

Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Δημήτρης Χατζηαβραμίδης¹, Γιώργος Παπαβασιλόπουλος²

¹ Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 15780 Αθήνα

² Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, 15780 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της βιώσιμης ανάπτυξης είναι η πρόοδος σε όλα τα μέτωπα, δηλαδή, οικονομία, περιβάλλον και κοινωνία. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη προϊόντων και διεργασιών πρέπει να ικανοποιούν, εκτός από τεχνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά, κριτήρια **βιωσιμότητας (sustainability)**, όπου η βιωσιμότητα αναφέρεται σε απόθεμα (stock), ροή (flow) ή άλλο χαρακτηριστικό φυσικών και βιομηχανικών πόρων (resources).

Στη φυσική οικολογία, βιωσιμότητα είναι η ορθολογική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων με βασική επιταγή τη διατήρηση ισορροπίας στις πολυσύνθετες σχέσεις ειδών του φυσικού κόσμου, έμβιων και μη, ή έμβιων και των βιοτόπων (habitat) τους. Στη βιομηχανική οικολογία, πόροι δεν είναι μονάχα φυσικοί και ανθρωπογενείς (προϊόντα) αλλά και τα βιομηχανικά απόβλητα και η βιωσιμότητα είναι στενά συνδεδεμένη με την εκμετάλλευση των αποβλήτων με στόχο την ελαχιστοποίηση των απορριπτόμενων για ταφή.

Αποτίμηση της βιωσιμότητας γίνεται με δείκτες οικονομικής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας. Οι δείκτες αυτοί δημιουργούνται με ομαδοποίηση μεταβλητών διαφορετικής φύσης (τεχνικές, οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές) για την περιγραφή της κατάστασης του υπό εξέταση συστήματος εκφρασμένων σε ισοδύναμες μονάδες, π.χ., την απαιτούμενη **διαθέσιμη ενέργεια (emergy)** για παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών.

Η μοντελοποίηση της βιωσιμότητας περιλαμβάνει τρεις τομείς, (1) διαχείριση αποθέματος ή ροής πόρων, (2) επιλογή τεχνολογίας παραγωγής συγκεκριμένου προϊόντος ή υπηρεσίας, και (3) κατοχύρωση δικαιώματος διαχειριστή (μηχανικού ή διευθυντή παραγωγής) να παρεμβαίνει στην παραγωγή όταν συμβαίνουν αλλαγές στις εξωτερικές συνθήκες. Στον πρώτο τομέα, μπορεί κανείς να εργαστεί με δυναμικά μοντέλα (dynamic systems) των συζευγμένων ισοζυγίων μάζας και ενέργειας. Στο δεύτερο τομέα, τα προβλήματα επιλύονται με μεθόδους από την πολύκριτηριακή βελτιστοποίηση (multiple-criteria optimization) και θεωρία παιγνίων (game theory). Για τον τρίτο τομέα, εκτός από την ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis), μπορεί να

χρησιμοποιηθεί θεωρία εναλλακτικών λύσεων (options theory) για να γίνει περισσότερο ρεαλιστική η ανάλυση του κύκλου ζωής του προϊόντος (life cycle analysis).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βιώσιμη ανάπτυξη σημαίνει ισορροπία μεταξύ οικονομικής αποδοτικότητας, κοινωνικής δικαιοσύνης και περιβαλλοντικής μέριμνας. Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό που δόθηκε το 1991 από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (World Commission on Environment and Development), βιώσιμη ανάπτυξη είναι η «ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακινδυνεύεται η ικανότητα μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες».

Για την οικολογία της φύσης, βιωσιμότητα σημαίνει ορθολογική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων με βασική επιταγή τη διατήρηση ισορροπίας στις πολυσύνθετες σχέσεις ειδών του φυσικού κόσμου, έμβιων και μη, ή έμβιων και των βιοτόπων (habitat) τους. Στις σχέσεις αυτές περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων και οι σχέσεις του ανθρώπινου περιβάλλοντος, κοινωνικού, πολιτιστικού και οικονομικού με το φυσικό κόσμο. Για τα βιομηχανικά συστήματα, βιωσιμότητα σημαίνει ορθολογική εκμετάλλευση φυσικών και ανθρωπογενών πόρων όπου οι τελευταίοι περιλαμβάνουν προϊόντα και παραπροϊόντα ή απόβλητα, με βασικό σκοπό την ισορροπία ανάμεσα σε φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα. Η ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων σε όλο της το φάσμα (πρόληψη, ελαχιστοποίηση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, και ταφή) όταν ακολουθείται δεόντως οδηγεί σε μείωση των αρνητικών συνεπειών στο περιβάλλον και της υπερβολικής κατανάλωσης φυσικών πόρων.

