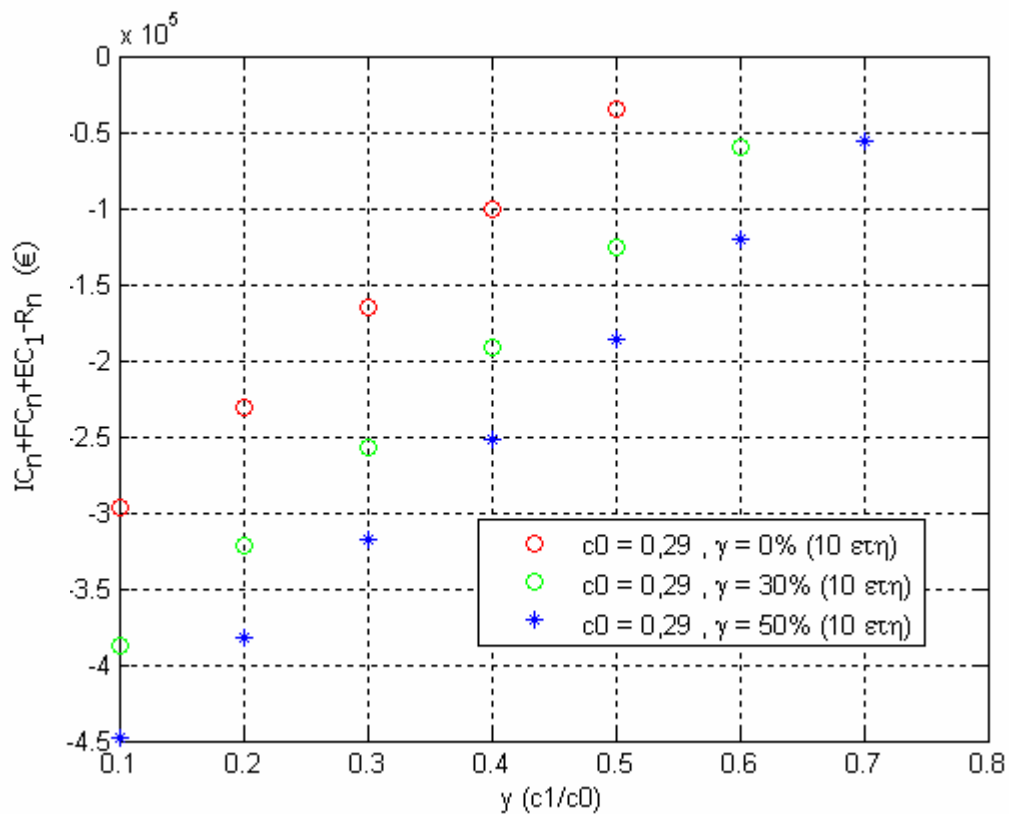
Σχήμα 8.205 Κέρδη (R_n) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδοτήσης



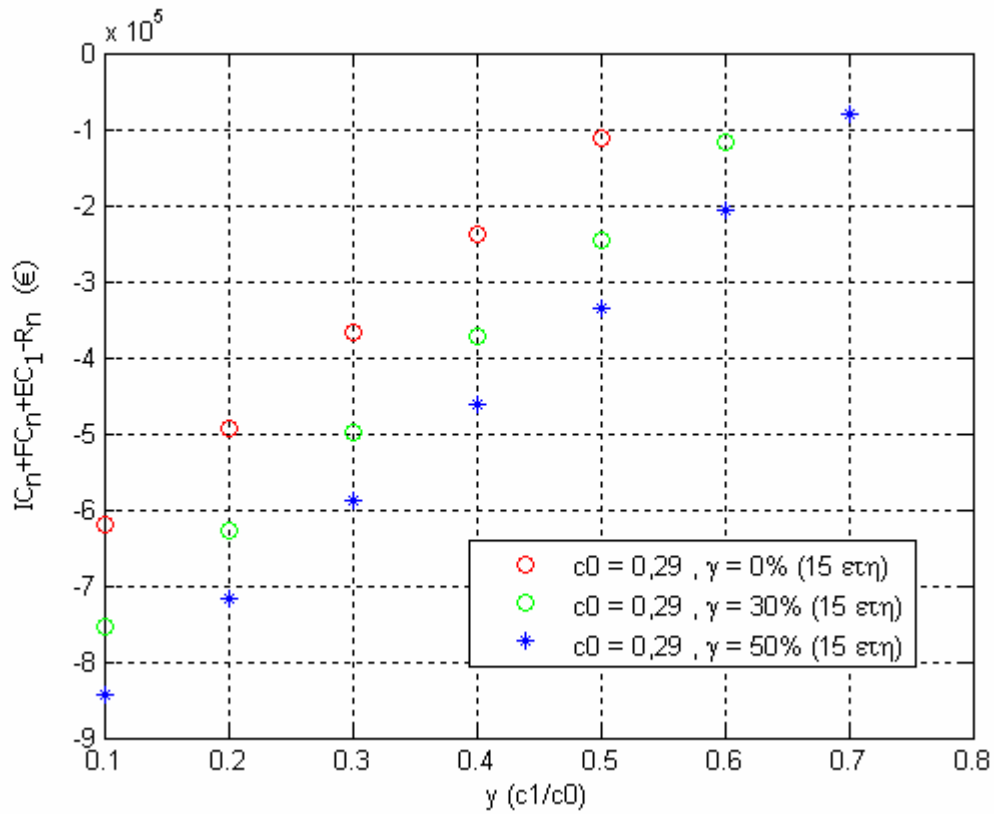
Σχήμα 8.206 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



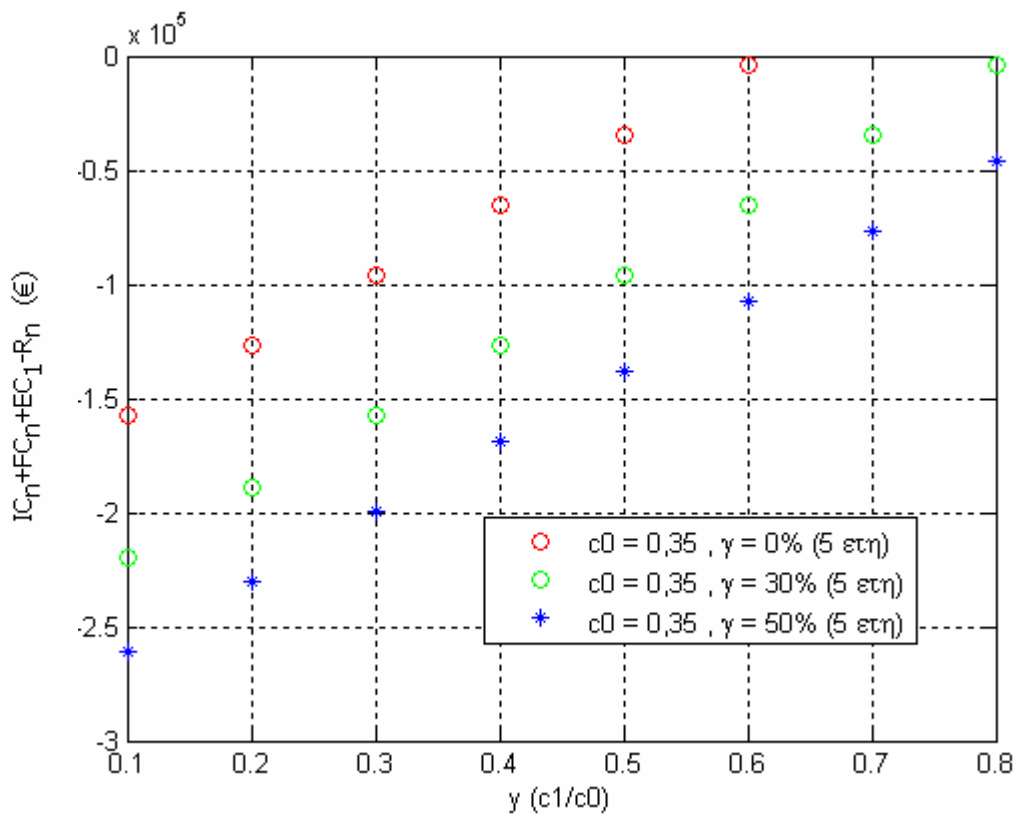
Σχήμα 8.207 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n + FC_n + EC_1 - R_n$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



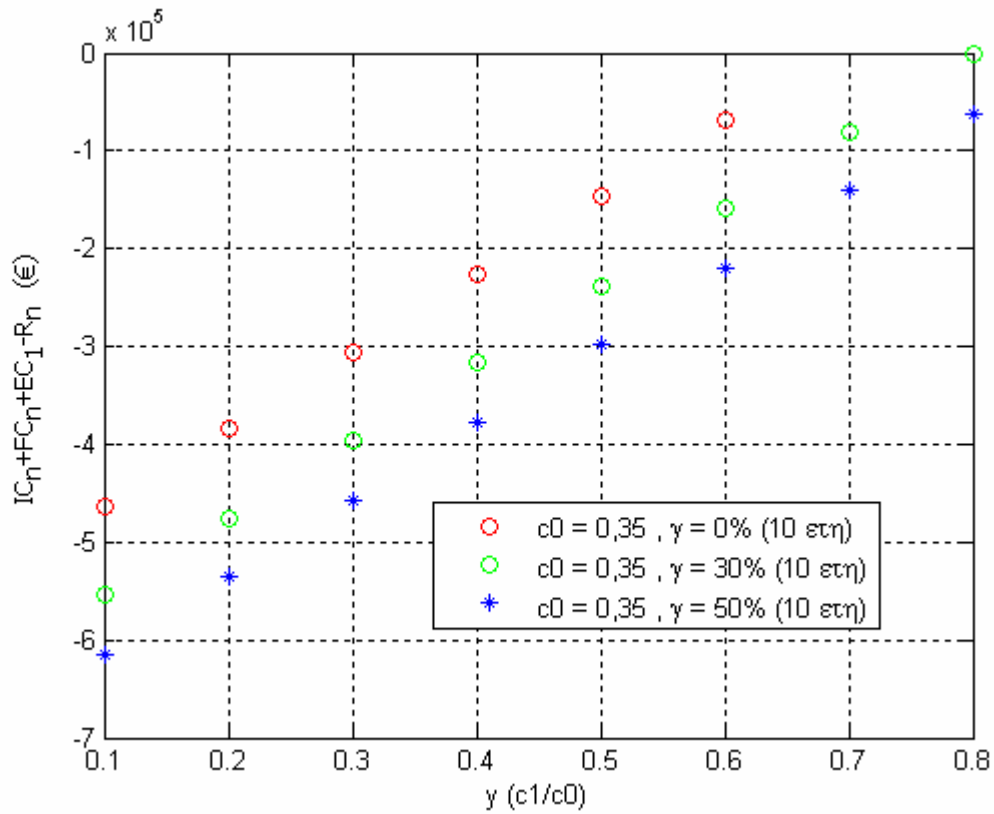
Σχήμα 8.208 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n + FC_n + EC_1 - R_n$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



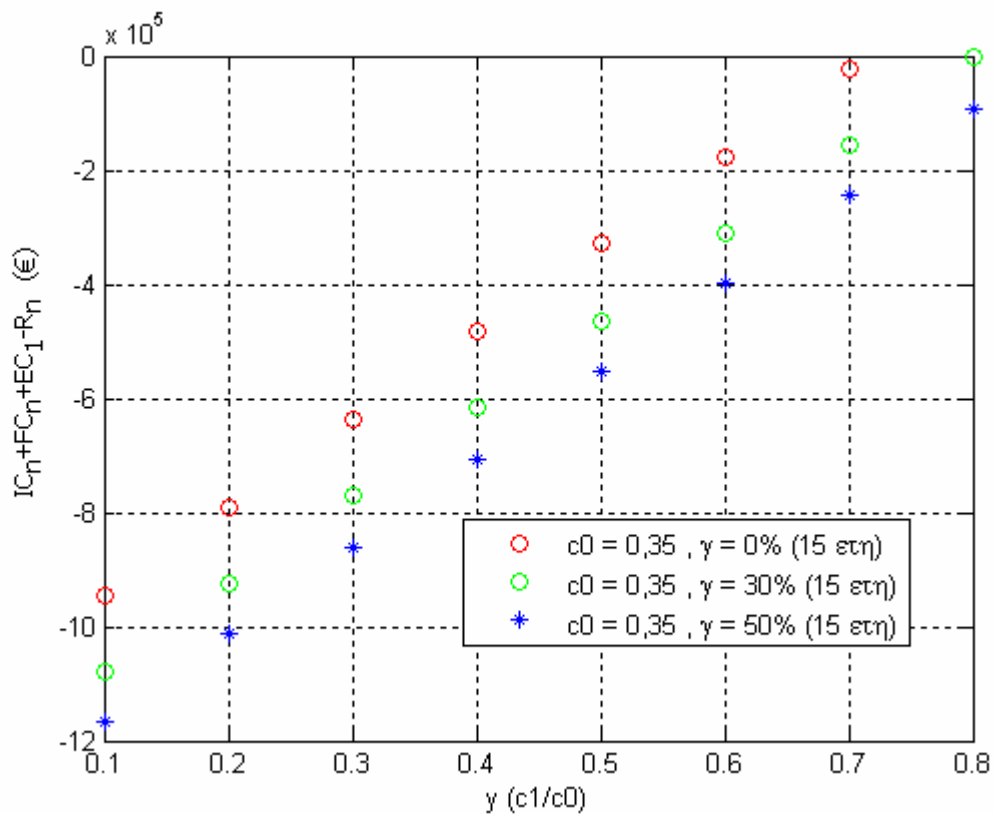
Σχήμα 8.209 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



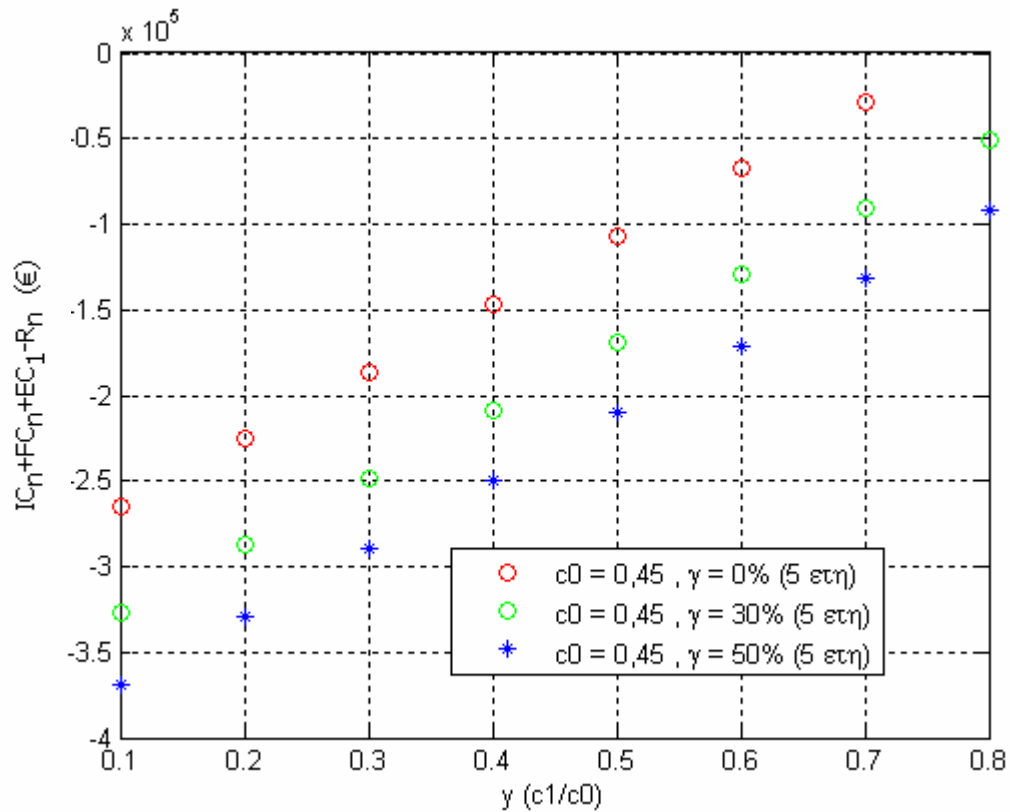
Σχήμα 8.210 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



