

Οικονομική Αποτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Π. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός

Δ. ΔΑΜΙΓΟΣ

Λέκτορας ΕΜΠ

Περίληψη

Η αποτίμηση του περιβάλλοντος σε οικονομικούς όρους αποκτά, τα τελευταία χρόνια, έμπρακτο ενδιαφέρον για τους φορείς που εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, σε όλα τα επίπεδα. Το γεγονός αυτό οφείλεται, σε σημαντικό βαθμό, στις αλλαγές του νομοθετικού πλαισίου σε ευρωπαϊκό και κατ' επέκταση εθνικό επίπεδο. Η παρούσα εργασία εστιάζει σε ένα κρίσιμο για την Ελλάδα τομέα, ήτοι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη. Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιάσει ένα πλαίσιο για την αποτίμηση των επιπτώσεων από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να αναδείξει τις εξελίξεις και τις αβεβαιότητες στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Σε αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζεται ως περίπτωση μελέτης ο ατμοηλεκτρικός σταθμός Αγίου Δημητρίου Πτολεμαΐδας. Το εξωτερικό κόστος αποτιμάται με τη βοήθεια εξειδικευμένων εργαλείων περιβαλλοντικής αποτίμησης, ενσωματώνοντας τα πλέον σύγχρονα συμπεράσματα από διεθνείς επιστημονικές έρευνες. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη που είχαν προκύψει από το ερευνητικό έργο ExternE, για το συγκεκριμένο σταθμό, προκειμένου να αναδειχθούν και να αξιολογηθούν οι κρίσιμες παράμετροι διαφοροποίησης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η οικονομική αποτίμηση του περιβάλλοντος ενσωματώνεται ολοένα και περισσότερο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, σε όλα τα επίπεδα. Στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει σημαντικά η περιβαλλοντική νομοθεσία, η οποία, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, επιβάλλει σε συγκεκριμένες περιπτώσεις την εφαρμογή μεθόδων περιβαλλοντικής αποτίμησης (π.χ. Οδηγίες 1996/61 σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης, 2000/60 για τη θέσπιση πολιτικής στη διαχείριση των υδατικών πόρων, 2004/35 την περιβαλλοντική ευθύνη όσον αφορά στην πρόληψη και αποκατάσταση των περιβαλλοντικών ζημιών, κ.λπ.).

Ειδικά στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει, σε διεθνές επίπεδο, έντονη δραστηριότητα αναφορικά με την εκτίμηση και αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το γεγονός αυτό απορρέει αφενός από τις απαιτήσεις των διαφόρων νομοθετικών πράξεων και αφετέρου από την ανάγκη συγκριτικής αξιολόγησης των διαφόρων ανταγωνιστικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (λιγνίτης, φυσικό αέριο, ΑΠΕ, κ.ά.) σε μια ενιαία βάση, στα

Υποβλήθηκε: 30.3.2006 Έγινε δεκτή: 1.8.2006

πλαίσια της χάραξης μιας πιο ορθολογικής περιβαλλοντικής και ενεργειακής πολιτικής.

Προς αυτή την κατεύθυνση, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή χρηματοδοτεί συστηματικά, εδώ και μία δεκαετία, ερευνητικά προγράμματα, τα οποία έχουν ως στόχο την αποτίμηση των επιπτώσεων από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. ExternE, NewExt, κ.ά.). Από τα αποτελέσματα των ερευνών προκύπτουν, συχνά, νέα δεδομένα, τα οποία οδηγούν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις κρίσιμων, για την αποτίμηση των επιπτώσεων, παραμέτρων. Το στοιχείο αυτό, σε συνδυασμό με την έντονη κριτική που ασκείται, ορισμένες φορές, υποδηλώνει ότι η προσπάθεια, μολονότι σημαντική, βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και υπάρχουν μια σειρά τεχνικών, πολιτικών αλλά και ηθικών ζητημάτων, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθώς και το γεγονός ότι η αποτίμηση των επιπτώσεων από διάφορες εγκαταστάσεις, και δη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποκτά σήμερα έμπρακτο ενδιαφέρον στα πλαίσια λήψης αποφάσεων (π.χ. για την επιλογή Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών προστασίας του περιβάλλοντος υπό την Οδηγία 96/61), η παρούσα εργασία έχει διττό στόχο:

- αφενός να παρουσιάσει ένα πλαίσιο για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- αφετέρου να αναδείξει τις εξελίξεις των πλέον πρόσφατων ερευνών πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο και την επίδρασή τους στην αποτίμηση των επιπτώσεων.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ως περίπτωση μελέτης ο ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου, ο οποίος βρίσκεται στο ενεργειακό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας. Το κόστος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου εκτιμάται με τη βοήθεια δύο εξειδικευμένων λογισμικών, του EcoSense 4 και του RiskPoll, στα οποία έχουν ενσωματωθεί οι αναμορφωμένες παράμετροι της αποτίμησης. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης του εξωτερικού κόστους εξετάζονται συγκριτικά με τα αντίστοιχα μεγέθη που είχαν προκύψει από το ερευνητικό έργο ExternE, για το συγκεκριμένο σταθμό, προκειμένου να αναδειχθούν και να αναλυθούν οι κρίσιμες συνιστώσες της διαφοροποίησης.

2. ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το πρόβλημα των εξωτερικών οικονομικών εξετάζεται, συστηματικά, σε θεωρητική βάση από το 1920, οπότε παρουσιάστηκε η εργασία του Ρίγου [1]. Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές εργασίες έχουν επικεντρώσει στην εκτίμηση του εξωτερικού κόστους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [2, 3, 4, 5, 6], τα αποτελέσματα των οποίων, σε αρκετές περιπτώσεις, έχουν αξιοποιηθεί σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Σε πολλές μελέτες αποτίμησης του εξωτερικού κόστους χρησιμοποιείται προσέγγιση από «την κορυφή προς τη βάση» (top-down). Όμως, αυτή η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι η ζημιά είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενη από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (τεχνικά, γεωμορφολογικά, κοινωνικά, κ.λπ.) κάθε περίπτωσης. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση παρέχει αποτελέσματα για τις μέσες, αλλά όχι οριακές τιμές, όπως απαιτείται σε πολλές περιπτώσεις.

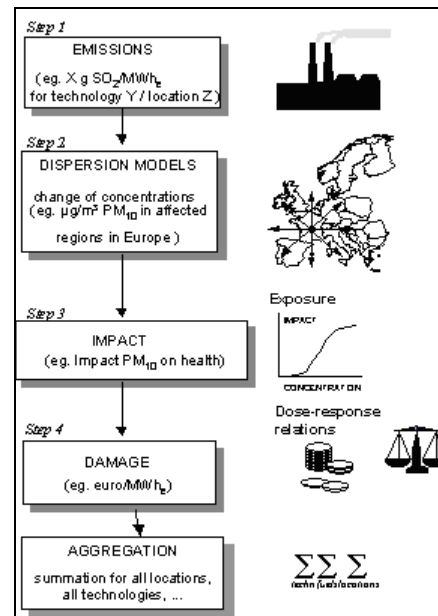
Η πιο εκτενής και ολοκληρωμένη επιστημονική εργασία στο συγκεκριμένο πεδίο, μέχρι σήμερα, θεωρείται το πρόγραμμα ExternE (Externalities of Energy), το οποίο ξεκίνησε το 1991 με τη συνεργασία της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των ΗΠΑ [7]. Η πρώτη φάση του προγράμματος ολοκληρώθηκε το 1998 [8, 9] και, όπως εκτιμήθηκε, το εξωτερικό κόστος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην Ευρώπη, ανέρχεται σε 1% έως 2% του ετήσιου ΑΕΠ. Η προσπάθεια αυτή συνεχίζεται, από πλευράς Ε.Ε., με τα προγράμματα NewExt (New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies), CAFE (Clean Air for Europe), κ.ά. [10, 11, 12].

