

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΝΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΥ PORTAL ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΥΠΕΡΚΥΒΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

Βασίλειος Νικολόπουλος ¹

Υποψήφιος Δρ. ΕΜΠ, Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμέσων ΕΜΠ

Βασίλειος Λούμος ²

Καθ. ΕΜΠ, Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμέσων ΕΜΠ

¹Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμέσων, Σχολή ΗΜΜΗΥ - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο -
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου - 2107722538 - vnikolop@medialab.ntua.gr

²Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμέσων, Σχολή ΗΜΜΗΥ - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο -
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου - 2107722538 - loumos@cs.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το άρθρο περιγράφει ένα πρωτοποριακό διαδικτυακό Ενεργειακό Πληροφοριακό Σύστημα Λήψης Αποφάσεων [1], [7] -Web Energy Information System - την απαιτούμενη αρχιτεκτονική με τεχνολογίες διαδικτύου (Web Services) και την αλγοριθμική βάση ενός διαδικτυακού μοντέλου ελέγχου, επεξεργασίας, βελτιστής διαχείρισης και απεικόνισης μίας οποιαδήποτε χρόνο-δυναμικής Βάσης Δεδομένων με ενεργειακές μετρήσεις. Το εν λόγω σύστημα έχει ως στόχο την on-line ελαχιστοποίηση του μεταβλητού κόστους προμήθειας ενέργειας, μέσω της θεωρίας της βελτιστοποίησης καθώς και την μεγιστοποίηση των κερδών της επιχείρησης ή του εκάστοτε προμηθευτή. Επίσης επιτυγχάνεται και ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης από πλευράς καταναλωτή, μέσω ενεργειακού profiling και αμφίδρομου ελέγχου της ενεργειακής συμπεριφοράς (energy behavioral control) του καταναλωτή. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος το πρόβλημα περιγράφεται με μια σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση η οποία βάση των ενεργειακών αποτελεσμάτων που θα εξάγονται από την ενεργειακή βάση δεδομένων και σύνθετων on-line αλγορίθμων, θα ελαχιστοποιείται συνεχώς. Τα διάφορα ενεργειακά στατιστικά προφίλ των καταναλωτών αποθηκεύονται, συσταδοποιούνται με βάση την διαφορική τοπολογία ιστομορφικού υπερκύβου και χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό, με την βοήθεια ενός Internet Portal, όπου όλοι οι παίκτες έχουν πρόσβαση και συμμετέχουν σε μία διαδικασία ενεργειακής οικονομικής δοσοληψίας (internet energy auction).

