

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΑΡΖΟΥΜΑΝΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΑΡΖΟΥΜΑΝΙΔΟΥ ΖΩΗ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ
ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ
ΦΟΡΤΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΖΑΝΗ 2004

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Εισαγωγή.....σελ 2
2.Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Παλινδρόμησης.....σελ 7
3.Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Έμπειρων Συστημάτων.....σελ 19
4.Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Νευρωνικών Δικτύων.....σελ 22
5.Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Ασαφών Συστημάτων.....σελ 40
6.Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Υβριδικών Μοντέλων.....σελ 44
7.Συμπεράσματα.....σελ 49
8.Βιβλιογραφία.....σελ 50

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
Αριθμ. Εισαγ.: 1826.....
Ημερομηνία: 5/10/04

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου (ΒΠΦ) είναι μια σημαντική λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ). Οι προβλέψεις των ωριαίων φορτίων των επομένων 24 μέχρι και 168 ωρών είναι απαραίτητες για την υποστήριξη βασικών λειτουργιών προγραμματισμού του συστήματος παραγωγής όπως η υδροθερμική συνεργασία και οι ανταλλαγές ενέργειας, καθώς και των λειτουργιών ανάλυσης δικτύου που σχετίζονται με την ασφάλεια του συστήματος όπως η ανάλυση ενδεχόμενων διαταραχών (Σχήμα 1). Μια αξιόπιστη πρόβλεψη φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομική και ασφαλή λειτουργία του συστήματος [8].

Η βασική εφαρμογή της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου είναι στον οικονομικό προγραμματισμό του συστήματος παραγωγής. Η πρόβλεψη φορτίου για το επόμενο εικοσιτετράωρο ή την επόμενη εβδομάδα είναι απαραίτητη για να καταρτισθεί το πρόγραμμα βέλτιστης ένταξης μονάδων στο δίκτυο, το πρόγραμμα υδροθερμικής συνεργασίας καθώς επίσης και το πρόγραμμα ανταλλαγών ενέργειας με γειτονικά δίκτυα.

Μια δεύτερη εφαρμογή της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου είναι στην ανάλυση της ασφάλειας του συστήματος. Η πρόβλεψη φορτίου παρέχει την απαραίτητη πληροφορία για την ανάλυση των συνθηκών που ενδεχομένως θα προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος στο εγγύς μέλλον.

Σφάλματα στην πρόβλεψη φορτίου αυξάνουν το κόστος λειτουργίας του συστήματος. Πρόβλεψη φορτίου με τιμή χαμηλότερη από την πραγματική, οδηγεί σε αποτυχία στη σωστή πρόβλεψη της απαραίτητης εφεδρείας στο σύστημα και φυσικά, σε υψηλότερο κόστος λειτουργίας εξαιτίας της ανάγκης για χρήση δαπανηρών μονάδων αιχμής. Αντίθετα, μια υπερεκτίμηση στην πρόβλεψη φορτίου οδηγεί σε

αντίστοιχη υπερεκτίμηση της απαιτούμενης εφεδρείας και συνεπώς σε αύξηση του λειτουργικού κόστους. Εκτιμήθηκε ότι στο ηλεκτρικό σύστημα της Μεγάλης Βρετανίας, κατά το 1985, μια αύξηση στο σφάλμα πρόβλεψης φορτίου κατά 1% οδηγεί σε μια αύξηση των λειτουργικών δαπανών κατά 10 εκατομμύρια λίρες το χρόνο [8]. Το νέο καθεστώς που διαμορφώνεται σήμερα, εξαιτίας της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές περιοχές του πλανήτη σε συνάρτηση με τις έντονα αυξανόμενες συνθήκες ανταγωνισμού που προκαλεί, καθιστά επιτακτική την ανάγκη για λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο ελάχιστο κόστος διατηρώντας αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χωρισθούν σε τέσσερις κατηγορίες [8]: α) Οικονομικοί, β) Χρονικοί, γ) Καιρικοί και δ) Τυχαίοι. Κατά την πρόβλεψη του φορτίου πρέπει να εκτιμηθεί η επίδραση όλων των παραγόντων στη διαμόρφωση της ζήτησης, μια σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί.

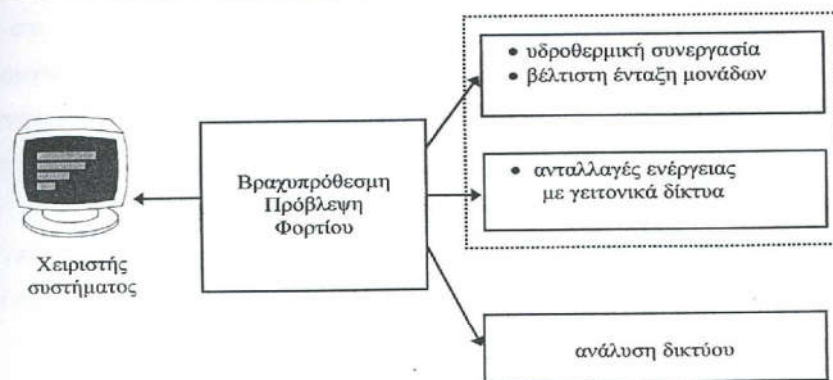
(α). Οικονομικοί Παράγοντες

Δημογραφικοί παράγοντες, επίπεδα βιομηχανικής δραστηριότητας, αλλαγές στον αγροτικό τομέα και γενικά η οικονομική δραστηριότητα έχουν μεγάλη επίδραση στο ρυθμό αύξησης ή μείωσης του φορτίου του συστήματος. Τυπικά οι οικονομικοί παράγοντες έχουν χρονικές σταθερές σημαντικά μεγαλύτερες από μια εβδομάδα. Χρειάζεται να ληφθούν υπόψη για την αλλαγή του μοντέλου πρόβλεψης από τον ένα χρόνο στον επόμενο. Οι οικονομικοί παράγοντες, ωστόσο, δε χρησιμοποιούνται απευθείας κατά τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου λόγω των μεγάλων χρονικών τους σταθερών.

(β). Χρονικοί Παράγοντες

Τρεις βασικοί χρονικοί παράγοντες - εποχιακές μεταβολές, εβδομαδιαίος/ ημερήσιος κύκλος και εορτές/ αργίες - επηρεάζουν σημαντικά το ηλεκτρικό φορτίο. Ορισμένες μεταβολές στην καμπύλη φόρτισης γίνονται σταδιακά με την αλλαγή διαφόρων εποχιακών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία και οι ώρες ηλιοφάνειας. Άλλες εποχιακές μεταβολές δημιουργούν απότομες αλλαγές στην καμπύλη φορτίου. Τέτοιες αλλαγές είναι η αλλαγή ώρας (Χειμερινή - Θερινή), έναρξη σχολικής χρονιάς κ.ά.

Η εβδομαδιαία/ ημερήσια περιοδικότητα του φορτίου είναι αποτέλεσμα της περιοδικότητας του κύκλου εργασίας - ανάπαυσης του πληθυσμού. Υπάρχουν προκαθορισμένες μορφές καμπυλών φορτίου για "τυπική" εβδομάδα κάθε εποχής. Η ζήτηση φορτίου κατά τη διάρκεια εορτών είναι σημαντικά χαμηλότερη από τα φυσιολογικά επίπεδα. Σημαντική μείωση της ζήτησης παρατηρείται επίσης κατά τη διάρκεια εορταστικών τριημέρων.



Σχήμα 1. Η Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου είναι απαραίτητη για την υποστήριξη βασικών λειτουργιών προγραμματισμού του συστήματος.

(γ). *Καιρικοί Παράγοντες*

Οι καιρικές συνθήκες προκαλούν σημαντικές αλλαγές στη μορφή της καμπύλης φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η λειτουργία ενός μεγάλου ποσοστού ηλεκτρικών συσκευών (θέρμανση, κλιματισμός, αρδεύσεις) εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες.

Σε πολλά συστήματα η θερμοκρασία έχει τη σημαντικότερη επίδραση στη διαμόρφωση του φορτίου. Για συστήματα που καλύπτουν μεγάλη γεωγραφική έκταση χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψη οι θερμοκρασίες σε διάφορες περιοχές για να

υπολογισθεί η ακριβής επίδραση στο φορτίο. Άλλοι παράγοντες όπως υγρασία, βροχόπτωση, άνεμος, νεφώσεις επηρεάζουν επίσης τη ζήτηση.

(δ). Τυχαίοι Παράγοντες

Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το φορτίο, και δεν ανήκουν σε καμιά από τις προηγούμενες κατηγορίες. Η λειτουργία του συστήματος δέχεται συνεχώς διαταραχές που οφείλονται στο γεγονός ότι η ζήτηση του φορτίου συνίσταται από ένα μεγάλο αριθμό επί μέρους ζητήσεων των καταναλωτών. Εκτός από τους χιλιάδες μικρούς καταναλωτές υπάρχουν και μεγάλοι καταναλωτές (χαλυβουργεία κ.ά.) που προκαλούν σχετικά μεγάλου μεγέθους τυχαίες διαταραχές στη ζήτηση φορτίου. Υπάρχουν επίσης ορισμένα άλλα γεγονότα, όπως μεγάλες απεργίες, εκλογές, ειδικά προγράμματα στην τηλεόραση που αν και εκ των προτέρων γνωστά, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στη διαμόρφωση της ζήτησης.

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός μοντέλου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου για εφαρμογή σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας [ΣΔΕ] είναι:

- α) Μικρό σφάλμα πρόβλεψης. Είναι ο πρωταρχικός στόχος αφού σφάλματα στην πρόβλεψη αυξάνουν το κόστος λειτουργίας και μειώνουν την ασφάλεια του συστήματος. Ενδιαφέρουν τα μεγάλα σφάλματα πρόβλεψης γιατί αυτά προσδιορίζουν το επίπεδο εμπιστοσύνης των χειριστών στις προβλέψεις και όχι τα μέσα σφάλματα που συνήθως αναφέρονται από τους ερευνητές. Μια καλή εικόνα του σφάλματος πρόβλεψης δίνεται από την καμπύλη διάρκειας του σφάλματος που δείχνει πόσες ώρες το χρόνο το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από μια τιμή.
- β) Να είναι εύκολα κατανοητό από τους χειριστές και απλό στη χρήση.
- γ) Το ίδιο μοντέλο να δίνει προβλέψεις φορτίου για όλες τις μέρες του χρόνου (εργάσιμες, Σαββατοκύριακα, αργίες).
- δ) Να είναι εύκολη η συντήρηση των παραμέτρων του μοντέλου στους υπολογιστές του ΣΔΕ. Δηλαδή οι παράμετροι του μοντέλου να ανανεώνονται κατά αραιά χρονικά διαστήματα εφόσον φυσικά δε θυσιάζεται η ακρίβεια πρόβλεψης.

- ε) Να δίνεται η δυνατότητα στον χειριστή να εκτελεί την πρόβλεψη (των φορτίων της επόμενης μέρας ή εβδομάδας) οποιαδήποτε ώρα της ημέρας θέλει εκμεταλλευόμενος τις πιο πρόσφατες ON-LINE μετρήσεις δεδομένων.
- στ) Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου πρέπει να είναι μικρός.
- ζ) Να είναι δυνατή η αποτύπωση της εμπειρίας του χειριστή στο μοντέλο έτσι ώστε να αντιμετωπίζονται ειδικές περιπτώσεις όπως τηλεοπτικές εκπομπές, αναμεταδόσεις αθλητικών γεγονότων κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες μοντέλων πρόβλεψης με βάση το χρόνο εμφάνισής τους στη βιβλιογραφία, πρόκειται για μοντέλα :

α) παλινδρόμησης, β) εμπείρων συστημάτων, γ) νευρωνικών δικτύων, δ) ασαφών συστημάτων και ε) υβριδικά.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Επί τρεις περίπου δεκαετίες οι ερευνητές μελετούν το πρόβλημα της βελτίωσης των αποτελεσμάτων της Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου. Τα μοντέλα πρόβλεψης που προτάθηκαν ποικίλουν ως προς τη δομή τους και τη διαδικασία εκτίμησης. Μια ολοκληρωμένη περιγραφή των κλασικών μεθόδων Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου παρουσιάζεται στην εργασία των Gross και Galiana [8].

Αρχικά προτάθηκαν μοντέλα πρόβλεψης της αιχμής του φορτίου. Η αιχμή φορτίου αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μια συνιστώσα φορτίου βάσης και μια συνιστώσα εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες. Τα μοντέλα πρόβλεψης αιχμής είναι απλά στη δομή τους και οι παράμετροί τους προσδιορίζονται με παλινδρόμηση, ωστόσο υπάρχει αδυναμία προσδιορισμού της ώρας εμφάνισης της αιχμής [1]. Ακολούθησαν τα μοντέλα πρόβλεψης καμπύλης φορτίου που διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά μοντέλα.

Τα στατικά μοντέλα που έχουν κατά καιρούς προταθεί στη βιβλιογραφία περιγράφονται από τη γενική εξίσωση :

$$z(t) = \sum_{i=1}^N a_i f_i(t) + v(t)$$

όπου t ανήκει στο χρονικό διάστημα τ , που περιλαμβάνει το πρόσφατο παρελθόν, το παρόν και το εγγύς μέλλον που επεκτείνεται μέχρι το χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης. Το $v(t)$ περιγράφει το σφάλμα μοντελοποίησης, η $f_i(\bullet)$ μια συνάρτηση του χρόνου, π.χ. ημιτονοειδής συνάρτηση και τα a_i τις παραμέτρους του μοντέλου που προσδιορίζονται με παλινδρόμηση ή εκθετική εξομάλυνση. Τα μοντέλα που προτείνονται έχουν απλή δομή και μικρή απαίτηση υπολογιστικού χρόνου αλλά χωρίς επαρκή απεικόνιση της στοχαστικής συσχέτισης με τις καιρικές μεταβολές με συνέπεια μεγάλα σφάλματα για απότομες καιρικές αλλαγές. Μια δεύτερη κλάση

στατικών μοντέλων βασίζεται στην ανάλυση φάσματος (spectral decomposition), όπου οι $f_i(\bullet)$ είναι οι ιδιοσυναρτήσεις που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης των χρονοσειρών φορτίου (μετά την απομάκρυνση περιοδικοτήτων και σταθερών).

Η εργασία του Christiaanse [2] χρησιμοποιεί εκθετική εξομάλυνση και αναπτύσσει μια τεχνική προσαρμογής της πρόβλεψης. Οι εβδομαδιαίες μεταβολές των ωριαίων φορτίων περιγράφονται ως μια περιοδική συνάρτηση του χρόνου (με περίοδο μιας εβδομάδας).

Οι Srinivasan και Pronovost [3] προτείνουν τέσσερα γραμμικά μοντέλα συσχέτισης πρώτης τάξης, με δεδομένα μόνο φορτία, για την πρόβλεψη της ωριαίας, ημερήσιας, εβδομαδιαίας και ετήσιας ζήτησης ενέργειας αντίστοιχα.

Τα δυναμικά μοντέλα πρόβλεψης φορτίου μπορούν να ταξινομηθούν σε μοντέλα ARMA και σε μοντέλα χώρου κατάστασης [8].

Οι Rahman και Baba [12] παρουσιάζουν ένα ερευνητικό πρόγραμμα, το οποίο άρχισε στη Virginia Tech με τη χορηγία του Virginia Center for Coal and Energy Research για να αναπτυχθούν απλά μοντέλα φορτίου και ένα αλγόριθμο πρόβλεψης φορτίου. Ο στόχος ήταν να βοηθηθούν οι ηλεκτρικές εταιρίες στη Βιρτζίνια έτσι ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις χωρητικότητας και να βελτιωθεί ο συντελεστής φορτίου του συστήματος. Οι προσπάθειές κατέληξαν στη κατασκευή ενός ενσωματωμένου διοικητικού προσομοιωτή για πρόβλεψη φορτίου (LFLM) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις ηλεκτρικές εταιρίες. Οι βασισμένοι στους κανόνες αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή των διάφορων λειτουργιών του προσομοιωτή. Τα κυριότερα στοιχεία είναι: 24-ωρη πρόβλεψη, θέρμανση νερού και μοντέλα φορτίων ψύξης, ελεγκτής φορτίου και πηγές δεδομένων.

Στην εργασία των Moghram και Rahman [13] παρουσιάζονται και συγκρίνονται πέντε διαφορετικές μέθοδοι Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου. Πρόκειται για τέσσερις στατιστικές μεθόδους : (α) πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, (β) στοχαστικών χρονοσειρών (μοντέλα ARMA, ARIMA), (γ)

εκθετικής εξομάλυνσης και (δ) χώρου κατάστασης με χρήση και φίλτρου Kalman, ενώ γίνεται σύγκριση με μια μέθοδο Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου που βασίζεται σε έμπειρα συστήματα [9].

Οι Lu et al [14] υλοποιούν ένα προσαρμοστικό μοντέλο τύπου Hammerstein, με ορθογώνια κλιμακωτή δομή για να προσομοιώσουν τη σχέση φορτίου - θερμοκρασίας. Τα σύνολα των ορθογωνίων βάσεων υπολογίζονται με μια τροποποιημένη διαδικασία ορθογωνιοποίησης τύπου Gram-Schmidt, ωστόσο η διαδικασία αυτή απαιτεί ένα προκαθορισμένο αριθμό συνόλων ορθογωνίων βάσεων και τιμές κατωφλίου του σφάλματος που χρησιμοποιείται κατά την προσαρμογή. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι τα μεγάλα σφάλματα είτε για μικρό αριθμό ορθογωνίων βάσεων είτε για μεγάλες τιμές κατωφλίου σφάλματος, καθώς και το πρόβλημα της ευαισθησίας του μοντέλου στη σειρά εισαγωγής των δεδομένων εισόδου που οδηγούν σε διαφορετικές προβλέψεις.