Στα ανωτέρω προγράμματα της Ε.Ε. έχει υιοθετηθεί η προσέγγιση του «τρόπου της επίδρασης» (Impact Pathway Approach) για την αποτίμηση των εξωτερικών επιπτώσεων. Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται από «τη βάση προς την κορυφή» (bottom-up approach). Τα περιβαλλοντικά κόστη και οφέλη αποτιμώνται σε χρηματικές μονάδες ακολουθώντας το «δρόμο» από την πηγή εκπομπής προς τους αποδέκτες, μέσω των επιπτώσεων στον αέρα, το έδαφος και τα νερά. Μέσω της συγκεκριμένης προσέγγισης, καθίσταται εφικτή η εκτίμηση οριακών τιμών εξωτερικού κόστους για τη μεταβολή των εκπεμπόμενων ρύπων, ο προσδιορισμός των κρίσιμων ρύπων, αποδεκτών, κ.λπ. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια (Σχ. 1):

- Εκτίμηση των εκπομπών στην πηγή
- Μοντελοποίηση της διασποράς των ρύπων
- Εκτίμηση των φυσικών επιπτώσεων μέσω εξισώσεων δόσης – αποτελέσματος
- Αποτίμηση των φυσικών επιπτώσεων σε χρηματικές μονάδες ανά έτος, παραγόμενη kWh, κ.λπ.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών, δεδομένων των πολύπλοκων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μεταφορά και τους χημικούς μετασχηματισμούς των ρύπων στην

ατμόσφαιρα. Σε αυτή την κατεύθυνση, έχουν αναπτυχθεί από το πρόγραμμα ExternE τα λογισμικά EcoSense [13] και RiskPoll [14]. Τα λογισμικά αποτιμούν τις επιπτώσεις από τις εκπομπές των διαφόρων ρύπων (π.χ. σωματίδια PM₁₀, SO₂, NO_x, δευτερογενών θεικών και νιτρικών αερολυμάτων, κ.ά.). Οι δέκτες των επιπτώσεων περιλαμβάνουν την ανθρώπινη υγεία, τις γεωργικές καλλιέργειες και τα δομικά υλικά.



Σχήμα 1. Η προσέγγιση του «τρόπου της επίδρασης» [8,9]
Figure 1. The "Impact pathway approach"

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

3.1 Δεδομένα αξιολόγησης

Η υπό εξέταση μονάδα βρίσκεται στον Αγ. Δημήτριο, στη νοτιοανατολική πλευρά της λεκάνης του λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας. Σύμφωνα με τα στοιχεία του προγράμματος ExternE Ελλάδας [15], τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στη συγκεκριμένη περίπτωση, η εγκατεστημένη ικανότητα παραγωγής του σταθμού είναι 366,5 MW και η διάρκεια ζωής του 40 έτη. Η καθαρή απόδοση του σταθμού ανέρχεται σε 34% και ο συντελεστής φορτίου σε 68,5%. Η περιεκτικότητα των ρύπων στα καυσαέρια είναι: σωματίδια <50 mg/Nm³, SO₂ 170-300 mg/Nm³, NO_x 190-200 mg/Nm³ και οι ετήσιες εκπομπές: σωματίδια 556 t, SO₂ 2615 t και NO_x 2170 t, αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, τα αντίστοιχα τεχνικά δεδομένα όπως: το ύψος και η διάμετρος της καπνοδόχου, ο όγκος, η ταχύτητα εξόδου και η θερμοκρασία των καυσαερίων.

Όσον αφορά στα πληθυσμιακά στοιχεία, στο πρόγραμμα EcoSense χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη βάση δεδομέ-

νων. Στο πρόγραμμα RiskPoll πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της μέσης πυκνότητας πληθυσμού, η οποία απαιτείται για την εκτίμηση των επιπτώσεων, σε τοπικό (περιοχή ακτίνας 60 Km, περίπου) και σε υπερτοπικό επίπεδο για τις 19 χώρες (περιοχή ακτίνας 1000 Km) που επηρεάζονται, όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 1 και στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1. Επηρεαζόμενες χώρες που βρίσκονται στην ακτίνα των 1000 km.

Table 1. Countries within the area of interest (range 1000 km)

Χώρα	Συνολικός πληθυσμός	Εκτιθέμενος πληθυσμός
Αλβανία	3.169.000	3.169.000
Αυστρία	8.140.000	4.000.000
Βοσνία	4.140.000	4.140.000
Βουλγαρία	7.801.000	7.801.000
Γιουγκοσλαβία	8.104.000	8.104.000
Ελλάδα	11.041.000	11.041.000
Ιταλία	57.888.000	40.000.000
Κροατία	4.442.000	4.442.000
Λιβύη	5.700.000	2.800.000
Μάλτα	400.000	400.000
Μολδαβία	4.238.000	2.500.000
Ουγγαρία	10.116.000	10.116.000
Ουκρανία	48.356.000	6.500.000
ΠΓΔΜ	2.049.000	2.049.000
Ρουμανία	21.711.000	21.711.000
Σλοβακία	5.380.000	4.000.000
Σλοβενία	1.996.000	1.996.000
Τουρκία	70.712.000	50.000.000
Τυνησία	9.400.000	500.000
Σύνολο εκτιθέμενου πληθυσμού		185.269.000
Μέση πληθυσμιακή πυκνότητα (άτομα/km²)		58,97

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων στο παρόν άρθρο, εστιάζει στην ανθρώπινη υγεία, για δύο κυρίως λόγους:

- το κόστος των επιπτώσεων της υγείας κυμαίνεται μεταξύ 80 – 94%, του συνολικού εξωτερικού κόστους [16, 17]
- οι σημαντικότερες εξελίξεις, που έχουν άμεση σχέση με την εκτίμηση του εξωτερικού κόστους, αφορούν σε παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση και αποτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, κυρίως στη χρόνια και οξεία θνησιμότητα.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις έκθεσης – απόκρισης από τις αναφερόμενες πηγές [10, 11, 12], οι οποίες είναι ενσωματωμένες στα δύο λογισμικά.



Σχήμα 2. Περιοχή ενδιαφέροντος (ακτίνα 1000 Km).

Figure 2. Area of interest (range 1000 km).

Για την οικονομική αποτίμηση των επιπτώσεων αυτών, υιοθετήθηκαν οι αναφερόμενες στον Πίνακα 2 τιμές [10, 11, 12, 18, 19].

Πίνακας 2. Τιμές μονάδας ανά επίπτωση (σε €2006)

Table 2. Unit prices per impact (in €2006)

Επίπτωση	Αποτίμηση
Χρόνια θνησιμότητα – σε YOLL ^(*)	50000
Οξεία θνησιμότητα – σε YOLL	75000
Χρόνια βρογχίτιδα	169300
Εισαγωγή σε νοσοκομείο λόγω παθήσεων των εγκεφαλικών αγγείων	16730
Ημέρες περιορισμένης δραστηριότητας	110
Αναπνευστική νοσοκομειακή εισαγωγή	4320
Χρόνιος βήχας –παιδιά	240
Συμφορητική καρδιακή ανεπάρκεια	3260
Βήχας – ασματικοί ενήλικες ή παιδιά	45
Χρήση βρογχοδιασταλτικών – ενήλικες ή παιδιά	40
Συμπτώματα του κατώτερου αναπνευστικού – ενήλικες ή παιδιά, με άσθμα	8

(*) YOLL: Years of Life Lost – Μείωση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής σε έτη

3.2 Αποτελέσματα EcoSense 4

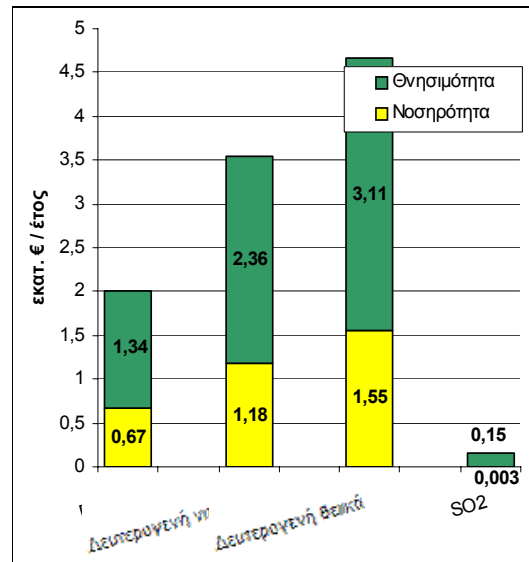
Από τα αποτελέσματα της αποτίμησης των επιπτώσεων με βάση το λογισμικό EcoSense 4 προκύπτει, ότι το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 10.350.000 €/έτος περίπου ή με βάση την ετήσια παραγωγή των 2.199.000 MWh/έτος σε 0,52 €cent/kWh. Στον Πίν. 3 και στο Σχ. 3 παρατίθενται τα αποτελέσματα της οικονομικής αποτίμησης των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία ανά ρύπο.