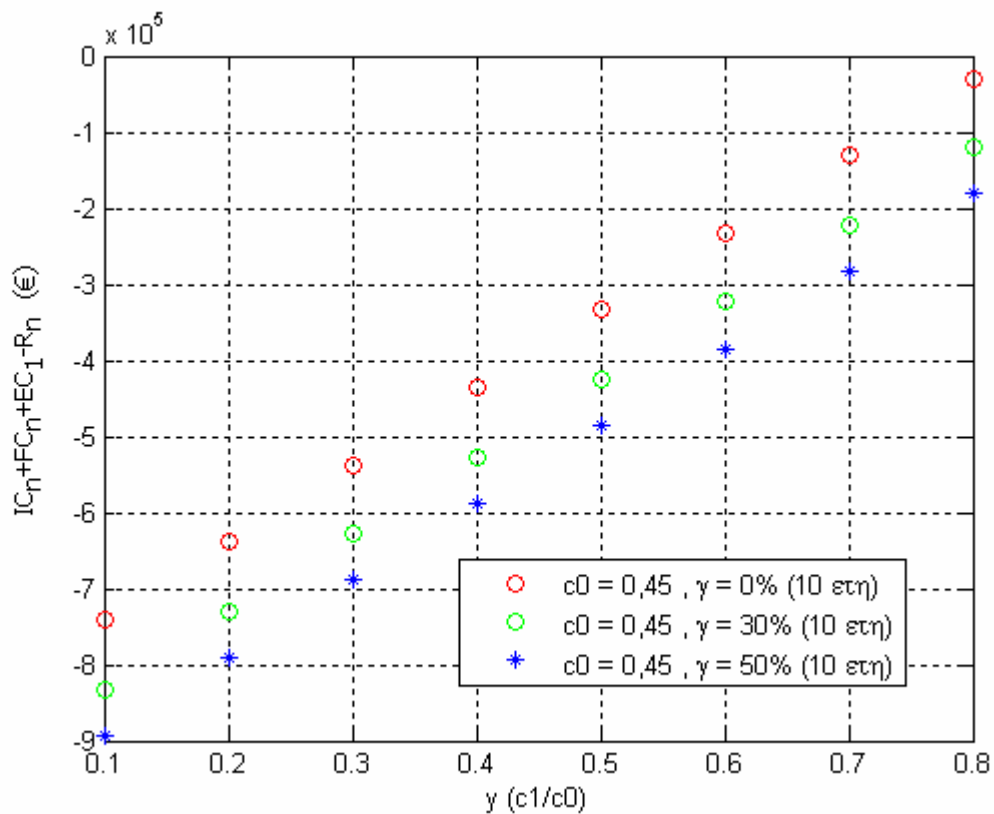
Σχήμα 8.211 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n + FC_n + EC_1 - R_n$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



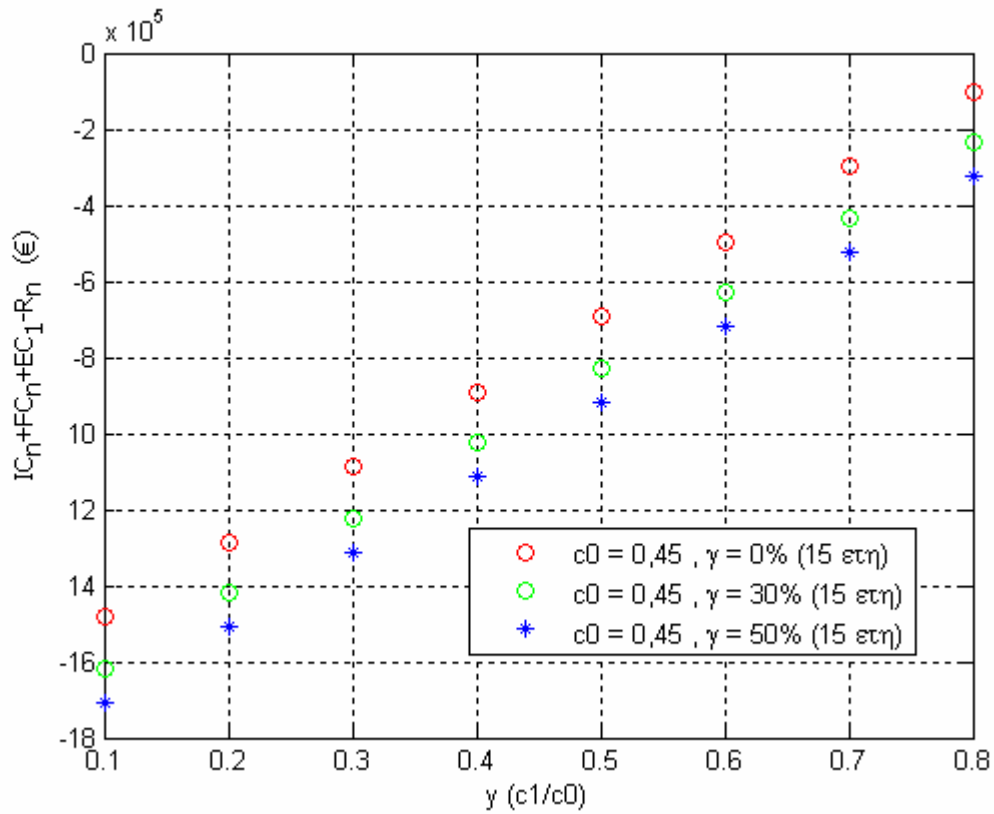
Σχήμα 8.212 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n + FC_n + EC_1 - R_n$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



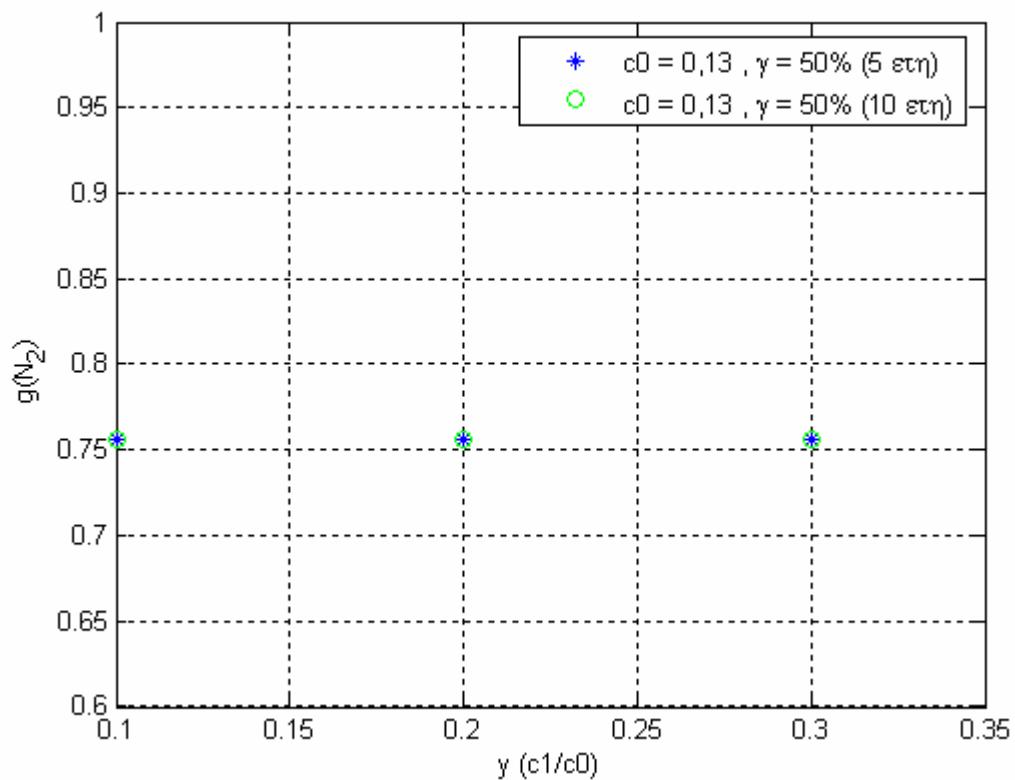
Σχήμα 8.213 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



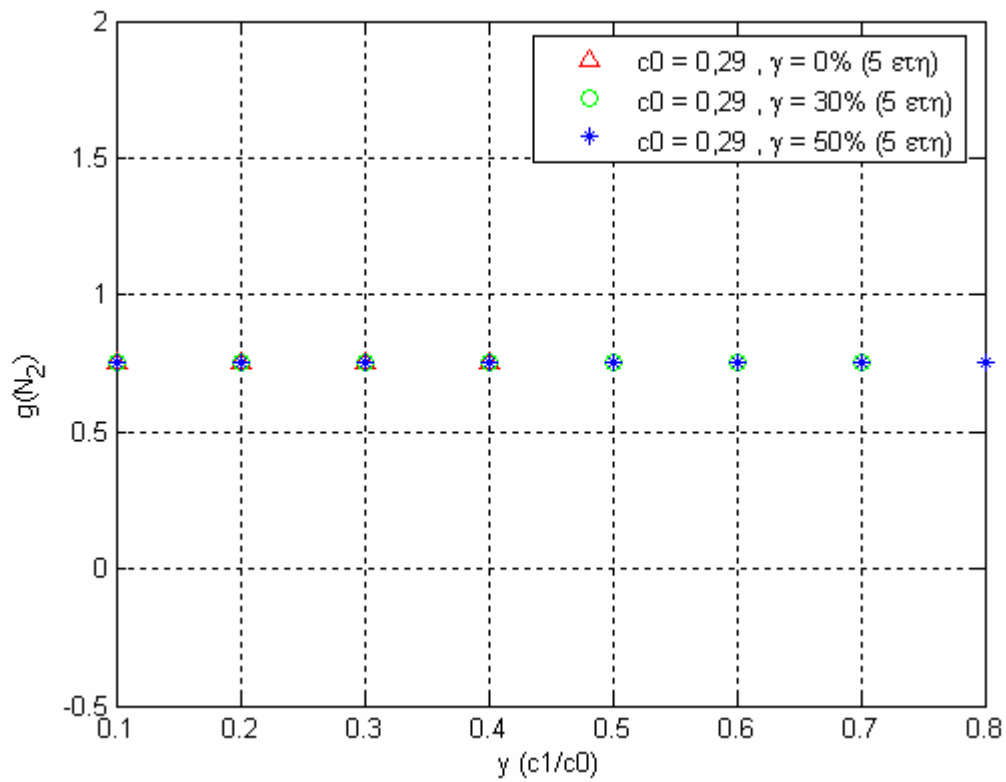
Σχήμα 8.214 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



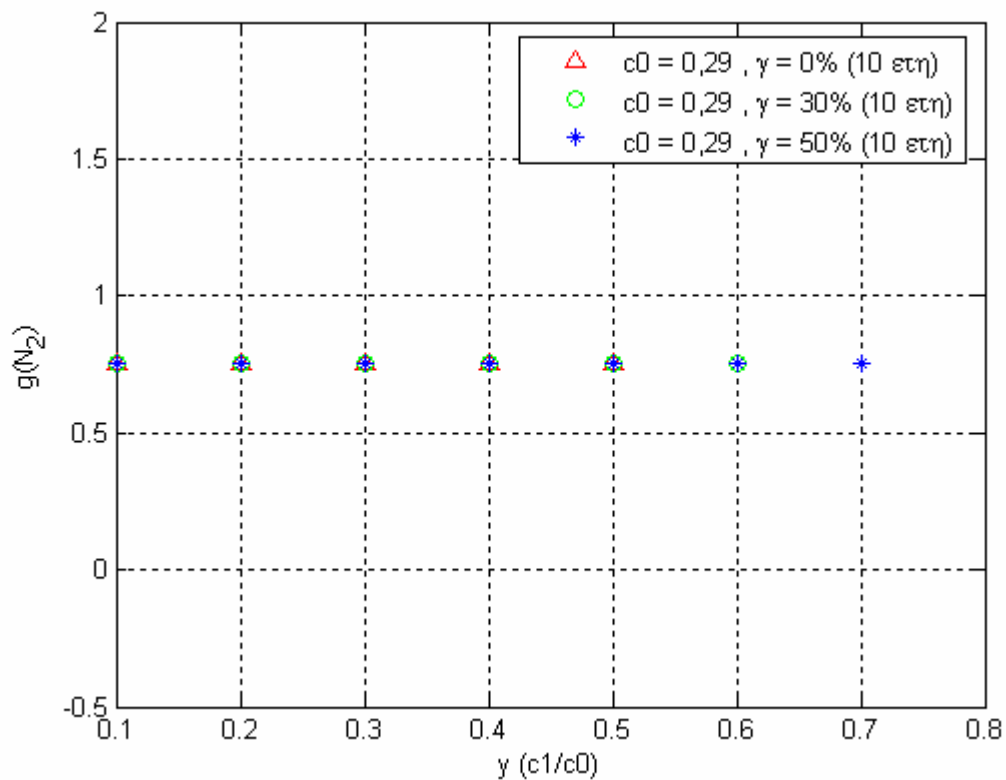
Σχήμα 8.215 Συνολικό κόστος εγκατάστασης ($IC_n+FC_n+EC_1-R_n$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



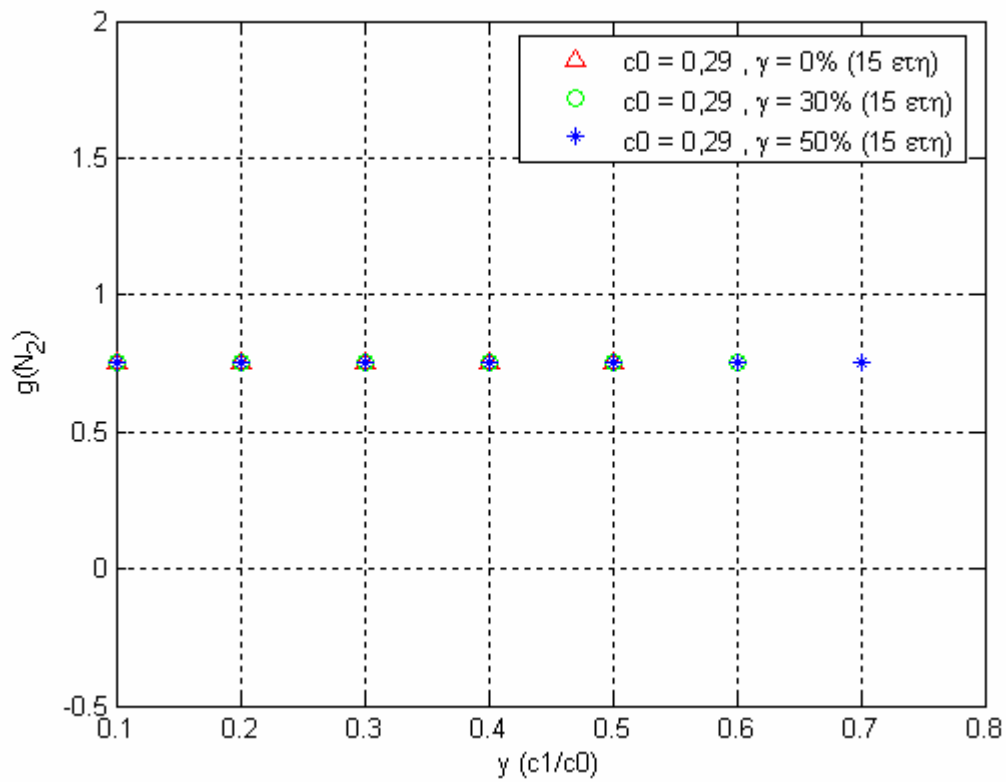
Σχήμα 8.216 Λόγος $[g(N_2)]$ για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