Οι Papalexopoulos και Hesteborg περιγράφουν στην εργασία τους [15] ένα μοντέλο Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου βασισμένο στη θεωρία της παλινδρόμησης που αργότερα υλοποιήθηκε και λειτούργησε on-line στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας της εταιρείας PG&E. Στην εργασία αυτή εισάγεται η μοντελοποίηση καμπυλών φορτίου αργιών χρησιμοποιώντας δυαδικές μεταβλητές, το μοντέλο θερμοκρασίας που διαμορφώνεται με βάση τα όρια της περιοχής θερμοκρασιών άνετης διαβίωσης (ζέστης και ψύχους). Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται με τη χρήση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Η επίδραση του σφάλματος πρόβλεψης των καιρικών συνθηκών στην πρόβλεψη φορτίου αμβλύνεται με τη χρήση μιας προτεινόμενης τεχνικής “ανάστροφου σφάλματος στις μεταβλητές”. Το πρόβλημα της υποεκτίμησης της πρόβλεψης του φορτίου αιχμής, αντιμετωπίζεται με τον διαχωρισμό της πρόβλεψης της χρονικά εξαρτώμενης ημερήσιας αιχμής φορτίου και του μεγίστου των ωριαίων προβλέψεων φορτίου.

Στην εργασία [17] οι Hubele και Cheng επικεντρώνονται στο διαχωρισμό των δεδομένων φορτίου και καιρικών συνθηκών σε ομάδες (clustering) ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Ο διαχωρισμός γίνεται με χρήση στατιστικών συναρτήσεων επιλογής τόσο ανά εποχή του χρόνου όσο και ανά ημέρα της εβδομάδος, ενώ ακολουθεί η επιμέρους Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου με χρήση γραμμικού

μοντέλου. Η φιλοσοφία του διαχωρισμού των περιόδων πρόβλεψης στο χρόνο είναι μια τεχνική που συναντούμε συχνά σε μεταγενέστερα άρθρα.

Οι Grady et al [18] ενίσχυσαν εκτενώς τον αρχικό προσαρμοστικό μη γραμμικό αλγόριθμο για πρόβλεψη φορτίου της επόμενης ώρας και τον έχουν εφαρμόσει στο TU Electric System Operating Center στο Ντάλας του Τέξας. Χρησιμοποιείται η τεχνική για να προβλέψει τα ωριαία φορτία για τις επόμενες πέντε ημέρες για τη λειτουργία του συστήματος και την δέσμευση των μονάδων. Τεκμηριώνουν τις προσθήσεις που γίνονται στον αλγόριθμο και επεξηγούν την απόδοση της πρόβλεψης χρησιμοποιώντας ιστορικά ωριαία στοιχεία φορτίου τεσσάρων ετών. Ένα σημαντικό όφελος του προσαρμοστικού αλγορίθμου είναι η δυνατότητα να προβλεφθούν οι καμπύλες φορτίου εκτός από τα καθημερινά μέγιστα φορτία. Οι χειριστές του συστήματος είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν τις καμπύλες για παλαιές διάφορες ώρες, για την επόμενη μέρα ή για τις επόμενες πέντε ημέρες, ακόμα και όταν τα μεμονωμένα ωριαία λάθη είναι μεγάλα. Σήμερα χρησιμοποιείται στο μοντέλο πρόβλεψης ο καιρός από μόνο μια θέση, αυτή του περιφερειακού αερολιμένα του Ντάλας. Μελλοντική έρευνα θα εστιαστεί στην ενσωμάτωση του καιρού από διάφορες θέσεις στο μοντέλο και στην επέκταση του αλγορίθμου ώστε να μπορεί να προβλέψει ταυτόχρονα περιφερειακά ηλεκτρικά φορτία του TU, και κατά συνέπεια να βελτιώσει περαιτέρω την δέσμευση των παραγωγικών μονάδων.

Η διαχείριση του φορτίου κατά τη διάρκεια της περιόδου μέγιστων φορτίων ή σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης, είναι ένας προκλητικός στόχος για τις περισσότερες λειτουργούσες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Η ακριβής βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου βοηθά στο να αποτραπεί η περιττή υπερφόρτωση του εξοπλισμού καθώς επίσης και η απώλεια φορτίου ή η σπατάλη φορτίου. Η ισχύς ενός μοντέλου πρόβλεψης φορτίου εξαρτάται από τα συλλεχθέντα στοιχεία. Ένα μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ιδιαίτερη περιοχή ή σύστημα και μπορεί να μην είναι κατάλληλο για παγκόσμια εφαρμογή. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα καλό μοντέλο πρόβλεψης μιας περιοχής, πρέπει να συλλεχθούν επαρκή δεδομένα: φορτίου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος ενός τοπικού υποσταθμού. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου, μπορούν να ελέγξουν τα φορτία πολλών σημαντικών υποσταθμών της περιοχής. Οι περισσότερες επιχειρήσεις έχουν επίσης μετεωρολογικούς σταθμούς με ένα τουλάχιστον σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με τον Satyendra Basu [23], μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός των στοιχείων του εποπτικού ελέγχου και των στοιχείων των μετεωρολογικών σταθμών, για να αναπτυχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης φορτίου. Μετά τη συλλογή επαρκών δεδομένων, μπορεί να αναπτυχθεί ένα σε πραγματικό χρόνο μοντέλο για να συλλέξει τα στοιχεία φορτίου και θερμοκρασίας και για να προβλέψει το φορτίο των μελλοντικών ωρών ενός υποσταθμού ή μιας περιοχής. Αυτό το σύστημα θα επιτρέπει στο προσωπικό να σχεδιάσει την ακολουθία όλων των διαδικασιών υπό καθημερινές συνθήκες, καθώς επίσης και κάτω από καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Οι Mbamalu και El-Hawary [27] προτείνουν τις διαδικασίες ελαχίστων τετραγώνων ή τις διαδικασίες Σταθμισμένων Επαναληπτικών Ελαχίστων Τετραγώνων [IRWLS] για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός εποχιακού πολλαπλασιαστικού autoregressive (AR) μοντέλου κατά την πρόβλεψη φορτίου ενεργειακών συστημάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ενός περιβάλλοντος αλληλεπιδρόντων υπολογιστών για τον υπολογισμό των παραμέτρων μιας εποχιακής πολλαπλασιαστικής AR διαδικασίας. Η μέθοδος περιλαμβάνει πέντε σημαντικά υπολογιστικά βήματα: το πρώτο καθορίζει τη σειρά της εποχιακής πολλαπλασιαστικής AR διαδικασίας, και το δεύτερο χρησιμοποιεί τις διαδικασίες ελαχίστων τετραγώνων ή τις IRWLS για να υπολογίσει τις βέλτιστες AR μη εποχιακές παραμέτρους του μοντέλου. Στο τρίτο βήμα λαμβάνει κανείς την ενδιάμεση σειρά με αντίστροφη πρόβλεψη, η οποία ακολουθείται από τη χρήση των διαδικασιών ελαχίστων τετραγώνων ή των IRWLS για τον υπολογισμό των βέλτιστων εποχιακών AR παραμέτρων. Το τελικό βήμα χρησιμοποιεί τις εκτιμώμενες παραμέτρους για να προβλέψει το μελλοντικό φορτίο. Η τεχνική πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Marquardt. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για την πρόβλεψη του ωριαίου φορτίου της επιχείρησης ηλεκτρισμού της Νέας Σκοτίας. Τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν είναι τεκμηριωμένα και σε σχέση με αυτά της μεθόδου Box & Jenkins. Είναι προφανές από τα αποτελέσματα του απόλυτου λάθους ότι η προτεινόμενη προσέγγιση έδωσε καλύτερα αποτελέσματα. Αναμένεται, τέλος, ότι το απόλυτο λάθος μπορεί να μειωθεί με μεταβολή της σταθεράς συντονισμού.

Οι Belzer και Kellogg [28] χρησιμοποιούν την κατανομή ακραίων τιμών [EVD], μαζί με τις προσομοιώσεις Monte Carlo, για να αναλύσουν πηγές

αβεβαιότητας στην πρόβλεψη των ετήσιων μέγιστων φορτίων ισχύος. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται στο φορτίο και τα καιρικά δεδομένα από 1984 έως 1986 για μια δημόσια εγκατάσταση κοντά στο Spokane, της Ουάσιγκτον. Η μεθοδολογία περιέχει μια προσέγγιση τεσσάρων βημάτων: 1) εκτίμηση ενός μοντέλου, που εξαρτάται από τον καιρό, καθημερινού μεγίστου φορτίου, 2) μοντελοποίηση των ιστορικών μέγιστων φορτίων, 3) εκτίμηση των παραμέτρων μιας ακραίας τιμής και 4) πρόβλεψη των σημείων πιθανότητας που συνδέονται με διαφορετικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Η ανάλυση του Carlo Monte χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει την αβεβαιότητα των διαταραχών στο εκτιμώμενο καθημερινό μοντέλο φορτίου. Υπολογίζεται μια χωριστή [EVD] για κάθε προσομοίωση Monte Carlo, και έπειτα χρησιμοποιούνται οι εκτιμώμενες EVD για να παράγουν μια σύνθετη κατανομή. Γίνονται διορθώσεις για την μικρή απόκλιση δειγμάτων στις εκτιμήσεις της μέγιστης πιθανότητας των παραμέτρων της EVD. Μια τεχνική έναρξης επεκτείνει την διαδικασία για να εξετάσει την αβεβαιότητα των παραμέτρων των δομικών του μοντέλου καθημερινού φορτίου. Η μέγιστη πρόβλεψη φορτίων είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στις περισσότερες λήψεις αποφάσεων των εγκαταστάσεων. Επειδή οι πιθανές δαπάνες των λαθών, σε κάθε κατεύθυνση, είναι μια σημαντική ανησυχία, αποδίδεται ιδιαίτερη αξία στη λήψη υγιών προβλέψεων. Εδώ εξετάζονται διάφορα δεδομένα της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου και παρουσιάζεται μια διαδικασία για την εκτίμησή τους κατά την πρόβλεψη. Η διαδικασία εστιάζει στον καιρό ως κύρια πηγή αβεβαιότητας, αλλά η μεθοδολογία ισχύει επίσης και για άλλες σημαντικές πηγές. Εν ολίγοις, οι πηγές αβεβαιότητας που εξετάζονται είναι οι εξής:

1. η αβεβαιότητα που συνδέεται με τα πιθανά μικρά δείγματα των ετήσιων καιρικών άκρων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των μέγιστων ηλεκτρικών φορτίων
2. η αβεβαιότητα που συνδέεται με τις πιθανολογικές διαταραχές των μοντέλων των καθημερινών μέγιστων φορτίων
3. η αβεβαιότητα που συνδέεται με τις παραμετρικές εκτιμήσεις που αφορούν τα καθημερινά μέγιστα φορτία με τις καιρικές μεταβλητές.

Κάθε πηγή αβεβαιότητας ποσοτικοποιείται σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες ετήσιες προβλέψεις μεγίστου φορτίου.

Οι Haida και Muto [30] παρουσιάζουν μια, βασισμένη στην παλινδρόμηση, μέθοδο πρόβλεψης καθημερινού μέγιστου φορτίου με μια τεχνική μετασχηματισμού. Για να γίνει το μοντέλο πρόβλεψης, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα πιο πρόσφατα στοιχεία. Αφ' ετέρου, υπάρχει μια προφανής εποχιακή αλλαγή του φορτίου που χαρακτηρίζεται ως μια μη γραμμική σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών και των φορτίων. Παρουσιάζεται μια τεχνική μετασχηματισμού για την εξέταση αυτών των χαρακτηριστικών στη πρόβλεψη φορτίου. Αυτή η τεχνική υιοθετεί μια λειτουργία μετασχηματισμού με μεθόδους μετατροπής και συμμετρικού μετασχηματισμού. Η αξιολόγηση της απόδοσης που χρησιμοποιεί πραγματικά στοιχεία καιρού και φορτίου στην επιχείρηση ηλεκτρισμού του Τόκυο [TEPCO] παρουσιάζει καλά αποτελέσματα. Η βασική τεχνική μετασχηματισμού που παρουσιάζεται, εφαρμόζεται και ελέγχεται στο βοηθητικό σύστημα πρόβλεψης μέγιστου φορτίου στο κεντρικό γραφείο διανομής της TEPCO. Στη συνέχεια, προγραμματίζεται να εφαρμοστεί η μετατροπή και ο συμμετρικός μετασχηματισμός στο βοηθητικό σύστημα. Αναμένεται ότι οι δύο αυτές μέθοδοι θα βελτιώσουν την ακρίβεια πρόβλεψης μέγιστου φορτίου περαιτέρω.

Στην εργασία των Fan και McDonald [31] προτείνεται ένα ARMA μοντέλο. Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται και ανανεώνονται on-line με τη χρήση αλγορίθμου σταθμισμένων επαναληπτικών ελαχίστων τετραγώνων (weighted recursive least squares).

Οι Barakat και Al-Qasem [49] παρουσιάζουν μια νέα και συστηματική προσέγγιση στη μοντελοποίηση των δεδομένων ηλεκτρικού φορτίου. Αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί στην ανάλυση και πρόβλεψη των εβδομαδιαίων δεδομένων φορτίου σχετικά με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του Ριάντ, το οποίο είναι γρήγορα αναπτυσσόμενο και λειτουργεί στην κεντρική περιοχή της Σαουδικής Αραβίας. Τα αποτελέσματα που βγήκαν από την προτεινόμενη προσέγγιση αποδείχθηκαν επαρκή σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από τις κλασσικές μεθόδους χρονοσειράς. Το πλεονέκτημα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι ότι είναι απλή να χρησιμοποιηθεί και δίνει ακριβέστερη διορατικότητα στη διαδικασία ανάλυσης του ηλεκτρικού φορτίου.

Οι Charytoniuk et al [52] παρουσιάζουν μια νέα προσέγγιση στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου με την εφαρμογή μη παραμετρικής

παλινδρόμησης. Η μέθοδος προέρχεται από ένα μοντέλο φορτίου υπό τη μορφή συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του φορτίου και των παραγόντων που έχουν επιπτώσεις στο φορτίο. Η πρόβλεψη φορτίου γίνεται όταν είναι δεδομένα ο χρόνος, οι καιρικές συνθήκες και άλλες επεξηγηματικές μεταβλητές. Αυτή η πρόβλεψη μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από ιστορικά στοιχεία ως τοπικός μέσος όρος των παρελθόντων φορτίων με το μέγεθος ή την περιοχή και τα συγκεκριμένα βάρη, στα φορτία που καθορίζονται από έναν πυρήνα πολλών και μεταβλητών προϊόντων. Η ακρίβεια της μεθόδου στηρίζεται στην επαρκή αντιπροσώπευση των πιθανών μελλοντικών συνθηκών από ιστορικά στοιχεία, αλλά μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα ένα μέτρο για να ανιχνευθεί οποιαδήποτε αναξιόπιστη πρόβλεψη. Η προτεινόμενη διαδικασία απαιτεί λίγες παραμέτρους που μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από ιστορικά στοιχεία με την εφαρμογή της τεχνικής της διασταύρωσης στοιχείων.

Οι Douglas et al [54] παρουσιάζουν μια μεθοδολογία βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου που είναι κατάλληλη για λειτουργικές μελέτες προγραμματισμού συστημάτων ηλεκτρισμού. Χρησιμοποιείται η Μπεϋσιανή εκτίμηση για να κάνει προβλέψεις πολλαπλών βημάτων για τα μέγιστα φορτία με τη βοήθεια των προβλέψεων μέγιστης και μέσης θερμοκρασίας, ως επεξηγηματικές μεταβλητές. Η επίδραση των λαθών στη πρόβλεψη της θερμοκρασίας διαφέρουν με την εποχή του χρόνου. Ο χειμώνας και η άνοιξη έχουν παρόμοιες ιδιαιτερότητες, το καλοκαίρι είναι εντυπωσιακά διαφορετικό. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ της πρόβλεψης φορτίου με πραγματική θερμοκρασία σε σχέση με αυτήν με την προβλεφθείσα θερμοκρασία, μπορεί να ποικίλει από τριάντα έως πενήντα τοις εκατό. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι θερινές σταθερές αποκλίσεις είναι οι μικρότερες από οποιαδήποτε άλλη εποχή. Ο λόγος για αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θερινό φορτίο εξαρτάται από τον καιρό, σε αντίθεση με το χειμερινό. Τέλος, θεωρείται ότι μπορούν να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα, αν δοθεί περισσότερη προσοχή στον προσδιορισμό του μοντέλου.

Οι αλλαγές στη βιομηχανία εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα η πρόοδος προς απορύθμιση της αγοράς έχουν δημιουργήσει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η απορύθμιση έχει προσδιοριστεί ως βασικό στοιχείο για την πρόβλεψη και είναι ίσως

η περιοχή που μπορεί το περισσότερο όφελος από την εφαρμογή της προηγμένης ανάλυσης χρονοσειράς. Οι Infield και Hill [57] παρουσιάζουν μια νέα προσέγγιση στην απορύθμιση, βασισμένη σε σταθερό διάστημα, ή σε βελτιωτικές τεχνικές. Οι προβλέψεις που παράγονται με αυτό τον τρόπο συγκρίνονται με τις συμβατικές προσεγγίσεις. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η νέα μέθοδος είναι ελπιδοφόρα και αξίζει περαιτέρω ανάπτυξη. Η μέθοδος αυτή βοήθησε στη μείωση του λάθους rms της γενικής πρόβλεψης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε 12% σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Οι Valenzuela et al [68] εξετάζουν την χρήση των προτύπων κοστολόγησης παραγωγής για το προγραμματισμό βραχυπρόθεσμων διαδικασιών. Σε αυτήν την περίοδο ήταν διαθέσιμες μια ακριβής πρόβλεψη της ωριαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του ορίζοντα μελέτης και η γνώση των αρχικών καταστάσεων λειτουργίας κάθε παραγωγικής μονάδας. Εξετάζονται οι αβεβαιότητες στο κόστος παραγωγής και την πρόσθετη δαπάνη ως αποτέλεσμα των διαθεσιμότητων των γεννητριών και των ωριαίων φορτίων. Τα μέτρα αυτών των αβεβαιοτήτων λαμβάνονται από μια ανάλυση των πραγματικών δεδομένων των ωριαίων φορτίων δύο ετών. Χρησιμοποιείται η προσομοίωση του Monte Carlo για να υπολογίσει τις συνεισφορές των αβεβαιοτήτων. Διαπιστώνεται ότι αγνοώντας την πρόβλεψη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και το συσχετισμό μεταξύ των ωριαίων φορτίων οδηγεί σε ανακριβή πρόβλεψη του κόστους και ότι η αβεβαιότητα του φορτίου αποτελεί μια σημαντική μερίδα του κόστους παραγωγής. Οι αρχικές καταστάσεις των παραγωγικών μονάδων έχουν επίσης μια σημαντική επίδραση στα κόστη. Υπάρχουν τέσσερα σημαντικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα του Monte Carlo.