Πίνακας 3. Χρηματική αποτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με βάση το EcoSense 4

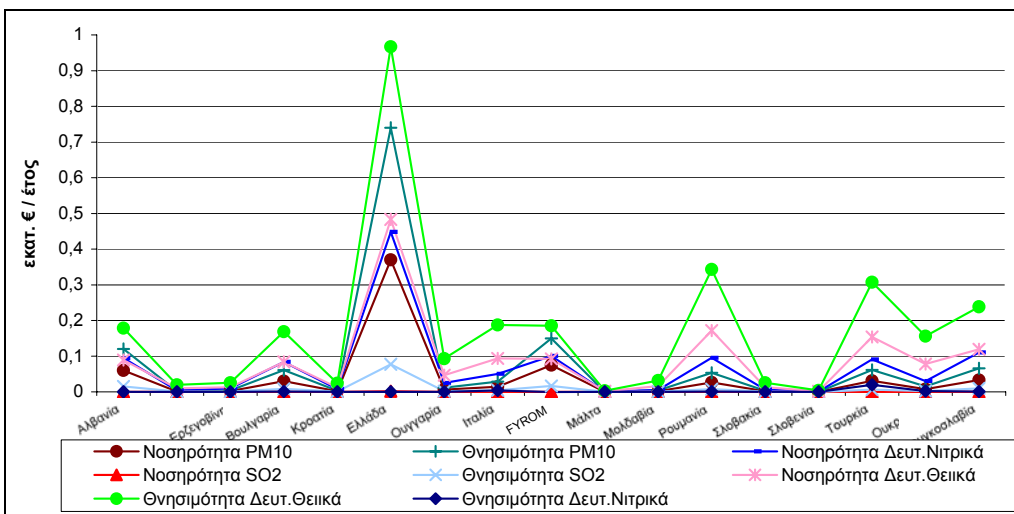
Table 3. Monetary valuation of human health impacts based on EcoSense 4

Επίπτωση	εκατ. €/έτος	€cent/kWh
Νοσηρότητα (PM10)	0,6673	0,0337
Θνησιμότητα (PM10)	1,3350	0,0674
Νοσηρότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	1,1780	0,0595
Θνησιμότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	2,3560	0,1190
Νοσηρότητα (Δευτερογενή θειικά)	1,5520	0,0784
Θνησιμότητα (Δευτερογενή θειικά)	3,1050	0,1568
Νοσηρότητα (SO ₂)	0,0034	0,0002
Θνησιμότητα (SO ₂)	0,1544	0,0078
Σύνολο	10,35	0,52

Επίσης, στο Σχ. 4 παρουσιάζονται οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ανά ρύπο και χώρα, για την περιοχή εντός της ακτίνας των 1000 km. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, το SO₂ προκαλεί τις μεγαλύτερες επιπτώσεις ως δευτερογενής ρύπος (sulphate-θειικά αερολύματα). Το σύνολο των επιπτώσεων από το SO₂ ανέρχεται σε 4,8 εκατ. € δηλαδή σε ποσοστό 46,5% του συνολικού εξωτερικού κόστους. Από το Σχ. 4, φαίνεται επίσης ότι οι μεγαλύτερες επιπτώσεις από τη λειτουργία του Σταθμού εμφανίζονται στην Ελλάδα.



Σχήμα 3. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ανά ρύπο (Ecos. 4)
Figure 3. Impacts on human health for each pollutant (Ecos. 4)



Σχήμα 4. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία στις επηρεαζόμενες χώρες (EcoSense 4)
Figure 4. Impacts on human health in the influenced countries (EcoSense 4)

3.3 Αποτελέσματα RiskPoll

Στην έκδοση RiskPoll που χρησιμοποιήθηκε (ver. 1.051, Αύγουστος 2004), υπάρχουν τέσσερα μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων: το RUWM, το QUERI και το URBAN για τον υπολογισμό των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και το AGRIMAT για τον υπολογισμό των επιπτώσεων στις γεωργικές καλλιέργειες και στα οικοδομικά υλικά. Δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται εκτός αστικής περιοχής, δεν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο URBAN. Επίσης, δεν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο AGRIMAT διότι ενδιέφεραν κυρίως οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με βάση το μοντέλο RUWM (εκτίμηση Best) και με το μοντέλο QUERI (εκτίμηση Intermediate). Για κάθε μοντέλο πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις σε σχέση με το χαρακτηρισμό της περιοχής ως αγροτικής (Site ID 0). Όπως φαίνεται από τους Πίν. 4 και 5, οι υπολογισμοί έδωσαν αποτελέσματα για τα δύο μοντέλα με μικρές διαφοροποιήσεις.

Πίνακας 4. Χρηματική αποτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με βάση το RiskPoll – Μοντέλο RUWM

Table 4. Monetary valuation of human health impacts based on RiskPoll – RUWM Model

Επίπτωση	εκατ. €/έτος	€cent/kWh
Νοσηρότητα (PM10)	1,38	0,0628
Θνησιμότητα (PM10)	2,16	0,0982
Νοσηρότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	2,76	0,1255
Θνησιμότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	4,31	0,1960
Νοσηρότητα (Δευτερογενή θειικά)	4,4	0,2001
Θνησιμότητα (Δευτερογενή θειικά)	7,1	0,3229
Νοσηρότητα (SO ₂)	0,01	0,0005
Θνησιμότητα (SO ₂)	0,164	0,0075
Σύνολο	22,3	1,013

Πίνακας 5. Χρηματική αποτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με βάση το RiskPoll – Μοντέλο QUERI

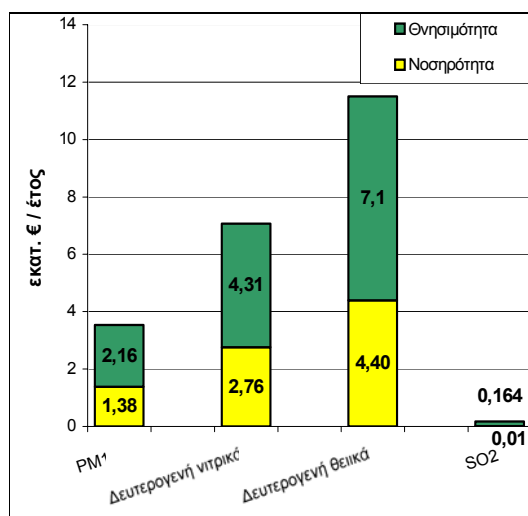
Table 5. Monetary valuation of human health impacts based on RiskPoll - QUERI Model

Επίπτωση	εκατ. €/έτος	€cent/kWh
Νοσηρότητα (PM10)	1,50	0,0682
Θνησιμότητα (PM10)	2,34	0,1064
Νοσηρότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	2,76	0,1255
Θνησιμότητα (Δευτερογενή νιτρικά)	4,31	0,1960
Νοσηρότητα (Δευτερογενή θειικά)	4,4	0,2001
Θνησιμότητα (Δευτερογενή θειικά)	7,1	0,3229
Νοσηρότητα (SO ₂)	0,007	0,0003
Θνησιμότητα (SO ₂)	0,179	0,0081
Σύνολο	22,6	1,028

Το συνολικό κόστος των επιπτώσεων βάσει των αποτελεσμάτων του RiskPoll ανέρχεται σε 22,3-22,6 εκατ. € ετήσια βάση ή σε 1,013- 1,028 €cent/kWh.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5, οι μεγαλύτερες επιπτώσεις,

σε ποσοστό 52,3%, προκαλούνται από το SO₂ και κυρίως μέσω των δευτερογενών ρύπων του (θειικά σωματίδια), τα οποία είναι υπεύθυνα για το 51,6% του εξωτερικού κόστους. Επίσης, μεγαλύτερες επιπτώσεις παρατηρούνται στη θνησιμότητα παρά στη νοσηρότητα. Πιο συγκεκριμένα, το εξωτερικό κόστος για τη θνησιμότητα ανέρχεται σε 61,6% του εξωτερικού κόστους, έναντι 31,4% για τη νοσηρότητα.



Σχίμα 5. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία για κάθε ρύπο (εκτίμηση RUWM Best - site ID 0)

Figure 5. Impacts on human health for each pollutant (RUWM estimate Best - site ID 0)

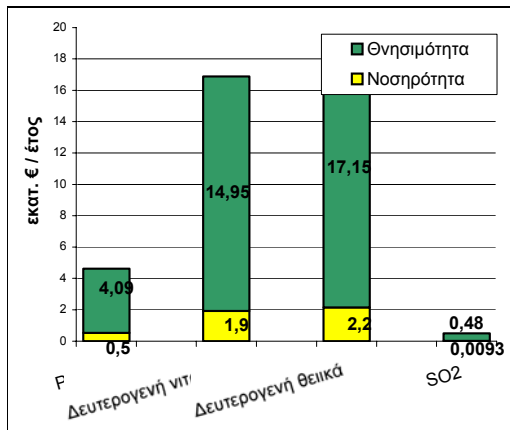
4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Τα αποτελέσματα του ExternE 1997

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των ερευνητικών εξελίξεων στο πεδίο της περιβαλλοντικής αποτίμησης των επιπτώσεων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάστηκαν οι διαφορές μεταξύ των δύο πρόσφατων λογισμικών, EcoSense 4 και RiskPoll, με τα αποτελέσματα του ExternE 1997, στο οποίο είχε γίνει χρήση του λογισμικού EcoSense 2.