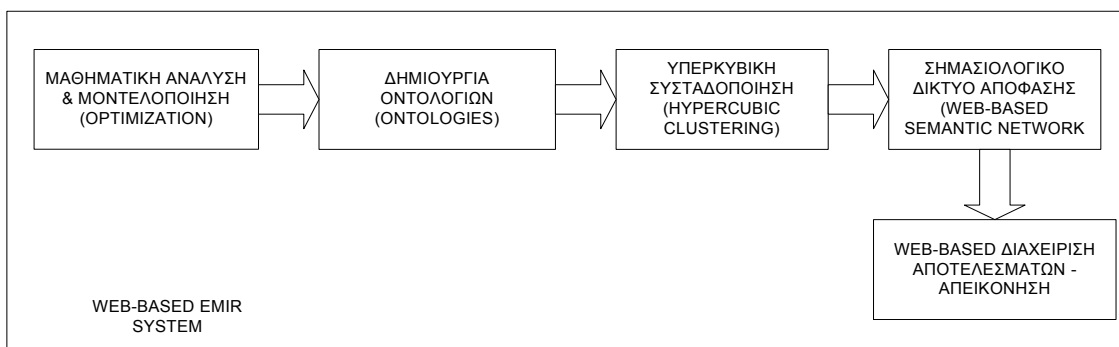
ABSTRACT: Energy Information Systems (EIS), which monitor and organize energy consumption and related trend data over the Internet, have been evolving over the past decade and can be considered as a part of a specialized DSS. In this paper, a modern and innovative web-based intelligent Energy Information System [1], [7] is described, for an optimal energy sources management and minimisation-control of home and factory-based energy consumption. The method is used for effective Energy Knowledge management in the newly opened Greek Energy Market. The system is designed and developed to analyze, optimize and manipulate energy data and energy practices, through a web portal. The energy data are accessed from ADSL databases and hypercubic grid structures or from internet-based heterogeneous sources, by using web services. The system adopts a powerful combination of current software frameworks based on the J2EE specification. Dynamic Java Server Pages and XML-XSL technologies provide effective energy data interoperability. The core intelligence of the on-line web system was developed using Matlab programming and the powerful MATLAB Web Server, connected in a clustered n-tier network. The system, which is currently on-line, was tested with real energy data and statistical graphical outputs were produced for result analysis and web-based reasoning demonstration.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχεδίαση της βέλτιστης ενεργειακής πολιτικής, στα πλαίσια της ελεύθερης παραγωγής και διάθεσης ενέργειας, εξελίσσεται σε ένα ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα την σήμερα εποχή, ειδικά μετά την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Την λύση μπορεί να δώσει το σύστημα και η μέθοδος που παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο με σκοπό την δημιουργία του πρώτου διαδικτυακού «έξυπνου» ενεργειακού χρηματιστηρίου για την on - line ανάλυση φορτίων και λήψης αποφάσεων στρατηγικού ενεργειακού σχεδιασμού.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Η μέθοδος που ακολουθείται συνδυάζει μία πρώτη οντολογική και σημασιολογική προσέγγιση του συστήματος παραγωγής ή προμήθειας [9], [10] και κοστολόγησης της ενέργειας και εν συνεχεία μέσω της δημιουργίας ενός σημασιολογικού δικτύου και Βάσης Δεδομένων, η ενεργειακή πληροφορία συσταδοποιείται (clustering), αναλύεται και παρουσιάζεται στον χρήστη μέσω στατιστικών γραφημάτων και πινάκων. Εν συνεχεία, αυτές οι ενεργειακές οντολογίες (προμηθευτής, πελάτης, ενεργειακή υπηρεσία, υπερκατανάλωση, peak κοκ) θα διασυνδεθούν μεταξύ τους για την παραγωγή ενός σύνθετου σημασιολογικού δικτύου, όπου βάση κάποιον προχωρημένων αλγορίθμων, θα επεξεργάζεται την πληροφορία για απόφαση.