Βιωσιμότητα μπορεί να αναφέρεται στο απόθεμα (stock), τη ροή (flow) ή άλλο χαρακτηριστικό των πόρων που ενδιαφέρουν, αλλά η βιωσιμότητα της ροής του πόρου, που συνιστά υπηρεσία για τον άνθρωπο, είναι πιο σπουδαία από τη βιωσιμότητα του αποθέματος του πόρου (Popp et al, 2001). Με βάση το κληροδότημα (endowment) τους, οι πόροι διακρίνονται σε (1) σταθερούς (stable), (2) ουδέτερους (neutral), και (3) ευπαθείς (susceptible). Οι σταθεροί δεν υφίστανται φυσική αποδόμηση και διατηρούν την ποιότητα τους με το χρόνο. Οι ουδέτεροι αρχικά υπόκεινται σε απώλειες ποιότητας λόγω αποδόμησης αλλά τελικά φθάνουν σε μια κατάσταση ισορροπίας με χαμηλότερη ποιότητα. Οι ευπαθείς είναι πολύ ευαίσθητοι σε αποδόμηση και η ποιότητα τους μειώνεται μέχρι του σημείου που δεν είναι σε θέση να υποστηρίξουν το επίπεδο του επιθυμητού αποτελέσματος. Ανθρωπογενείς παράγοντες επηρεάζουν διαφορετικά την ποιότητα των πόρων με την πάροδο του χρόνου καθώς οι άνθρωποι επιλέγουν να συμπεριλάβουν στις εισροές της παραγωγής μείγμα από εισροές χρήσης και διατήρησης πόρων (resource using and resource conserving inputs). Η ικανότητα για υποκατάσταση φυσικών από βιομηχανικούς πόρους αποτελεί κεντρικό άξονα του διαλόγου για το ρόλο αποθεμάτων και ροών πόρων στη βιωσιμότητα.

Για την εκτίμηση της βιωσιμότητας σε διεργασίες παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών έχουν αναπτυχθεί δείκτες οικονομικής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας (Popp et al, 2001- Lou et al, 2004 - Coelho et al, 2012). Για τη διαχείριση της βιωσιμότητας χρησιμοποιούνται μοντέλα όπως αυτά της Βιομηχανικής Συμβίωσης και Οικολογίας, Καθαρότερης Παραγωγής (Cleaner Production), Μείωσης Αποβλήτων (Waste Reduction Model ή WARM), Αρχής Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA, 2006), Οικο-αποδοτικότητας (Eco-efficiency), κλπ.

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Σχέσεις μεταξύ φυσικών και βιομηχανικών εισροών (inputs), X_{it} , και εκροών (outputs), Y_{it} , καθορίζονται από συναρτήσεις παραγωγής, οι οποίες δεν είναι στατικές, επειδή η ποιότητα των πόρων, Q_{it} , μεταβάλλεται με το χρόνο με ή χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Σε συμφωνία με τα παραπάνω

$$Y_{it} = F(X_{it}, Q_{it}) \quad (1)$$

και αν εκροές με αντικείμενο i αποτελούν εισροές για εκροές με άλλο αντικείμενο j , ισχύει

$$\begin{aligned} Y_{jt} &= F(X_{jt}, Y_{it}, Q_{jt}) \\ Y_{jt} &= F(X_{jt}, Q_{jt}, X_{it}, Q_{it}) \end{aligned} \quad (2)$$