Σύμφωνα με τη μελέτη που εκπονήθηκε για τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου, στα πλαίσια του ExternE, με τη χρησιμοποίηση του λογισμικού EcoSense 2 [15], η προκαλούμενη βλάβη στην ανθρώπινη υγεία εκτιμήθηκε σε περίπου 43.800.000 €/έτος ή 1,99 €cent/kWh.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 6, και στην περίπτωση αυτή οι επιπτώσεις από το SO₂ είναι οι σημαντικότερες, συμβάλλοντας στο 45,2% του συνολικού εξωτερικού κόστους. Οι μεγαλύτερες επιπτώσεις εμφανίζονται, επίσης, στη θνησιμότητα, η οποία καλύπτει ποσοστό 89% των επιπτώσεων των δευτερογενών ρύπων SO₂ και 88% από τις επιπτώσεις των δευτερογενών ρύπων NO_x, αντίστοιχα.



Σχήμα 6. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ανά ρύπο (Ecos. 2)
Figure 6. Impacts on human health for each pollutant (Ecos. 2)

4.2 Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα λογισμικά ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, καθώς σε αυτές εντοπίζονται οι σημαντικότερες μεταβολές. Στους Πίν. 6 και 7, καθώς και στο Σχ. 7 παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα των τριών λογισμικών για την οικονομική αποτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, σε απόλυτα και ποσοστιαία μεγέθη.

Πίνακας 6. Συγκριτικά αποτελέσματα επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία (σε εκατ. €/έτος)

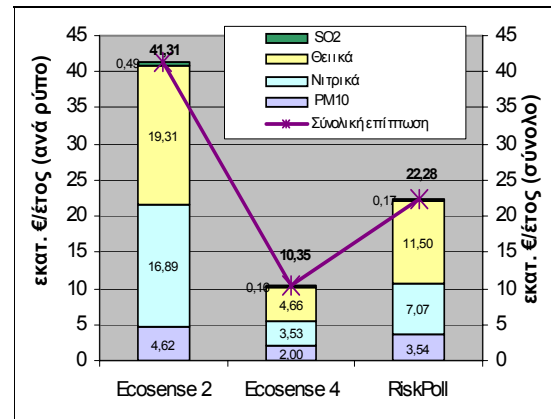
Table 6. Comparative results of impacts on human health (in M€ /year)

Ρύπος	EcoSense 2	EcoSense 4	RiskPoll
PM10	4,62	2,00	3,54
Δευτ. νιτρικά	16,88	3,54	7,07
Δευτ. θειικά	19,31	4,66	11,50
SO ₂	0,49	0,16	0,17
Σύνολο	41,3	10,36	22,28

Πίνακας 7. Ποσοστιαία αναλογία των ρύπων στο κόστος των επιπτώσεων της ανθρώπινης υγείας

Table 7. Percentage of pollutants on the total cost of human health impacts

Ρύπος	EcoSense 2	EcoSense 4	RiskPoll
PM10	11,2%	19,3%	15,9%
Δευτ.	40,9%	34,2%	31,7%
Δευτ. θειικά	46,8%	45,0%	51,6%
SO ₂	1,2%	1,5%	0,8%
Σύνολο	100%	100%	100%



Σχήμα 7. Συγκριτικά αποτελέσματα επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία (σε εκατ. €/έτος)

Figure 7. Comparative results of impacts on human health (in M€ /year)

4.3 Γενικές παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Το εξωτερικό κόστος των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία που υπολογίζεται από το EcoSense 4 είναι μειωμένο κατά 76% σε σχέση με το εξωτερικό κόστος που υπολογίστηκε από το ExternE βάσει του λογισμικού EcoSense 2. Επίσης, το εξωτερικό κόστος που υπολογίζεται από το EcoSense 4 είναι μειωμένο κατά 50%, περίπου σε σχέση με το εξωτερικό κόστος που υπολογίστηκε από το RiskPoll.
- Το εξωτερικό κόστος που υπολογίζεται από το RiskPoll είναι μειωμένο κατά 50% περίπου, σε σχέση με το εξωτερικό κόστος που υπολογίστηκε από το λογισμικό EcoSense 2.
- Οι δευτερογενείς ρύποι του SO₂, και στα 3 λογισμικά, φαίνεται ότι έχουν τη σημαντικότερη συμβολή στη διαμόρφωση του εξωτερικού κόστους των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία με ποσοστό που κυμαίνεται από 45% έως 52%. Ακολουθούν τα νιτρικά σωματίδια, με ποσοστό μεταξύ 32% έως 41% και τα σωματίδια PM10, η συμβολή των οποίων κυμαίνεται από 11% έως 19%, αντίστοιχα.
- Μεταξύ των αποτελεσμάτων του EcoSense 4 και του RiskPoll παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις, αν και χρησιμοποιούνται κοινές εξισώσεις έκθεσης – απόκρισης και ίδιες τιμές μονάδας για τις επιπτώσεις υγείας.
- Μεταξύ των αποτελεσμάτων του EcoSense 4 και του EcoSense 2 υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, αν και χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο διασποράς των ρύπων με κοινά δεδομένα εισόδου ως προς τα χαρακτηριστικά της πηγής και των αποδεκτών και τα μετεωρολογικά στοιχεία.

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι διαφορές που εντοπίζονται στα αποτελέσματα των τριών λογισμικών προκαλούνται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- τις υποθέσεις των μοντέλων διασποράς των ρύπων
- τις συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των φυσικών επιπτώσεων (αριθμός επεισοδίων) και
- τις χρησιμοποιούμενες τιμές μονάδας ανά επίπτωση.

Ακολουθώς, παρουσιάζονται και αναλύονται οι διαφορές μεταξύ του EcoSense 4 και των δύο άλλων λογισμικών, EcoSense 2 και RiskPoll. Οι διαφορές μεταξύ του RiskPoll και του EcoSense 2 προέρχονται από το συνδυασμό των δύο άλλων περιπτώσεων και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται αναλυτικότερα.

5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων RiskPoll και EcoSense 4

Όπως αναφέρθηκε, στα λογισμικά EcoSense 4 και RiskPoll οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τις ίδιες συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης και τιμές μονάδας για τις επιπτώσεις. Ωστόσο, οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων είναι σημαντικές.

Οι διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα δυο λογισμικά προέρχονται από τη μοντελοποίηση της διασποράς των ρύπων και από τον εκτιθέμενο πληθυσμό.

Η διαφορά αυτή γίνεται άμεσα αντιληπτή εξετάζοντας τον αριθμό των επεισοδίων ανά έτος σε κάθε ρύπο, που εξάγονται από το κάθε λογισμικό. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίν. 8, ο αριθμός των περιπτώσεων χρόνιας θνησιμότητας εκφρασμένων σε έτη μείωσης της αναμενόμενης διάρκειας ζωής (Years of Life Lost – YOLL), είναι σχεδόν διπλάσιος για κάθε ρύπο στο RiskPoll σε σύγκριση με το EcoSense 4.

Πίνακας 8. Αριθμός περιπτώσεων χρόνιας θνησιμότητας σε YOLL ανά έτος

Table 8. Number of YOLL due to chronic mortality per year

Ρύπος	RiskPoll	EcoSense 4
PM10	45	26,7
Δευτ. θειικά	137	62,11
Δευτ. νιτρικά	82,9	47,12

Οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων προκαλούνται από τα μοντέλα διασποράς των δύο λογισμικών και τις παραδοχές στις οποίες στηρίζονται. Το EcoSense χρησιμοποιεί πιο σύνθετα μοντέλα, όπως το Industrial Source Complex Model σε τοπικό και το Windrose Trajectory Model σε περιφερειακό επίπεδο, ενώ το RiskPoll στηρίζεται σε πιο απλά μοντέλα διασποράς όπως στο Simple Uniform World Model

ή το Robust Uniform World Model. Η λεπτομερής ανάλυση και συγκριτική παρουσίαση των μοντέλων υπερβαίνει το σκοπό της παρούσας εργασίας. Επισημαίνεται ωστόσο ότι μια σημαντική διαφορά των απλοποιημένων μοντέλων είναι η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής των αποδεκτών σε σχέση με την πηγή, σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, καθώς και των τυπικών και ομοιόμορφων μετεωρολογικών συνθηκών [14, 20].