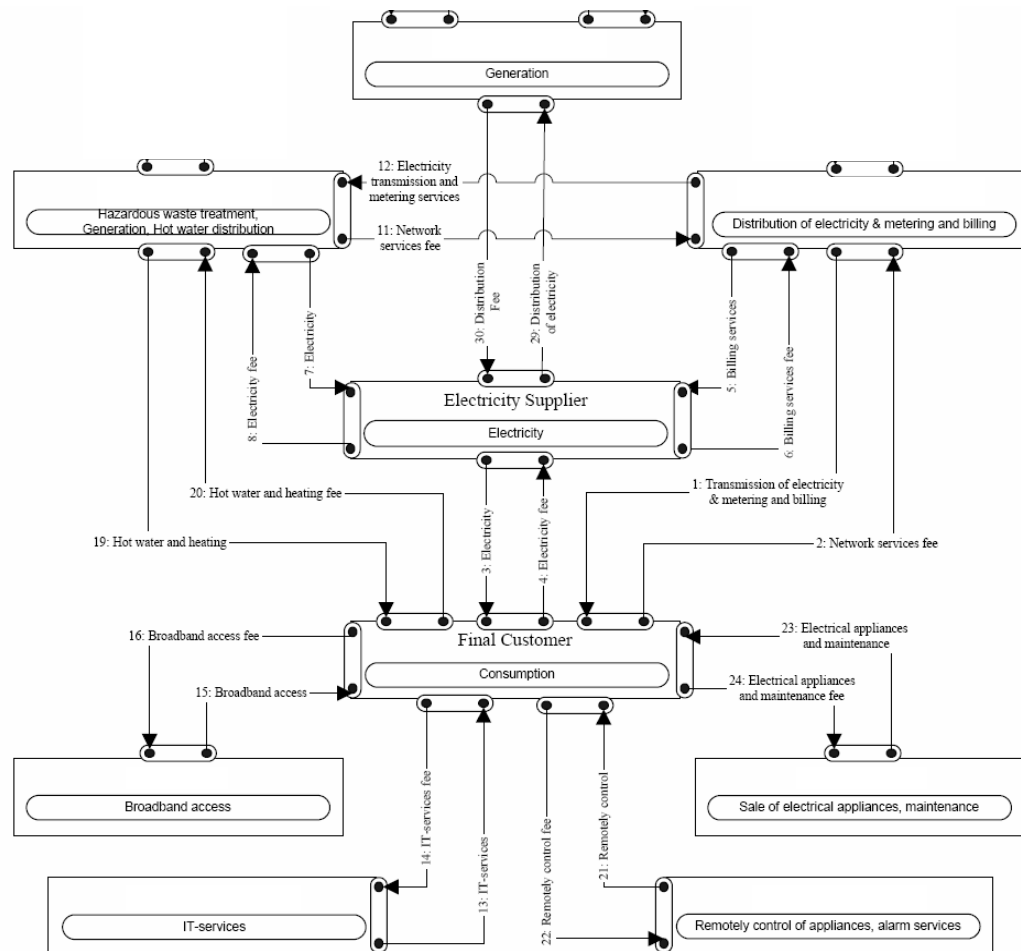


Σχ. 1 Συνολική διαδικασία ανάλυσης και σημασιολογικής επεξεργασίας ενεργειακής πληροφορίας

Οι υπηρεσίες του συστήματος θα είναι πλήρως προσπελάσιμες μέσω Διαδικτύου (advanced web services) και οι αυτοματοποιημένες απεικονίσεις θα γίνονται μέσω on-line web-based γραφικών αναφορών, που θα είναι ορατές σε όλους, μέσω ADSL σύνδεσης. Οι διάφορες μετρήσεις ενέργειας θα γίνονται μέσω ειδικών ασύρματων μετρητών και η μεταφορά δεδομένων μέσω ADSL δικτύων και ασύρματων ADSL Wi-Fi routers.

ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το αρχικό μοντέλο βασίστηκε στην μαθηματική ανάλυση κοστολόγησης του *E. Λεκατσά* [4] η οποία παρουσιάζει και αναλύει διεξοδικά όλα τα σύνθετα σημεία υπολογισμού και κοστολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ελεύθερη αγορά. Το μαθηματικό μοντέλο αναλύθηκε σε βάθος και με βάση τις περιγραφικές ολοκληρο-διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες, ενεργειακές ιεραρχικές οντολογίες εξήχθησαν.



Σχ. 2 Πρωτεύουσες σημασιολογικές ροές που ενοποιούν διάφορες ενεργειακές Οντολογίες

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος το πρόβλημα περιγράφεται μαθηματικά με μια Αντικειμενική Συνάρτηση (Objective Function) η οποία με βάση τα ενεργειακά αποτελέσματα που θα εξάγονται από την ενεργειακή Βάση Δεδομένων και σύνθετων on-line αλγορίθμων, θα ελαχιστοποιείται συνεχώς. Η όλη διαδικασία της ελαχιστοποίησης μπορεί να μας δώσει