Η βιωσιμότητα αποτιμάται με διάφορους δείκτες (Ebert and Welsch, 2004 - Coelho et al, 2012), οι οποίοι δημιουργούνται με ομαδοποίηση διαφόρων μεταβλητών και ερμηνεύονται σαν αναπαραστάσεις τάξης προτίμησης (preference ordering) στο πολυδιάστατο πεδίο των πόρων και του περιβάλλοντος (Ebert and Welsch, 2004). Για να είναι οι δείκτες σημαντικοί, πρέπει η τάξη προτίμησης πρέπει να έχει ορισμένες ιδιότητες. Αν $X = (X_1, \dots, X_n)$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών, X_i , $i = 1, \dots, n$, που περιγράφουν την κατάσταση του περιβάλλοντος, με πεδίο ορισμού, $X_i \in D$ και $D = \mathbb{R}$, $D = \mathbb{R}_+$ or $D = \mathbb{R}_{++}$, αν οι μεταβλητές X_i παίρνουν πραγματικές, μη αρνητικές ή αυστηρά θετικές τιμές, αντίστοιχα, τότε $X \in D^n$, και η τάξη προτίμησης που παριστάνεται με $\succeq$ απαιτείται να είναι διμερής σχέση και να έχει τις ιδιότητες

1. Πληρότητα, δηλαδή, $X \succeq \hat{X}$ ή $\hat{X} \succeq X$ για όλα τα $X, \hat{X} \in D^n$,
2. Αντανακλαστικότητα, δηλαδή, $X \succeq X$ για όλα τα $X \in D^n$, και
3. Μεταβατικότητα, δηλαδή, $X \succeq \hat{X}$ και $\hat{X} \succeq \tilde{X} \Rightarrow X \succeq \tilde{X}$ για όλα τα $X, \hat{X}, \tilde{X} \in D^n$.

Η τάξη προτίμησης εκφράζει την κρίση του μελετητή και $X \succeq \hat{X}$ ή $X \succ \hat{X}$ διαβάζονται « X είναι καλό τουλάχιστον όσο το $\hat{X}$ » and « X είναι καλό όσο το $\hat{X}$ ». Ο δείκτης παριστάνεται από τη συνάρτηση $I : D^n \rightarrow \mathbb{R}$, που ικανοποιεί τη συνθήκη

$$X \succeq \hat{X} \Leftrightarrow I(X) \geq I(\hat{X}) \quad (3)$$

Μια ομάδα σημαντικών δεικτών για αποτίμηση της βιωσιμότητας σε βιομηχανικά συστήματα έχει προταθεί το 2004 (Lou et al, 2004). Στους δείκτες αυτούς όλες οι μεταβλητές, χρηματικές

(monetary) και μη, εκφράζονται σε τιμές **διαθέσιμης ενέργειας (emergy)** για να κατασκευαστούν προϊόντα και να παραχθούν υπηρεσίες. Μια σημαντική έννοια για την ενεργειακή ανάλυση της βιωσιμότητας είναι η μετατρεψιμότητα (transformity) που ορίζεται ως η ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας ενός είδους που απαιτείται για να παραχθεί 1 Joule διαθέσιμης ενέργειας άλλου είδους. Οι τρεις δείκτες της ομάδας αυτής για την αποτίμηση της βιωσιμότητας είναι (1) ο Δείκτης Οικονομικής Αποδοτικότητας, IEcP, (2) ο Δείκτης Περιβαλλοντικής Αποδοτικότητας, IEnP, και (3) ο Δείκτης Βιωσιμότητας, ISP, που ορίζονται από τη σχέση

$$\begin{aligned} \text{IEcP} &= (Y_P + Y_W) / (F_P + F_W + F_R + F_D + I_{NR}) \\ \text{IEnP} &= (N + W_{UW} + W_{TW}) / (R + W_{RR} + W_{RN}) \\ \text{ISP} &= \text{IEcP} / \text{IEnP} = [(Y_P + Y_W) / (F_P + F_W + F_R + F_D + I_{NR})] / [(N + W_{UW} + W_{TW}) / (R + W_{RR} + W_{RN})] \end{aligned} \quad (4),$$