α) διαπιστώνεται ότι για την ιδιαίτερη ημέρα, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας και του συσχετισμού μεταξύ των ωριαίων φορτίων προκαλεί μια καλύτερη εκτίμηση των αναμενόμενων κοστών παραγωγής

β) οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις της αναμενόμενης τιμής και του κόστους παραγωγής εξαρτώνται από την αρχική κατάσταση των παραγωγικών μονάδων

γ) παρατηρείται ότι οι εκτιμήσεις των βραχυπρόθεσμων κοστών παραγωγής μπορούν να γίνουν ακριβέστερες με τη χρήση των προβλέψεων για τη θερμοκρασία, το γνωστό φορτίο για την τρέχουσα ώρα και τη γνώση του συσχετισμού που υπάρχει μεταξύ των ωριαίων φορτίων

δ) διαπιστώνεται ότι η αβεβαιότητα του φορτίου είναι ένα σημαντικό συστατικό της συνολικής αβεβαιότητας που συνδέεται με τα κόστη παραγωγής για τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις.

Επομένως, οι προσπάθειες προς ακριβέστερη πρόβλεψη φορτίου μπορούν να αποδώσουν με τη μείωση του λάθους στις προβλέψεις στα κόστη παραγωγής. Η ενισχυμένη πρόβλεψη φορτίου μπορεί να περιλάβει την εκτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας λεπτομερέστερα καθώς επίσης και των παραγόντων όπως η υγρασία, τα σύννεφα και η ταχύτητα του ανέμου. Στην πράξη, αλλαγές στη θερμοκρασία και επομένως στο φορτίο, και στη διαθεσιμότητα παραγωγής οδηγούν σε επαναπρογραμματισμό της παραγωγής.

Ο Amjadi [71] έχει αναπτύξει μια νέα προσέγγιση για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου, η οποία ενσωματώνει τη μοντελοποίηση χρονικών σειρών της ARIMA με την γνώση πεπειραμένων ανθρώπινων χειριστών. Για να εφαρμοστεί αυτή η προσέγγιση, που ονομάζεται “τροποποιημένη ARIMA”, μελετάται στατιστικά η ζήτηση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει τα ωριαία φορτία και το καθημερινό μέγιστο φορτίο του δικτύου ισχύος του Ιράν. Έχει αποδειχθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές, όπως Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων ANN ή ARIMA. Εκτός από τα ωριαία φορτία, η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια και το καθημερινό μέγιστο φορτίο. Η μέθοδος “τροποποιημένη ARIMA” συνδυάζει την εκτίμηση των χειριστών με τα δεδομένα θερμοκρασίας και φορτίου. Από μαθηματική άποψη, αυτή η μέθοδος υιοθετεί την εκτίμηση των χειριστών ως αρχική πρόβλεψη. Κατόπιν συνδυάζει αυτή την αρχική πρόβλεψη με τα δεδομένα θερμοκρασίας και φορτίου σε μια διαδικασία παλινδρόμησης πολλών μεταβλητών για να ληφθεί μια καλύτερη πρόβλεψη. Για αυτόν το λόγο, η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι καλύτερη από την ARIMA, δεδομένου ότι στην ARIMA δεν υπάρχει αυτό το αρχικό σημείο. Αυτό ισχύει επίσης για τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα [ANN] και Ασαφή Νευρωνικά Δίκτυα [FNN], καθώς η εκπαίδευσή τους αρχίζει με τυχαίες αρχικές σταθμίσεις. Επίσης, η ακρίβεια της μεθόδου “τροποποιημένη ARIMA” αυξάνεται αν υπάρχει καλύτερη εκτίμηση των χειριστών. Με άλλα λόγια, με καλύτερη αρχική πρόβλεψη, αυξάνεται η ακρίβεια της τελικής πρόβλεψης. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα μπορεί να είναι ελκυστικό για τα κέντρα ελέγχου των δικτύων ισχύος, δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν ειδικοί χειριστές στα κέντρα ελέγχου, γεγονός που

μπορεί να ενισχύσει την αποδοτικότητα της μεθόδου αυτής. Η ερευνητική εργασία βρίσκεται σε εξέλιξη προκειμένου: 1)να ενσωματωθούν περισσότερα καιρικά στοιχεία, όπως η υγρασία, 2)να ασαφοποιηθεί το καιρικό πρότυπο, 3)να καθοριστεί ένα χωριστό μοντέλο για τις ισλαμικές περιπτώσεις και 4)να προβλεφθεί ο χρόνος του καθημερινού μέγιστου φορτίου.

Οι Liu et al [77] παρουσιάζουν μια μέθοδο τοποθέτησης μετρητών, η οποία αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η τοποθέτηση των μετρητών γίνεται χρησιμοποιώντας μια ευρηματική μέθοδο. Στο δεύτερο στάδιο, υπολογίζεται το διάστημα εμπιστοσύνης για να καθοριστεί εάν οι μετρητές δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, στην περίπτωση που τα φορτία ποικίλλουν μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου ορίου. Η ανάλυση του συστήματος δειγμάτων και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζουν ότι η προσέγγιση είναι αποδοτική για την εύρεση δοκιμαστικών θέσεων για τους μετρητές. Επίσης εξετάζονται οι πραγματικοί περιορισμοί εφαρμογής όπως η εφεδρεία αποτυχίας των μετρητών, η διαθεσιμότητα του διαστήματος, οι αυτοματοποιημένες θέσεις διακοπών και τα μη ισορροπημένα συστήματα. Η μέθοδος τοποθέτησης μετρητών για την εκτίμηση φορτίων μπορεί να επεκταθεί εύκολα και για να τοποθετήσει μετρητές για την εκτίμηση της κατάστασης των κυκλωμάτων (SE, State Estimation).

Οι Ruzic et al [78] παρουσιάζουν έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο βασισμένο στην καιρική παλινδρόμηση για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου, ο οποίος έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας της Σερβίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από δύο κύρια βήματα. Η συνολική καθημερινή ενέργεια προβλέπεται ανεξάρτητα, σε πρώτη φάση, ενώ τα ωριαία φορτία προβλέπονται στη συνέχεια. Όλες οι παράμετροι μοντελοποίησης υπολογίζονται αυτόματα και ενημερώνονται χρησιμοποιώντας τα πραγματοποιημένα δεδομένα της περιόδου προσδιορισμού. Αυτή η περίοδος είναι ένα σύνολο σχεδίων από την βάση δεδομένων με συνθήκες καιρού και φορτίου, παρόμοιες με αυτές που αναμένονται για την προβλεπόμενη ημέρα. Ως μέτρο για την ομοιότητα χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση. Από το 1991 έχει χρησιμοποιηθεί στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας της Σερβίας ένα πακέτο προγραμματισμού, που είναι βασισμένο στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται, για να προβλέψει τα 24-ωρα φορτία για μια έως επτά ημέρες.

Οι Contreras et al [79] προτείνουν δύο πρότυπα ARIMA για να προβλέψουν τις ωριαίες τιμές στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας της Ισπανίας και της Καλιφόρνια αντίστοιχα. Το ισπανικό πρότυπο χρειάζεται 5 ώρες για να προβλέψει τις μελλοντικές τιμές, σε αντιδιαστολή με τις 2 ώρες που απαιτούνται από το πρότυπο της Καλιφόρνια. Αυτές οι διαφορές μπορούν να απεικονίσουν διαφορετικές δομές και προσφορές. Το μέσο λάθος στην ισπανική αγορά είναι περίπου 10% με και χωρίς επεξηγηματικές μεταβλητές, και περίπου 5% στη σταθερή περίοδο της αγοράς της Καλιφόρνια (περίπου 11% εξετάζοντας τρεις εβδομάδες, και χωρίς επεξηγηματικές μεταβλητές). Στην Ισπανία, οι επεξηγηματικές μεταβλητές απαιτούνται μόνο στους μήνες με υψηλό συσχετισμό μεταξύ της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής παραγωγής και της τιμής. Σε οποιοδήποτε άλλο μήνα, η επίδραση ακυρώνεται έξω. Και για τις δύο αγορές, αυτά είναι λογικά λάθη, λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθετη φύση των σειρών χρόνου-τιμών.

**ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΜΠΕΙΡΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Οι Rahman και Bhatnagar παρουσιάζουν στην εργασία τους [9] μια πρώτη προσέγγιση στην εφαρμογή εμπειρών συστημάτων για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου. Αναπτύσσουν δύο αλγόριθμους, έναν για εξάωρη και έναν για εικοσιτετράωρη πρόβλεψη, που βασίζονται σε εμπειρικούς κανόνες που προκύπτουν έπειτα από ανάλυση της συμπεριφοράς του φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους. Τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη για τη δημιουργία των εμπειρικών κανόνων είναι η εποχή του έτους, η ημέρα της εβδομάδος, η θερμοκρασία και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου που προτείνεται είναι η μικρού μεγέθους βάση δεδομένων που απαιτείται - ωριαία δεδομένα 5 εβδομάδων μόνο.

Στην εργασία των Jabbour et al [10] αναπτύσσεται ένα έμπειρο σύστημα για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου που κάνει χρήση μιας βάσης ιστορικών δεδομένων φορτίου και καιρικών μεταβλητών των τελευταίων δέκα ετών. Το μοντέλο που προτείνεται αποτελείται από τη βάση δεδομένων και από μια βάση κανόνων. Το φορτίο αναλύεται σε τρεις συνιστώσες : (α) το στατικό φορτίο που περιλαμβάνει τις μεταβλητές που είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, (β) το υπόλοιπο φορτίου, που αποτελεί την εξαρτώμενη από τον καιρό συνιστώσα και (γ) τη συνιστώσα του θορύβου που προσομοιώνει τις τυχαίες διακυμάνσεις του φορτίου. Στη διαμόρφωση των κανόνων σημαντικό ρόλο παίζει η ώρα της ημέρας, όπως και η ημέρα του χρόνου. Σε δεύτερη φάση γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης, διαχωρισμός και αξιολόγηση των σφαλμάτων.

Οι Matthews et al [11] παρουσιάζουν μια νέα διαδικασία για την ανάπτυξη μεσοπρόθεσμων προβλέψεων. Οι προβλέψεις προετοιμάστηκαν από μια βάση δεδομένων ωριαίων φορτίων που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τον Hannan's

Efficient Estimator. Αυτό ήταν η πρώτη σημαντική προσπάθεια πρόβλεψης στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο εκτιμητής. Οι συγκρίσεις των προβλέψεων έδειξαν ότι η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας έδωσε ακριβέστερες προβλέψεις μηνιαίας ικανότητας. Το λάθος πρόβλεψης μειώθηκε κατά δύο τρίτα σε σχέση με τη διαδικασία Box-Jenkins, μια γενικά αποδεκτή μέθοδος για τη μεσοπρόθεσμη μοντελοποίηση. Το μοντέλο προσπαθεί να παραλάβει τις επιδράσεις ενός άσχημου καιρού και άλλων επεμβάσεων, μέσω της τοποθέτησης των κανόνων ARIMA, ιδιαίτερα του κινούμενου μέσου όρου. Θεωρείται ότι οι προηγούμενες προσπάθειες για ομαλοποίηση των βάσεων δεδομένων των ωριαίων φορτίων είναι ανεπαρκείς. Συγκεκριμένα, τα υπάρχοντα μοντέλα αγνοούν τον τμηματικό συσχετισμό, που αποδίδεται στην αποτυχία του μοντέλου ωριαίας παλινδρόμησης να παραλάβει τα κοινωνικά, δημογραφικά και εργασιακά στοιχεία. Η διαδικασία Hannan παράγει αποδοτικές εκτιμήσεις, λαμβάνοντας υπόψη το σύνθετο τμηματικό συσχετισμό της πηγής των διαταραχών. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των ωριαίων παλινδρομήσεων φορτίου/ καιρού, εφαρμόστηκαν παραδοσιακές στατιστικές διαδικασίες για την εκτίμηση του μοντέλου. Κατά τη διάρκεια αυτών των προσπαθειών, ήταν εμφανές ότι αυτές οι τεχνικές ήταν ανεπαρκείς σε σχέση με τη διαδικασία Hannan στην εκτίμηση των κατάλληλων συντελεστών τους, τον υπολογισμό των διαγνωστικών στατιστικών, κλπ. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η διαδικασία Hannan έδωσε ένα ανώτερο μοντέλο και μια καλύτερη πρόβλεψη. Περιγράφηκε ακόμα η διαδικασία για κανονικοποίηση του καιρού μιας βάσης δεδομένων ωριαίου φορτίου. Η διαδικασία εφαρμόστηκε στα ωριαία φορτία τριών πολύ διαφορετικών ηλεκτρικών συστημάτων. Από αυτές τις τρεις βάσεις δεδομένων, παρήχθησαν ετήσιες Box-Jenkins προβλέψεις των μηνιαίων αιχμών, για τα έτη 1983 έως 1986. Αυτές οι προβλέψεις συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις Box-Jenkins που γίνονται από πραγματική βάση δεδομένων. Σε 11 από τις 12 συγκρίσεις πρόβλεψης, ο απλός μέσος όρος μηνιαίων λαθών πρόβλεψης κατά τη διάρκεια κάθε ημερολογιακού έτους, μειώθηκε κατά σχεδόν 50% ή και περισσότερο. Σε 9 από τις 12 των περιπτώσεων το λάθος μειώθηκε πάνω από 66%. Το μέσο απόλυτο λάθος 11 από 12 προβλέψεις μειώθηκε κατά 20% ή και περισσότερο. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων πρόβλεψης έδειξαν ότι η διαδικασία Hannan ανέπτυξε προβλέψεις πολύ ανώτερες στην ακρίβεια από εκείνες που αναπτύσσονται από τις παραδοσιακές τεχνικές.

Οι Ho et al [16] αναπτύσσουν ένα, βασισμένο στη γνώση, ειδικό σύστημα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Το αναπτυγμένο σύστημα γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού PROLOG, χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων πέντε ετών. Έτσι καθιερώνονται έντεκα τύποι ημερών για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ταϊβάν. Ο τύπος μιας ιδιαίτερης ημέρας, της οποίας τα ωριαία φορτία πρόκειται να προβλεφθούν, μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα από ειδικό σύστημα μέσω απλών διαλόγων μεταξύ του χρήστη και του συστήματος. Προσεκτικά εξετάζεται και η επίδραση των καιρικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία και η υγρασία στην πρόβλεψη φορτίου. Μελετάται επίσης η επίδραση της θερμικής συγκέντρωσης. Το προτεινόμενο έμπειρο σύστημα έχει εφαρμοστεί για την πρόβλεψη των ωριαίων φορτίων της επιχείρησης ηλεκτρισμού της Ταϊβάν κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους. Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα πραγματικά φορτία και είναι πιο ακριβή σε σχέση με εκείνα από την μέθοδο Box-Jenkins. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το ειδικό σύστημα λαμβάνει υπόψη διάφορους τύπους ημέρας ενώ η μέθοδος Box-Jenkins δεν το κάνει. Δεδομένου ότι το ειδικό σύστημα είναι πολύ εύκαμπτο όσον αφορά στην ενημέρωση των τύπων ημέρας, αναμένεται ότι το αναπτυγμένο σύστημα μπορεί να χρησιμεύσει ως ένας πολύτιμος βοηθός στους χειριστές του συστήματος στην εκτέλεση των καθηκόντων τους για πρόβλεψη καθημερινών φορτίων.

Η εργασία των Rahman και Hazim [25] προτείνει ένα υβριδικό μοντέλο εμπειρικού συστήματος και στατιστικής μεθόδου για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου. Σκοπός της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός μοντέλου ανεξάρτητου από την περιοχή εφαρμογής της πρόβλεψης, που θα υπολογίζει τη σχέση φορτίου με τις καιρικές συνθήκες. Εξετάζεται επίσης, η δυνατότητα χρησιμοποίησης τοπικών χαρακτηριστικών και η αποτύπωση της εμπειρίας χειριστή μέσω καθορισμένων κανόνων, με στόχο τη βελτίωση των προβλέψεων. Η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό ιστορικών δεδομένων, παρά μόνο αυτών της τελευταίας τριετίας.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η ανάπτυξη μοντέλων Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου με Νευρωνικά Δίκτυα [NN] άρχισε το 1990. Οι Park et al [19] εφάρμοσαν ένα NN με τρία στρώματα (layers) και τον κανόνα δέλτα για την εκπαίδευσή του. Το NN έδωσε ακριβείς προβλέψεις για ωριαία φορτία, φορτίο αιχμής και ημερήσια ζήτηση. Το μέσο σφάλμα πρόβλεψης ήταν πολύ ικανοποιητικό σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι Peng et al [20], βασιζόμενοι στη γνωστή διαφοροποίηση της καμπύλης φορτίου ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας, χώρισαν τα ιστορικά δεδομένα δύο ετών σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της ημέρας της εβδομάδας. Έδειξαν επίσης ότι η επίδοση του Νευρωνικού Δικτύου εξαρτάται από την επιλογή των περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευσή του.

Ενδιαφέρον είχε και η προσέγγιση των Lee et al [21] στο πρόβλημα της Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου. Στην εργασία αυτή προτείνεται ο διαχωρισμός των ημερήσιων καμπυλών φορτίου σε δύο κατηγορίες, αυτή που αντιστοιχεί στα Σαββατοκύριακα (Σάββατο-Κυριακή-Δευτέρα) και στις υπόλοιπες ημέρες της εβδομάδος (Τρίτη-Παρασκευή).