σημαντικές πληροφορίες για την διαδικασία προμήθειας ενέργειας και βέλτιστων ενεργειακών δοσοληψιών, οι οποίες εξαρτώνται χρονικά από τις εκάστοτε ενεργειακές μετρήσεις. Η δυναμικότητα του συστήματος αντιμετωπίζεται δυναμικά από το σύστημα, με βάση την συνεχή διαδικτυακή εξόρυξη μετρήσεων και την συνεχή συσταδοποίηση των αποτελεσμάτων για εξαγωγή απόφασης (Hypercube Data Mining). Βασική επιδίωξη του web-based συστήματος είναι η εύρεση και στοχαστική πρόβλεψη των ωρών ή ημερών όπου θα υπάρχει κέρδος για τον προμηθευτή, που σημαίνει μικρό διαφορικό κόστος εισαγωγής και η δυνατότητα μεταβλητής τιμολογιακής πολιτικής προς τον καταναλωτή (προσφορές, εκπτώσεις, added-value ενεργειακές υπηρεσίες) που θα διεξάγεται δυναμικά από το σύστημα, με βάση το μεταβλητό ενεργειακό του προφίλ. Ως συνέπεια, η μεταβλητή τιμή της Οριακής Τιμής Συστήματος (ΟΤΣ) συγκριτικά με την μεταβλητή τιμή ενός συμβολαίου και το μεταβλητό διαφορικό κόστος παραγωγής ή προμήθειας θα αποφέρει στον προμηθευτή διαφορικά κέρδη από την πώληση της περίσσειας θετικής ενέργειας στο σύστημα ή στον στοχευμένο ενεργοβόρο καταναλωτή ο οποίος εκείνη την συσχετισμένη χρονική στιγμή θα έχει σημαντικό και κερδοφόρο peak. Η παραπάνω παραδοχή αποδεικνύεται και μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση E-

$$\text{νεργειακής Ισορροπίας [4]: } \sum_{j=1}^n (Q_j - L_{\Delta} - L_E) * SMP + \sum_{i=1}^m (Q_i^a - L_i^a) * SMP = 0 \quad (1)$$

Όπου $\left[Q_i \propto \sum_{n=1}^k W_n^k \right] \propto e_r$ που σημαίνει ότι το φορτίο είναι άμεσα εξαρτώμενο και ανάλογο της πολυδιάστατης Μήτρας W που αντιπροσωπεύει τις ειδικές τιμές και συμφωνίες (n) του συμβολαίου προμήθειας ενέργειας (k) καταναλωτών και επίσης η συνολική σχέση είναι ανάλογη της ζήτησης φορτίου που αντιπροσωπεύεται από την στοχαστική συνάρτηση $e_r(x)_{x_i}$, εξαρτώμενη από διάφορες κλιματολογικές και λοιπές τυχαίες μεταβλητές. Τα ανύσματα L_{Δ} και L_E μοντελοποιούνται από την εξίσωση (2) και αντιπροσωπεύουν την καταναλισκόμενη ενέργεια (από καταναλωτές) και το $Q_{i,j}$ αντιπροσωπεύει την παραγομένη ή εισαγόμενη ενέργεια από την προμηθευτή. Το SMP είναι η οριακή τιμή συστήματος (ΟΤΣ). Ένα τυπικό πολυμεταβλητό ενεργειακό διάνυσμα φορτίου περιγράφεται από την εξίσωση:

$$L_D = \mu_m^L + \sum_{i=1}^j w_d^{Li} v_m^{Li} \quad (2). \text{ Το διάνυσμα πρωτευόντων μεταβλητών [11] } v_{Li} \text{ και τα συσχετι-}$$

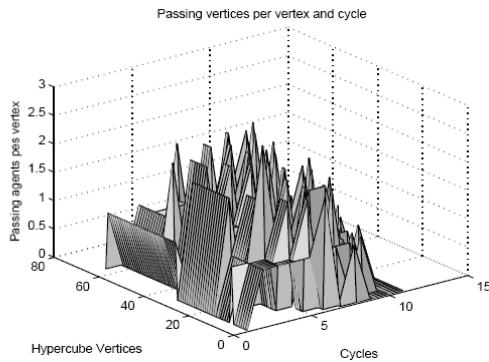
σμένα βάρη w_i ενσωματώνονται έτσι ώστε να υπάρξει η βέλτιστη προσέγγιση ενός συνολικού ενεργειακού διανύσματος φορτίου. Το μ_m συμβολίζει τα ημερήσια ενεργειακά διανύσματα. Ένα μηνιαίο μονοδιάστατο διάνυσμα $[24 \times 1]$ χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά φορτίου, μετασχηματίζοντας την παραπάνω εξίσωση σε: $L_D = \mu_m^L + w_d^L v_m^L$, ό-