Οι διαφορές στις παραδοχές αντανακλώνται και στα δεδομένα εισόδου. Το λογισμικό EcoSense διαθέτει ενσωματωμένες βάσεις πληθυσμιακών και μετεωρολογικών δεδομένων, σε επίπεδο Ευρώπης.

Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό χρησιμοποιεί ένα τετραγωνικό κάναβο διαστάσεων 50x50 km², που προέρχεται από το πρόγραμμα “Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air pollutants in Europe” (EMEP 50 grid) [13], ο οποίος περιλαμβάνει τα απαραίτητα για το μοντέλο διασποράς δεδομένα (πυκνότητα πληθυσμού, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, κ.ά.). Αντιθέτως, στο λογισμικό RiskPoll, ο πληθυσμός θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένος μέσα στην επηρεαζόμενη περιοχή, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική και φυσική δομή της, καθώς και την τοποθεσία των κατοικημένων περιοχών (πόλεων, χωριών). Επίσης, δεν χρησιμοποιούνται λεπτομερή μετεωρολογικά δεδομένα, παρά μόνο σε αναλύσεις τοπικού επιπέδου εφόσον είναι διαθέσιμα από το χρήστη.

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι σύμφωνες με τις παρατηρήσεις άλλων ερευνητών. Όπως έχει αποδειχθεί από εκτενείς συγκριτικές αναλύσεις [20, 21], το RiskPoll υπερεκτιμά το κόστος των επιπτώσεων όταν στην περιοχή ενδιαφέροντος υπάρχουν μεγάλες υδάτινες επιφάνειες (π.χ. θάλασσα, λίμνες), όπως στην υπό εξέταση περίπτωση. Το πραγματικό κόστος των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία είναι για τις εκτάσεις αυτές μηδενικό, γεγονός που αγνοείται από το RiskPoll, λόγω της παραδοχής της ομοιόμορφης κατανομής του πληθυσμού.

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων EcoSense 4 και EcoSense 2

Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των EcoSense 4 και RiskPoll οφείλονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων μοντέλων διασποράς. Η αποτίμηση των επιπτώσεων στα λογισμικά EcoSense 4 και EcoSense 2, όμως, πραγματοποιείται στη βάση κοινών μοντέλων διασποράς, μετεωρολογικών δεδομένων και πληθυσμιακών χαρακτηριστικών.

Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων, στην περίπτωση αυτή, είναι αποτέλεσμα των εξελίξεων στα επιστημονικά πεδία της επιδημιολογίας και της περιβαλλοντικής αποτίμησης και για το λόγο αυτό παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

5.2.1 Αναμορφωμένες συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης

Οι συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης συσχετίζουν την παρουσία ενός ρύπου με τις επιπτώσεις στην υγεία του εκτιθέμενου πληθυσμού. Οι συναρτήσεις αυτές προσδιορίζονται με τη βοήθεια επιδημιολογικών μελετών, μετά από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία των ευρημάτων. Οι αβεβαιότητες, ωστόσο, που εμπλέκονται στον προσδιορισμό των συναρτήσεων αυτών είναι πολλές [10, 11, 22]:

- οι επιπτώσεις των ρύπων στην ανθρώπινη υγεία είναι μικρές σε «τυπικές» συγκεντρώσεις
- οι επιδημιολογικές μελέτες μπορούν να μετρήσουν μόνο ένα μέρος των πολύπλοκων βιολογικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού, π.χ. την εμφάνιση αναπνευστικών προβλημάτων λόγω υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
- ο αριθμός των παρατηρήσεων (π.χ. εισαγωγή ασθενών με αναπνευστικές παθήσεις ανά ημέρα), ακόμη και σε μητροπολιτικές περιοχές, μπορεί να μην είναι επαρκής, ώστε να προκύψουν ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα
- ο πληθυσμός εκτίθεται σε ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών ρύπων, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο το διαχωρισμό των επιμέρους επιπτώσεων, κ.λπ.

Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις αναφέρονται σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιδημιολογικών μελετών, π.χ. σε κάποιες αποδεικνύεται η συσχέτιση μεταξύ της παρουσίας SO₂ και επιπτώσεων στην υγεία, ενώ σε κάποιες άλλες όχι. Επίσης, σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, η επανεξέταση των δεδομένων με βελτιωμένα μοντέλα παρέχει διαφορετικά συμπεράσματα. Εξαιτίας των παραπάνω, οι συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης υπόκεινται σε συνεχή αναμόρφωση. Στα πλαίσια του NewExternE, υιοθετήθηκαν νέες συναρτήσεις αναφορικά με τη χρόνια θνησιμότητα, τη χρόνια βρογχίτιδα και το βήχα, οι οποίες μειώνουν τον αριθμό των επεισοδίων (με εξαίρεση το βήχα) από 20-60%. Μάλιστα, οι σημαντικότερες μειώσεις παρατηρούνται στις συναρτήσεις της χρόνιας θνησιμότητας (18% για τα σωματίδια PM10, 59% για τα νιτρικά και 50% για τα θειικά), η οποία έχει και τη σημαντικότερη συμβολή στη διαμόρφωση του εξωτερικού κόστους. Επίσης, ορισμένες επιπτώσεις, όπως η χρόνια βρογχίτιδα στα παιδιά ή η άμεση θνησιμότητα από τα σωματίδια, δεν προσμετρώνται πλέον στη βάση των νέων αποτελεσμάτων [10, 11, 23].

5.2.2 Αναμορφωμένες τιμές μονάδας

Οι συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης, μολονότι συμβάλλουν σημαντικά, δεν αποτελούν τη μοναδική παράμετρο στη μείωση του εξωτερικού κόστους που παρατηρείται μεταξύ των εκτιμήσεων των EcoSense 4 και EcoSense 2. Τα τελευταία χρόνια, υφίσταται μια διαρκής ερευνητική προσπάθεια για την αποτίμηση των επιπτώσεων της αέριας ρύπανσης, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στο ζήτημα της θνησιμότητας.

Απόρροια αυτής της προσπάθειας είναι η υιοθέτηση νέων τιμών μονάδας ανά επίπτωση, οι οποίες, όπως αποδεικνύεται, επιδρούν καθοριστικά στις εκτιμήσεις.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίν. 9), παρουσιάζονται, σε αντιπαράθεση με τον Πίν. 2, οι χρησιμοποιούμενες τιμές μονάδας από το πρόγραμμα ExternE κατά την πρώτη περίοδο εφαρμογής του [9].

Οι τιμές αναφορικά με την αποτίμηση της νοσηρότητας του πληθυσμού είναι αυξημένες, με εξαίρεση την εισαγωγή σε νοσοκομείο λόγω αναπνευστικών παθήσεων (μείωση κατά 60% περίπου). Σημαντικά μειωμένες είναι οι τιμές της μείωσης στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής. Πιο συγκεκριμένα, για τη χρόνια θνησιμότητα οι νέες τιμές είναι μειωμένες κατά 40% και για την οξεία θνησιμότητα κατά 52%.

Πίνακας 9. Τιμές μονάδας ανά επίπτωση (ExternE 1999)
Table 9. Unit prices per impact (ExternE 1999)

Επίπτωση	Αποτίμηση
Χρόνια θνησιμότητα – σε YOLL (r = 3%)	84330
Οξεία θνησιμότητα – σε YOLL (r = 3%)	155000
Χρόνια βρογχίτιδα	105000
Εισαγωγή σε νοσοκομείο λόγω παθήσεων των εγκεφαλικών αγγείων	7870
Εισαγωγή σε νοσοκομείο λόγω αναπνευστικών παθήσεων	7870
Ημέρες περιορισμένης δραστηριότητας	75
Χρόνιος βήχας – παιδιά	225
Συμφορητική καρδιακή ανεπάρκεια	7870
Βήχας – ασθματικοί ενήλικες ή παιδιά	7
Χρήση βρογχοδιασταλτικών – ενήλικες ή παιδιά	37
Συμπτώματα του κατώτερου αναπνευστικού – ενήλικες ή παιδιά, με άσθμα	8

Η διαφορά στην τιμή μονάδας για τη χρόνια θνησιμότητα σε συνδυασμό και με την ελάττωση των εκτιμώμενων ετών μείωσης της αναμενόμενης διάρκειας ζωής λόγω των νέων συναρτήσεων έκθεσης απόκρισης, είναι και ο κύριος παράγοντας διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων που φαίνονται στα Σχήματα 3 και 6. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη νοσηρότητα τα αποτελέσματα του EcoSense 4 είναι μειωμένα κατά 28% περίπου για τα νιτρικά, 30% για τα θειικά και 66% για το SO₂, ενώ είναι αυξημένα κατά 34% για τα PM10. Στην περίπτωση της θνησιμότητας, όμως, όλες οι τιμές είναι σημαντικά μειωμένες. Πιο αναλυτικά, η μείωση ανέρχεται σε 84% για τα νιτρικά, 82% για τα θειικά, 69% για το SO₂ και 68% για τα PM10.