Οι Chen et al [22] χρησιμοποίησαν ένα μη πλήρως συνδεδεμένο Νευρωνικό Δίκτυο που αποτελείται από ένα βασικό NN και τρία βοηθητικά. Το βασικό NN δίνει τη βασική πρόβλεψη. Τα βοηθητικά NN υπολογίζουν τη συναρτησιακή σχέση του φορτίου με διάφορες ομάδες μεταβλητών εισόδου όπως θερμοκρασία, ημέρα της εβδομάδας κ.ά.

Οι Peng et al [24] χρησιμοποιούν μόνο ιστορικά δεδομένα φορτίου σαν εισόδους σε ένα NN τύπου ADALINE. Η χρονοσειρά του φορτίου επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες, χρησιμοποιώντας φασματική ανάλυση : τη βασική συνιστώσα

φορτίου και τις συνιστώσες υψηλής και χαμηλής συχνότητας. Το προτεινόμενο Νευρωνικό Δίκτυο προβλέπει τις επιμέρους συνιστώσες που αθροίζονται για την τελική πρόβλεψη φορτίου. Το σφάλμα πρόβλεψης φορτίου, για χρονικό ορίζοντα μιας εβδομάδας είναι 3,4%.

Οι Lu et al [26] απέδειξαν ότι η δομή του NN για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου εξαρτάται από το σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται και εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της ταυτόχρονης πρόβλεψης των μέσων ωριαίων φορτίων του επόμενου 24ωρου με Νευρωνικά Δίκτυα.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή ενός μοντέλου Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου με χρήση NN στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας της εταιρείας PG&E περιγράφεται από τους Papalexopoulos et al [29]. Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται στην υλοποίηση του μοντέλου ώστε να αντιμετωπίζει το φορτίο αργών. Οι προβλέψεις φορτίου έχουν μικρότερο σφάλμα σε σχέση με αυτές του μοντέλου παλινδρόμησης.

Μια εναλλακτική μέθοδος πρόβλεψης φορτίου αργιών από αυτή που προτείνεται στην εργασία [29] παρουσιάζεται στην εργασία των Mohammed et al [32]. Στην εργασία αυτή προτείνεται η χρήση ιστορικών δεδομένων των αντιστοίχων αργιών καθώς και των κοντινότερων Σαββατοκύριακων της τελευταίας πενταετίας, για την πρόβλεψη του φορτίου μιας αργίας. Παρόμοια λογική εφαρμόζεται για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου ημερών με απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Το μοντέλο Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου που προτείνουν οι Khotanzad et al [36] είναι ένας συνδυασμός διαφόρων Νευρωνικών Δικτύων που εκμεταλλεύονται τα ωριαία, ημερήσια και εβδομαδιαία χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου. Η τελική πρόβλεψη συνδυάζει τις εξόδους των NN μέσω προσαρμοστικών φίλτρων (adaptive filters). Εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής των θερμοκρασιακών δεδομένων εισόδου, ενώ το προτεινόμενο μοντέλο αποδεικνύεται ιδιαίτερα σταθερό στην απόκρισή του. Σε μεταγενέστερες εργασίες της ίδιας ερευνητικής ομάδας, προτείνεται η πρόβλεψη της θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο Νευρωνικό Δίκτυο, να γίνεται με χρήση ενός άλλου NN (Khotanzad et al) [38].

Σε δύο πιο πρόσφατες εργασίες στην περιοχή της Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου, οι Chow και Leung [37] προτείνουν ένα μοντέλο NN που χρησιμοποιεί μια μέθοδο αντιστάθμισης των καιρικών μεταβλητών και θεωρεί την κατανάλωση φορτίου ως μια μη στάσιμη χρονοσειρά, ενώ οι Lamedica et al [43] προτείνουν μεθοδολογία για την αντιμετώπιση της Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου ημερών με “ανώμαλη” καμπύλη φορτίου. Οι “ανώμαλες” ημέρες εντοπίζονται μέσω μιας διαδικασίας διαχωρισμού των καμπυλών φορτίου σε ομάδες, με τη χρήση αλγορίθμου αυτοοργάνωσης τύπου Kohonen (self organizing map), ενώ τα επιλεγμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται ακολούθως ως είσοδοι σε NN για να ολοκληρωθεί η Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου.

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ηλεκτρικών φορτίου είναι ένα θέμα με σημαντικό ενδιαφέρον για τον προγραμματισμό της ενεργειακής παραγωγής και της διανομής. Οι Piras et al [39] καταδεικνύουν τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων ως εναλλακτική για τις κλασσικές στατιστικές μεθόδους, σε επίπεδο ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Εντούτοις, εξακολουθεί να λείπει μια κοινή αρχιτεκτονική που να είναι ικανή να προβλέψει το φορτίο σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά καμπύλης φορτίου και κλίματος. Εδώ συζητείται μια ετερογενής αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου που αποτελείται: α) από ένα μη επιτηρούμενο μέρος, δηλαδή ένα νευρωνικό αέριο, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της διαδικασίας στα υπο-μοντέλα βρίσκοντας τοπικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στα στοιχεία και που προτείνοντας μεταβλητές παλινδρόμησης, και β) από ένα επιτηρούμενο, δηλαδή ένα πολυστρωματικό perceptron, ο οποίος εκτελεί την προσέγγιση της λειτουργίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αθροίζονται έπειτα από έναν σταθμισμένο ασαφή μέσο όρο, που επιτρέπει μια ομαλή μετάβαση από το ένα υπο-μοντέλο στο άλλο. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής καταδεικνύεται από την πρόβλεψη φορτίου (για τις επόμενες δύο ημέρες) των πέντε διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών του συστήματος Ενέργειας Δυτικής Ελβετίας [EOS] και του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου του.

Οι Liu et al [40] σε μια συγκριτική μελέτη τριών μεθόδων Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου προχωρούν σε πρόβλεψη φορτίου για το επόμενο λεπτό έως

εικοσάλεπτο. Οι προβλέψεις χρησιμοποιούνται στον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC). Οι τρεις μέθοδοι που συγκρίνονται είναι ένα Νευρωνικό Δίκτυο, ένα μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης και ένα μοντέλο ασαφούς NN. Τα δύο Νευρωνικά Δίκτυα έχουν συγκριτικά μικρότερο σφάλμα πρόβλεψης.

Οι Dash et al [44] παρουσιάζουν μια νέα on-line τεχνική πρόβλεψης φορτίου χρησιμοποιώντας ένα νευρωνικό δίκτυο λειτουργικών συνδέσεων. Το μοντέλο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου συνδυάζει το γνωστό αυτομειούμενο μοντέλο χρονικών σειρών μέσου όρου με τη θεωρία του επίτεδου συνολικού υπολογισμού. Η πρόβλεψη φορτίου λειτουργικής σύνδεσης, που είναι βασισμένη στο δίκτυο, παράγει μια γερή και ακριβή σε πραγματικό χρόνο (on-line) πρόβλεψη και είναι σε θέση να λαμβάνει τις καιρικές και εποχιακές αλλαγές χρησιμοποιώντας έναν προσαρμοστικό μηχανισμό, που υπάρχει στο δίκτυο. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που επιτυγχάνονται, σε συνδυασμό με δεδομένα φορτίου από μια τυπική εγκατάσταση στη Βιρτζίνια των ΗΠΑ, αποκαλύπτουν την ανώτερη απόδοση του αυτόματου και ενισχυμένου δικτύου στο να προβλέψει το φορτίο για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών.

Το μοντέλο πρόβλεψης φορτίου ενός συστήματος είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για λήψη αποφάσεων για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σήμερα. Οι AlFuhaid et al [45] παρουσιάζουν μια εφαρμογή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων [ANN] στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Προτείνεται η χρήση ενός σειριακού αλγορίθμου εκπαίδευσης σε συνδυασμό με το ιστορικό φορτίο και τα καιρικά δεδομένα για την πρόβλεψη φορτίου ανά μισή ώρα (για τις επόμενες 24 ώρες). Αυτός ο σειριακός αλγόριθμος νευρωνικών δικτύων CANN περιλαμβάνει την πρόβλεψη αιχμής, ελαχίστου, και της καθημερινής ενέργειας ως πρόσθετα δεδομένα εισόδου για το στάδιο οριακής πρόβλεψης. Αυτά τα πρόσθετα δεδομένα εισόδου προβλέπονται χρησιμοποιώντας το αρχικό μοντέλο ANN. Τα δίκτυα εκπαιδεύονται και εξετάζονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του Κουβέιτ. Το μέσο απόλυτο λάθος πρόβλεψης μειώνεται από 3,367% σε 2,707% με την εφαρμογή του CANN σε σύγκριση με το συμβατικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η αναπτυγμένη προσέγγιση πρόβλεψης είναι αποτελεσματική και δείχνει τη δυνατότητα της μεθοδολογίας για οικονομικές εφαρμογές. Παρατηρείται ότι το μέσο απόλυτο λάθος πρόβλεψης βελτιώνεται κατά 28,9%, ενώ και το μέγιστο απόλυτο λάθος κατά 54,7%.

Το κόστος παραγωγής μιας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει από ώρα σε ώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με τις παραγωγικές μονάδες που είναι ανοικτές. Το κόστος ενός λάθους πρόβλεψης σε μια συγκεκριμένη ώρα της ημέρας σχετίζεται με το πρόσθετο κόστος παραγωγής εκείνη την ώρα. Οι Choueiki et al [46] χρησιμοποιούν αρχικά τους αναπτυσσόμενους κανόνες, αναγνωρίζουν την χρονική μεταβλητότητα του κόστους, κατά την περίοδο με τη λάθος πρόβλεψη, σε 24 ώρες και περιγράφουν μια διαδικασία εκπαίδευσης για την ενσωμάτωση αυτής της μεταβλητότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες υποθέσεις, καταδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της διαδικασίας σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων κατά την εκπαίδευση ενός μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [STLF]. Το μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων [NNWLS] ξεπερνά σαφώς το πρότυπο Νευρωνικού Δικτύου Ελαχίστων Τετραγώνων [NNLS] κατά τη διάρκεια των περιόδων μεγίστου φορτίου και για τα δύο κριτήρια, και κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου για το κριτήριο του κόστους. Αυτά τα αποτελέσματα προτείνουν να μελετηθεί περαιτέρω η διαδικασία σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων από τις εγκαταστάσεις, που δοκιμάζονται από μεγάλες αλλαγές στα σχεδιαγράμματα των ενεργειακών δαπανών τους, και τη χρήση νευρωνικών δικτύων για την επίλυση του προβλήματος Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου [STLF]. Σημειώνεται ότι οι τιμές των σταθερών βαρών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης του μοντέλου NNWLS μπορούν να μην είναι η καλύτερη επιλογή για την απεικόνιση του κόστους στην περίοδο του λάθους. Εντούτοις, με τις ωριαίες ενεργειακές δαπάνες να χρησιμοποιούνται ως βάρη, παρουσιάζεται το πιθανό όφελος από τη χρήση μιας προσέγγισης εκπαίδευσης, βασισμένης στο κόστος, σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Εάν χρησιμοποιηθούν τα βάρη που είναι προτιμητέα στις ωριαίες ενεργειακές δαπάνες, απαιτείται έρευνα για να επιτύχει μια καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ των λαθών πρόβλεψης και των λειτουργικών δαπανών.

Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου είναι ένα ουσιαστικό συστατικό στις διαδικασίες μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης. Όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν αυτές τις προβλέψεις στο σχεδιασμό των λειτουργιών τους. Οι Choueiki [47] καταδεικνύουν το πώς ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί



με επιτυχία για την εύρεση λύσης του προβλήματος Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου [STLF]. Μια συγκριτική μελέτη οδηγεί στη μέγιστη απόδοση ενός "σχεδόν βέλτιστου" (quasi optimal) νευρωνικού δικτύου με τη βοήθεια ενός αυτοματοποιημένου εποχιακού πρότυπου Box-Jenkins ARIMA στην επίλυση του προβλήματος Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου. Έχει έτσι καταδειχθεί ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι ένα έγκυρο και εναλλακτικό υπολογιστικό εργαλείο που μπορεί επαρκώς να μοντελοποιήσει την πολύπλοκη συμπεριφορά του βραχυπρόθεσμου ηλεκτρικού φορτίου, χωρίς να πρέπει να γίνουν οποιεσδήποτε υποθέσεις για τις ντετερμινιστικές και πιθανολογικές δομές του. Έχει επίσης καταδειχθεί, το πώς τα ορθογώνια κλασματικά παραγοντικά σχέδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει κατανοητό το πώς τα τεχνικά ζητήματα που προκύπτουν στη δημιουργία ενός νευρωνικού δικτύου έχουν επιπτώσεις στην απόδοση του δικτύου για την επίλυση του προβλήματος Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου [STLF]. Στην πραγματικότητα, το πείραμα έχει επιτρέψει στο να γίνει κατανοητό το πώς μπορεί να βελτιστοποιηθεί ο τρόπος με τον οποίο επιλύονται τα τεχνικά ζητήματα.

Οι Drezga και Rahman [50] εισάγουν μια νέα μέθοδο για το προσδιορισμό των μεταβλητών εισαγωγής για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου [STLF], βασισμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα [ANN]. Η μέθοδος χρησιμοποιεί την ενσωμάτωση φάσης-διαστήματος και είναι εν γένει διαφορετική από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνταν για τον ίδιο σκοπό μέχρι τώρα. Σε αυτές, η επιλογή των μεταβλητών εισαγωγής είναι βασισμένη στον γραμμικό συσχετισμό μεταξύ του προβλεφθέντος φορτίου και άλλων ποσοτήτων, όπως είναι η θερμοκρασία και το φορτίο της προηγούμενης ημέρας κατά την ίδια ώρα. Αντιθέτως, η προσέγγιση που προτείνεται προσδιορίζει μια σειρά "ανεξάρτητων" μεταβλητών με την ανακάλυψη γενικών σχέσεων σε μια χρονοσειρά φορτίου. Για παράδειγμα, είναι γεγονός, το οποίο μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί με τη χάραξη της λειτουργίας της αυτοσυσχέτισης μιας χρονοσειράς φορτίου, ότι τα φορτία της παρούσας ώρας (h) και της προηγούμενης ημέρας της ίδιας ώρας ($h-24$) σχετίζονται έντονα μεταξύ τους. Συνεπώς, σχεδόν κάθε μοντέλο πρόβλεψης φορτίου, ανεξάρτητα από το αν είναι βασισμένο σε ANN ή όχι, χρησιμοποιεί αυτό το γεγονός και περιλαμβάνει το φορτίο της προηγούμενης ημέρας στη μεταβλητή εισαγωγής του. Σε αντίθεση με αυτήν την πρακτική, η προσέγγιση που καθιερώνεται εδώ δεν χρησιμοποιεί το φορτίο στην ώρα

($h-24$) για την πρόβλεψη του φορτίου της ώρας h . Ως ένα πλαίσιο για μια αναδημιουργία της δυναμικής καθοδήγησης της ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιήθηκαν προσδιορισμένες μεταβλητές φορτίου υστέρησης. Αυτό το πλαίσιο ήταν περαιτέρω ενισχυμένο με πληροφορίες θερμοκρασίας και κύκλων φορτίου. Τελικά υπήρξαν 15 προσδιορισμένες μεταβλητές εισαγωγής, αριθμός που ήταν πολύ μικρότερος απ' ό,τι στη μεγάλη πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων μέχρι τώρα προσεγγίσεων. Η Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου, που είναι βασισμένη σε ANN και που χρησιμοποιεί προσδιορισμένες μεταβλητές εισαγωγής, έδωσε αποτελέσματα που μπορούν να συγκριθούν αρκετά ευνοϊκά με τα μέχρι τώρα γνωστά αποτελέσματα Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου. Για να τεθεί το επίτευγμα αυτής της έρευνας σε μια καλύτερη προοπτική, πρέπει να αναφερθεί ότι ο προσδιορισμός των μεταβλητών εισαγωγής δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα στη πρακτική της Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου: έχει αναφερθεί ότι απαιτούνται πάνω από 500 υποψήφιες μεταβλητές προκειμένου να καθοριστούν οι μεταβλητές εισαγωγής για τη Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου, που βασίζεται σε ANN. Συνεπώς, το κύριο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι προσφέρει έναν συστηματικό τρόπο για την επιλογή των μεταβλητών εισαγωγής χωρίς να θυσιαστεί η ακρίβεια των προβλέψεων. Έτσι, έχει την δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τον χρόνο και την προσπάθεια που χρειάζονται για την επιλογή των μεταβλητών εισαγωγής. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα βασίζεται στο γεγονός ότι χρειάστηκε για την ανάλυση ένα πολύ μικρό σύνολο μεταβλητών εισαγωγής. Ένα πιο συμπαγές σύνολο μεταβλητών εισαγωγής επιτρέπει τη χρήση μικρότερων ANN και μικρότερων σετ εκπαίδευσης, που οδηγούν στη ευκολότερη εκπαίδευση των ANN. Επιπλέον, επειδή το προσδιορισμένο σύνολο μεταβλητών εισαγωγής δεν περιέχει ισχυρά συσχετισμένες μεταβλητές, οι προβλέψεις αυτές είναι εν γένει πιο σταθερές σε περίπτωση ξαφνικών καιρικών αλλαγών.