που οι μεταβλητές μ_m και v_m είναι ντετερμινιστικά διανύσματα και το w_d μία ημερήσια στοχαστική διαδικασία. Η προσέγγιση λοιπόν και η πρόβλεψη φορτίων, θα ενσωματωθεί στην αρχική εξίσωση Ενεργειακής Ισορροπίας (1). Έτσι η διαφορά $Q_i - L_i$ είναι πολύ σημαντική καθώς περιγράφει το «κέρδος» του προμηθευτή, είτε προς το σύστημα (ΟΤΣ) είτε προς τους επιλέγοντες πελάτες του, μέσω της μήτρας συμβολαίων Wn . Η διαφορά κέρδους υπολογίζεται και προβλέπεται από την υπερκυβική συσταδοποίηση των ενεργειακών προφίλ των καταναλωτών. Οι ενεργειακές καμπύλες συσταδοποιούνται γύρω από τα απαραίτητα κεντροειδή, ανάλογα με το ποσοστό προμήθειας της ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση επιταγχύνει πάρα πολύ τις αλγοριθμικές διαδικασίες και ενσωματώνει τα κεντροειδή μέσα στο σημασιολογικό διάγραμμα του Σχ. 1. Έτσι, ο προμηθευτής μπορεί, ψάχνοντας μία μεγάλη χρονικά μεταβαλλόμενη ενεργειακή βάση, να βρει συσχετισμούς ενεργοβόρων καταναλωτών και την περιοδικότητά τους. Αυτόματα, το σύστημα αναπροσαρμόζει την αντικειμενική συνάρτηση και καθορίζει τις βέλτιστες τιμές συμβολαίων Wn , από όπου και οι καταναλωτές θα εξοικονομήσουν ενέργεια αλλά και ο προμηθευτής θα έχει συγκεντρωτικό κέρδος για μικρό χρονικό διάστημα (peak prediction - correlation). Συνεπώς, μέσω της μεταβαλλόμενης μήτρας W και της στοχαστικής εκτίμησης φορτίου $\overline{e_r(x)}_{x_i}$ μπορούμε να επέμβουμε στην ελεγχόμενη ελαχιστοποίηση. Το σύστημα, με back-end processes και διαδικασίες εξόρυξης, αναλύει τα μετρούμενα ενεργειακά δεδομένα και υπολογίζει τα θετικά ισοζύγια ενέργειας, με βάση τους πελάτες και τα κόστη εισαγωγής του εκάστοτε προμηθευτή. Εν συνεχεία, με την μέθοδο της συσταδοποίησης (clustering) και επιλέγοντας συγκεκριμένο κεντροειδές (centroid) βρίσκει και περιγράφει γραφικά τις βέλτιστες ημέρες και ώρες, όπου ο προμηθευτής αναμένεται να έχει κέρδος. Βέβαια, όλα τα παραπάνω είναι δυναμικά και προσαρμόζονται στην εκάστοτε αγορά και τους κανόνες συνδιαλλαγής. Η βάση του συστήματος απόφασης, είναι οι οντολογίες, οι οποίες συνδυαζόμενες δημιουργούν ένα ενεργειακό σημασιολογικό δίκτυο, το οποίο αποτελεί την βάση γνώσης του συστήματος.