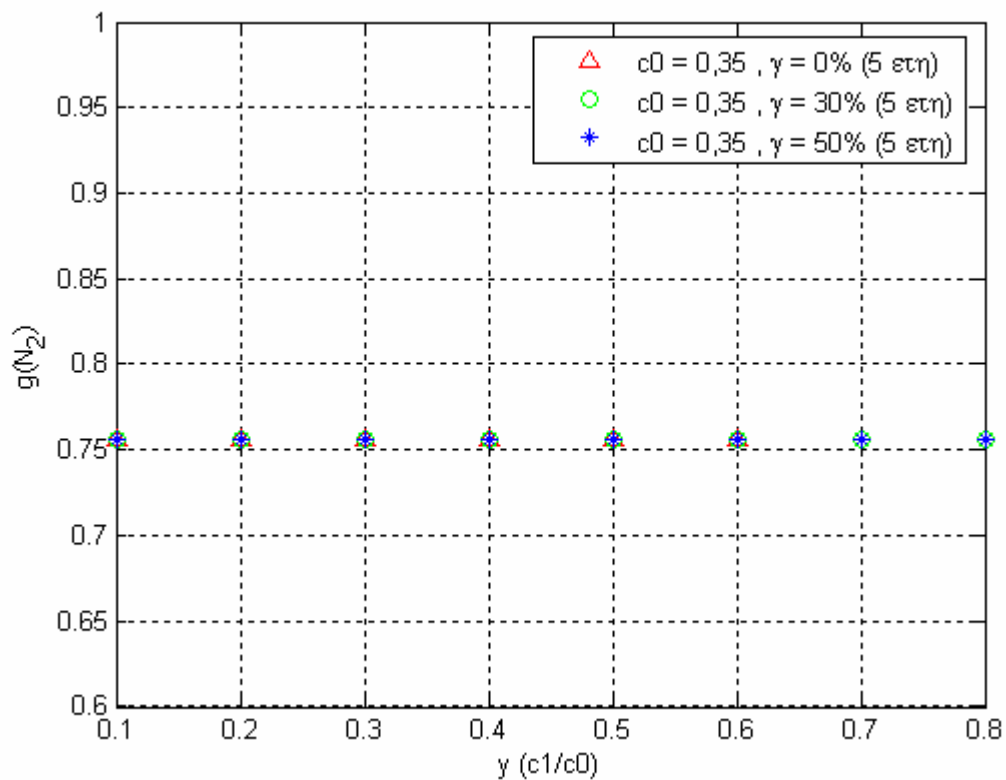
Σχήμα 8.217 Λόγος [g(N₂)] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



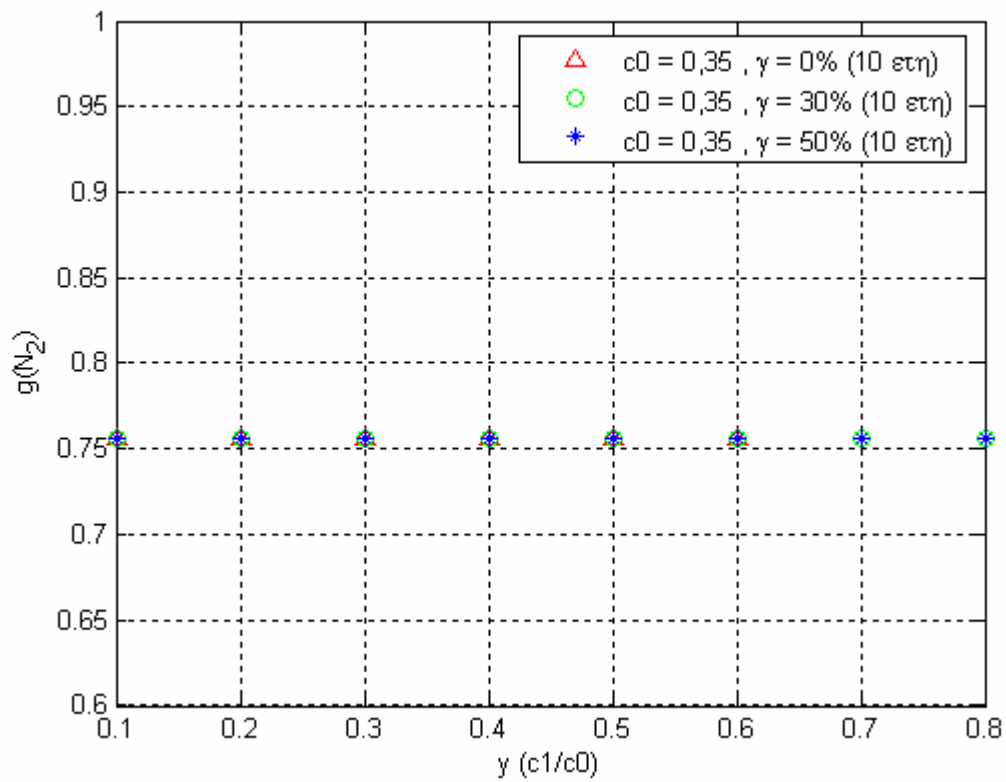
Σχήμα 8.218 Λόγος [g(N₂)] για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



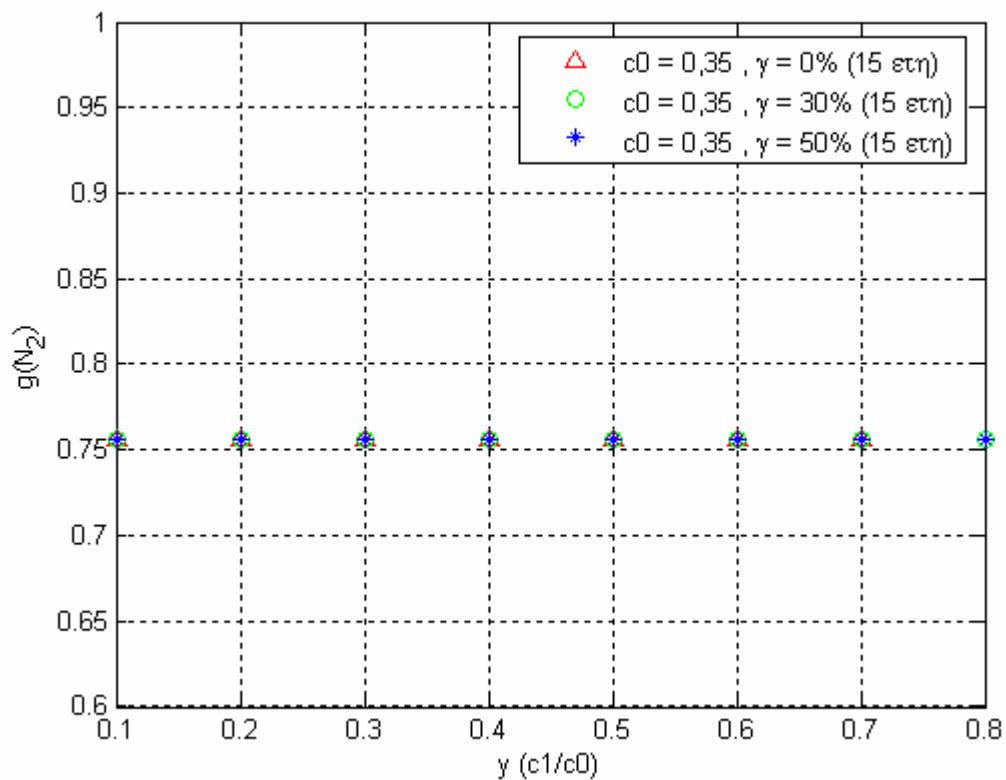
Σχήμα 8.219 Λόγος [g(N₂)] για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



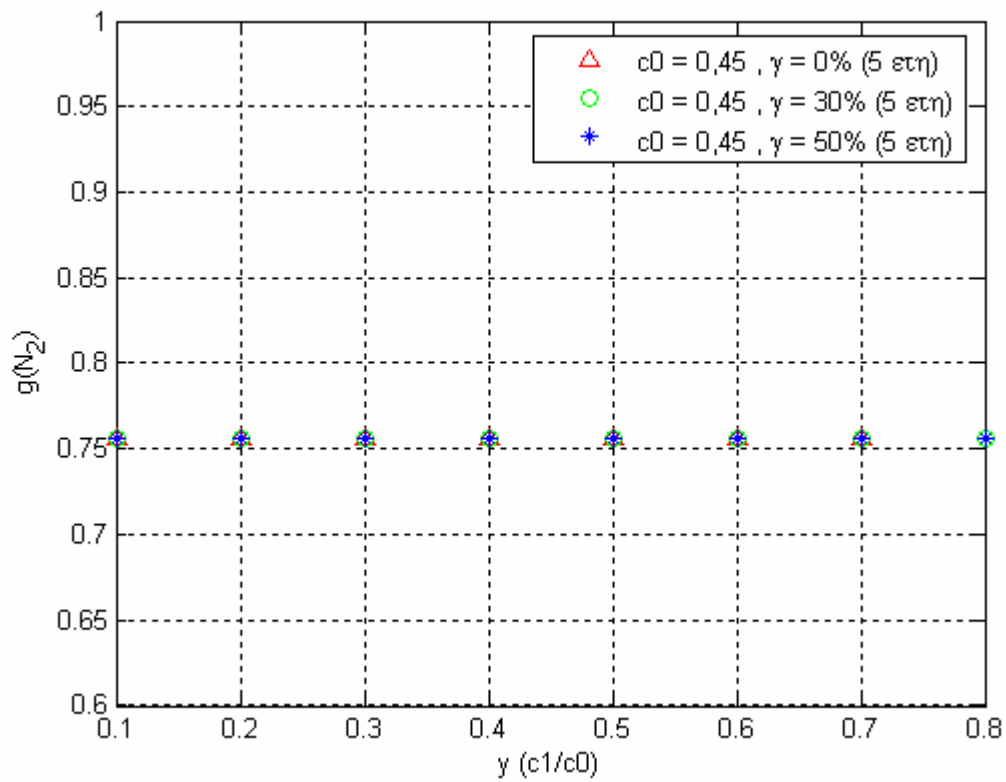
Σχήμα 8.220 Λόγος [g(N₂)] για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



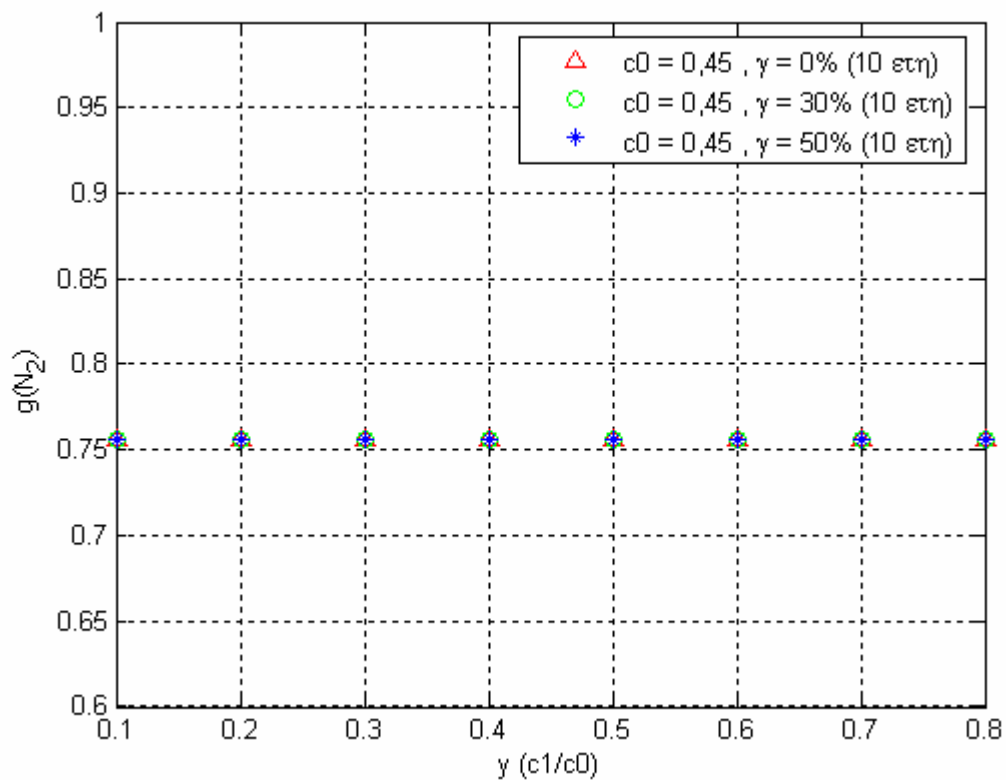
Σχήμα 8.221 Λόγος [g(N₂)] για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



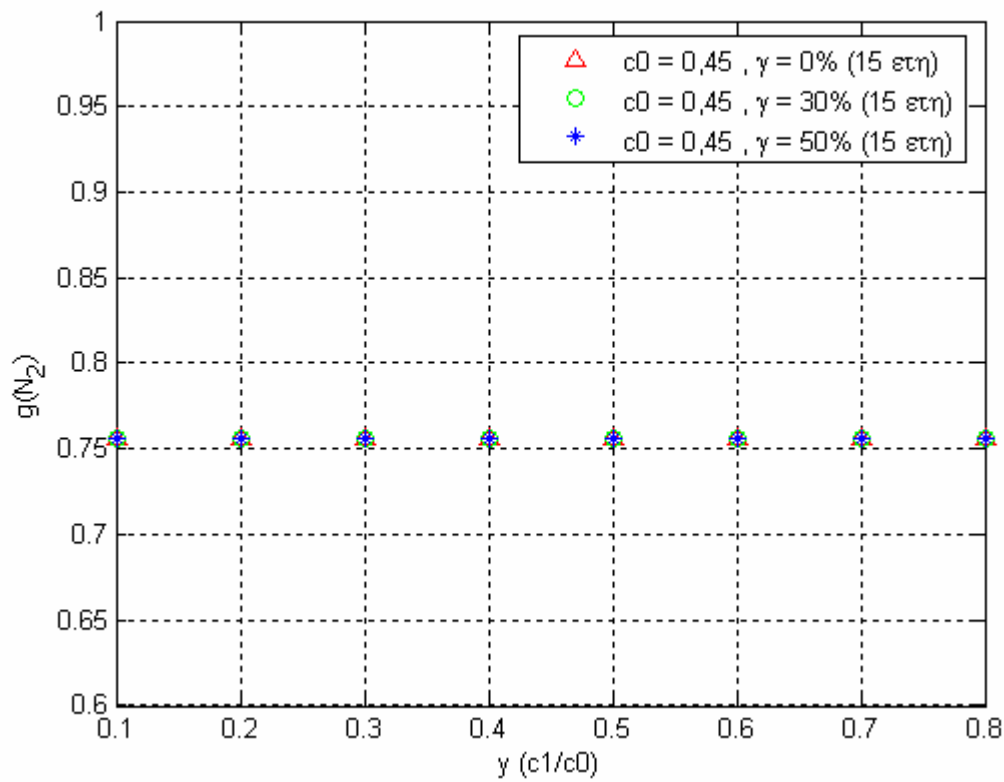
Σχήμα 8.222 Λόγος [g(N₂)] για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