Η πρόβλεψη του βραχυπρόθεσμου φορτίου συνεπάγεται την κατασκευή ενός μοντέλου και τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πληροφοριών, υπολογίζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της πρόβλεψης. Ακολουθεί, ότι όσο περισσότερο το πρότυπο προσεγγίζει την πραγματική (φυσική) παραγωγική διαδικασία, τόσο υψηλότερη είναι η αναμενόμενη απόδοση του συστήματος πρόβλεψης. Οι Vermaak και Botha [56] καταθέτουν ότι το φορτίο μπορεί να διαμορφωθεί ως παραγωγή κάποιου δυναμικού συστήματος, που επηρεάζεται από

τον καιρό, το χρόνο και άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Επιπλέον, η επιλεγμένη επαναλαμβανόμενη δικτυακή αρχιτεκτονική διευκολύνει μια μέθοδο εκπαίδευσης, που καθιστά την βελτιστοποίηση αυτών των δικτύων ακόμα γρηγορότερη από αυτή των συγκριτικών δικτύων, επειδή είναι γενικά μικρότερα. Αυτό ισχύει επίσης για την φάση της εφαρμογής, δεδομένου ότι η ισοδύναμη δομή δείχνει ότι η επαναλαμβανόμενη εξίσωση, μαζί με τις εισαγωγές και εξαγωγές, μπορεί να εφαρμοστεί από μια δομή ορθής τροφοδοσίας. Η σκόπιμη αποφυγή των ειδικών ημερών, όπως οι διακοπές, οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα περιστατικά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξωγενή. Λόγω της επιθυμητής γενίκευσής τους, τα νευρωνικά δίκτυα, είτε στατικά, είτε επαναλαμβανόμενα, τείνουν να φιλτράρουν αυτά τα εξωγενή στοιχεία. Εάν είναι διαθέσιμα αρκετά δεδομένα για το συγκεκριμένο περιστατικό, μπορεί να κατασκευαστεί ένα ξεχωριστό δίκτυο. Τις περισσότερες φορές δεν ισχύει αυτό και το μοντέλο πρόβλεψης πρέπει να αυξηθεί με τη βοήθεια δομών με ένα υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης, όπως τα δίκτυα ασαφούς λογικής ή ειδικά συστήματα. Αυτό δεν συνέβη, δεδομένου ότι η έμφαση δόθηκε στη σύγκριση των επαναλαμβανόμενων και δικτύων ορθής τροφοδοσίας. Ακόμα κι αν τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα, πρέπει να γίνει ακόμα περισσότερη έρευνα πριν να μπορούν να γίνουν οποιεσδήποτε τελειωτικές δηλώσεις σχετικά με την καταλληλότητα του καθενός από τα μοντέλα. Αυτό περιλαμβάνει την έρευνα για διάφορα άλλα επαναλαμβανόμενα δίκτυα και παραδείγματα εκπαίδευσης, μαζί με μια ανάλυση των συνθηκών σταθερότητας. Επιπλέον, πρέπει να καθοριστούν οι καλές στρατηγικές επιλογής των δεδομένων και οι αντιπροσωπεύσεις των εισαγωγών και εξαγωγών των δικτύων.

Οι Khotanzad et al [58] περιγράφουν την τρίτη γενεά ενός ωριαίου συστήματος βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου γνωστή ως ANNSTFL (Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα). Αυτή η πρόβλεψη έχει ευρεία αποδοχή στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιείται από 35 εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ και τον Καναδά. Η αρχιτεκτονική τρίτης γενεάς έχει αλλάξει σημαντικά από την προηγούμενη γενιά. Περιλαμβάνει μόνο δύο προβλέψεις Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων [ANN], η μια προβλέπει το φορτίο βάσης και η άλλη προβλέπει τις αλλαγές στο φορτίο. Η τελική πρόβλεψη υπολογίζεται από το συνδυασμό αυτών των δύο. Η επίδραση της υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου εξετάζονται μέσω ενός γραμμικού μετασχηματισμού της

θερμοκρασίας. Αναπτύσσεται ένα νέο σταθμισμένο σχέδιο παρεμβολής για την πρόβλεψη των φορτίων κατά τη διάρκεια διακοπών, το οποίο δίνει βέλτιστη ακρίβεια. Το μέγιστο φορτίο κατά τη διάρκεια διακοπών υπολογίζεται αρχικά και έπειτα αναδιαμορφώνεται η πρόβλεψη ANNSTLF με νέα πρόβλεψη του μεγίστου. Αναφέρεται η απόδοση στα δεδομένα από δέκα διαφορετικές εγκαταστάσεις και συγκρίνεται με την προηγούμενη γενεά.

Οι Drezga και Rahman [60] παρουσιάζουν μια νέα τεχνική βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου, που βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [ANN]. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης. Η επιλογή εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας την τεχνική "k-κοντινών γειτόνων" [k-nearest neighbors], και χρειάστηκαν το διανυσματικό διάστημα των γειτόνων και η απόσταση. Το αποτέλεσμα ήταν μια νέα και αποτελεσματική τεχνική για τον προσδιορισμό των κοντινών γειτόνων για λόγους πρόβλεψης φορτίου. Η τεχνική απαιτεί μόνο τη μέση, ελάχιστη και μέγιστη καθημερινή θερμοκρασία και λαμβάνει υπόψη την επίδραση της αδράνειας με συνυπολογισμό των μεταβλητών της προηγούμενης ημέρας. Αν και αυτό μπορεί να φανεί επίσης περιοριστικό εκ πρώτης όψεως, η έμφαση δίνεται στο γεγονός ότι πρέπει να μαθευτούν μόνο οι αναμενόμενοι τύποι ημέρας αλλά όχι η ακριβής σειρά εμφάνισής τους. Αυτό καθιστά την τεχνική ελκυστική από πρακτικής άποψης λόγω των εύκολα διαθέσιμων προβλέψεων της θερμοκρασίας. Επιπλέον, εάν υπάρχει αβεβαιότητα για τον τύπο των αναμενόμενων ημερών κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πρόβλεψης, μπορεί να περιληφθεί οποιοσδήποτε λογικά αναμενόμενος τύπος ημέρας στο σύνολο. Αυτή η επιλογή των στοιχείων εκπαίδευσης συνέβαλε στο να παρθούν άριστα αποτελέσματα πρόβλεψης για τις πιο μακροχρόνιες χρονικές περιόδους. Με βάση αυτήν την προϋπόθεση, μπορεί να υποστηριχτεί ότι τα δεδομένα εισόδου που περιέχουν εν γένει διαφορετικά σχέδια φορτίων κατανάλωσης περιπλέκουν την εκπαίδευση των ANN και τα ωθούν στο να μάθουν σχέσεις που δεν θα χρησιμοποιηθούν οπωσδήποτε για μια δεδομένη περίοδο πρόβλεψης, γεγονός που μπορεί να μετριάσει την ακρίβεια της πρόβλεψης. Συνεπώς, παρά την εκτενή εκπαίδευση, μπορεί να χρειαστεί και η καθημερινή ή εβδομαδιαία επανεκπαίδευση προκειμένου να κατασταθεί η απόδοσή των συστημάτων πιο ικανή σε μια δεδομένη κατάσταση. Αφ' ετέρου, χρησιμοποιώντας τοπικές προβλέψεις και την περιγραφόμενη διαδικασία, τα ANN ειδικεύτηκαν περισσότερο και η εκπαίδευση τους έγινε ευκολότερη. Για τον προσδιορισμό της αρχιτεκτονικής ενός ANN,

εισήγαγαν μια καινοτόμο έννοια της πειραματικής προσομοίωσης. Αυτή η έννοια χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό, με έναν συστηματικό τρόπο, του αριθμού κρυμμένων μονάδων για έναν δεδομένο ορίζοντα πρόβλεψης. Ένα πολύ σημαντικό εύρημα αυτής της έρευνας ήταν ότι το ειδικό στις προβλέψεις ANN ήταν ικανό να διατηρήσει την ακρίβεια πρόβλεψης για εκτεταμένες χρονικές ανοχές, με συνέπεια την ανώτερη απόδοση έναντι άλλων μεθόδων. Ένα χαρακτηριστικό της προτεινόμενης τεχνικής, πιθανόν πολύ σημαντικό στο άμεσο μέλλον των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν η άριστη ακρίβεια πρόβλεψης για τις μονόωρες προβλέψεις. Στις παραδοσιακές εφαρμογές τέτοιες πληροφορίες είχαν περιορισμένη αξία. Σε ένα απορυθμισμένο περιβάλλον αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εντούτοις, τέτοιες πληροφορίες θα κερδίσουν σε αξία. Σαν αποτέλεσμα των επερχόμενων αλλαγών, ορίζοντας λήψης αποφάσεων και προγραμματισμού στη βιομηχανία ηλεκτρισμού θα λιγοστεύουν αναπόφευκτα και δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς ότι οι συναλλαγές θα γίνονται σε πραγματικό χρόνο. Σε μια τέτοια κατάσταση, η ακριβής γνώση για την συμπεριφορά ενός συστήματος στο πολύ κοντινό μέλλον μπορεί να βοηθήσει στη λήψη καλύτερων αποφάσεων και να ωφεληθεί από την αγορά. Η αποκτηθείσα εμπειρία από απορυθμισμένα περιβάλλοντα επιβεβαιώνει την ανάγκη για τις πολύ σύντομες προβλέψεις. Συνεπώς, αναμένεται ότι η σημασία αυτών των προβλέψεων (μιας ώρας ή ακόμα και ενός ημίωρου) θα αυξηθεί. Αν και η επαναληπτική προσέγγιση φαίνεται να είναι καλύτερη για την πρόβλεψη 120 ωρών, δεν μπορεί να βγει κανένα συμπέρασμα για την εικοσιτετράωρη χρονική ανοχή. Εντούτοις, εξ αιτίας των προαναφερθέντων λόγων, η επαναληπτική πρόβλεψη μπορεί να είναι καταλληλότερη για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου σε ένα απορυθμισμένο περιβάλλον. Η τεχνική πρόβλεψης που περιγράφεται παρουσίασε πολύ καλή εκτέλεση με ξαφνικές και μεγάλες αλλαγές στη θερμοκρασία. Αυτό το χαρακτηριστικό καταδείχθηκε για όλες τις χρονικές ανοχές. Τα λάθη ήταν συνήθως καλύτερα σε σχέση με παρόμοιες μεθόδους. Αυτό έγινε εξ αιτίας της καινοτόμου επιλογής μεταβλητών εισαγωγής, που δεν χρησιμοποίησε το κριτήριο του συσχετισμού για τον καθορισμό των μεταβλητών και την επιλογή των στοιχείων εκπαίδευσης.

Η προσπάθεια αυτής της έρευνας έδωσε μια τεχνική πρόβλεψης, που αποδείχθηκε ότι έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με άλλες μεθόδους. Τα MAPE που αναφέρονται σε αυτήν την μελέτη είναι παρόμοια και σε πολλές περιπτώσεις

καλύτερα από αυτά των άλλων μεθόδων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα λάθη πρόβλεψης με χρονικό ορίζοντα 120 ωρών. Επίσης, τα μέγιστα λάθη ήταν στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων χαμηλότερα από 7%, γεγονός που θεωρείται μια πολύ καλή εκτέλεση. Αυτό είναι πολύ σημαντικό έχοντας υπ' όψιν ότι τα χαμηλά μέγιστα λάθη βοηθούν την ανάπτυξη εμπιστοσύνης προς ένα ειδικό στις προβλέψεις. Τα μέσα λάθη μέγιστου φορτίου ήταν κάπως μεγαλύτερα από 2%, το οποίο είναι συγκρίσιμο με τα καλύτερα λάθη από άλλες μεθόδους. Επιπλέον, η τεχνική έχει τη δυνατότητα να παράσχει μια γενικευμένη προσέγγιση στη Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου. Στα παραδείγματα Βραχυπρόθεσμης Πρόβλεψης Φορτίου για δύο ουσιαστικά διαφορετικές εγκαταστάσεις, η τεχνική έδωσε άριστα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία και στις δύο περιπτώσεις.

Οι Yoo και Pimmel [62] εφάρμοσαν ένα αυτο-εποπτούμενο προσαρμοστικό αλγόριθμο στην πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου με πραγματικά στοιχεία από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Για πρόβλεψη μιας μέρας, επιτεύχθηκαν αποτελέσματα που ξεπέρασαν τα άλλα συστήματα πρόβλεψης φορτίου που χρησιμοποιούσαν συνήθως πολύ περίπλοκες δομές και αλγόριθμους. Για προβλέψουν μιας ώρας, τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια με εκείνα που έχουν αναφερθεί από άλλους. Η προσέγγιση πραγματοποίησε πρόβλεψη φορτίου, σε πραγματικό χρόνο, δεδομένου ότι η διάρκειά της ήταν μερικά λεπτά πρακτικά σε ένα PC με μια CPU Pentium 120 MHz. Το σχέδιο αυτό παρέχει καλή προσαρμοστικότητα χρησιμοποιώντας έναν γρήγορο, σε πραγματικό χρόνο, τρόπο εκπαίδευσης που είναι κρίσιμος σε εφαρμογές όπου οι στατιστικές πηγές είναι μη στατικές ή όπου χρησιμοποιείται η πρόβλεψη σε διαφορετικά συστήματα ισχύος.

Οι Doveh et al [64] αναφέρονται στην εμπειρία πρόβλεψης μεσοπρόθεσμης ζήτησης φορτίου για το ισραηλινό δίκτυο ενέργειας (IEC) χρησιμοποιώντας μοντέλα νευρωνικών δικτύων. Χρησιμοποιούνται ποικίλες διαφορετικές διαδικασίες συστηματοποίησης για την κατάρτιση και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον γίνονται προτάσεις για το συνδυασμό μοντέλων και την επιλογή μεταβλητών εισαγωγής.

Από την εφαρμογή των πειραμάτων συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα μοντέλα Feed Forward Neural Network (FNN), που κάνουν πρόβλεψη στα δεδομένα από το IEC, προσφέρουν μια σημαντική βελτίωση στις υπάρχουσες τεχνικές.
- Η πρακτική του συνδυασμού των μοντέλων των προβλέψεων έχει μια υγιή στατιστική βάση, είναι απλή να εφαρμοστεί και μπορεί να οδηγήσει σε πιο σταθερές προβλέψεις.
- Μεταξύ των προτεινόμενων διαδικασιών συστηματοποίησης των FNN, πρόωρο σταμάτημα δίνει συνεχώς καλή απόδοση στο λάθος του αθροίσματος των τετραγώνων (NESS), καθώς επίσης και για την διάμεσο και το 9ο εκατοστημόριο των απόλυτων διαφορών, αλλά μπορεί να δώσει υψηλότερες τιμές για τη μέγιστη απόλυτη διαφορά.
- Η Μπεϋσιανή διαδικασία, αφ' ετέρου, δίνει σταθερή απόδοση σε όλα τα μέτρα.
- Αυτήν την περίοδο συνιστάται το πρόωρο σταμάτημα και οι Μπεϋσιανές διαδικασίες.

Όσον αφορά τις διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρεται ότι μια άμεση σύγκριση του πρόωρου σταματήματος με τις μεθόδους λειτουργίας με ποινή είναι προβληματική λαμβάνοντας υπόψη την διαφορετική χρήση των δεδομένων που κάνουν οι διαδικασίες. Εντούτοις, οι μέθοδοι πρόωρου σταματήματος δίνουν σαφώς βέλτιστη απόδοση από την άποψη γενικού και μηνιαίου λάθους του αθροίσματος των τετραγώνων (NESS) στους δύο στόχους πρόβλεψης που παρουσιάζονται. Από τις μεθόδους λειτουργίας με ποινή, η εξασθένιση του βάρους (weight decay) με την ενεργοποίηση του tanh δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τα δεδομένα συνολικής κατανάλωσης, ενώ ο πιο σύνθετος στόχος μοντελοποίησης των στοιχείων μεγίστων βραδιού ταιριάζει καλύτερα στην πιο περίπλοκη Μπεϋσιανή προσέγγιση. Και η Μπεϋσιανή προσέγγιση επίσης έδωσε συγκρίσιμη απόδοση στην εξασθένιση του βάρους για τα στοιχεία της συνολικής κατανάλωσης. Η Μπεϋσιανή εκπαίδευση περιέχει πραγματικά απλή εξασθένιση του βάρους, δεδομένου ότι μια ειδική περίπτωση πρέπει, τουλάχιστον θεωρητικά, να παράγει πάντα καλύτερα μοντέλα. Επιπλέον, η Μπεϋσιανή εκπαίδευση πρέπει να είναι σχετικά ανεξάρτητη από τον αριθμό των κρυμμένων μονάδων στο μοντέλο (μέσα σε ορισμένα λογικά κατώτατα όρια), αν και κάτι τέτοιο δεν βρέθηκε με την τωρινή εφαρμογή του διαθέσιμου αλγορίθμου. Τα πρώτα αποτελέσματα προτείνουν ότι αυτή η προσέγγιση μπορεί να δώσει καλές μεσοπρόθεσμες προβλέψεις για την ηλεκτρική ενέργεια και ότι θα πρέπει

να διερευνηθεί περαιτέρω. Υπάρχουν διάφορες ερωτήσεις που περιβάλλουν τη χρήση της μεθόδου του πρόωρου σταματήματος. Αρχικά, το πρόωρο σταμάτημα δεν εκπαιδεύεται σε ένα τοπικό ελάχιστο των λειτουργιών λάθους, και πολλά από τα θεωρητικά αποτελέσματα για τα μη γραμμικά πρότυπα που είναι βασισμένα σε αυτήν την υπόθεση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτός ο περιορισμός καλύπτει επίσης τέτοιες πρακτικές διαδικασίες όπως την δημιουργία φραγμών λάθους πρόβλεψης. Επιπλέον, τα μοντέλα πρόωρου σταματήματος τείνουν να δώσουν υψηλές μέγιστες απόλυτες διαφορές, οι οποίες μπορούν να δώσουν μια αστάθεια στις προβλέψεις, η οποία δεν υπάρχει στις μεθόδους λειτουργίας με ποινή. Από την άλλη πλευρά, η προσέγγιση που έχουμε χρησιμοποιήσει για τις μεθόδους λειτουργίας με ποινή απαιτεί την αφαίρεση του πρώτου έτους της εκπαίδευσης, όταν πρόκειται να εκπαιδευθούν τα τελικά μοντέλα. Αυτό το ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί θεωρητικά (ή ακόμα και συνολικά να αποφευχθεί στη Μπεϋσιανή περίπτωση) εντούτοις, υπό τις παρούσες συνθήκες, αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα εκείνων των διαδικασιών.