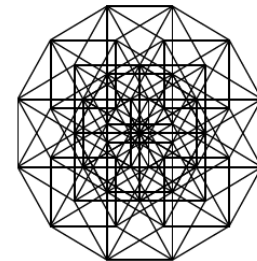
ΥΠΕΡΚΥΒΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η οντολογική προσέγγιση είναι μείζονος σημασίας [1], [2], [8] καθώς αποτελεί το μέσο από όπου θα εξαχθεί η απόφαση. Η παραπάνω προσέγγιση [1], [2], [7] σε συνδυασμό με αλγόριθμους υπερκυβικού clustering [2], εξάγει συγκριτική απόφαση για το αποτέλεσμα. Μέσω δυναμικών αλγορίθμων, βασισμένων στο Matlab, διάφορες τοπολογικές αποστάσεις (normed distances) μετρούνται από κεντροειδή με βάση διάφορες ενεργειακές ιδιότητες (attributes) οι

οποιές βαθμολογούνται σε σχέση με μία βέλτιστη, η οποία χαρακτηρίζεται και ως κεντροειδές. Με αυτό το τρόπο μπορούν να εισαχθούν όσες ιδιότητες θεωρούνται σημαντικές για την εξαγωγή συμπεράσματος (πχ. λεπτομέρειες συμβολαίων, τιμές peaks, ώρες peaks, κλπ).

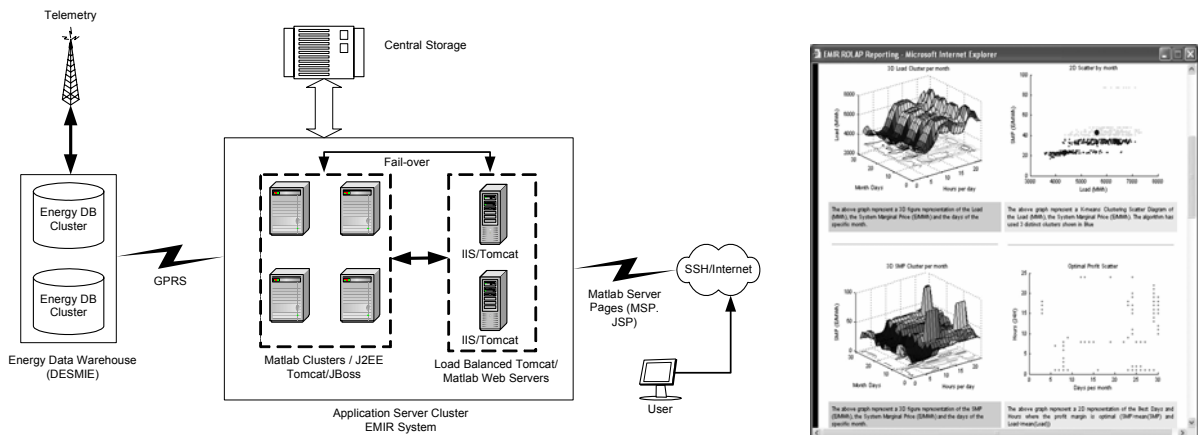


Σχ.3 Δρομολόγηση Ενεργειακού 64διάστατου Υπερκύβου



Σχ.4 64διάστος ισομορφικός Υπερκύβος

Η μέτρηση των νορμών βασίζονται σε ένα ισομορφικό μετρικό χώρο, που αποτελείται από πολλά vertices σε δομή simplicial complex, [2], [7]. Αυτό δίνει μία οπτική αλλά και μαθηματική μέτρηση του πόσο απέχει η εκάστοτε μέτρηση από γειτονικές οντότητες [1], [2], [7]. Διασυνδέοντας λοιπόν όλες τις αποστάσεις, με ειδικό μαθηματικό αλγόριθμο και ειδική παράλληλη επεξεργασία, έχουμε πολυδιάστατη γνώση αλλά και οπτικά ένα γεωμετρικό - τοπολογικό locus που μας δείχνει το πως "κινείται" η μέτρηση σε σχέση με τα κεντροειδή που έχουμε θέσει αρχικά ως βέλτιστες τιμές (πχ. εκτιμώμενο κέρδος, ιδανικό SMP, βέλτιστη τιμή συμβολαίου, κοκ). Η παραπάνω εξομοίωση έγινε μέσα σε ένα ιδεατό υπερκυβικό πλέγμα, όπου κάθε κορυφή αντιστοιχεί σε ένα κεντροειδές (centroid). Η μέτρηση των νορμών έγινε χρησιμοποιώντας τον στοχαστικό αλγόριθμο δρομολόγησης του L.Valiant [2] με την χρήση πρακτόρων-agents και κάποια αποτελέσματα φαίνονται στον Σχ.3, με πολύ καλό performance output (10 virtual κόκκοι CPU για δρομολόγηση 64αρων centroids σε παράλληλο σύστημα clustered Matlab / J2EE και υπολογισμού 5-διάστατης Ευκλείδειας Νόρμας). Η επικοινωνία μεταξύ των δομημένων στοιχείων γίνεται με την XML η οποία αποτελεί πια έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο περιγραφής και ενσωμάτωσης δομημένης πληροφορίας. Τα διάφορα ενεργειακά δεδομένα τα οποία αποκτώνται είτε μέσω δομημένης βάσης, είτε μέσω σημασιολογικών IR τεχνικών από το Internet (HITS, Page Rank σε συνδυασμό με OWL) αναλύονται και μοντελοποιούνται στον βασικό Matlab Application Server [5] με βάση το Σχ.5