Οι μεταβολές αυτές καθίστανται εντονότερες αν ληφθεί υπόψη η αποτίμηση της θνησιμότητας με βάση την «αξία της στατιστικής ζωής» (Value of Statistical Life - VSL) αντί της μείωσης της αναμενόμενης διάρκειας ζωής. Κατά την πρώτη φάση του ExternE, η αποτίμηση της θνησιμότητας, μολονότι προτεινόταν η χρήση της μεθόδου YOLL, είχε πραγματοποιηθεί και με τις δύο προσεγγίσεις. Η αξία της στατιστικής ζωής είχε προσδιοριστεί σε 3.100.000 € [9], αλλά αργότερα μειώθηκε σε 1.000.000 € [24]. Η μέθοδος VSL έδινε αποτελέσματα περίπου 3,5 φορές υψηλότερα σε σχέση με τη μέθοδο YOLL. Στη βάση της VSL, τα αποτελέ-

σματα του EcoSense 4 είναι μειωμένα κατά 95% περίπου σε σχέση με τα αποτελέσματα του EcoSense 2.

Το συγκεκριμένο ζήτημα αποτίμησης εξακολουθεί ακόμη και σήμερα να απασχολεί τη διεθνή ερευνητική κοινότητα. Στην Ευρώπη, ειδικά στα έργα που ακολουθούν τη μεθοδολογία Impact Pathway Approach που αναπτύχθηκε στο ExternE, όπως το NewExternE και το CAFE, έχει υιοθετηθεί η αποτίμηση της θνησιμότητας βάσει της μεθόδου YOLL [10, 11, 12, 17].

Η επιλογή αυτή στηρίζεται σε σύγχρονα ερευνητικά δεδομένα [18, 19, 23, 25, 26], σύμφωνα με τα οποία η αποτίμηση της θνησιμότητας βάσει της VSL μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση των αποτελεσμάτων. Όπως επισημαίνεται μεταξύ άλλων, η μέθοδος VSL έχει αναπτυχθεί στη βάση της αποτίμησης θανατηφόρων ατυχημάτων, λαμβάνοντας μια μέση απώλεια διάρκειας ζωής 30 – 40 ετών. Η εκδήλωση ενός πρόωρου θανάτου λόγω της αέριας ρύπανσης εμφανίζεται σε άτομα που υποφέρουν ήδη από προβλήματα υγείας. Σε αυτή την περίπτωση, η μείωση στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής ανέρχεται σε μερικές εβδομάδες ή μήνες. Μάλιστα, εκτιμάται ότι μείωση της αέριας ρύπανσης κατά 50% θα οδηγούσε σε μέση αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής κατά 5 μήνες. Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι οι επιδημιολογικές μελέτες εκτιμούν τη μέση αύξηση στην αναμενόμενη θνησιμότητα. Όμως, δεν μπορεί να διευκρινιστεί αν υπάρχει μεγάλη απώλεια διάρκειας ζωής για λίγα άτομα ή μικρή απώλεια διάρκειας ζωής για πολλά άτομα, καθώς η πρόωφη απώλεια που οφείλεται στην αέρια ρύπανση δεν μπορεί να αποτυπωθεί ευκρινώς στις επιδημιολογικές μελέτες, όπως π.χ. η απώλεια ζωής λόγω ατυχήματος.

Εκτός από την επιλογή της μεθόδου VSL ή YOLL, σημαντικό μέρος της έρευνας εστιάζει στην αποτίμηση των συγκεκριμένων μεγεθών. Το ExternE χρησιμοποιούσε για τη χρόνια θνησιμότητα τιμή YOLL = 84.330 €, λαμβάνοντας τιμή VSL = 3.100.000 €. Σύγχρονες μελέτες [18, 23, 27], στηριζόμενες στη Μέθοδο της Υποθετικής Αξιολόγησης (Contingent Valuation Method) που υλοποιήθηκαν σε τρεις Ευρωπαϊκές χώρες (Ηνωμένο Βασίλειο, Ιταλία και Γαλλία), βάσει του πρωτοκόλλου των Krupnick et al. [28], υπολόγισαν τιμή VSL = 1.000.000 €, YOLL = 50.000 € για τη χρόνια θνησιμότητα και YOLL = 75.000 € για την οξεία θνησιμότητα, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές έχουν υιοθετηθεί και από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα συναφή ερευνητικά προγράμματα (π.χ. NewExternE και CAFE), αντικαθιστώντας τις αρχικές τιμές του ExternE και τις τροποποιήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί σε αυτές πριν το 2004, π.χ. αναμορφωμένες τιμές του Benefits Table Database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe [24].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια, η κοινοτική νομοθεσία εισάγει συστηματικά, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, την αποτίμηση του

εξωτερικού κόστους ή οφέλους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε διάφορα επίπεδα. Όπως παρουσιάστηκε μέσα από τη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης στον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου, μολονότι υφίσταται ένα καταρχήν πλαίσιο για την εφαρμογή της οικονομικής αποτίμησης των επιπτώσεων, καθίσταται εμφανές ότι η προσπάθεια αυτή βρίσκεται στην αρχή ενός δύσκολου δρόμου. Ακόμη και σήμερα υπάρχουν αβεβαιότητες που πρέπει να αντιμετωπιστούν, οι οποίες εντοπίζονται τόσο στις φυσικές επιπτώσεις όσο και στις οικονομικές, π.χ. στις συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης, στις τιμές μονάδας ανά επίπτωση, στα μοντέλα διασποράς των ρύπων, κ.ά.

Οι μέθοδοι περιβαλλοντικής αποτίμησης και οι παράμετροι που εμπλέκονται σε αυτές βρίσκονται σε μια διαρκή αναθεώρηση και, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει μέθοδος «πανάκεια» για την επίλυση του προβλήματος. Το γεγονός αυτό ωστόσο, κατά τη γνώμη των γραφόντων, δεν πρέπει να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα στην προσπάθεια που καταβάλλεται, διεθνώς, για ένα πιο ορθολογικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων. Απαιτείται, όμως, προσεχτική εφαρμογή, σε σχέση με τις ιδιαίτερες ανάγκες και απαιτήσεις κάθε περίπτωσης. Επιπλέον, είναι προτιμότερο να εξετάζεται, στα πλαίσια πραγματικών αποφάσεων, ένα εύρος τιμών και να πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας. Η προσέγγιση αυτή, σε σχέση με τις ντετερμινιστικές τιμές, μπορεί να συμβάλει στην ασφαλέστερη εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Παρά τις όποιες αδυναμίες, η περιβαλλοντική οικονομία είναι ένας χρήσιμος και κρίσιμος επιστημονικός κλάδος και μπορεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο σε θέματα λήψης αποφάσεων, καθώς όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά: «... η οικονομική αποτίμηση των μη μετρήσιμων περιβαλλοντικών αγαθών μπορεί να είναι λίγο ως πολύ ατελής. Είναι όμως καλύτερα να πραγματοποιείται, σε κάθε περίπτωση, η οικονομική αποτίμηση των περιβαλλοντικών συνιστωσών ενός προβλήματος στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης από τους αρμόδιους φορείς από το να μην πραγματοποιείται καθόλου, καθώς αυτό θα σήμαινε ότι αγνοείται παντελώς η αξία που κρύβει το περιβάλλον για το κοινωνικό σύνολο» (Κ. Turner, D. Pearce και I. Bateman).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Freeman, M., III (2003). **The measurement of environmental and resource values: Theory and methods**, 2nd ed., Resources for the Future.
2. Sundqvist, T. and Söderholm P. (2002). Valuing the Environmental Impacts of Electricity Generation: A Critical Survey, **Journal of Energy Literature**, Vol. VIII, No. 2, pp. 3-41.
3. Stirling, A. (1998). Valuing the Environmental Impacts of Electricity Production: A Critical Review of Some "First-Generation" Studies, **Energy Sources**, 20, pp. 267-300.
4. Freeman, A. M. (1996). Estimating the Environmental Costs of Electricity: An Overview and Review of the Issues, **Resource and Energy Economics**, 18, pp. 347-362.
5. Sundqvist, T. (2000). **Electricity Externality Studies - Do the**

Numbers Make Sense? Luleå University of Technology, Licentiate Thesis, Luleå.