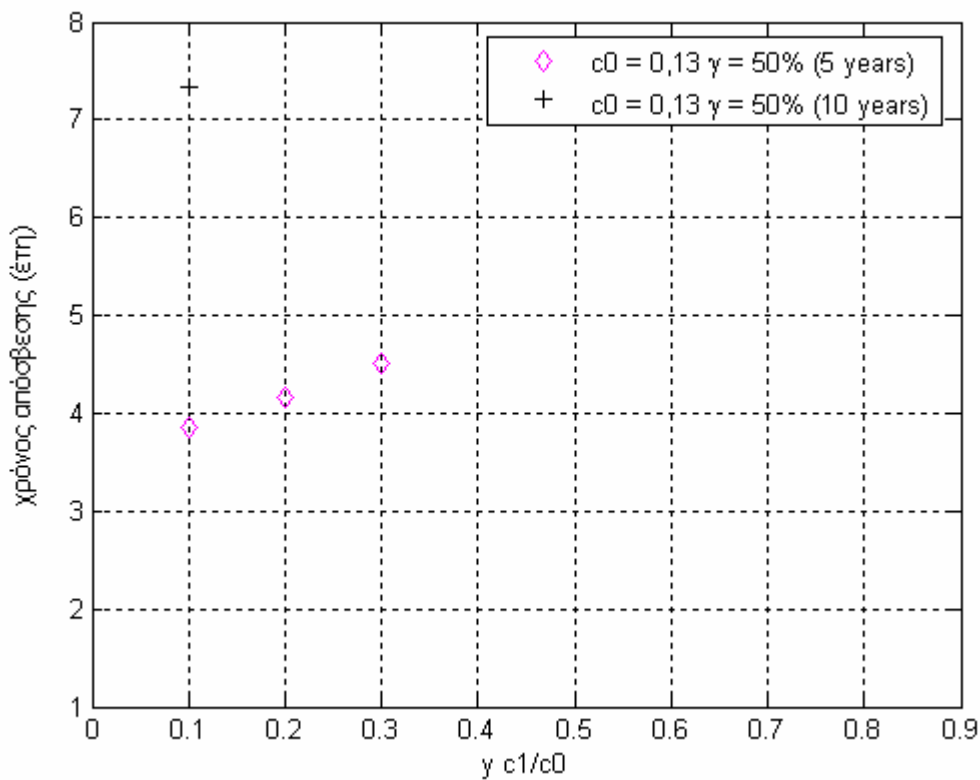
Σχήμα 8.223 Λόγος $[g(N_2)]$ για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



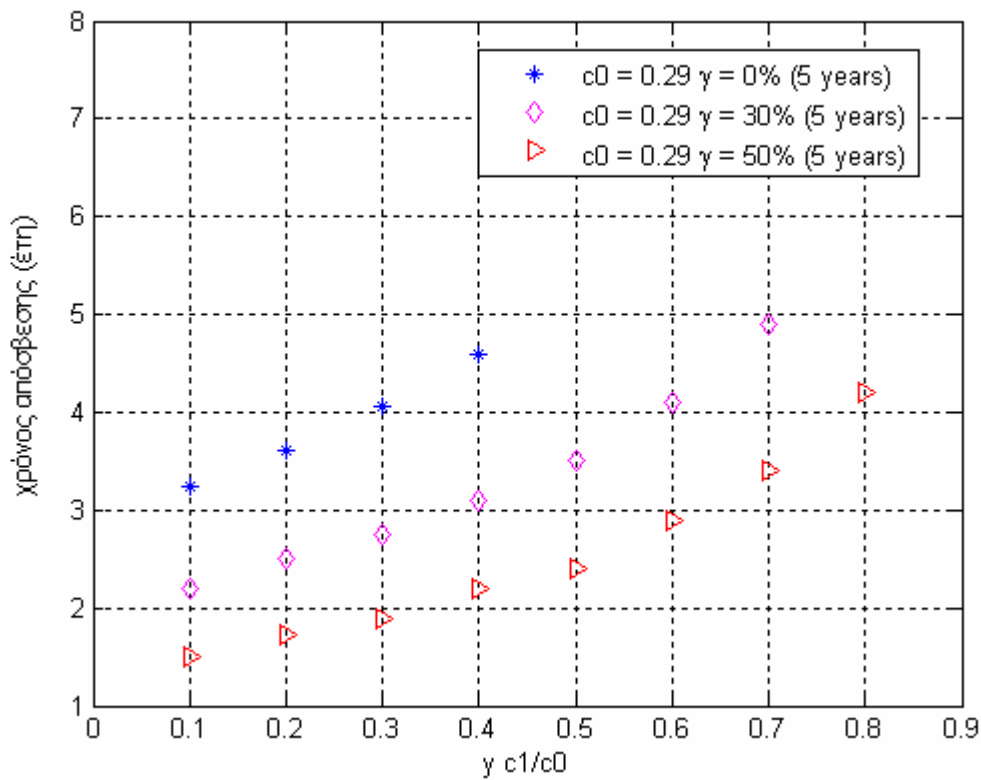
Σχήμα 8.224 Λόγος $[g(N_2)]$ για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



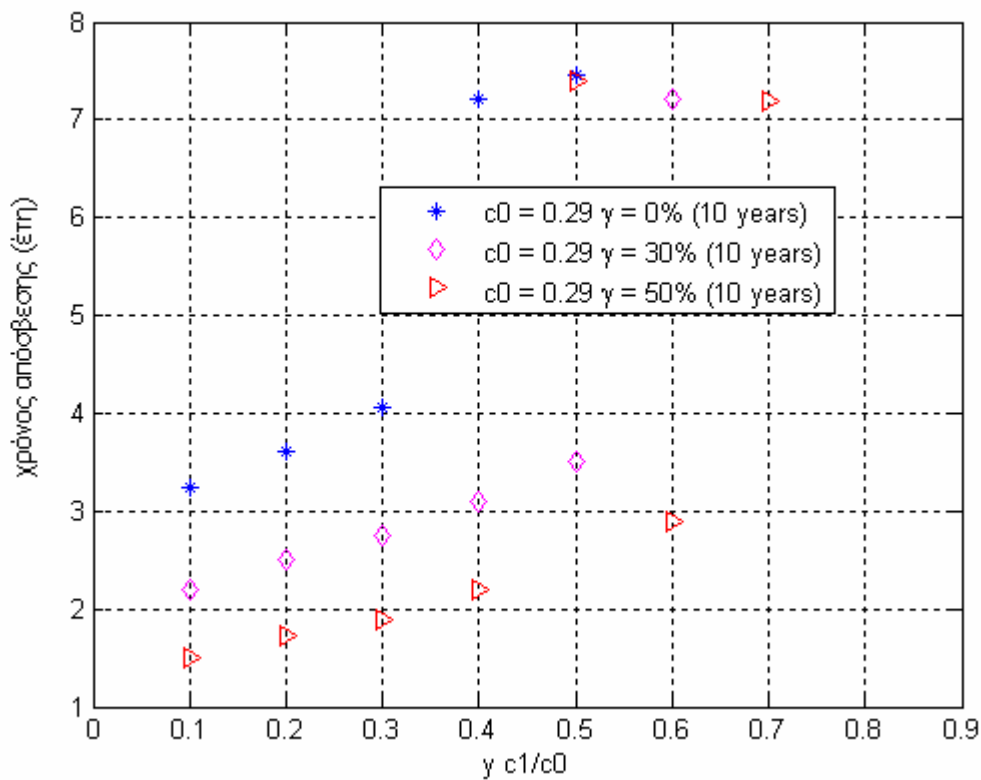
Σχήμα 8.225 Λόγος $[g(N_2)]$ για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



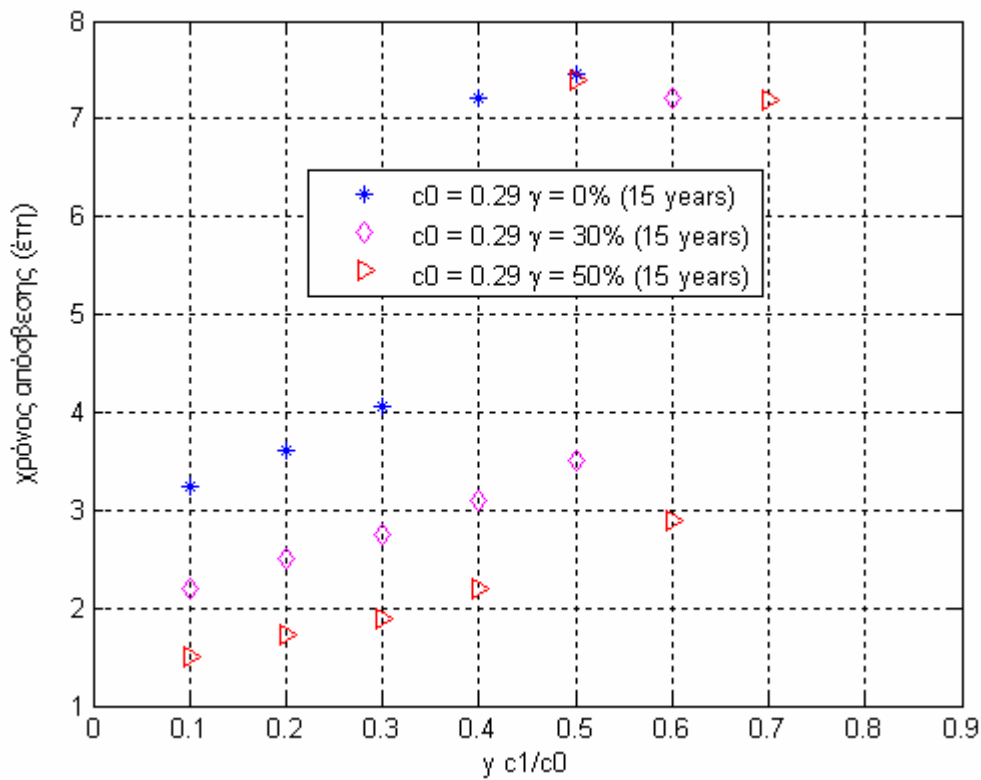
Σχήμα 8.226 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



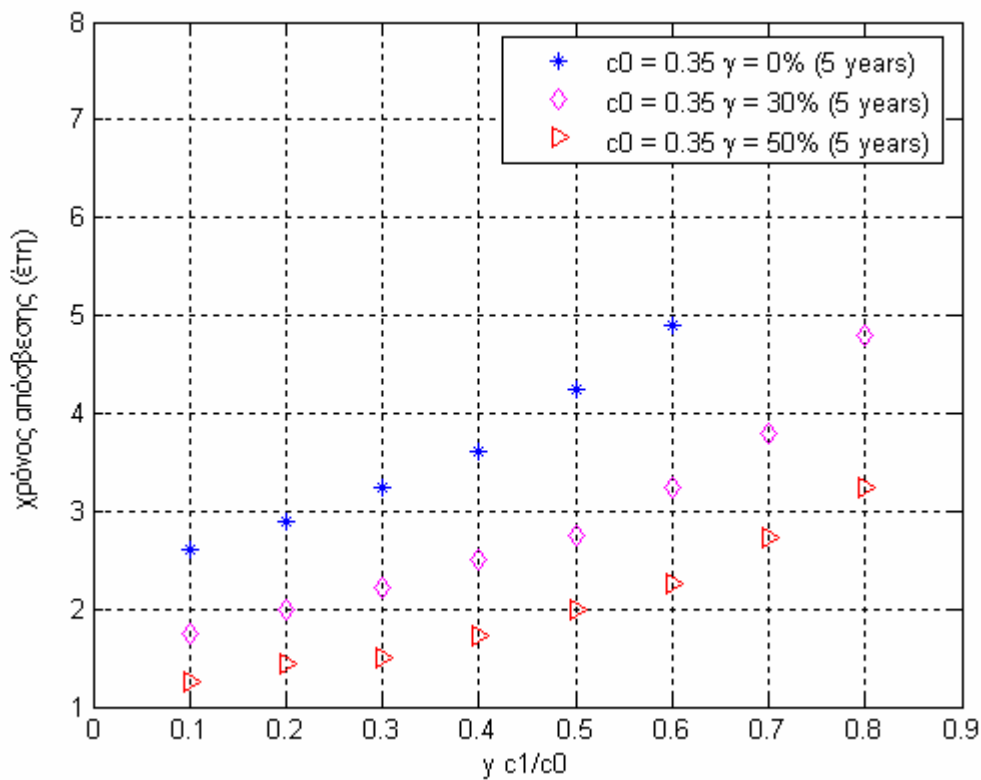
Σχήμα 8.227 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh



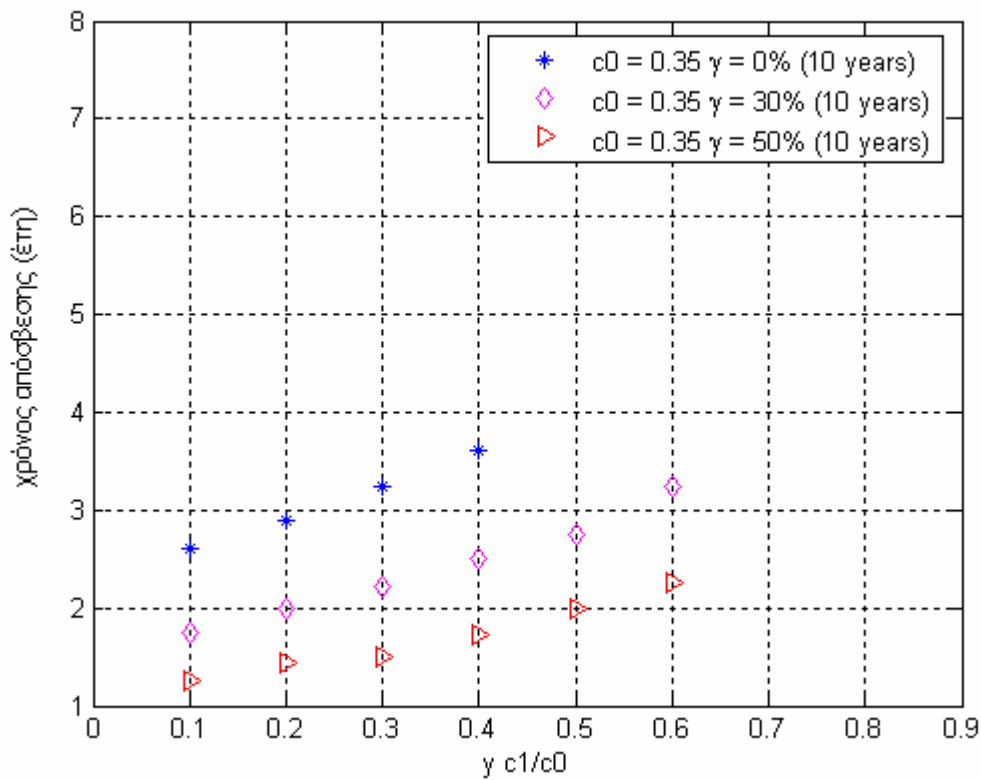
Σχήμα 8.228 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh



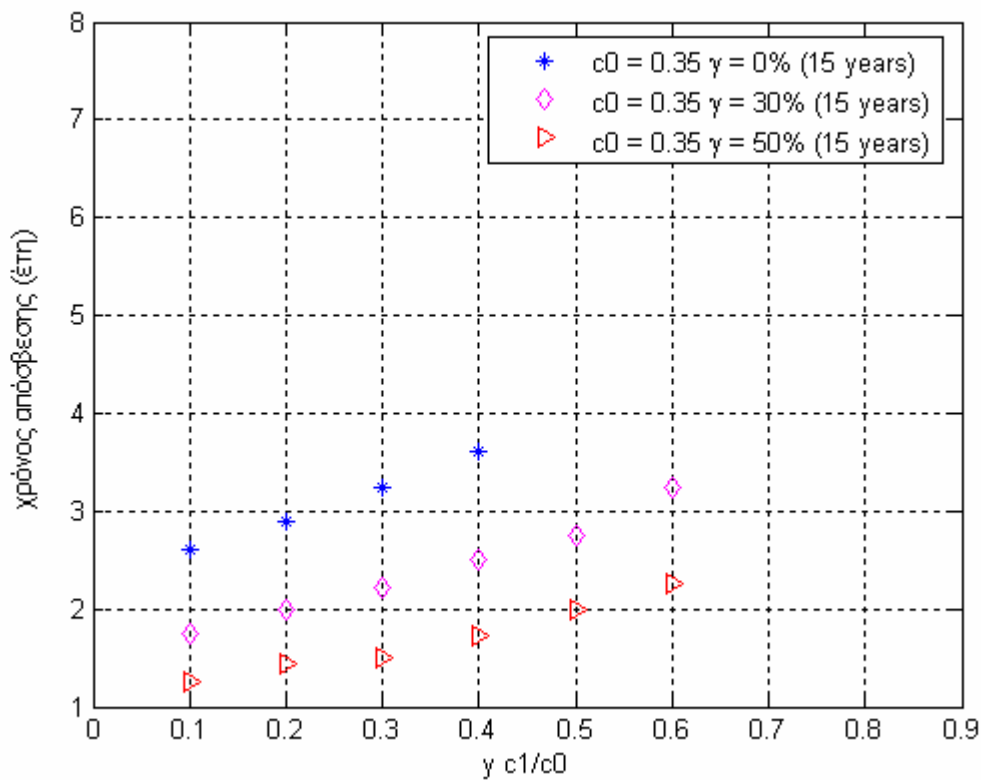
Σχήμα 8.229 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,29 €/kWh



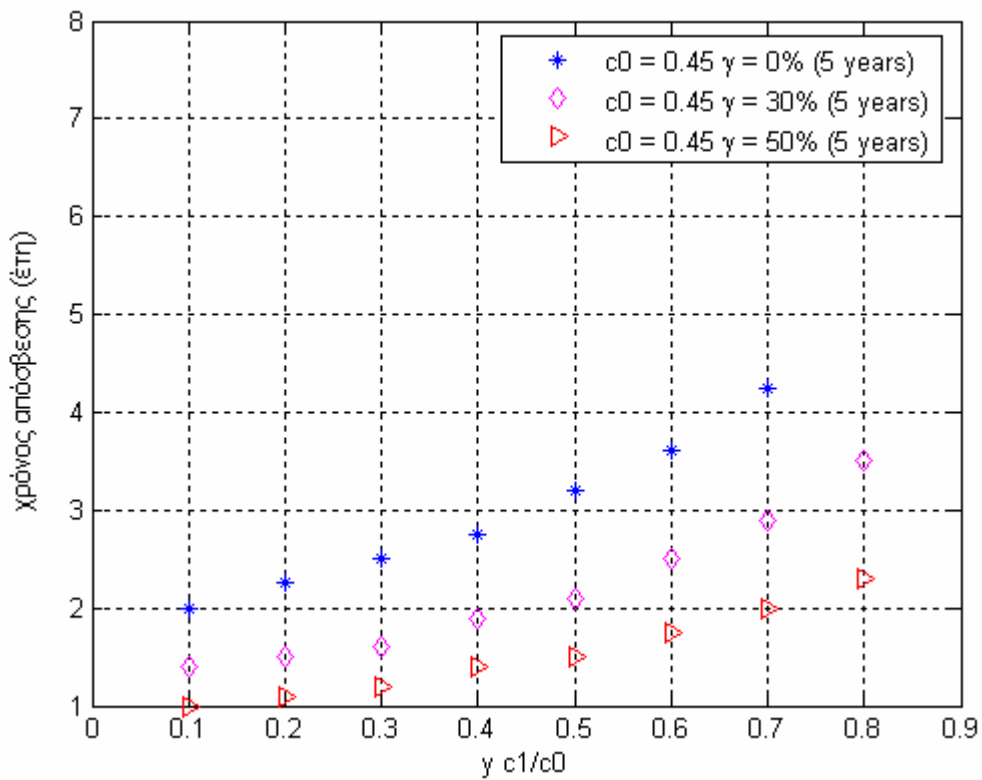
Σχήμα 8.230 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh



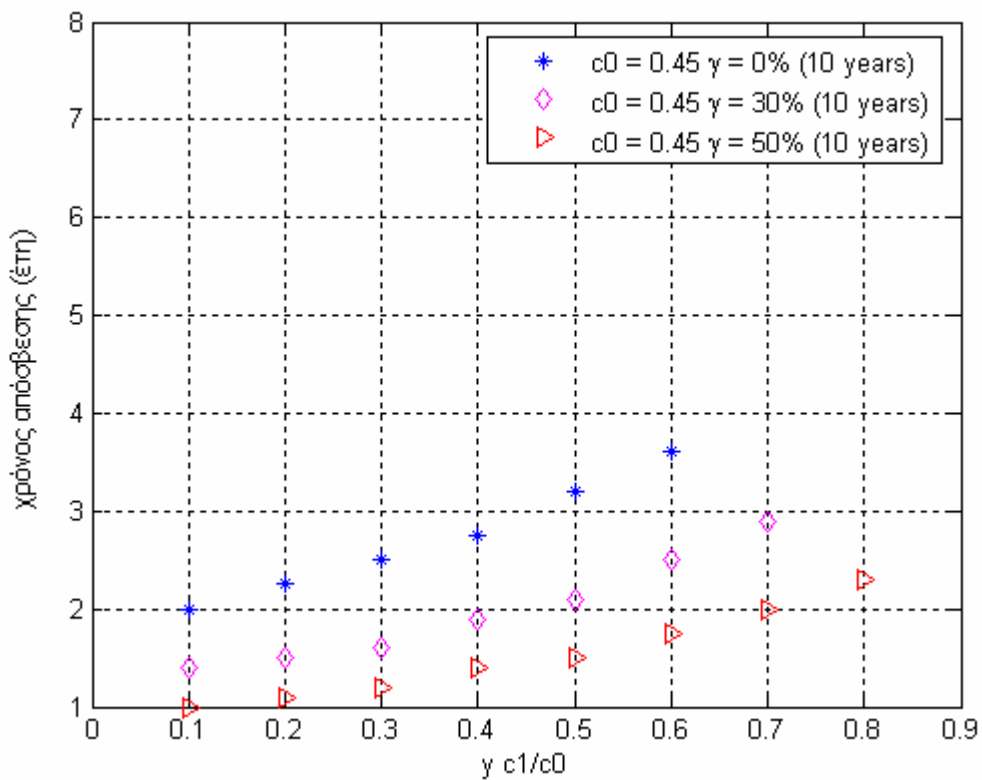
Σχήμα 8.231 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh



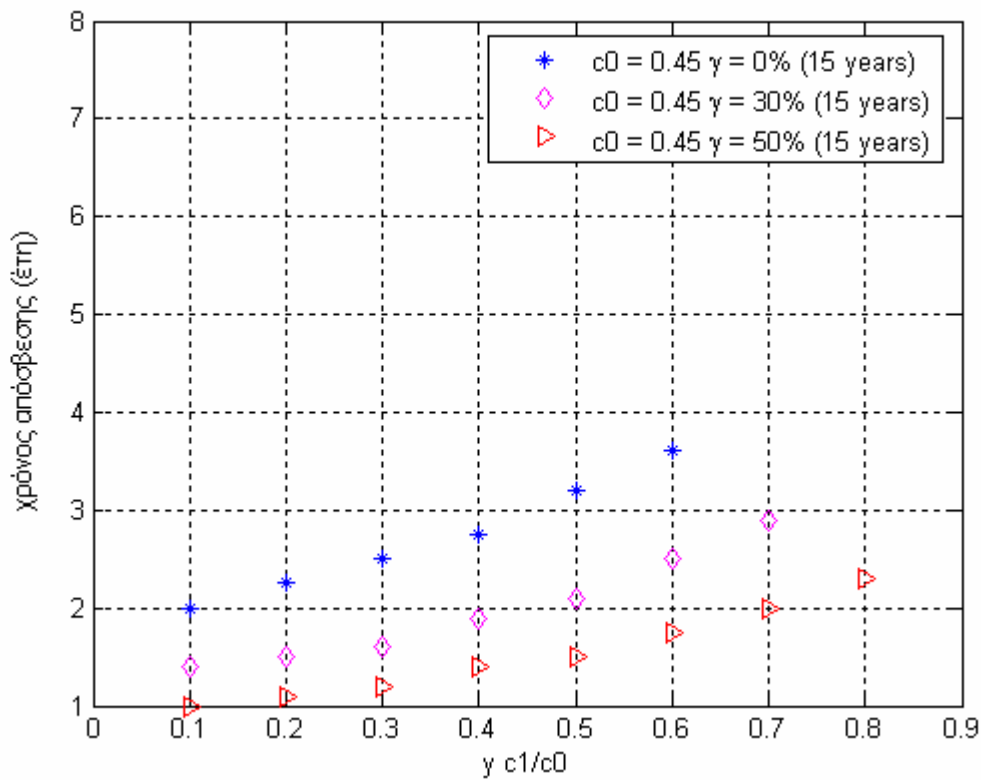
Σχήμα 8.232 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,35 €/kWh



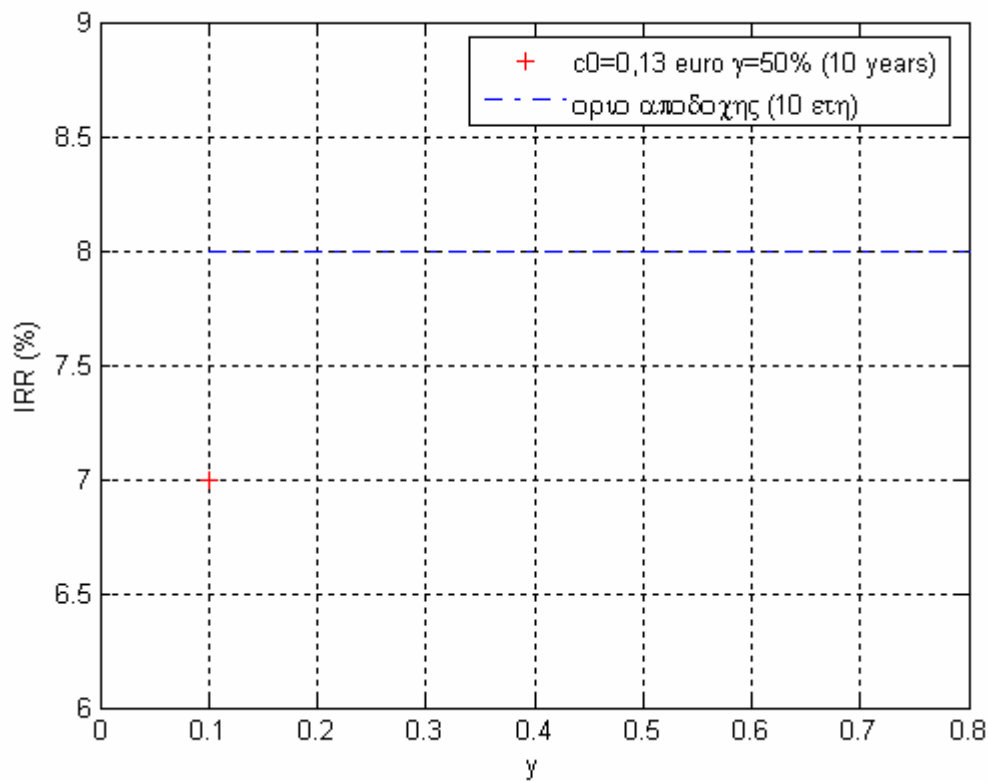
Σχήμα 8.233 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 5 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh



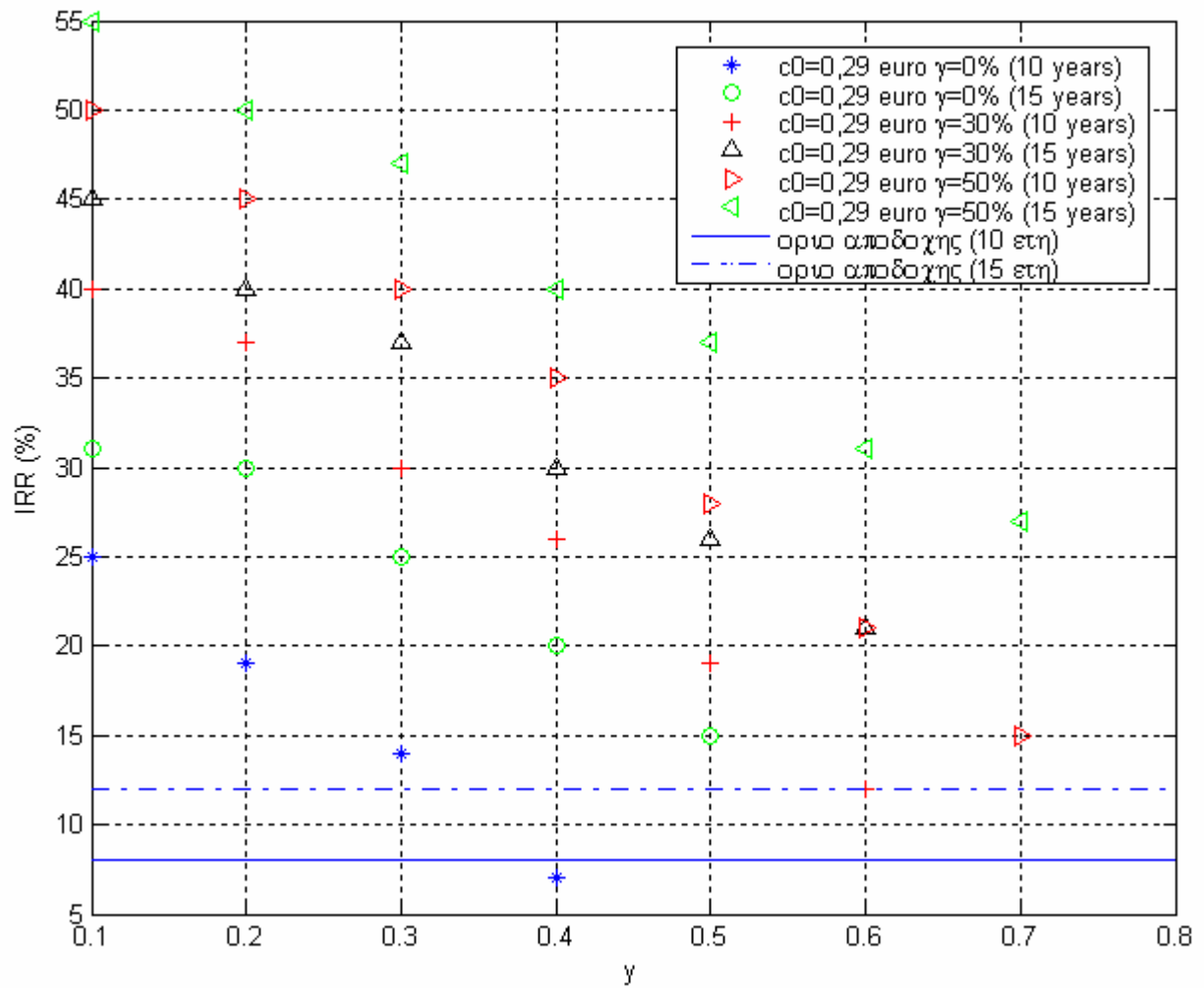
Σχήμα 8.234 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 10 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh



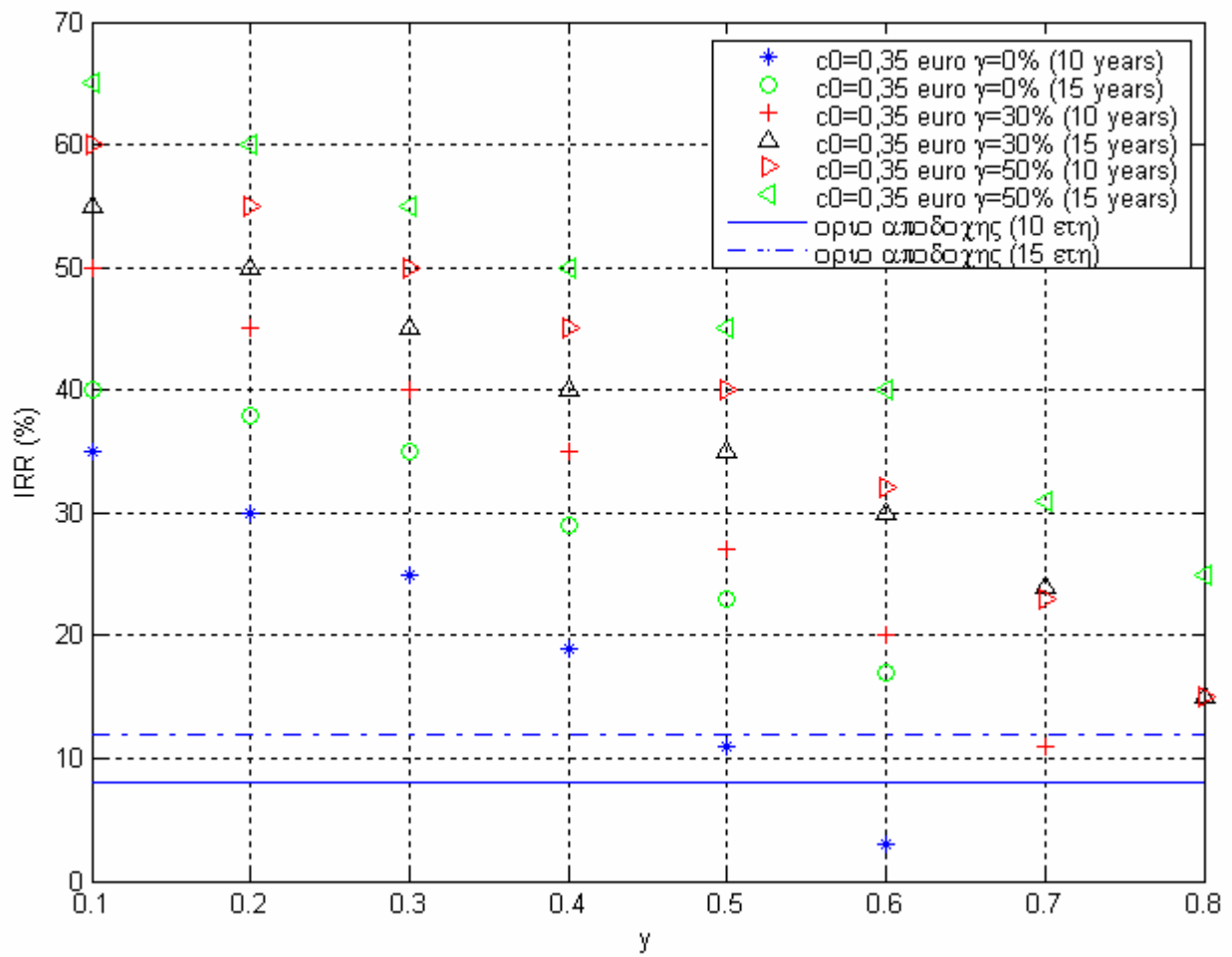
Σχήμα 8.235 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης για 15 έτη και τιμή πώλησης 0,45 €/kWh



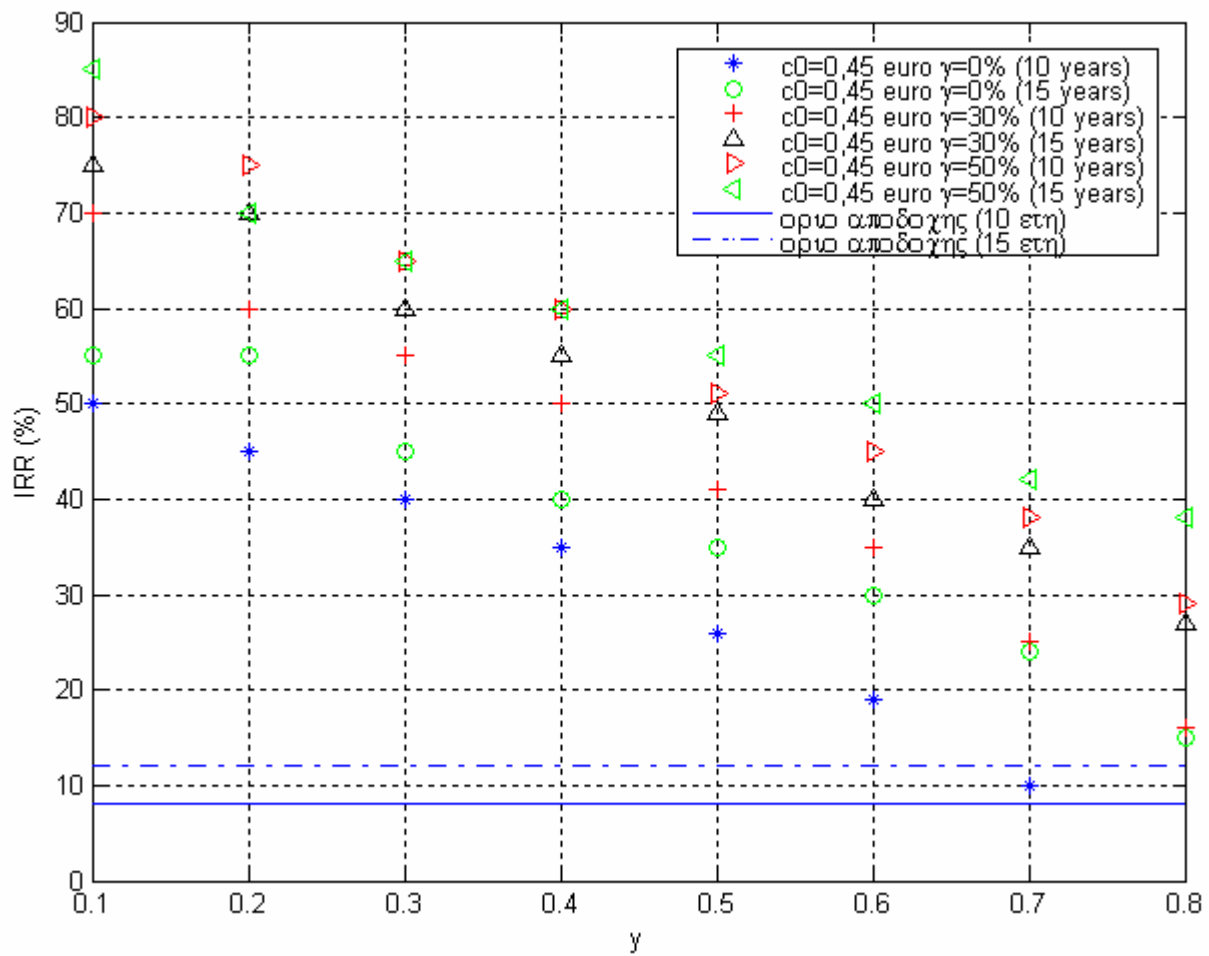
Σχήμα 8.236 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



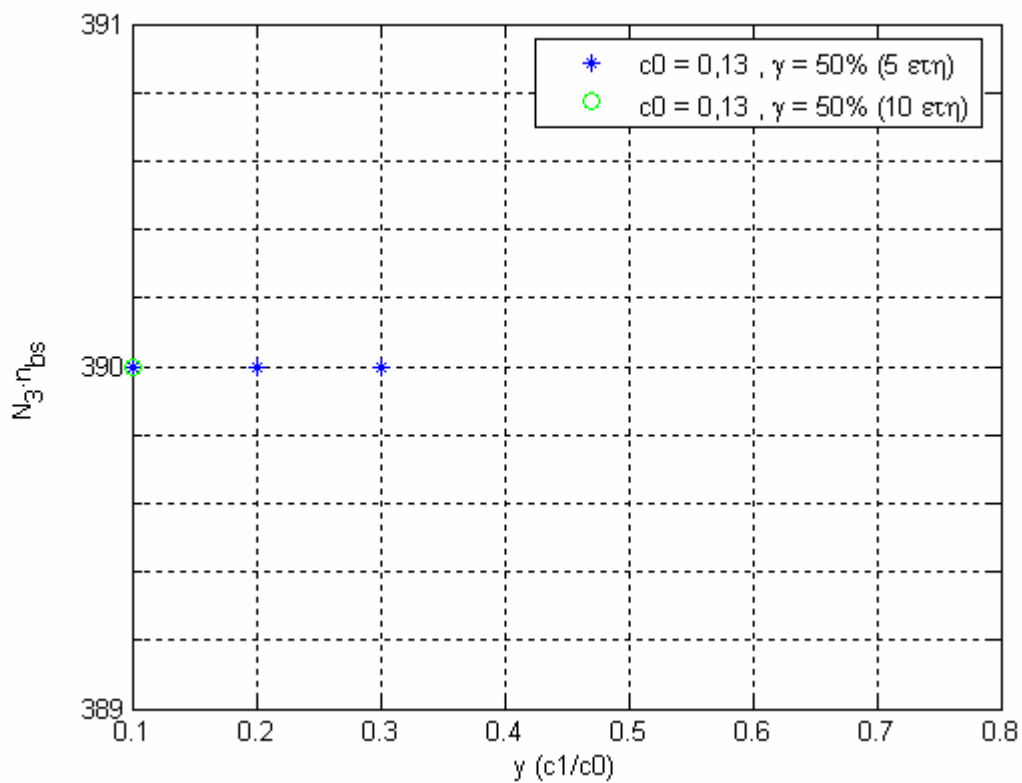
Σχήμα 8.237 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,29 €/kWh



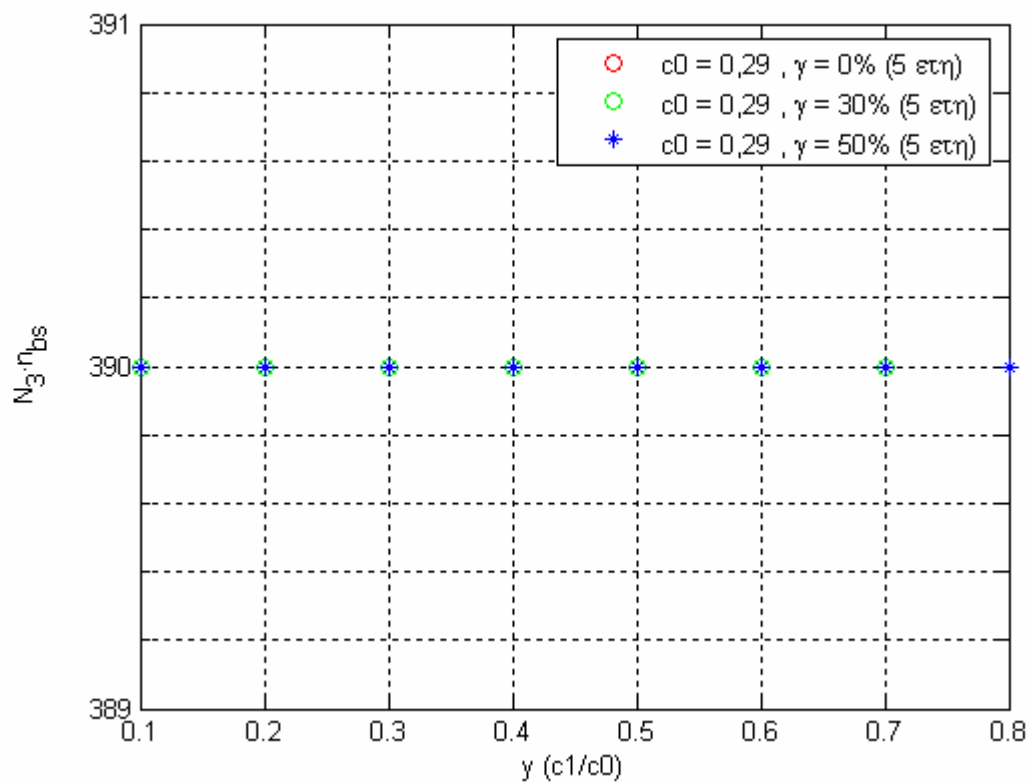
Σχήμα 8.238 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,35 €/kWh



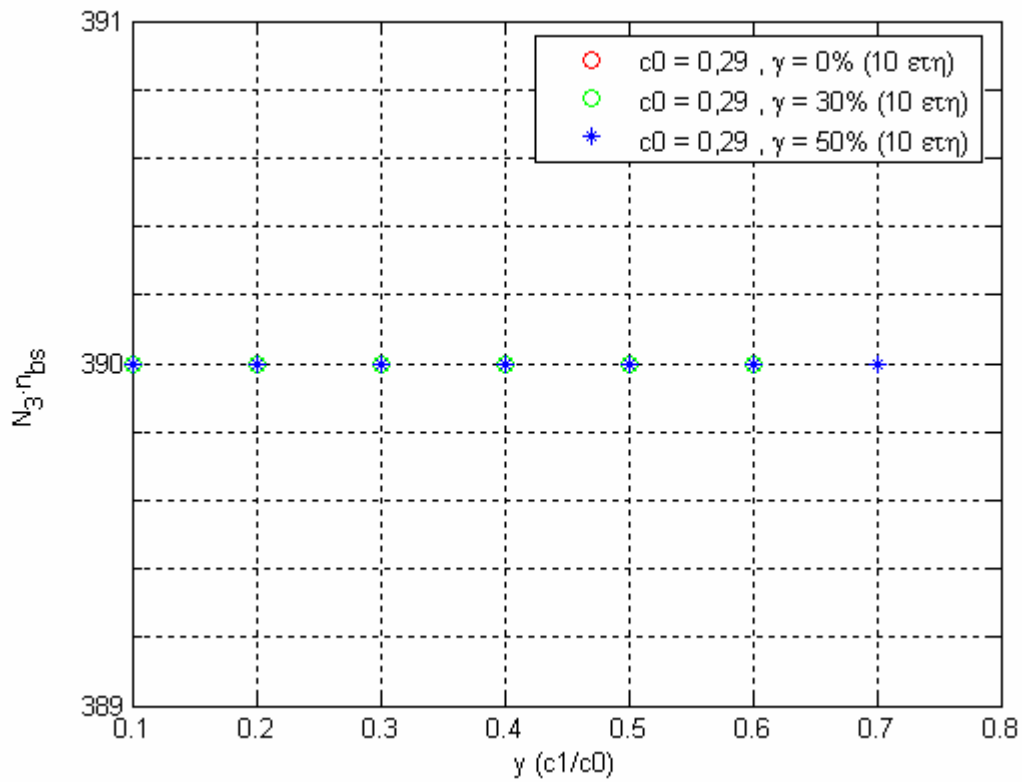
Σχήμα 8.239 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) για τιμή πώλησης 0,45 €/kWh