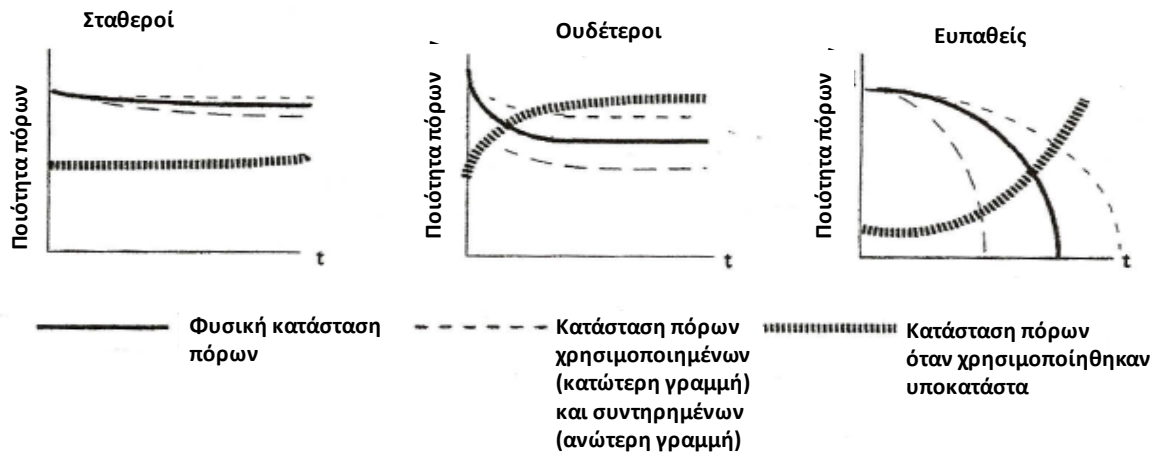
όπου Y_P είναι διαθέσιμη ενέργεια για παραγωγή όλων των προϊόντων και παραπροϊόντων, Y_W διαθέσιμη ενέργεια για παραγωγή αποβλήτων, F_P, F_W, F_R διαθέσιμη ενέργεια που αντιστοιχεί στην επένδυση για παραγωγή, επεξεργασία και ταφή αποβλήτων, αντίστοιχα, $I_{NR} (=N+R)$ διαθέσιμη ενέργεια που αντιστοιχεί στην εισροή ανανεώσιμων και μη πόρων. Στην ίδια σχέση, N και R είναι διαθέσιμη ενέργεια που αντιστοιχεί σε κατανάλωση ανανεώσιμων και μη πόρων, αντίστοιχα, W_{UW} και W_{TW} διαθέσιμη ενέργεια που αντιστοιχεί σε εκροή ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων αποβλήτων, αντίστοιχα, και W_{RR} και W_{RN} διαθέσιμη ενέργεια που αντιστοιχεί σε ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, αντίστοιχα.

Υψηλή τιμή του Δείκτη Οικονομικής Αποδοτικότητας, IEcP, σημαίνει υψηλή αποδοτικότητα σε προϊόντα με χαμηλότερη επένδυση. Αν $\text{IEcP} < 1$, η οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος είναι απαράδεκτη. Για να γίνει ένα βιομηχανικό σύστημα βιώσιμο, ο Δείκτης Περιβαλλοντικής Αποδοτικότητας, IEnP, πρέπει να κρατηθεί σε όσο το δυνατό χαμηλότερα επίπεδα. Η πλειονότητα των βιομηχανικών συστημάτων καταναλώνει ανανεώσιμους πόρους και παράγει απόβλητα. Τέλος, υψηλότερη τιμή του Δείκτη Βιωσιμότητας, ISP, δείχνει υψηλότερο επίπεδο βιωσιμότητας για το συγκεκριμένο βιομηχανικό σύστημα.