6. Friedrich, R. and Kallenbach, U. (1991). **External Costs of Electricity Generation, in External Environmental Costs of Electric Power: Analysis and Internalization**, Hohmeyer O. and Ottinger R.L. Eds., Berlin: Springer-Verlag.
7. Krewitt, W. (2002). External Costs of Energy – Do the Answers Match the Questions? Looking back at 10 Years of ExternE, **Energy Policy**, 30, pp. 839-848
8. CEC – Commission of the European Communities (1995). **ExternE: Externalities of Energy**, Vol. 1-6, DG XII (ed.), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1995
9. CEC – Commission of the European Communities (1999). **ExternE: Externalities of Energy**, Vol. 7-10, DG XII (ed.), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
10. European Commission (2004). **ExternE – Externalities of Energy, Methodology 2005 Update**, Bickel, P. and Friedrich. R. (eds), Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
11. Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy – IER (2004). **New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies**, Final Report to the European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration.
12. AEA Technology Environment (2005). **CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020**, Service Contract for Carrying out Cost-Benefit Analysis of Air Quality Related Issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE) Programme, AEA Technology Environment, UK.
13. Institute of Energy Economics and the Rational use of Energy – IER. (2004). **ECOSENCE: Integrated environmental impact assessment software**, Institute of Energy Economics and the Rational use of Energy (IER), University of Stuttgart, Germany.
14. Spadaro, J. V. (2004). **RISK POLL: Manual and Reference Documentation, Impact Assessment Tools to Estimate the Health and Environmental Risks from Exposure to Routine Atmospheric Emissions**, ver. 1.05.
15. Laboratory of Industrial and Energy Economics (1997). **External Costs of Electricity Generation in Greece**, Laboratory of Industrial and Energy Economics, National Technical University of Athens.
16. Holland, M. and Krewitt, W. (1996). **Benefits of an Acidification Strategy for the European Union: reductions of SO_x, NO_x, NH₃ in the European Union**, European Commission, DGXI, Brussels.
17. AEA Technology Environment (1998). **Cost Benefit Analysis of Proposals Under the UNECE Multi-Effect Protocol: reductions of SO_x, NO_x, NH₃, VOCs**, AEA Technology Environment, UK.
18. Desaignes, B., Rabl, A., Ami, D., Boun My, K., Masson, S., Salomon, M.A. and Santoni, L. (2004). **Monetary Valuation of Air Pollution Mortality: Current Practice, Research Needs and Lessons from a Contingent Valuation**, Report for the NewExtproject of the ExternE series.
19. Desaignes, B. (2005). **Monetary Valuation of Environmental Damages, MAXIMA Workshop**, Paris, France.
20. Spadaro, J. V. (2002). **A Simplified Methodology for Calculating the Health Impacts and Damage Costs of Airborne Pollution: the Uniform World Models**, Report prepared for the Paul Scherrer Institut (Villigen, Switzerland) for the China Electricity Technology Project.
21. Spadaro, J. V. (1999). **Quantifying the Damages of Airborne Pollution: Impact Models, Sensitivity Analysis and Applications**, Ph.D. Dissertation, Ecole des Mines De Paris, Centre d’Énergétique, Paris, France.
22. Rabl, A. (1998). Mortality Risks of Air Pollution: the Role of Exposure-Response Functions, **Journal of Hazardous Materials**, vol.61, pp.91-98.
23. Markandya, A. & Rabl, A. (2004). **Valuation of Air Pollution Mortality: How to achieve consistency between the epidemiological studies and the monetary valuation**, Working paper, Centre for Public Economics, Department of Economics and International Development, University of Bath, UK.
24. European Commission (2002). **Benefits Table Database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe, ver. E1.02a**, prepared by Holland, M. and Watkiss, A. for DG Environment, European Commission.
25. Rabl, A. (2002). **Relation Between Life Expectancy and Probability of Dying**. Centre d’Énergétique, Ecole des Mines report, Paris.
26. Rabl, A. (2003). Interpretation of Air Pollution Mortality: Number of Deaths or Years of Life Lost?, **Journal of the Air & Waste Management Association**, 53(1), 41-50.
27. Alberini, A., Krupnick, A., Cropper, M., Simon N., and Cook, J. (2001). **The Willingness to Pay for Mortality Risk Reductions: A Comparison of the United States and Canada**, Nota di Lavoro 92-2001 FEEM.
28. Krupnick, A. Alberini, A. Cropper, M., Simon, N., O’Brien, B., Goeree, R. and Heintzelman, M. (2000). **What Are Older People Willing to Pay to Reduce Their Risk of Dying?**, Resources For the Future, Boston.

Π. Γρηγορόπουλος

Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Ε.Μ.Π., Ταΰγετου 24, 152 34 Χαλάνδρι, Αθήνα

Δ. Δαμίγος

Λέκτορας Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλευτικής, Εργαστήριο Μεταλλευτικής Τεχνολογίας και Περιβαλλοντικής Μεταλλευτικής, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου, Αθήνα

Extended Summary

Economic Valuation of Environmental Impacts from Electricity Generation

P. GRIGOROPOULOS

Mining Engineer - Metallurgist

D. DAMIGOS

Lecturer NTUA

Abstract

The valuation of the environment in monetary terms has received particular attention in recent years from all parties involved in decision-making processes. This paper focuses on a crucial sector for Greece, namely electricity production by means of lignite fuel. The aim of the paper is to present a framework for assessing the external costs from energy production as well as to highlight some recent developments and uncertainties involved in this particular field. Towards this direction, the power plant of Agios Dimitrios in Ptolemais was selected as a case study. The external cost of electricity production was estimated using sophisticated software and adopting state-of-the-art research techniques. These results were compared against the figures derived from the ExternE national implementation study, carried out in 1997, in order to discuss some critical issues of the valuation framework.

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been growing concern about implementing environmental valuation techniques in decision-making processes. Towards this direction, legislation enforcement plays an important role. Several Directives have focused on relevant aspects: e.g. 1996/61/EC concerning integrated pollution prevention and control, 2000/60/EC on establishing a framework in the field of water policy, 2004/35/EC on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage, etc.

Especially in the energy sector, there has been an intense effort with respect to the assessment of environmental impacts, in physical as well as economic terms. The latter derive not only from the implementation of environmental legislation but also from the need to weight fossil fuels against renewable energy sources on an equal basis. Several target-oriented projects have been funded by the EU during the last decade. These research efforts have come up with significant conclusions. However, there are many uncertainties, as well as ethical dilemmas that require further analysis.

Submitted: Mar. 3. 2006 Accepted: Aug. 1. 2006

Given that the energy sector is particularly affected by these legislative and social requirements, the aim of the paper is twofold:

- to present an appropriate framework for estimating externalities from energy production
- to highlight some recent developments in the field of environmental valuation that significantly influence the estimated figures.

The power plant of Agios Dimitrios, which is located in Ptolemais area, in North-western Greece has been used as an illustrative example. The external cost of power generation from the plant under investigation was calculated by means of specialized software packages, namely EcoSense 4 and RiskPoll, adopting the latest scientific advances. These results were examined vis-à-vis the figures derived from the ExternE national implementation study, in 1997, and on this basis some critical issues of the valuation framework are further discussed.

2. EXTERNAL COST AND ENERGY PRODUCTION

The theoretical basis of externalities is outlined in the welfare economics literature. The theory of externalities goes back to 1920, to the work of Pigou, and has become the main principle used by economists when analyzing pollution problems.

During the last decades, several studies have been conducted in order to assess externalities in the power sector. The most exhaustive study so far of the external costs of energy was the ExternE project (Externalities of Energy), which began as a collaborative effort between the EU and the US in 1991. The European side completed the third phase in 1998 with the "National Implementation Studies". According to the results, the external cost of electricity production amounts to 1 – 2% of EU GDP. This first effort was further supported by the EU, resulting in follow-up projects such

as NewExt (New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies), CAFE (Clean Air for Europe), etc.