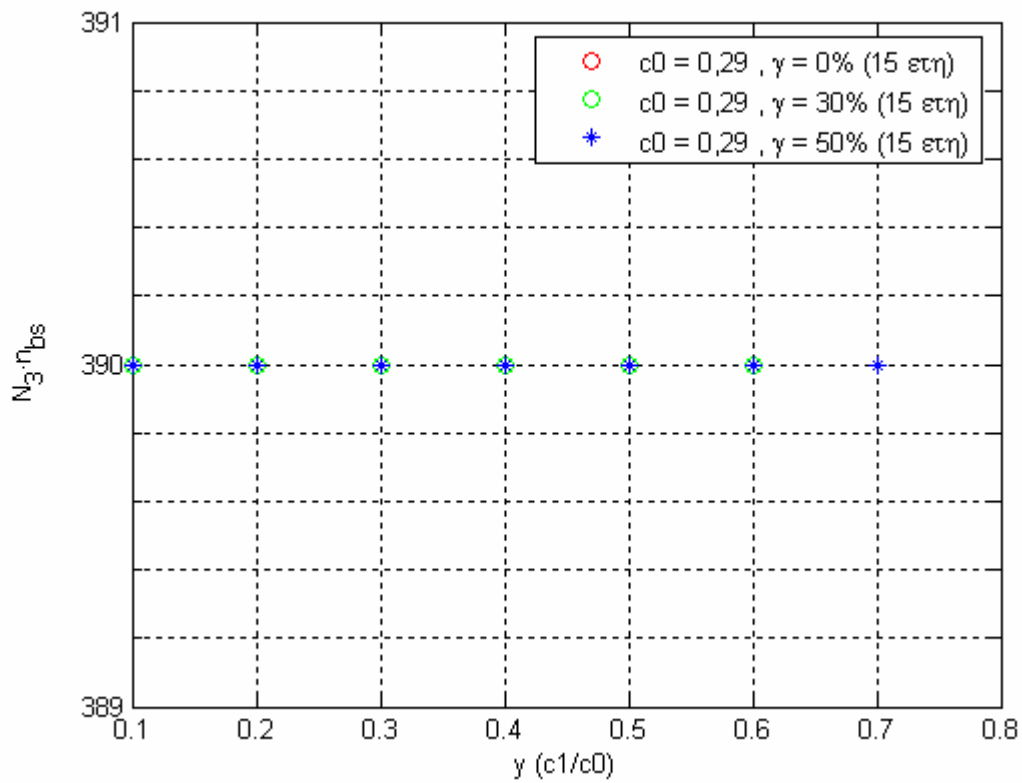
Σχήμα 8.240 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 και 10 έτη και τιμή πώλησης 0,13 €/kWh



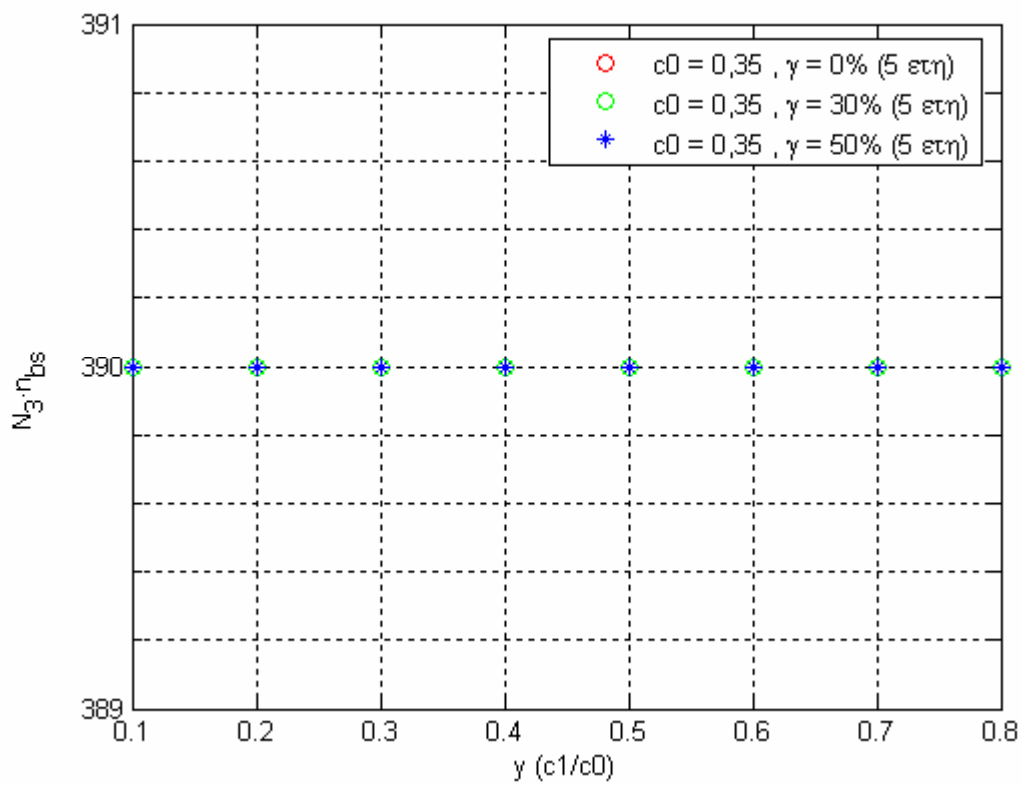
Σχήμα 8.241 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



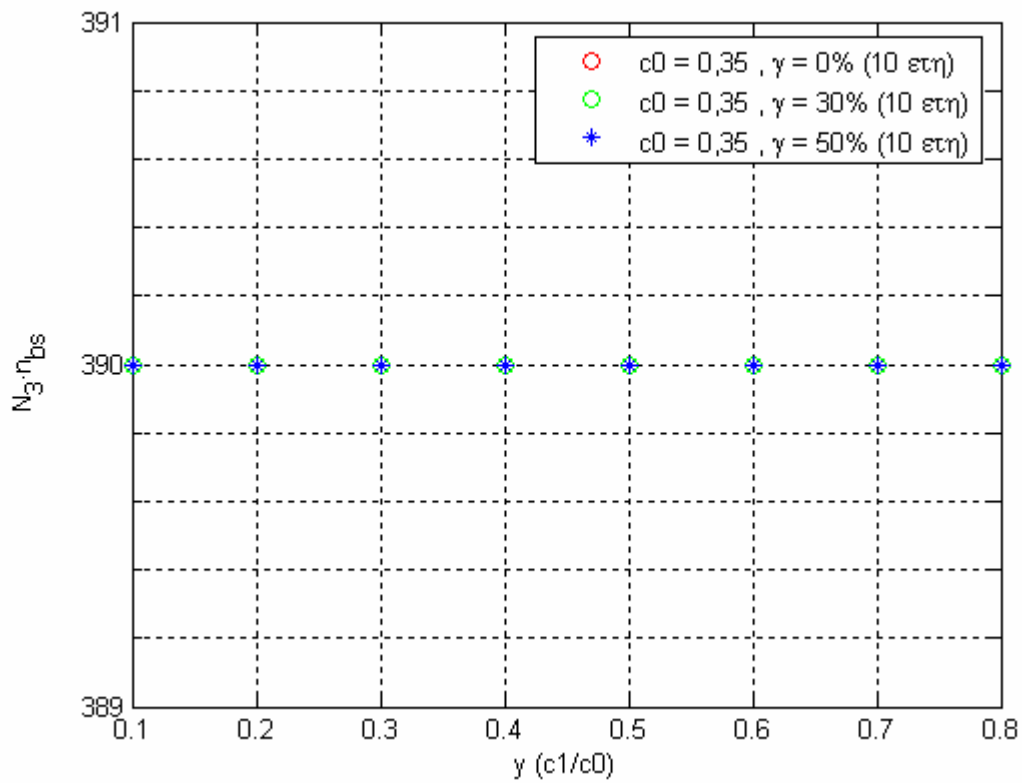
Σχήμα 8.242 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



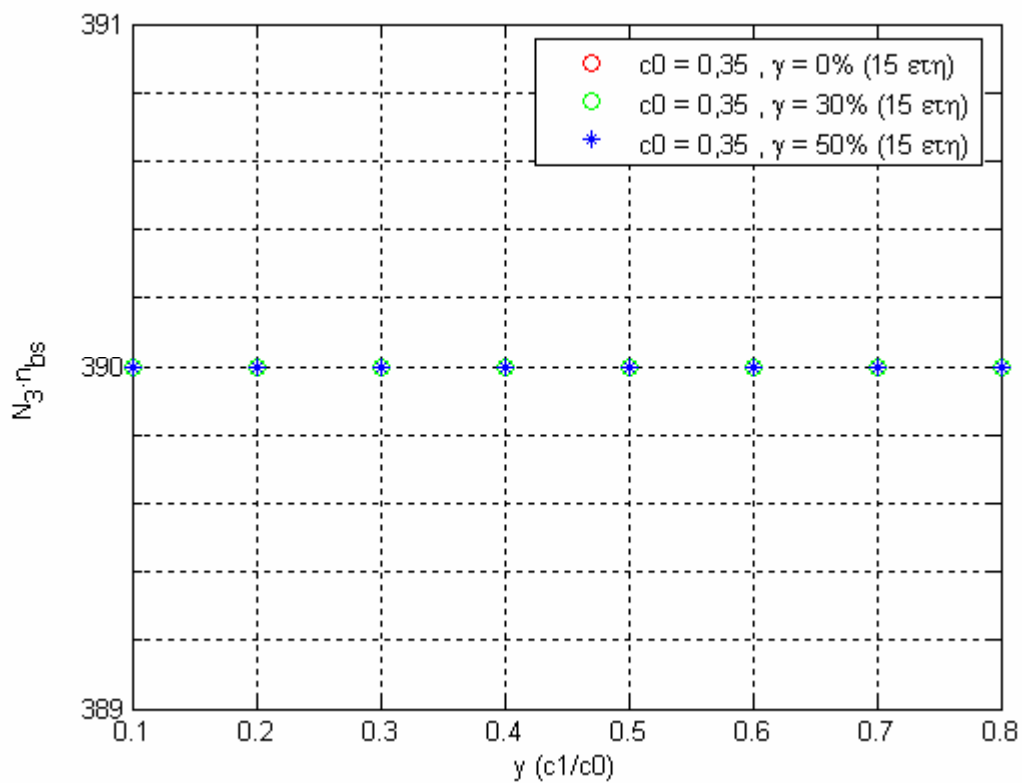
Σχήμα 8.243 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,29 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



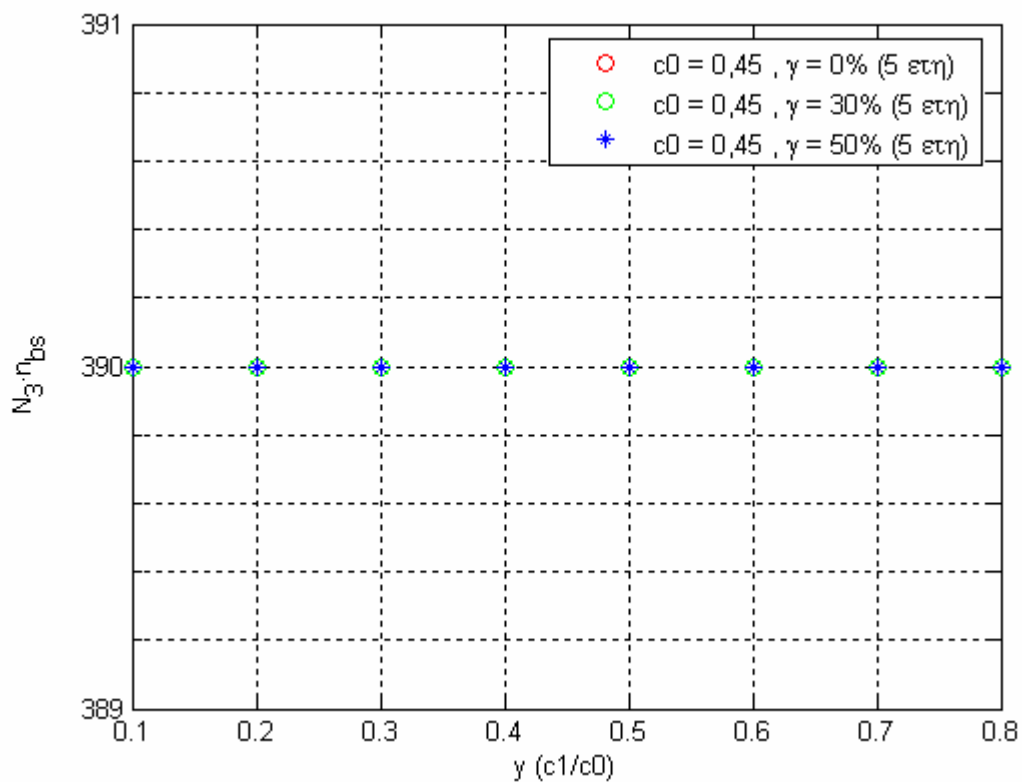
Σχήμα 8.244 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_{3*\eta_{bs}}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



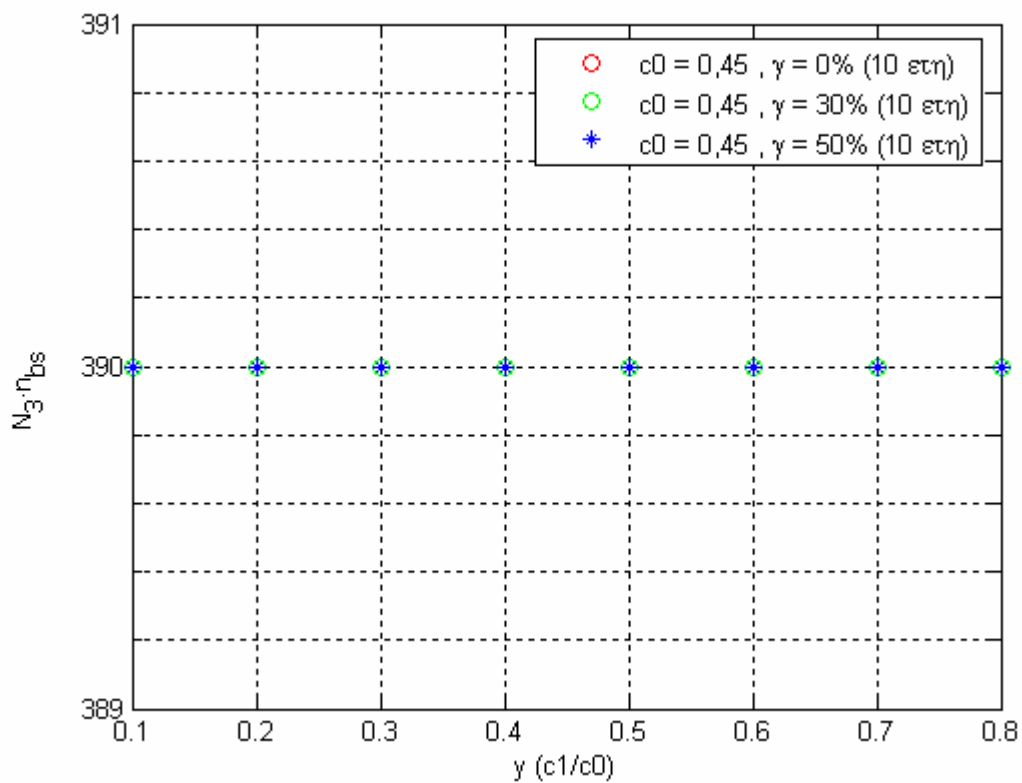
Σχήμα 8.245 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_{3*\eta_{bs}}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