Οι παραπάνω δείκτες δείχνουν την ισχυρή αλληλεξάρτηση των διαφόρων στόχων και κριτηρίων και παρέχουν σωστή καθοδήγηση σε βιομηχανικά συστήματα για το πώς να βελτιώσουν την αποδοτικότητα τους σε πολλαπλά επίπεδα.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΟΡΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, οι πόροι ανάλογα με το κληροδότημα και το ρυθμό αποδόμησης τους διακρίνονται σε σταθερούς, ουδέτερους και ευπαθείς. Οι τρεις τύποι πόρων φαίνονται στο Σχήμα 1. Ανεξάρτητα από το αν η βιωσιμότητα αναφέρεται σε απόθεμα (stock), ροή (flow) ή άλλο χαρακτηριστικό των πόρων, βιωσιμότητα σημαίνει διατήρηση κατάστασης ισορροπίας (steady state) πόρων διαθέσιμων για παραγωγή προϊόντων ή υπηρεσιών. Η αναζήτηση τέτοιων καταστάσεων καθώς και της διαδρομής (path) του συστήματος είναι τυπική της μεθοδολογίας δυναμικών συστημάτων (Luenberger, 1979).



Σχήμα 1. Είδη πόρων και ρυθμοί αποδόμησης τους

Στις θερμικές μεθόδους επεξεργασίας (καύση, πυρόλυση ή αεριοποίηση) αστικών στερεών απορριμμάτων (municipal solid waste), το σύστημα περιγράφεται από ισοζύγια μάζας και ενέργειας και η ανάλυση ακολουθεί τη κλασσική μεθοδολογία για αντιδραστήρα τύπου συνεχώς αναδευόμενης δεξαμενής (CSTR) (Fogler, 2005) που περιγράφεται από τις εξισώσεις

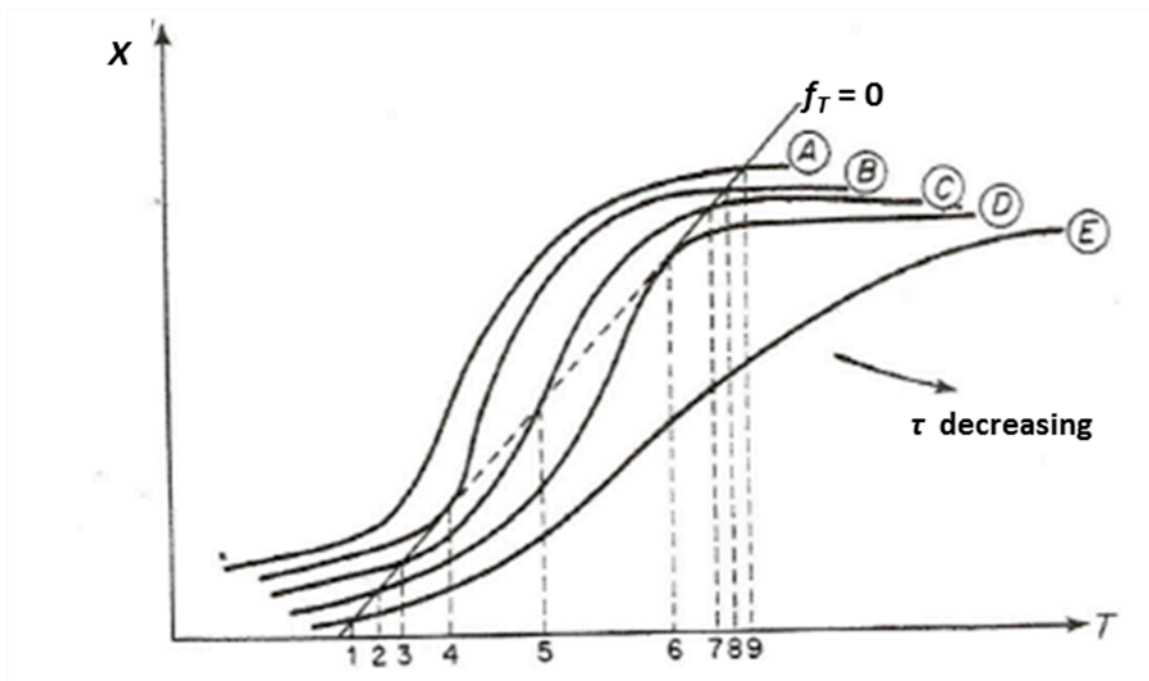
$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= f_X(X, T; X_0, T_0, T_C, \Delta H_R, F_{0i}, \nu_i, UA, \tau) \\ \frac{dT}{dt} &= f_T(X, T; X_0, T_0, T_C, \Delta H_R, F_{0i}, \nu_i, UA, \tau) \end{aligned} \quad (5),$$