Σχ. 5 Σχηματικό διάγραμμα συνολικής J2EE - Matlab Αρχιτεκτονικής και παράδειγμα web output

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το παραπάνω πληροφοριακό σύστημα εστιάζεται στην ενσωματωμένη ενεργειακή ευφυΐα, η οποία χρησιμοποιείται on-line με την βοήθεια σύγχρονων πληροφοριακών συστημάτων και την χρησιμοποίηση του στρώματος ADSL - Internet ως μέσο πρόσβασης και ως μέσο αναζήτησης. Επίσης, η απαιτούμενη υπολογιστική ευφυΐα και πολυπλοκότητα θα παραμένει κρυφή στον τελικό χρήστη, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος, διότι ο απλός χρήστης χωρίς ειδικευμένες γνώσεις θα μπορεί με απλά menus και απλές διεπαφές, μέσω ενός Internet browser, να παράγει σύνθετα reports και στατιστικούς πίνακες. Το σύστημα και η μέθοδος προστατεύεται ήδη από 2 διπλώματα ευρεσιτεχνίας (O.B.I.)

REFERENCES

- [1] **E.M.I.R. Project** (Energy Management & Intelligent Reporting) : <http://fermat.medialab.ntua.gr/emir>
- [2] 'Analyse et Simulation des méthodes de routage dans la topologie d'hypercube', V. Nikolopoulos, mémoire Ingénieur, Ecole Polytechnique, promotion X99, 2002
- [3] 'Responsable d'équilibre - Règles et contractualisation', RTE, France
- [4] 'Financial Analysis of Energy Systems', E.Lekatsas, Chap.4 Pupil. TEE 2000
- [5] MATLAB Web Server. Natick, MA: The Mathworks Inc., 1999.
- [6] 'Code of Commerce', MAVIR website <http://www.mavir.hu>
- [7] 'A web-based Energy Decision Support System for dynamic knowledge energy management and automatic intelligent reporting (EMIR)', paper under preparation, V.Nikolopoulos,, V.Loumos, Medialab, NTUA 2006
- [8] Newman MEJ. The structure and function of complex networks. Siam Rev 2003;45(2):167-256.
- [9] Steyvers M, Tenenbaum JB. The large-scale structure of semantic networks: Statistical analyses and a model of semantic growth. Cognitive Sci 2005;29(1):41-78.
- [10] M.Emoult and F.Meslier, "Analysis and forecast of electrical energy demand". RCE, No.4, 1982.
- [11] Skantze, P., Chapman, J., Ilic, M.D., "Stochastic Modelling of Electric Power Prices in a Multi-Market Environment", Transactions of IEEE PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.
- [12] S.V.Allera and A.G.Horsburgh, "Load profiling for the energy trading and settlements in the UK electricity markets", Proc. DistribuTECH Europe DA/DSM Conference, London, 27-29 October 1998