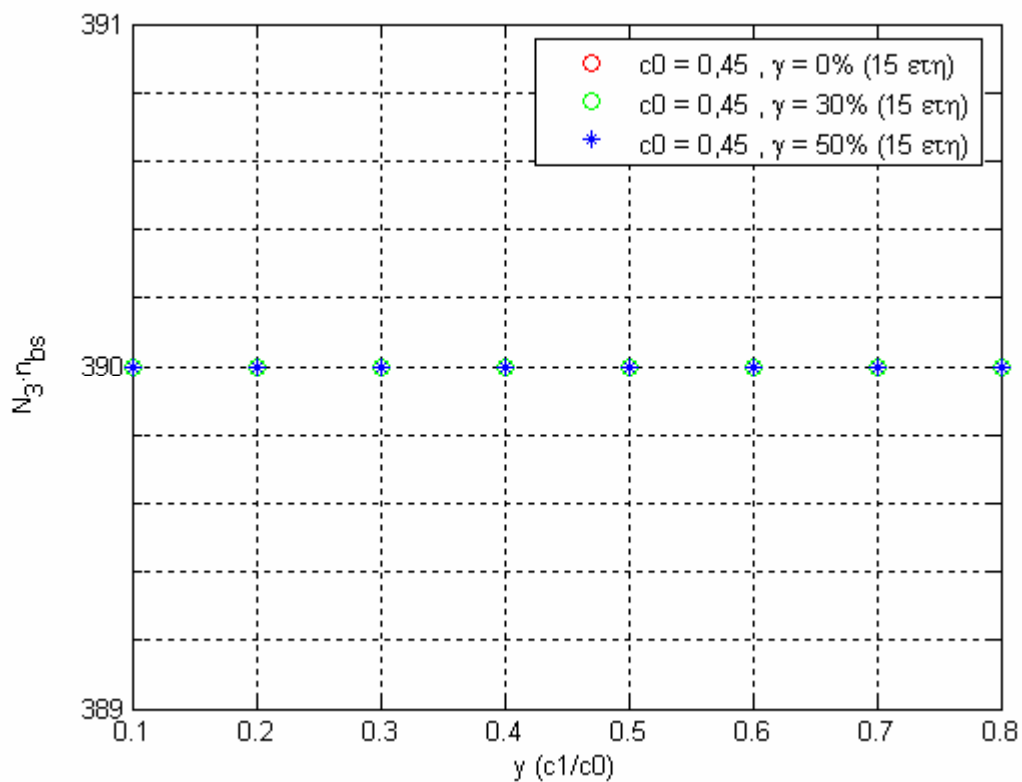
Σχήμα 8.246 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,35 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.247 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot \eta_{bs}$) για 5 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.248 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 10 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης



Σχήμα 8.249 Συνολικός αριθμός συσσωρευτών ($N_3 \cdot n_{bs}$) για 15 έτη, τιμή πώλησης 0,45 €/kWh και διάφορες τιμές επιδότησης

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την περίπτωση του αυτόνομου συστήματος, όπου η μόνη ισχύς που φορτίζει τους συσσωρευτές είναι αυτή που απορρίπτεται από το αιολικό πάρκο, μελετήθηκαν διάφορα σενάρια πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τρία ποσοστά επιδότησης και τρεις χρονικές περιόδους ανάλυσης. Από το σχήμα 8.5, στο οποίο παρουσιάζεται η τιμή της εγγυημένης ισχύος, παρατηρεί κανείς ότι η τελευταία δεν ξεπερνάει τα 0.7kW. Αυτό συμβαίνει γιατί οι συσσωρευτές φορτίζονται μόνο από την απορριπτόμενη ισχύ και πρέπει να παρέχουν στο ηλεκτρικό δίκτυο εγγυημένη ισχύ σταθερής τιμής καθημερινά. Το αποτέλεσμα είναι να μειώνεται η τιμή της εγγυημένης ισχύος έτσι ώστε το σύστημα να μπορέσει να ανταπεξέλθει στον περιορισμό που έχει τεθεί (σταθερή εγγυημένη ισχύς για όλη τη διάρκεια του έτους). Τα έντοκα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σε καμιά από τις περιπτώσεις (ακόμα και σε αυτήν με τιμή πώλησης $c_0=0,45$ €/kWh, ποσοστό επιδότησης $\gamma=50\%$ και 5 έτη λειτουργίας), ικανά να δώσουν μια βιώσιμη λύση. Το κόστος εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης και αλλαγής των συσσωρευτών αυξάνουν με πολύ γρηγορότερο ρυθμό από τα έσοδα. Σημειώνεται ότι βιώσιμη λύση παρουσιάζεται όταν το συνολικό κόστος του συστήματος έχει αρνητική τιμή.

Στα μη-αυτόνομα συστήματα εκτός από την απορριπτόμενη ισχύ, οι συσσωρευτές φορτίζονται και με ισχύ που εισάγεται από το ηλεκτρικό δίκτυο κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης (00:00-08:00πμ). Για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $c_0=0,1$ €/kWh, ποσοστό επιδότησης $\gamma=50\%$, διάρκεια 5 ετών και ποσοστό αγοράς της εισαγόμενης ενέργειας $\gamma<0,2$, το σύστημα δίνει βιώσιμη λύση με χρόνο απόσβεσης περίπου στα 4 έτη. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνάει παρόλα αυτά το αποδεκτό όριο του 8%. Τα συνολικά καθαρά κέρδη ανέρχονται στα 11.000 € και ο λόγος R_e υπολογίζεται ίσος με 0.78.

Για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $c_0=0,13$ €/kWh, ποσοστό αγοράς της εισαγόμενης ενέργειας $\gamma < 0,4$ και ποσοστά επιδότησης $\gamma=30\%$ και 50% , το σύστημα δίνει βιώσιμη λύση για όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης, με τιμή εγγυημένης ισχύος που κυμαίνεται από $0,2\text{MW}$ (15 έτη λειτουργίας) έως $3,2\text{MW}$ (για 5 έτη λειτουργίας). Για τα 5 έτη λειτουργίας η απόσβεση γίνεται στα 4 έτη και για τα 10 και 15 έτη η απόσβεση γίνεται στα 7 έτη. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) για ποσοστό επιδότησης $\gamma=50\%$ παίρνει τιμές από $11-16\%$ οι οποίες είναι πάνω από το όριο αποδοχής. Σημειώνεται ότι το όριο αποδοχής του εσωτερικού βαθμού απόδοσης λαμβάνεται ίσο με 8% για τα 10 έτη και 12% για 15 τα έτη. Ο λόγος R_e βρίσκεται στο διάστημα $0.78-0.83$.

Για τιμές πώλησης $c_0=0,29-0,45$ €/kWh, το σύστημα παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τις οικονομικές παραμέτρους. Σύμφωνα με τη μέθοδο του υπολογισμού του χρόνου απόσβεσης το σύστημα δίνει βιώσιμες λύσεις για ποσοστά αγοράς της εισαγόμενης ενέργειας $\gamma < 0,5$, ποσοστά επιδότησης $\gamma=0-50\%$ και για όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Η τιμή της εγγυημένης ισχύος κυμαίνεται από 1MW έως και 12MW . Ο εκτιμώμενος χρόνος απόσβεσης είναι στα 2-3 έτη για ποσοστά επιδότησης $\gamma=30-50\%$ και όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Για ποσοστό επιδότησης $\gamma=0\%$ ο χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται στα 4 έτη για την 5ετή λειτουργία και στα 7 έτη για την 10ετή και 15ετή λειτουργία. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης βρίσκεται αρκετά πιο πάνω από το όριο αποδοχής για τις περιπτώσεις που αφορούν ποσοστά επιδότησης 30% και 50% . Ο λόγος R_e κυμαίνεται από $0.77-0.85$, για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Σημειώνεται ότι σε μερικές περιπτώσεις που αφορούν τη μελέτη για 10 και 15 έτη λειτουργίας, η μέθοδος υπολογισμού χρόνου απόσβεσης δίνει δυο τιμές (π.χ. ο υπολογισμός μπορεί να δώσει πρώτη τιμή απόσβεσης στα 3 έτη και δεύτερη στα 7). Το φαινόμενο εξηγείται από την ανάγκη για την αντικατάσταση των μπαταριών όταν τελειώσει ο ωφέλιμος χρόνος ζωής τους. Η τιμή που επιλέγεται τελικά είναι η δεύτερη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα επιδεικνύει την καλύτερη συμπεριφορά για τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας $c_0=0,35$ €/kWh και ποσοστά επιδότησης $\gamma=30-50\%$. Για την πλειοψηφία των ποσοστών αγοράς εισαγόμενης ενέργειας ($\gamma<0,5$), η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στα 12MW και ο εκτιμώμενος χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται από ένα έως τέσσερα έτη (για όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης). Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) έχει τιμή μεγαλύτερη του 12% με εξαίρεση μερικές περιπτώσεις που περιλαμβάνουν μηδενικό ποσοστό επιδότησης (IRR<10%). Τέλος, ο λόγος R_e υπολογίζεται ίσος με 0.85.

Στα μη-αυτόνομα συστήματα και για την βελτιστοποίηση του λόγου Ετήσια Προμηθευόμενη ενέργεια/Ετήσια (εγγυημένη) Παραγόμενη ενέργεια, τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά σε σχέση με αυτά της βελτιστοποίησης του κόστους. Αυτό συμβαίνει γιατί στη βελτιστοποίηση δεν λαμβάνεται υπόψη το συνολικό κόστος του συστήματος και επομένως δεν είναι ένα πολύ καλό κριτήριο διαστασιολόγησης.

Για τιμή πώλησης $c_0=0,1$ €/kWh, το σύστημα δεν δίνει σε καμία περίπτωση βιώσιμη λύση. Για τις υπόλοιπες τιμές πώλησης ($c_0=0,13-0,45$ €/kWh) η τιμή της εγγυημένης ισχύος είναι η ίδια και έχει τιμή 0,13Mw. Ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών και των μετατροπέων είναι επίσης σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι τα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης θα είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις μελέτης. Την ίδια συμπεριφορά έχει και η παράμετρος βελτιστοποίησης $[g(N_2)]$ που έχει τιμή 0.75. Η μόνη παράμετρος που αλλάζει είναι το κόστος της εισαγόμενης ενέργειας το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από το γ . Όσον αφορά τον εκτιμώμενο χρόνο απόσβεσης, υπολογίζεται ότι για τις περισσότερες τιμές του γ βρίσκεται ανάμεσα στα δύο και πέντε έτη (για ποσοστά επιδότησης $\gamma=30-50\%$). Ο υπολογισμός του εσωτερικού βαθμού απόδοσης δίνει τιμές που βρίσκονται πάνω από το όριο αποδοχής (IRR>12%) με μερικές εξαιρέσεις που αφορούν μηδενικό ποσοστό επιδότησης (IRR<10%).

Σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες [1], η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία επιδεικνύει καλύτερα οικονομικά οφέλη. Στη σύγκριση συμπεριλαμβάνονται μόνο οι περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα (απορριπτόμενη ενέργεια, τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας και ποσοστά επιδότησης). Στα αντλησιοταμιευτικά συστήματα η οικονομική ανάλυση δίνει χρόνο απόσβεσης που ξεπερνά σε κάθε περίπτωση τα δέκα έτη, ενώ στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές ο εκτιμώμενος χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται περίπου στα επτά έτη (για 15 έτη λειτουργίας). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αντλησιοταμιευτικά έχουν πολύ μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Το μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης προκύπτει από τα έργα που είναι απαραίτητα για την κατάλληλη διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου (δημιουργία ταμιευτήρων μεγάλης χωρητικότητας). Ενδεικτικά σημειώνεται ότι ένα αντλησιοταμιευτικό σύστημα με ονομαστική ωριαία ισχύ 3,5MW έχει αρχικό κόστος εγκατάστασης $IC_0=5,7$ εκατομμύρια €.

Πέραν των οικονομικών προτερημάτων, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές παρουσιάζουν ευκολία στην εγκατάσταση και τη λειτουργία. Δεν περιορίζονται από την μορφολογία του χώρου και δεν χρειάζονται επιπλέον φυσικούς πόρους από το περιβάλλον (π.χ. ικανές ποσότητες νερού για τα αντλησιοταμιευτικά). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές μπορούν, υπό τις κατάλληλες οικονομικές προϋποθέσεις, να αποτελέσουν μια οικονομικά ελκυστική λύση για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης ενέργειας των αιολικών πάρκων, αυξάνοντας την παραγωγή ενέργειάς τους.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι σε σχέση με άλλες μεθόδους, παρουσιάζουν μεγάλο πλεονέκτημα όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης. Η ικανότητά τους να εντοπίζουν το ολικό βέλτιστο μιας αντικειμενικής συνάρτησης αποφεύγοντας πιθανά τοπικά βέλτιστα τους καταστεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Μια επέκταση της μεθόδου που παρουσιάστηκε

θα μπορούσε να είναι η δημιουργία μιας διεπαφής χρήστη (user interface), με σκοπό την ευκολότερη χρήση του λογισμικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Electricity Storage Association, www.electricitystorage.org
- [2] J.K. Kaldellis, K.A. Kavadias, D.E. Papantonis G.S. Stavrakakis, "Maximising wind generated electricity with hydro storage: case study Crete", Wind Engineering, Vol 30, No. 1, 2006.
- [3] D. Linden, T. Reddy, "Handbook of batteries", 3rd Edition, McGraw-Hill, August 2001.
- [4] Gabriele Seeling-Hochmuth, "Optimization of hybrid energy systems-sizing and operation control", PhD Thesis, University of Kassel, October 1998.
- [5] Sonnenschein industrial batteries technical manual, www.exide.com.
- [6] Ultima SLM Ni-Cd battery technical manual, www.saftbatteries.com.
- [7] N. Mohan, T. Underland, W. Robbins, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1996.
- [8] Ποτηράκης Αντώνιος, "Ανάπτυξη λογισμικού διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.
- [9] Τσιτσόπουλος Νικόλαος, "Βελτιστοποίηση ελέγχου μετατροπών DC/AC (Αντιστροφείς) με χρήση γενετικών αλγορίθμων", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.