Οι Kim et al [65] παρουσιάζουν την ερευνητική εργασία που διενεργήθηκε για να βελτιώσει τις μεθόδους βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου για τις ειδικές ημέρες με ανώμαλες συνθήκες φορτίου. Η νέα αυτή μέθοδος πρόβλεψης φορτίου για τις ειδικές ημέρες γίνεται χρησιμοποιώντας Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN) και τη μέθοδο ασαφούς συμπεράσματος. Σε αυτήν την μέθοδο, ένα ANN παρέχει μια κλιμακωτή καμπύλη φορτίου πρόβλεψης και τα μοντέλα ασαφούς συμπεράσματος δίνουν στη πρόβλεψη τα μέγιστα και ελάχιστα φορτία της ειδικής ημέρας. Τα 24 ωριαία φορτία πρόβλεψης της ειδικής ημέρας προβλέπονται με το συνδυασμό των αποτελεσμάτων του ANN και της μεθόδου ασαφούς συμπεράσματος. Το κέρδος από την προτεινόμενη υβριδική δομή είναι να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα και των δυο, π.χ. η ικανότητα γενίκευσης ενός ANN και η ικανότητα του ασαφούς συμπεράσματος για χειρισμό και τυποποίηση της εμπειρίας και της γνώσης των προβλέψεων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος πρόβλεψης θα μπορούσε να δώσει μια αξιοσημείωτη βελτίωση στην ακρίβεια της πρόβλεψης για τις ειδικές ημέρες. Επομένως, εάν η μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα σύστημα πρόβλεψης για τις ειδικές ημέρες με ανώμαλες συνθήκες φορτίου, θα μπορούσε αποτελεσματικά να αντικαταστήσει το συμβατικό σύστημα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου και την ανθρώπινη πρόβλεψη.

Οι da Silva και Moulin [66] αποδεικνύουν ότι χρησιμοποιώντας τα παραδοσιακά στατιστικά πρότυπα, όπως το ARMA και την πολυγραμμική παλινδρόμηση, τα διαστήματα εμπιστοσύνης μπορούν να υπολογιστούν για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ηλεκτρικών φορτίων, υποθέτοντας ότι τα λάθη πρόβλεψης είναι ανεξάρτητα και γκαουσιανά διανεμημένα. Εδώ, τα 1 έως 24 βήματα πρόβλεψης φορτίου λαμβάνονται μέσω πολυστρωματικών perceptrons που ρυθμίζονται από τον αλγόριθμο προς τα πίσω διάδοσης. Παρουσιάζονται τρεις τεχνικές για τον υπολογισμό των διαστημάτων εμπιστοσύνης για αυτή τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου βασισμένη σε νευρωνικό δίκτυο: i) έξοδος λάθους (EO), ii) επανάληψη δείγματος (RE) και iii) πολυγραμμική παλινδρόμηση (MR) που προσαρμόζεται στα νευρωνικά δίκτυα. Εκτελείται μια σύγκριση των τριών τεχνικών μέσω προσομοιώσεων των on-line προβλέψεων. Αποδεικνύεται ότι οι αποδόσεις των μεθόδων εκτίμησης του διαστήματος εμπιστοσύνης στηρίζονται έντονα στη ομοιότητα μεταξύ των προηγούμενων και των παρόντων στοιχείων. Αυτό ισχύει ακόμη και για τις μεθόδους EO και MR, στις οποίες η άμεση επιρροή των παρόντων στοιχείων εγγυάται από την εισαγωγή Νευρωνικών Δικτύων (NN). Τα Διαστήματα Εμπιστοσύνης (CI) που υπολογίζονται από τις τεχνικές RE και EO είναι σχεδόν ανεξάρτητα από την διανομή των δεδομένων. Η αφαίρεση των διανεμημένων υποθέσεων παράγει ευρύτερα, αλλά πιο αξιόπιστα, διαστήματα Η τεχνική MR υποθέτει ότι τα λάθη πρόβλεψης διανέμονται κανονικά και, συνεπώς, τα βάρη σύνδεσης θα ήταν επίσης γκαουσιανά κατανεμημένα. Εντούτοις, αυτό δεν ισχύει πραγματικά για ένα μη γραμμικό Νευρωνικό Δίκτυο (NN) που εκπαιδεύεται με προς τα πίσω διάδοση λάθους. Η τεχνική MR έχει πολύ χαμηλής αξιοπιστίας διαστήματα εμπιστοσύνης. Αυτό δείχνει ότι η υπόθεση της κανονικότητάς της είναι πολύ δαπανηρή. Στην τεχνική EO, η εκτίμηση του διαστήματος εμπιστοσύνης είναι μία από τις εξόδους των NN, που απαιτεί λίγους πρόσθετους υπολογισμούς, εκτός από το προβλεπόμενο φορτίο. Αφ' ετέρου, η αρχιτεκτονική των Νευρωνικών της Δικτύων είναι πιο σύνθετη, και απαιτεί περισσότερο χρόνο δοκιμών. Οι τεχνικές EO και RE παρουσιάζουν παρόμοιους δείκτες αξιολόγησης. Εντούτοις, η EO δε μπορεί να αντιμετωπίσει πολλαπλά βήματα πρόβλεψης. Πρέπει να ακολουθήσει τα αυξανόμενα λάθη της επαναλαμβανόμενης πρόβλεψης φορτίων. Αυτό δεν έχει επιβεβαιωθεί από τους δείκτες συσχέτισμού. Τα διαστήματα εμπιστοσύνης της RE είναι τα πιο αξιόπιστα. Η μέθοδος επανάληψης δείγματος παρέχει σωστά διαστήματα όταν

υπολογίζονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης από δείγματα που είναι αντιπροσωπευτικά του αληθινού πληθυσμού, ακόμα κι αν οι προβλέψεις δεν είναι καλές. Έχουν δοκιμαστεί άλλες δομές Νευρωνικών Δικτύων, οι οποίες δεν έχουν βελτιώσει την έξοδο λάθους. Στην πραγματικότητα, η επιλογή της αρχιτεκτονικής των NN για την τεχνική ΕΟ ορίζει μια πρόσθετη δυσκολία. Πρέπει να ερευνηθούν τα μη παραμετρικά πρότυπα των NN. Η επαναληπτική πρόβλεψη θα μπορούσε να αποφευχθεί με τη χρησιμοποίηση NN με 24 εξόδους, ένα για κάθε χρονική στιγμή. Αυτή η εναλλακτική λύση δεν έχει δοκιμαστεί λόγω των προβλημάτων στο να προσαρμοστεί στις αλλαγές δυναμικής φορτίων και λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους. Η ανάγκη λειτουργίας των συστημάτων ισχύος πιο κοντά στα όριά τους απαιτεί ακριβή γνώση των τωρινών και των μελλοντικών καταστάσεων ενός τέτοιου συστήματος. Οι πληροφορίες φορτίου είναι αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της γνώσης. Για να λειτουργήσει το σύστημα οικονομικά, εκτός από τις παραδοσιακές προβλέψεις, των ανά μία ώρα, φορτίων για τις επόμενες μέρες, απαιτούνται επίσης οι προβλέψεις στιγμιαίου φορτίου για τις επόμενες δωδεκάδες λεπτών.

Οι Charytoniuk και Chen [67] παρουσιάζουν μια νέα προσέγγιση στο πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου με την εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANN). Αντί της εξέτασης των πραγματικών φορτίων, τα ANN πρέπει να εστιάσουν στη μοντελοποίηση της δυναμικής του φορτίου. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση της ακρίβειας και βελτίωση της αξιοπιστίας. Μια περαιτέρω αύξηση στην ακρίβεια της πρόβλεψης μπορεί να επιτευχθεί με τη καταμερισμό των προβλέψεων μεταξύ ενός συνόλου οικονομικά σχεδιασμένων ANN. Κάθε δίκτυο χρησιμοποιείται για έναν ιδιαίτερο τύπο ημέρας και μια ορισμένη περίοδο ημέρας με ένα μοναδικό σχέδιο δυναμικής φορτίων. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε μια εγκατάσταση ηλεκτρισμού στις Ηνωμένες Πολιτείες επιβεβαίωσε την καλή της εκτέλεση και την υψηλή της αξιοπιστία.

Οι Charytoniuk et al [69] διερευνούν την δυνατότητα μιας εναλλακτικής προσέγγισης για την πρόβλεψη φορτίου, η οποία είναι βασισμένη στην έμμεση εκτίμηση της ζήτησης από διαθέσιμα στοιχεία πελατών. Η παραδοσιακή προσέγγιση ήταν βασισμένη στην επεξεργασία χρονικής σειράς παραγόντων φορτίου και καιρού που έχουν καταγραφεί κατά το παρελθόν. Στο δυναμικό περιβάλλον της απορρυθμισμένης βιομηχανίας ισχύος, τα ιστορικά στοιχεία φορτίου μπορεί να μην

είναι διαθέσιμα. Τώρα, η συνολική πρόβλεψη φορτίου μπορεί να γίνει με τη συνάθροιση των προβλέψεων ζήτησης ομάδων πελατών που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί τη χρησιμοποίηση προτύπων ζήτησης για τις διάφορες κατηγορίες πελατών. Εδώ παρουσιάζεται μια μέθοδος μοντελοποίησης της ζήτησης, βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι σε θέση να χαρτογραφήσουν τις μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ της ζήτησης και των παραγόντων που την επηρεάζουν, και να επιτρέψουν τον εύκολο συνυπολογισμό οποιωνδήποτε σχετικών παραγόντων στο μοντέλο. Τα νευρωνικά δίκτυα σχεδιάζονται και εκπαιδεύονται με βάση τη συνολική ζήτηση των πελατών από τις διάφορες κατηγορίες. Η απόδοση τέτοιων προτύπων εξαρτάται από το σχεδιασμό του νευρωνικού δικτύου και την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων εκπαίδευσης. Η ακρίβεια πρόβλεψης επηρεάζεται επίσης από το προβλεπόμενο μέγεθος της ομάδας, τα χαρακτηριστικά των πελατών, το σύστημα ταξινόμησης πελατών, και την έκταση της έρευνας της ζήτησης.

Οι Hippert et al [72] εξετάζουν την πρόβλεψη φορτίου Νευρωνικών Δικτύων και αξιολογούν τους τρόπους, που είχαν σχεδιαστεί και εξεταστεί τα συστήματα, που είχαν προταθεί στο παρελθόν. Αυτή η εξέταση οδήγησε σε δύο γεγονότα:

α) Τα περισσότερα από τα προτεινόμενα μοντέλα, ειδικά αυτά που προέβλεπαν τις κατανομές, φάνηκαν να είναι υπερ-παραμετροποιημένα. Πολλά βασίστηκαν στην πρόβλεψη πολλών μεταβλητών, δηλ αυτοί θεώρησαν τις κατανομές ως διανύσματα με 24 συνιστώσες που πρέπει να προβλεφθούν ταυτόχρονα από ένα ενιαίο Νευρωνικό Δίκτυο με 24 νευρώνες στην έξοδο. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε στη χρήση πολύ μεγάλων NN, η οποία μπορεί να είχε εκατοντάδες παραμέτρους προς υπολογισμό από πολύ μικρά σύνολα δεδομένων.

β) Τα αποτελέσματα των δοκιμών από αυτά τα Νευρωνικά Δίκτυα δεν ήταν πάντα πολύ πειστικά. Όλα τα συστήματα εξετάστηκαν σε πραγματικά δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές δεν πραγματοποιήθηκαν συστηματικά: τα συστήματα δεν συγκρίθηκαν κατάλληλα με τα τυποποιημένα και η ανάλυση των λαθών δεν χρησιμοποίησε διαθέσιμα γραφικά και στατιστικά εργαλεία.

Οι Taylor και Buizza [73] δείχνουν πώς οι μετεωρολογικές προβλέψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη φορτίου Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANN) για χρόνους από μία έως 10 ημέρες. Χρησιμοποιήθηκαν τα 51 μέλη

του Ευρωπαϊκού Κέντρου για Βραχυπρόθεσμες Μετεωρολογικές Προβλέψεις (ECMWF) για κάθε μετεωρολογική μεταβλητή για να παραχθούν 51 σενάρια για το φορτίο από τα ANN. Και για τους δέκα χρόνους, ο μέσος όρος των σεναρίων φορτίου ήταν μια ακριβέστερη πρόβλεψη φορτίου από αυτή που παραγόταν από την παραδοσιακή διαδικασία, όπου υπήρχε ένα ενιαίο σημείο πρόβλεψης για κάθε μετεωρολογική μεταβλητή στο μοντέλο φορτίου των ANN. Αυτή η παραδοσιακή διαδικασία προσέγγιζε την πρόβλεψη της μη γραμμικής λειτουργίας των ANN των μετεωρολογικών μεταβλητών από την ίδια μη γραμμική λειτουργία των αναμενόμενων τιμών των μετεωρολογικών μεταβλητών. Ο μέσος όρος των 51 σεναρίων είναι ισοδύναμος με τη λήψη της πρόβλεψης μιας εκτίμησης της πυκνότητας πιθανότητας του φορτίου. Η κατανομή των 51 σεναρίων φορτίου παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη φορτίου. Εντούτοις, δεδομένου ότι η κατανομή δεν προσαρμόζει τις αβεβαιότητες φορτίου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANN), θα τείνει να υποτιμήσει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, έγινε επανεκτίμηση της διαφοράς των σεναρίων πριν χρησιμοποιηθούν ως εκτιμητής της διαφοράς λάθους πρόβλεψης φορτίου.

Οι Senjyu et al [74] προτείνουν μια μέθοδο πρόβλεψης, όπου η προβλεπόμενη ισχύς φορτίου λαμβάνεται με την προσθήκη μιας διόρθωσης στα επιλεγμένα παρόμοια δεδομένα της ημέρας. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο για το νευρωνικό δίκτυο να μάθει όλα τα δεδομένα μιας παρόμοιας ημέρας. Επομένως, είναι δυνατό να μειωθεί η δομή του νευρωνικού δικτύου και ο χρόνος εκπαίδευσης. Εάν η ημέρα πρόβλεψης αλλάξει, το νευρωνικό δίκτυο επανεκπαιδεύεται και μπορεί να λάβει τη σχέση μεταξύ του φορτίου και της θερμοκρασίας για την ημέρα της πρόβλεψης. Επομένως, θα ήταν σε θέση να παράγει τη διόρθωση, που αντιστοιχεί στις γρήγορες αλλαγές της θερμοκρασίας. Η καταλληλότητα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι διευκρινισμένη μέσω μιας εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα φορτίου της επιχείρησης ηλεκτρικής ενέργειας της Okinawa στην Ιαπωνία.

Οι Saini και Soni [76] εξηγούν ότι η πρόβλεψη καθημερινού ηλεκτρικού μέγιστου φορτίου (PLF) έχει γίνει χρησιμοποιώντας το νευρωνικό δίκτυο (ορθής τροφοδοσίας) (FFNN), που βασίζεται στη μέθοδο προς τα πίσω διάδοσης συζευγμένης κλίσης (CG), με ενσωμάτωση της επίδρασης 11 καιρικών παραμέτρων,

των πληροφοριών μέγιστου φορτίου της προηγούμενης ημέρας, και του τύπου της ημέρας. Για την αποφυγή της παγίδευσης του δικτύου σε μια κατάσταση τοπικών ελάχιστων, έχει εκτελεστεί η βελτιστοποίηση των καθορισμένων από το χρήστη παραμέτρων, δηλαδή, γνώση του ποσοστού και το στόχο για το λάθος. Το σύνολο δεδομένων κατάρτισης έχει επιλεγεί χρησιμοποιώντας μια αυξανόμενη έννοια παραθύρων (growing window concept) και μειώνεται σύμφωνα με την φύση της ημέρας και της εποχής για τις οποίες γίνεται η πρόβλεψη. Για την αφαίρεση πλεονασμού στις μεταβλητές εισαγωγής, έχει γίνει μείωση του αριθμού μεταβλητών εισαγωγής με την μέθοδο ανάλυσης κύριων τμημάτων (PCA) του παράγοντα εξαγωγής. Για να αυξηθεί η ταχύτητα εκμάθησης, τα βάρη και οι διαφορετικές τιμές τοποθετούνται ως αρχικές τιμές σύμφωνα με την μέθοδο Nguyen και Widrow.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι Bakirtzis et al [34] ανέπτυξαν ένα ασαφές νευρωνικό δίκτυο για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Το σύστημα ασαφούς λογικής έχει τη δομή ενός δικτύου και τη διαδικασία εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου και ονομάζεται Ασαφές Νευρωνικό Δίκτυο [FNN]. Από την σύγκριση του αναπτυγμένου μοντέλου με τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να προέλθουν τα ακόλουθα συμπεράσματα: (1) Το Ασαφές Νευρωνικό Δίκτυο πέτυχε παρόμοια απόδοση με ένα νευρωνικό δίκτυο για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. (2) Η εκπαίδευση του Ασαφούς Νευρωνικού Δικτύου ήταν πολύ γρηγορότερη σε σχέση με αυτή των νευρωνικών δικτύων. (3) Το Ασαφές Νευρωνικό Δίκτυο μπορεί να ενσωματώσει αποτελεσματικά τους ειδικούς κανόνες γλώσσας προγραμματισμού “if-then”, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα δεν μπορούν.

Μια ερευνητική εργασία βρίσκεται σε εξέλιξη προκειμένου: (1) να ενσωματώσει τα καιρικά δεδομένα, (2) να ενσωματώσει τους ειδικούς κανόνες της γλώσσας προγραμματισμού και (3) να χρησιμοποιήσει ένα ενιαίο Ασαφές Νευρωνικό Δίκτυο πολλαπλών εξόδων για εικοσιτετράωρη πρόβλεψη φορτίου.

Ιδιαίτερη έμφαση στην πρόβλεψη φορτίου αργιών και Σαββατοκύριακων δίνεται στην εργασία των Srinivasan et al [35]. Χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά Νευρωνικά Δίκτυα ένα για τις κανονικές ημέρες της εβδομάδος, ένα για το Σάββατο και ένα για την Κυριακή και τις αργίες. Οι εισοδοί των Νευρωνικών Δικτύων είναι ασαφείς τιμές των δεδομένων εισόδου (θερμοκρασία, βροχόπτωση, δείκτες ημέρας ή αργίας κτλ.) και η έξοδος είναι επίσης ασαφής τιμή φορτίων. Η πρόβλεψη του φορτίου του επόμενου 24ώρου λαμβάνεται μετά από διαδικασία αποσαφήνισης της εξόδου των NN.

Οι Mori και Kobayashi [42] χρησιμοποιούν τη μέθοδο της προσομοιωμένης απόψησης (simulated annealing) για να καθορίσουν το βέλτιστο αριθμό κανόνων και παραμέτρων ενός ασαφούς συστήματος για Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίου.