The ExternE project established a bottom-up methodology, also known as impact-pathway or damage-function approach (DFA), which allows for the calculation of marginal external costs from energy production. Within this framework, impacts on human health and the environment are quantified in monetary terms in four consecutive steps (Figure 1). First, the quantity of emissions from a defined source is determined. Second, local and regional dispersion models are used to examine the increase in ambient concentrations. Then, exposure-response functions are applied to estimate the marginal physical impacts that result from the emissions. Finally, the external cost is calculated by multiplying the marginal physical damages by their estimated monetary value.

The methodology is carried out via specialized software tools, which were developed through the ExternE project series, e.g. EcoSense and RiskPoll. These tools provide data and models required for an integrated assessment of the impact of primary and secondary airborne pollutants (e.g. PM 10, SO₂, NO_x, nitrates, etc.) on human health, crops, materials and the ecosystem.

3. CASE STUDY

3.1. Data and Procedures

The power plant under investigation has an installed capacity of 366.5 MW with a net efficiency of 34%. The projected load factor is 68.5% and the lifetime of the plant is 40 years. The pollutant concentrations in the flue gases are: particulates <50 mg/Nm³, SO₂ 170-300 mg/Nm³, NO_x 190-200 mg/Nm³. The annual emissions are particulates 556 t, SO₂ 2615 t and NO_x 2170 t. For estimation purposes, technical data and other operating parameters of the plant were also used.

As far as EcoSense estimates are concerned, the in-built reference environment database was used. In order to carry out the analysis in RiskPoll, the average population density was estimated within a range of 1000 km from the station (Table 1 and Figure 2). Although both tools provide the means for estimating impacts on human health, crops, materials and the ecosystem, the analysis focuses only on humans for two main reasons:

- the cost of human health impacts amounts to 80 – 94% of the total external cost
- the most important scientific findings affecting the estimates are in the field of human health effects and more specifically in the valuation of chronic and acute mortality.

For the assessment of physical impacts, updated Expo-

sure Response Functions (ERFs) were used, which were included in the software packages. The unit prices per impacts adopted are illustrated in Table 2.

3.2 EcoSense 4 results

According to EcoSense 4 results, the total external cost in terms of human health is estimated at 10,350,000 €/year or 0.52 €cent/KWh. The findings are detailed in Table 3 and Figure 3. The results indicate that SO₂, especially in the form of sulfates, is responsible for 46.5% of the total cost. In addition, in Figure 4, the external costs per country are illustrated. It is evident that Greece is predominantly affected by the plant compared to the other neighboring countries.

3.3 RiskPoll results

The analysis was carried out using the RUWM (Best estimate) and the QUERI (Intermediate estimate) models. For each models two different conditions were used, namely Site ID 0 (rural area) and Site ID 4 (emission source lies within 15 – 25 km from urban area). The results of RUWM models and QUERI Site ID 0 were identical. The results of QUERI Site ID 4 were comparable.

Table 4 and Figure 5 provide, for conciseness, only the results of RUWM model. According to the estimates, the external cost of the station is 22,300,000 €/year or 1.0134 €cent/KWh. More specifically, 51.6% of the cost is attributed to sulfates. 61.6% of the cost is due to mortality effects whereas 31.4% is associated with morbidity effects.

4. COMPARATIVE RESULTS

In order to investigate the methodological elements that affect the accounting framework of externalities in the energy sector, the results of EcoSense 4 were compared against the findings of RiskPoll and EcoSense 2. The latter was used in the ExternE study.

According to the national implementation plan of the ExternE accounting framework in Greece, the externalities of Agios Dimitrios power plant on human health were estimated at 43,800,000 €/year or 1.99 €cent/KWh. 45.2% of the quantified externalities were due to SO₂ emissions, mainly in the form of sulfates. The mortality effects corresponded to 89% of the cost of sulfates and 88% of the cost of nitrates, respectively. The results are given in Figure 6.

In Tables 5 and 6 as well as in Figure 7, the results of the software tools are provided. According to the findings, the following observations were made:

- The external cost of human health impacts derived by EcoSense 4 is reduced by 76% in comparison with EcoSense 2 estimates. Furthermore, EcoSense 4 figures are half as those provided by RiskPoll.
- The external cost of RiskPoll corresponds to 50% of the cost estimated by EcoSense 2.
- Sulfates are the most detrimental pollutant to human health, since they are responsible for 45-52% of the total external cost. Nitrates are associated with 32-41% of externalities, while the contribution of particulates varies between 11-19%.

5. CRITICAL PARAMETERS AFFECTING THE RESULTS

As far as the divergence of the estimates is concerned, the following parameters are involved:

- The assumptions and data used in the dispersion models.
- The ERFs applied.
- The unit cost per impact adopted.

5.1 RiskPoll and EcoSense 4

Although EcoSense 4 and RiskPoll models are based on the same ERFs and unit cost values, the discrepancy between the estimates is significant. This phenomenon is attributed to the dispersion modeling of the pollutants. EcoSense uses more complex models, such as the Industrial Source Complex Model for the local and the Windrose Trajectory Model for the regional level analysis, whereas RiskPoll employs a simplified assessment methodology based on the Simple Uniform World Model or the Robust Uniform World Model.

EcoSense 4 uses an in-built database derived from the "Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air pollutants in Europe" (EMEP 50 grid), which provides detailed data for the model. On the other hand, RiskPoll assumes a uniform population distribution around the plant under investigation. This approach results in over-estimates when the source is displaced near the sea, due to the fact that part of the pollution plume is transported over the sea, where health effects are null. The latter is evident from the figures provided in Table 7.

5.2 EcoSense 4 and EcoSense 2

EcoSense 4 and EcoSense 2 use the same models and in-built databases. However, the estimates provided are quite

different, since EcoSense 4 has embodied new scientific findings with respect to epidemiological data and valuation procedures.

5.2.1 Updated ERFs

The ERFs for many pollutants and many impacts are very uncertain or even not known at all. For example, a major difficulty is due to the fact that one needs relatively high doses in order to obtain observable responses. Yet, these doses are usually far in excess of typical ambient concentrations in the EU. Further, there are large uncertainties because there is insufficient evidence for the effects of individual pollutants, since humans are exposed to a mix of different pollutants.

Bearing in mind the difficulties involved in the estimation of ERFs, it is not surprising that ERFs are updated from time to time. In the follow-up of ExternE, NewExternE, different ERFs were adopted for chronic mortality, chronic bronchitis and cough that resulted in 20-60% less episodes (except cough).

5.2.2 Unit values per impact

ERFs are not the only factor affecting the results of EcoSense 4 and EcoSense 2. In recent years, the follow-up of ExternE has focused on areas in which a need for further research was identified. Within these issues, the valuation of mortality effects holds a central position.

Table 8 presents the unit values that were used in ExternE. In comparison with Table 2, it becomes evident that all morbidity costs, except from cerebrovascular and respiratory hospital admissions, have increased. However, mortality values are lower by from 40% up to 52%. As a result of the new ERFs and prices involved, the morbidity externalities are lower in EcoSense 4 for nitrates (28%), sulfates (30%) and SO₂ (66%) but higher for particulates (34%). As far as mortality effects are concerned, new findings are lower for primary and secondary pollutants, namely nitrates (85%), sulfates (82%), SO₂ (69%) and particulates (68%).

The reduction in mortality cost is due to the new values of YOLL (Years of Life Lost) and VSL (Value of Statistical Life) adopted. More specifically, in the national implementation studies of ExternE, the VSL was equal to 3,100,000 €, the YOLL for acute mortality was set to 155,000 € and for chronic mortality to 84,330 €, respectively. NewExternE has adopted, according to new scientific evidence, the following values: VSL = 1,000,000 €, acute YOLL = 75,000 € and chronic YOLL = 50,000 €.

6. CONCLUSIONS

Several legislative acts require that valuation of externalities should be performed in decision-making processes. Nowadays, there is a coherent and widely accepted framework to support decision making, especially in the field of energy. However, the analysis presented indicates that several uncertainties are involved and many issues, both epidemiological and economic, need to be further examined, since the whole process is still at the beginning.

On the other hand, however, the assessment of externalities should not be withdrawn, although the current accounting framework is criticized. Particular attention is required and the characteristics of each case studied should be

thoroughly taken into consideration. Furthermore, sensitivity analyses, based on a range of values, should be provided instead of deterministic results, due to the fact that one may come up with more safe and sound conclusions.

In any case, as is commonly accepted "...the economic (monetary) valuation of non-market environmental assets may be more or less imperfect given the particular asset together with its environmental and valuation contexts; but, invariably, some valuation explicitly laid out for scrutiny by policy-makers and the public, is better than none, because none can mean some implicit valuation shrouded from public scrutiny..." (K. Turner, D. Pearce and I. Bateman).