Οι Chow et al [48] προτείνουν έναν προγραμματισμό για τα ηλεκτρικά συστήματα διανομής που πρόκειται να παράσχει ένα σχέδιο οικονομικής επέκτασης έτσι ώστε να ικανοποιήσει τις μελλοντικές απαιτήσεις. Για τον προγραμματισμό της διανομής αποτελεί προϋπόθεση μια πρόβλεψη της μελλοντικής ηλεκτρικής ζήτησης και της γεωγραφικής κατανομής της. Η ποιότητα και η ακρίβεια αυτής της πρόβλεψης έχουν μεγάλη επιρροή στην ποιότητα του προγραμματισμού των ηλεκτρικών συστημάτων διανομής. Η πρόβλεψη του φορτίου στο χώρο παρέχει μια ακριβέστερη πρόβλεψη των μεγεθών και των θέσεων των μελλοντικών ηλεκτρικών φορτίων. Δεδομένου ότι το σχέδιο αύξησης φορτίου εξαρτάται από τη χρήση της περιοχής (κατοικημένη, εμπορική ή βιομηχανική), είναι σημαντική η μελέτη χρήσης εδάφους μικρής περιοχής, για να δεχτεί τα μελλοντικά φορτία με ακρίβεια. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που λαμβάνονται υπ' όψιν στην απόφαση του πελάτη για χρήση της περιοχής, π.χ., η απόσταση από τους δρόμους ευρείας κυκλοφορίας, η απόσταση από το αστικό κέντρο και οι δαπάνες. Οι προτιμήσεις του πελάτη μπορούν να υπολογιστούν με βάση αντικειμενικούς παράγοντες. Κατόπιν μπορούν να υπολογιστούν η χρήση εδάφους και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι οι στόχοι είναι μερικές φορές αλληλοσυγκρουόμενοι, μπορεί να είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η συμβατική προσέγγιση συνάρτησης κόστους για να καθοριστεί η απόφαση για τη χρήση της περιοχής. Εδώ εφαρμόζεται το σχέδιο ασαφών πολλαπλών στόχων λήψης αποφάσεων Yager στην αστική αναδιαμόρφωση και την πρόβλεψη φορτίου στο χώρο, η οποία είναι μια πρόβλεψη που χρησιμοποιείται ευκολότερα για το χειρισμό του προβλήματος χωρικών φορτίων.

Οι Yang και Huang [53] προτείνουν ένα νέο αλγόριθμο για το ασαφές μοντέλο ARMAX και το εφαρμόζουν στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου σε συστήματα ισχύος. Με βάση μια συνδυασμένη χρήση ευρηματικών λύσεων και του παγκόσμιου αποδοτικού σχεδίου αναζήτησης του Εξελικτικού Σχεδιασμού [EP], η προτεινόμενη προσέγγιση μοντελοποίησης FARMAX μπορεί να καθορίσει αυτόνομα τις βέλτιστες μεταβλητές εισαγωγής του μοντέλου, το βέλτιστο ασαφές χώρισμα του διαστήματος των μεταβλητών εισαγωγής και των σχετικών ασαφών λειτουργιών των

μελών. Η δοκιμή σε χαρακτηριστικούς τύπους δεδομένων φορτίου και καιρού των συστημάτων Taipower έχει δείξει ότι τα μέσα και μέγιστα λάθη πρόβλεψης (ιδιαίτερα το μέγιστο λάθος) των παραδοσιακών προσεγγίσεων πρόβλεψης (το πρότυπο ARMAX που εφαρμόζεται με την εμπορική επωνυμία της SAS και την μέθοδο ANN) μπορούν να μειωθούν πολύ με τη χρήση της προτεινόμενης προσέγγισης. Επιπλέον, εκτενείς αναλύσεις ευαισθησίας για διαφορετικές λειτουργίες μελών και δομές μοντέλων ARMAX, καθώς επίσης και τα άσχημα δεδομένα που περιλαμβάνονται, έχουν αποδείξει ότι τα προτεινόμενα μοντέλα FARMAX υπερσχύουν αυτών σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών. Παρατηρείται ότι υπάρχει έτσι η δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας πρόβλεψης των συμβατικών προσεγγίσεων με τη βοήθεια της προτεινόμενης μεθόδου.

Οι Papadakis et al [55] προτείνουν ένα ασαφές μοντέλο για την πρόβλεψη των ωριαίων φορτίων (της επόμενης ημέρας). Η προτεινόμενη προσέγγιση προχωρά στα ακόλουθα βήματα: (α) πρόβλεψη των ακρότατων της καμπύλης φορτίου της επόμενης ημέρας (φορτία αιχμών και τοπικών ελαχίστων, (β) διατύπωση της αντιπροσωπευτικής ημέρας στην ωριαία βάση χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα φορτίων και (γ) μετασχηματισμός της αντιπροσωπευτικής καμπύλης φορτίου ημέρας ώστε να προσαρμόσει τα προβλεπόμενα φορτία αιχμών και τοπικών ελαχίστων προκειμένου να ληφθεί η τελική καμπύλη πρόβλεψης φορτίου της επόμενης ημέρας. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης για κάθε τύπο ημέρας (ημέρα της εβδομάδας) σε κάθε εποχή. Τα πραγματοποιημένα ετήσια μέσα λάθη πρόβλεψης των 85,54MW, ταξινομούν την αναπτυγμένη μέθοδο μεταξύ των μεθόδων με τη μεγαλύτερη ακρίβεια για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου.

Οι Mastrocostas et al [63] προτείνουν μια προσέγγιση ασαφούς μοντελοποίησης για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου [STLF]. Η μέθοδος ορθογώνιων ελαχίστων τετραγώνων υιοθετείται διαδοχικά για να διαχειριστεί τους ακόλουθους στόχους: α) Εξαγωγή του αριθμού κανόνων και εντοπισμός των ασαφών υπερ-κυψελών μέσα στο προϋποτιθέμενο διάστημα. β) Λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο πιθανών υποψηφίων εισαγωγής, να γίνει επιλογή των σημαντικότερων μεταβλητών και να διατυπωθεί η επακόλουθη δομή. Η επιλογή των εισαγωγών του επακόλουθου μέρους εκτελείται αυτόματα κατά ένα απλό τρόπο θέτοντας σε σειρά προτεραιότητας τις μεταβλητές. Συνεπώς, τα ασαφή μοντέλα TSK (Tagaki, Sugeno

και Kang) παράγονται με επακόλουθα υπομοντέλα μεταβλητού μεγέθους. Τα μοντέλα που προκύπτουν εκθέτουν διάφορα επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως η ικανότητα ακριβούς, απλής και ικανής πρόβλεψης. Αναπτύσσονται διαφορετικά μοντέλα για κάθε τύπο ημέρας σε κάθε εποχή. Το πραγματοποιημένο ετήσιο μέσο λάθος πρόβλεψης των 88,13MW καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου και συγκρίνεται με άλλες τεχνικές πρόβλεψης.

Οι Khotanzad et al [75] παρουσιάζουν μια νέα προσέγγιση στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου σε ένα απορρυθμισμένο και εξαρτώμενο από την τιμή περιβάλλον. Προβλέπεται ένα σενάριο τιμολόγησης σε πραγματικό χρόνο όπου οι τιμές ενέργειας θα μπορούν να αλλάξουν σε ωριαία βάση και ο καταναλωτής θα έχει τη δυνατότητα να αντιδράσει στις τιμές μέσω της μετατόπισης της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειάς του από τις ακριβές ώρες σε άλλες, όταν κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί. Το σχεδιάγραμμα φορτίου αυτού του σεναρίου θα είχε διαφορετικές χαρακτηριστικές σε σχέση με αυτή της ρυθμισμένης εποχής με καθορισμένες τιμές. Συνεπώς, τα βραχυπρόθεσμα πρότυπα πρόβλεψης φορτίου που προσαρμόζονται στα ιστορικά δεδομένα της ρυθμισμένης εποχής (που δεν εξαρτώνται από την τιμή) (PIS) δεν θα ήταν σε θέση πλέον να αποδώσουν καλά. Εδώ, αναπτύσσεται μια πρόβλεψη φορτίου που εξαρτάται από την τιμή (PS). Αυτή η πρόβλεψη αποτελείται από δύο στάδια, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με πρόβλεψη φορτίου PIS ακολουθούμενο από ένα σύστημα ασαφούς λογικής (FL) που μετασχηματίζει τις προβλέψεις φορτίων PIS του πρώτου σταδίου σε προβλέψεις PS. Η πρόβλεψη του πρώτου σταδίου είναι ευρέως χρησιμοποιημένη στις βιομηχανικές προβλέψεις και είναι γνωστή ως ANNSTLF. Για το σύστημα fuzzy logic του δεύτερου σταδίου, αναπτύσσεται μια προσέγγιση βασισμένη σε ένα γενετικό αλγόριθμο για να βελτιστοποιήσει αυτόματα τον αριθμό κανόνων και τον αριθμό παραμέτρων των ασαφών λειτουργιών. Ένα άλλο σύστημα ασαφούς λογικής αναπτύσσεται για να προσομοιώσει τα δεδομένα φορτίου PS από τα ιστορικά δεδομένα PIS μιας εγκατάστασης. Αυτή η νέα πρόβλεψη που ονομάζεται NFSTLF εξετάζεται σε τρεις βάσεις δεδομένων και αποδεικνύεται ότι παράγει ανώτερες προβλέψεις στο PIS ANNSTLF.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Οι Kim et al [33] παρουσιάζουν ένα νέο υβριδικό μοντέλο για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου που ενσωματώνει τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και ειδικά ασαφή συστήματα, το οποίο εφαρμόστηκε στο Σύστημα Πρόβλεψης Φορτίου [LoFES] της Επιχείρησης Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κορέας [KEPCO] ως γενικό μοντέλο πρόβλεψης. Το προβλεπόμενο φορτίο λαμβάνεται κατά δύο βήματα: την προσωρινή πρόβλεψη από τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και την τροποποίηση από τα ειδικά ασαφή συστήματα. Το προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο έχει εξεταστεί και έχει συγκριθεί με την βελτιωτική εκθετική μέθοδο σε πραγματικό περιβάλλον για τη δοκιμή της απόδοσης του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της δοκιμής (για τέσσερις μήνες το 1994) έδειξαν ότι το υβριδικό μοντέλο παρείχε μια ακριβέστερη πρόβλεψη από τη βελτιωτική εκθετική μέθοδο και πρόβλεψε το φορτίο των διακοπών (με ακρίβεια όμοια αυτής των καθημερινών) όπου η συμβατική μέθοδος και η μέθοδος τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρέχουν μια φτωχή πρόβλεψη. Κατά συνέπεια, το προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο παράγει μια καλή προσέγγιση στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Δεδομένου ότι το προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο εξετάζει όλους τους παράγοντες των αλλαγών του φορτίου στα ειδικά ασαφή συστήματα, έχει ιδιαίτερη ευελιξία από την άποψη προσθηκών ή αλλαγών των κανόνων. Το υβριδικό μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ προτάθηκε και εφαρμόστηκε ως γενικό μοντέλο πρόβλεψης για την εξέταση των αλλαγών στο φορτίο, ειδικά εκείνων των διακοπών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι απαιτούνται συγκεκριμένοι κανόνες για την εξέταση των διακοπών, οι οποίες γίνονται σε διαφορετικές περιόδους σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας δοκιμής του LoFES το 1995, η βάση ασαφών δεδομένων ενισχύθηκε και με την προσθήκη των συγκεκριμένων κανόνων. Θα περιληφθούν επίσης οι συγκεκριμένοι ασαφείς κανόνες για τις ημέρες που έχουν παράγοντες αλλαγής φορτίου, όπως οι ημέρες εκλογών, η περίοδος βροχών, κατά τη διάρκεια ενός τυφώνα και ειδικών τηλεοπτικών προγραμμάτων. Μετά από την δοκιμή και την αύξηση της απόδοσης το 1995, το LoFES

χρησιμοποιήθηκε ως κύριο σύστημα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου στο KEPCO.

Οι Yang et al [41] παρουσιάζουν μια προσέγγιση εξελικτικού προγραμματισμού [EP] στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Προτάθηκε ένας αλγόριθμος για να ψάξει την βέλτιστη δομή του μοντέλου και τις σχετικές παραμέτρους του προτύπου ARMAX, για να υπερνικήσει τα πολυάριθμα τοπικά βέλτιστα και να επιτύχει ολικό ή σχεδόν ολικό ακρότατο στην επιφάνεια σύνθετου λάθους. Η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου αποδείχθηκε με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών τύπων πρακτικών δεδομένων φορτίου του συστήματος Taipower (στην Ταϊβάν) για ωριαία πρόβλεψη φορτίου μιας ημέρας και μιας εβδομάδας. Η ικανότητα της βασισμένης στον EP μεθόδου πρόβλεψης ελέγχθηκε για να είναι καλύτερη από αυτήν της παραδοσιακής προσέγγισης, που ήταν βασισμένη στην αναζήτηση κλίσης και που εφαρμόζεται από την εμπορικό πακέτο της SAS. Η δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας της πρόβλεψης του προτύπου ARMAX αποδεικνύεται μέσω της προτεινόμενης προσέγγισης, που βασίζεται στον EP. Αν και εδώ ενυπάρχει μόνο η μεταβλητή της θερμοκρασίας στο πρότυπο ARMAX, μπορούν να περιληφθούν και περισσότερες εξωγενείς μεταβλητές που έχουν επιπτώσεις στη ζήτηση φορτίου, προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η ακρίβεια της πρόβλεψης με τη βοήθεια του προτεινόμενου αλγορίθμου EP. Ακόμα, έχει παρουσιαστεί η δυνατότητα της εφαρμογής των μοντελοποιημένων εξελικτικών μεθόδων για τον προσδιορισμό του ARMAX ή άλλων πιθανολογικών χρονικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία ενέργειας.

Οι Daneshdoost et al [51] προτείνουν ένα πολυστρωματικό Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο [ANN] σε συνδυασμό με την ασαφή τεχνική ταξινόμησης για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Τα ωριαία δεδομένα ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες που βασίζονται στην ασαφή αντιπροσώπευση δύο καιρικών μεταβλητών: θερμοκρασία ξηρού βολβού και σχετική υγρασία. Η ταξινόμηση βασίζεται στο γεγονός ότι το φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται αρκετά από τις καιρικές συνθήκες. Το ασαφές σύνολο χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει την διαδικασία ταξινόμησης, προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή μετάβαση μεταξύ των κατηγοριών των καιρικών συνθηκών. Η προτεινόμενη τεχνική εξετάστηκε και αξιολογήθηκε η απόδοσή της με τη βοήθεια του μέσου απόλυτου

ποσοστού λάθους [MAPE] για τρεις περιπτώσεις: του ωριαίου φορτίου, του μέγιστου φορτίου και της συνολικής καθημερινής ενέργειας. Το σύνολο των ANN πρόβλεψε το φορτίο του συστήματος μέχρι και για 120 ώρες με MAPE λιγότερο από 2% και για τις τρεις περιπτώσεις.

Οι Srinivasan et al [59] αναφέρονται στην ανάπτυξη και την εφαρμογή μιας υβριδικής ασαφούς, βασισμένης σε νευρωνικά δίκτυα, πρόβλεψης φορτίου. Η προσέγγιση περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια. Στο πρώτο στάδιο, τα ιστορικά δεδομένα φορτίου βοήθησαν στη μελέτη της αυξητικής τάσης και της απαραίτητης αμοιβής για την πρόβλεψη της παρούσας ζήτησης φορτίου. Το δεύτερο στάδιο προσπαθεί να χαρτογραφήσει την καμπύλη φορτίου για διαφορετικές ημέρες με τη βοήθεια της μεθόδου του Kohonen. Η πρόβλεψη φορτίων για την τρέχουσα ημέρα λαμβάνεται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την αυτόματη μνήμη του νευρωνικού δικτύου. Ένας παράλληλος ασαφούς λογικής επεξεργαστής λαμβάνει υπόψη μεταβλητές όπως ο τύπος ημέρας, ο καιρός και οι διακοπές, κατά παραγωγή των απαραίτητων ωριαίων ρυθμίσεων των φορτίων της κάθε ημέρας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ακριβής πρόβλεψη των καμπυλών φορτίου μπορεί να επιτευχθεί με την προτεινόμενη ασαφή-νευρωνική προσέγγιση. Ο σύντομος χρόνος που λαμβάνεται για την εκπαίδευση και τη δοκιμή της πρόβλεψης φορτίου, η ακρίβεια του μοντέλου για όλους τους τύπους ημέρας όσο και η έλλειψη αναγκαιότητας για μεγάλα κομμάτια ιστορικών στοιχείων δείχνει τη δυνατότητα της πρόβλεψης φορτίου και το γεγονός ότι είναι σε θέση να τροφοδοτήσει όλες τις πιθανές καταστάσεις. Η ικανότητα του υβριδικού δικτύου για την on-line πρόβλεψη, η δυναμικότητα και η δυνατότητα εκπαίδευσης επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το μέσο MAPE υπολογίστηκε ότι είναι 0,83%, 0,75% και 0,84% για τις εργάσιμες μέρες, τις Κυριακές και τις επίσημες αργίες αντίστοιχα.

Οι Kassaei et al [61] προτείνουν μια υβριδική προσέγγιση η οποία χρησιμοποιεί ένα ασαφές σύστημα και ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη ενός φορτίου. Αυτή η προσέγγιση μοντελοποιεί τη συμπεριφορά του φορτίου με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι επιπτώσεις στο φορτίο ταξινομούνται σε: (α) μια επίπτωση κανονικού φορτίου που δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και (β) μια επίπτωση φορτίου που εξαρτάται από αυτές. Έχει αποδειχθεί ότι το κανονικό φορτίο έχει μια σταθερή χαρακτηριστική και μπορεί να

μοντελοποιηθεί από προς τα πίσω διάδοσης νευρωνικά δίκτυα. Το φορτίο, που εξαρτάται από τον καιρό, έχει μοντελοποιηθεί από τρία συστήματα ασαφούς λογικής με τη βοήθεια της εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων ενός βέλτιστου συντελεστή βασικής ασαφούς λειτουργίας. Το μοντέλο δοκιμάστηκε με τα ιστορικά δεδομένα του 1994 της πόλης Hinton της West Virginia, ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ένα μέσο απόλυτο ποσοστιαίο λάθος 2%, το οποίο είναι συγκρίσιμο και με άλλες μεθόδους πρόβλεψης φορτίου.

Οι Mori και Yuihara [70] παρουσιάζουν μια μέθοδο συγκέντρωσης για τα δεδομένα εισόδου της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου στα συστήματα ισχύος. Η συγκέντρωση των δεδομένων εισόδου πριν από την πρόβλεψη με το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) μειώνει τα παρατηρηθέντα λάθη πρόβλεψης. Εδώ, χρησιμοποιείται ένα NN πολυστρωματικού perceptron (MLP ANN) για να εξετάσει την ενός βήματος καθημερινή πρόβλεψη μέγιστου φορτίου και τη συγκέντρωση ντετερμινιστικής ανέλιξης (deterministic annealing) (DA) που υιοθετείται για να ταξινομήσει τα δεδομένα εισόδου στις συστάδες. Η DA που συγκεντρώνεται είναι βασισμένη στην αρχή της μέγιστης εντροπίας στην στατιστική μηχανική για να αξιολογηθεί συνολικά η βέλτιστη ταξινόμηση. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται επιτυχώς σε πραγματικά δεδομένα. Γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των προτεινόμενων και συμβατικών μεθόδων από την άποψη του μέσου όρου και των μέγιστων λαθών πρόβλεψης. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου καταδεικνύεται μέσω της σύγκρισης των πραγματικών δεδομένων των φορτίων με τις βραχυπρόθεσμες τιμές πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έχουν παρουσιάσει τα ακόλουθα:

1) Το λάθος της πρόβλεψης μειώθηκε σημαντικά με την προτεινόμενη μέθοδο με την συγκέντρωση deterministic annealing (DA) των δεδομένων εισόδου για το MLP. Πραγματικά, η προτεινόμενη μέθοδος μείωσε κατά 0,254% το μέσο όρο και κατά 1,249% τα μέγιστα λάθη του συμβατικού MLP. Ειδικότερα, η προτεινόμενη μέθοδος ήταν αποτελεσματικότερη για πρόβλεψη φορτίου κατά τη διάρκεια του Αυγούστου που χρησιμοποίησε για να δίνει μεγαλύτερα μέγιστα λάθη λόγω των μεγάλων ζητήσεων φορτίου. Η αποτελεσματικότητα επιβεβαιώθηκε και για άλλους μήνες.

2) Η προτεινόμενη μέθοδος με τη συγκέντρωση DA έχει δώσει καλύτερα αποτελέσματα από τον MLP με την μέθοδο των K-μέσων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ήταν αποτελεσματικό να τοποθετήσει έναν ταξινομητή

των δεδομένων εισόδου πριν από τον MLP. Η μέθοδος των K-μέσων και η συγκέντρωση DA διαδραμάτισαν έναν σημαντικό ρόλο στην ταξινόμηση των δεδομένων εισόδου. Η συγκέντρωση DA της προτεινόμενης μεθόδου ήταν καλύτερη από την μέθοδο των K-μέσων επειδή η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στο να αξιολογήσει την ταξινόμηση των δεδομένων από μία άποψη σφαιρικής βελτιστοποίησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου είναι μια σημαντική λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Οι προβλέψεις των ωριαίων φορτίων των επομένων 24 μέχρι και 168 ωρών είναι απαραίτητες για την υποστήριξη βασικών λειτουργιών προγραμματισμού του συστήματος παραγωγής όπως η υδροθερμική συνεργασία και οι ανταλλαγές ενέργειας, καθώς και των λειτουργιών ανάλυσης δικτύου που σχετίζονται με την ασφάλεια του συστήματος όπως η ανάλυση ενδεχόμενων διαταραχών. Μια αξιόπιστη πρόβλεψη φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομική και ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες μοντέλων πρόβλεψης με βάση το χρόνο εμφάνισής τους στη βιβλιογραφία, πρόκειται για μοντέλα :

α) παλινδρόμησης, β) εμπείρων συστημάτων, γ) νευρωνικών δικτύων, δ) ασαφών συστημάτων και ε) υβριδικά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Stanton K.N. and Gupta P.C.: "Forecasting Annual or Seasonal Peak Demand in Electric Utility Systems", IEEE Transactions, volume PAS89, Pages 951-959 (1970)
- [2] Christiaanse W.: "Short-Term Load Forecasting using General Exponential Smoothing", IEEE Transactions, volume PAS90, Pages 900-910 (1971)
- [3] Srinivasan K. and Pronovost R.: "Short Term Load Forecasting using Multiple Correlation Models", IEEE Transactions, volume PAS94, Pages 1854-1857 (1975)
- [4] Box G.E. and Jenkins G.M.: "Time Series Analysis, Forecasting and Control", Holden-Day: San Francisco, CA (1976)
- [5] Vemuri S., Huang W. L. and Nelson D. J.: "On-Line Algorithms for Forecasting Hourly Loads of an Electric Utility", IEEE Transactions on Power Applications & Systems, Volume PAS-100, No. 8, Pages 3775-3784 (1981)
- [6] Irisarri G.D., Widergren S.E. and Yehsakul P.D.: "On-line Load Forecasting for Energy Control Center Application", IEEE Transactions Power Applications & Systems, Volume PAS-101, No. 1, Pages 71-78 (1982)
- [7] Bolzern P. and Fronza G.: "Role of Weather Inputs in Short-Term Forecasting of Electric Load", Electric Power and Energy Systems, Vol 8, No. 1, Pages 42-46 (1986)
- [8] Gross G. and Galiana F.D.: "Short term load forecasting", Proc. IEEE, Volume 75, No. 12, Pages 1558-1573 (1987)
- [9] Rahman S , Bhatnagar R: "An expert system based algorithm for short term load forecast", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 3, Issue 2, Pages 392-399 (1988)
- [10] Jabbour K, Riveros JFV, Landsbergen D, Meyer W: "ALFA: automated load forecasting assistant", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 3, Issue 3, Pages 908-914 (1988)

- [11] Matthews A, Russell L, Carpinella C: "Weather-normalized intermediate term capacity forecasting: a procedural innovation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 3, Issue 3, Pages 1291-1297(1988)
- [12] Rahman S , Baba M: "An integrated load forecasting-load management simulator: its design and performance", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 4, Issue 1, Pages 184-189 (1989)
- [13] Moghram I, Rahman S: "Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 3, Issue 4, Pages 1484-1491 (1989)
- [14] Lu QC, Grady WM, Crawford MM, Anderson GM: "An adaptive nonlinear predictor with orthogonal escalator structure for short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 4, Issue 1, Pages 158-164 (1989)
- [15] Papalexopoulos AD, Hesterberg TC: "A regression-based approach to short-term system load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 5, Issue 4, Pages 1535-1547 (1990)
- [16] Ku-Long Ho, Yuan-Yih Hsu, Chuan-Fu Chen, Tzong-En Lee, Chih-Chien Liang, Tsau-S, Kung-Keng Chen: "Short term load forecasting of Taiwan power system using a knowledge-based expert system", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 5, Issue 4, Pages 1214-1221 (1990)
- [17] Hubele NF, Cheng C-S: "Identification of seasonal short-term load forecasting models using statistical decision functions", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 5, Issue 1, Pages 40-45 (1990)
- [18] Grady WM, Groce LA, Huebner TM, Lu QC, Crawford MM: "Enhancement, implementation, and performance of an adaptive short-term forecasting algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 6, Issue 4, Pages 1404-1410 (1991)
- [19] Park JH, Park YM, Lee KY: "Composite modeling for adaptive short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 6, Issue 2, Pages 450-457 (1991)
- [20] Peng TM, Hubele NF, Karady GG: "Advancement in the application of neural networks for short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 7, Issue 1, Pages 450-457 (1992)

- [21] Lee KY, Cha YT, Park JH: "Short-term load forecasting using an artificial neural network", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 7, Issue 1, Pages 124-132 (1992)
- [22] Chen S-T, Yu DC, Moghaddamjo AR: "Weather sensitive short-term load forecasting using non fully connected artificial and neural network", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 7, Issue 3, Pages 1098-1105 (1992)
- [23] Basu SN: "Short term localized load prediction", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 7, Issue 1, Pages 389-397 (1992)
- [24] Peng TM, Hubele NF, Karady GG: "An adaptive neural network approach to one-week ahead load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 3, Pages 1195-1203 (1993)
- [25] Rahman S, Hazim O: "A generalized knowledge-based short-term load-forecasting technique", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 2, Pages 508-514 (1993)
- [26] Lu C-N, Wu H-T, Vemuri S: "Neural network based short term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 1, Pages 336-348 (1993)
- [27] Mbamalu GAN, El-Hawary ME: "Load forecasting via suboptimal seasonal autoregressive models and iterative reweighted least squares estimation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 1, Pages 343-348 (1993)
- [28] Belzer DB, Kellogg MA: "Incorporating sources of uncertainty in forecasting peak power Monte Carlo analysis using the extreme value distribution", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 8, Issue 2, Pages 730-737 (1993)
- [29] Papalexopoulos AD, Shangyou Hao, Tie-Mao Peng: "An implementation of a neural network based load forecasting model for the EMS", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 4, Pages 1956-1962 (1994)
- [30] Haida T, Muto S: "Regression based peak load forecasting using a transformation technique", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 4, Pages 1788-1794 (1994)
- [31] Fan JY, McDonald JD: "A real-time implementation of short-term load forecasting for distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 2, Pages 988-994 (1994)

- [32] Mohammed O, Park D, Merchant R, Dihn T, Tong C, Azeem A, Farah J, Drake C: "Practical experiences with an adaptive neural network short-term load forecasting system", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 1, Pages 254-265 (1995)
- [33] Kwang-Ho Kim, Jong-Keun Park, Kab-Ju Hwang, Sung-Hak Kim: "Implementation of hybrid short-term load forecasting system using artificial networks and fuzzy expert systems", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 3, Pages 1534-1539 (1995)
- [34] Bakirtzis AG, Theocharis JB, Kiartzis SJ, Satsios KJ: "Short term load forecasting using fuzzy neural networks", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 3, Pages 1518-1524 (1995)
- [35] Dipti Srinivasan, Chang CS, Liew AC: "Demand forecasting using fuzzy neural computation, with special emphasis on weekend and public holiday forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 4, Pages 1897-1903 (1995)
- [36] Khotanzad A, Rey-Chue Hwank, Abaye A, Maratukulam D: An adaptive modular artificial neural network hourly load forecasting and its implementation at electric utilities", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 10, Issue 3, Pages 1716-1722 (1995)
- [37] Chow TWS, Leung CT: "Neural network based short term load forecasting using weather compensation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 4, Pages 1736-1742 (1996)
- [38] Khotanzad A, Davis MH, Abaye A, Maratukulam DJ: "An artificial neural network hourly temperature forecaster with applications in load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 2, Pages 870-876 (1996)
- [39] Piras A, Germond A, Buchenel B, Imhof K, Jaccard Y: "Heterogenous artificial neural network for short term electrical load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 1, Pages 397-402 (1996)
- [40] Liu K, Subbarayan S, Shoults RR, Manry MT, Kwan C, Lewis FI, Naccarino J: "Comparison of short-term load forecasting techniques", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 2, Pages 877-882 (1996)
- [41] Hong-Tzer Yang, Chao-Ming Huang, Ching-Lien Huang : "Identification of ARMAX model for short-term load forecasting: an evolutionary programming

- approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 1, Pages 403-408 (1996)
- [42] Mori H, Kobayashi H: “Optimal fuzzy inference for short-term load forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 1, Pages 390-396 (1996)
- [43] Lamedica R, Prudenzi A, Sforza M, Carciotta M, Cencelli VO: “A neural network based technique for short-term forecasting of anomalous load periods”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 11, Issue 4, Pages 1749-1756 (1996)
- [44] Dash PK, Satpathy HP, Liew AC, Rahman S: “A real-time short-term load forecasting system using functional link networks”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 12, Issue 2, Pages 675-680 (1997)
- [45] AlFuhaid AS, El-Sayed MA, Mahmoud MS: “Cascaded artificial neural networks for short-term load forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 12, Issue 4, Pages 1524-1529 (1997)
- [46] Choueiki MH, Mount-Campbell CA, Ahalt SC: “Implementing a weighted least squares procedure in training a neural network to solve the short-term load forecasting problem”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 12, Issue 4, Pages 1689-1694 (1997)
- [47] Choueiki MH, Mount-Campbell CA, Ahalt SC: “Building a 'quasi optimal' neural network to solve the short-term load forecasting problem”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 12, Issue 4, Pages 1432-1439 (1997)
- [48] Mo-Yen Chow, Jinxiang Zhu, Tram H: “Application of fuzzy multi-objective decision making in spatial load forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 3, Pages 1185-1190 (1998)
- [49] Barakat EH, Al-Qasem JM: “Methodology for weekly load forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 4, Pages 1548-1555 (1998)
- [50] Drezga I, Rahman S: “Input variable selection for ANN-based short-term load forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 4, Pages 1238-1244 (1998)
- [51] Daneshdoost M, Lotfalian M, Bumroonggit G, Ngoy JP: “Neural network with fuzzy set-based classification for short-term load forecasting”, IEEE

- Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 4, Pages 1386-1391 (1998)
- [52] Charytoniuk W, Chen MS, Van Olinda P: "Nonparametric regression based short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 3, Pages 725-730 (1998)
- [53] Hong-Tzer Yang, Chao-Ming Huang: "A new short-term load forecasting approach using self-organizing fuzzy models", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 1, Pages 217-225 (1998)
- [54] Douglas AP, Breipohl AM, Lee FN, Adapa R: "The impacts of temperature forecast uncertainty on Bayesian load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 4, Pages 1507-1513 (1998)
- [55] Papadakis SE, Theocharis JB, Kiartzis SJ, Bakirtzis AG: "A novel approach to short-term load forecasting using fuzzy neural networks", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 2, Pages 480-492 (1998)
- [56] Vermaak J, Botha EC: "Recurrent neural networks for short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 1, Pages 126-132 (1998)
- [57] Infield DG, Hill DC: "Optimal smoothing for trend removal in short term electricity demand forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 3, Pages 1115-1120 (1998)
- [58] Khotanzad A, Afkhami-Rohani R, Maratukulam DJ: ANNSTFL-Artificial Neural Network Short-Term Load Forecaster generation three", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 13, Issue 4, Pages 1413-1422 (1998)
- [59] Srinivasan D, Swee Sien Tan, Chen CS, Eng Kiat Chan: "Parallel neural network-fuzzy expert system strategy for short-term load forecasting: system implementation and performance evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 3, Pages 1100-1106 (1999)
- [60] Drezga I, Rahman S: "Short-term load forecasting with local ANN predictors", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 3, Pages 844-850 (1999)
- [61] Kassaei HR, Keyhani A, Woung T, Rahman S: "A hybrid fuzzy, neural network bus load modeling and predication", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 2, Pages 718-724 (1999)

- [62] Yoo H, Pinmel RL: "Short term load forecasting using a self-supervised adaptive neural network", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 2, Pages 779-784 (1999)
- [63] Mastorocostas PA, Theocharis JB, Bakirtzis AG: "Fuzzy modeling for short term load forecasting using the orthogonal least squares method", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 1, Pages 29-36 (1999)
- [64] Doveh E, Feigin P, Greig D, Hyams L: "Experience with FNN models for medium term power demand problem", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 14, Issue 2, Pages 538-546 (1999)
- [65] Kwang-Ho Kim, Hyoung-Sun Youn, Yong-Cheol Kang: "Short-term load forecasting for special days in anomalous load conditions: neural networks and fuzzy inference method", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 15, Issue 2, Pages 559-565 (2000)
- [66] da Silva APA, Moulin LS: "Confidence intervals for neural network based short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 15, Issue 4, Pages 1191-1196 (2000)
- [67] Charytoniuk W, Chen MS: "Very short-term load forecasting using artificial neural networks", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 15, Issue 1, Pages 263-268 (2000)
- [68] Valenzuela J, Mazumdar M, Kapoor A: "Influence of temperature and load forecast uncertainty on estimates of power generation production costs", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 15, Issue 2, Pages 668-674 (2000)
- [69] Charytoniuk W, Box ED, Lee W-J, Chen M-S, Kotas P, Van Olinda P: "Neural-network-based demand forecasting in a deregulated environment", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 36, Issue 3, Pages 893-898 (2000)
- [70] Mori H, Yuihlara A: "Deterministic annealing clustering for ANN-based short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 16, Issue 3, Pages 545-551 (2001)
- [71] Amjady N: "Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 16, Issue 3, Pages 498-505 (2001)

- [72] Hippert HS, Pedreira CE, Souza RC: "Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 16, Issue 1, Pages 44-55 (2001)
- [73] Taylor JW, Buizza R: "Neural network load forecasting with weather ensemble predictions", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Issue 3, Pages 626-632 (2002)
- [74] Senjiyu T; Takara H, Uezato K, Funabashi T: "One-hour-ahead load forecasting using neural network", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Issue 1, Pages 113-118 (2002)
- [75] Khotanzad A, Enwang Zhou, Elragal H: "A neuro-fuzzy approach to short-term load forecasting in a price-sensitive environment", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Issue 4, Pages 1273-1282 (2002)
- [76] Mohan Saini L, Kumar Soni M: "Artificial neural network-based peak load forecasting using conjugate methods", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Issue 3, Pages 907-912 (2002)
- [77] Haijun Liu, Yu D, Hsiao-Dong Chiang: "A heuristic meter placement method for load estimation", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Issue 3, Pages 913-917 (2002)
- [78] Ruzic S, Vuckovic A, Nikolic N: "Weather sensitive method for short-term load forecasting in electric power utility of Serbia", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 18, Issue 4, Pages 1581-1586 (2003)
- [79] Contreras J, Espinola R, Nogales FJ, Conejo AJ: "ARIMA models to predict next-day electricity prices", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 18, Issue 3, Pages 1014-1020 (2003)