όπου X είναι ο βαθμός μετατροπής της αντίδρασης, T η θερμοκρασία του αντιδραστήρα, and X_0 and T_0 οι τιμές των ίδιων μεταβλητών στην τροφοδότηση του αντιδραστήρα. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι: T_C η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται για να ελέγχεται η θερμοκρασία του αντιδραστήρα, UA η θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα θερμοκρασίας και χρόνου, ΔH_R η θερμότητα που εκλύεται από την αντίδραση, F_{0i} και ν_i ο ρυθμός τροφοδότησης και ο στοιχειομετρικός συντελεστής του αντιδραστήριου i , αντίστοιχα, και τ ο χρόνος παραμονής του αντιδραστήρα ίσος με το λόγο του όγκου του αντιδραστήρα προς τον ογκομετρικό ρυθμό τροφοδότησης.

Οι καταστάσεις ισορροπίας (steady states) του συστήματος αναγνωρίζονται με μελέτη του συστήματος των μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων

$$\begin{aligned} f_X(X, T; X_0, T_0, T_C, \Delta H_R, F_{0i}, \nu_i, UA, \tau) &= 0 \\ f_T(X, T; X_0, T_0, T_C, \Delta H_R, F_{0i}, \nu_i, UA, \tau) &= 0 \end{aligned} \quad (6).$$

Οι δυνατές λύσεις των εξισώσεων (6) δίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Επίδραση του χρόνου παραμονής του αντιδραστήρα στις πολλαπλές καταστάσεις ισορροπίας (steady states) του συστήματος εξισώσεων (6)

Στο Σχήμα 2, οι καμπύλες A, B, C, D, και E παριστάνουν την πρώτη εξίσωση του συστήματος (6), $f_X = 0$, όταν ο χρόνος παραμονής, τ , μειώνεται (μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του ογκομετρικού ρυθμού τροφοδότησης). Η ευθεία γραμμή παριστάνει τη δεύτερη εξίσωση του συστήματος (6), $f_T = 0$, που παραμένει αμετάβλητη όταν ο χρόνος παραμονής μεταβάλλεται. Το Σχήμα 2 δείχνει τα ακόλουθα:

1. Μια κατάσταση ισορροπίας για τις καμπύλες A και E, που δίνονται από τα σημεία 9 και 1, αντίστοιχα,
2. Δύο καταστάσεις ισορροπίας για τις καμπύλες B and D, που δίνονται από τα σημεία 8, 4 και 6, 2, αντίστοιχα, και
3. Τρείς καταστάσεις ισορροπίας για την καμπύλη C, που δίνονται από τα σημεία 7, 5, και 3.

Προφανώς, είναι επιθυμητή η λειτουργία σε κατάσταση ισορροπίας με τον υψηλότερο βαθμό μετατροπής. Υπάρχει, όμως, ένα όριο σταθερότητας (stability) που είναι αποδεκτό για ασφαλή λειτουργία.

Εκτός από τις καταστάσεις ισορροπίας, είναι σημαντικό να βρεθεί πως προσεγγίζονται οι καταστάσεις αυτές. Η γραμμική ανάλυση σταθερότητας (linear stability analysis) των εξισώσεων (5), αποκαλύπτει τη συμπεριφορά του συστήματος σε μικρές διαταραχές (disturbances) των τιμών των παραμέτρων λειτουργίας. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεγάλες διαταραχές, όμως, απαιτείται να λυθούν αριθμητικά οι εξισώσεις (5) και να αποτυπωθεί η λύση στο φασικό πεδίο βαθμού μετατροπής-θερμοκρασίας.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ένα εύστοχο παράδειγμα επιλογής τεχνολογίας παραγωγής για βιώσιμα βιομηχανικά συστήματα είναι η επιλογή μιας από τις τεχνολογίες επεξεργασίας στερεών αποβλήτων, αναερόβιας ζύμωσης για παραγωγή βιο-αερίου (biogas), κομποστοποίησης και πυρόλυσης για παραγωγή βιο-άνθρακα (biochar), βιο-καυσίμου (biooil) και βιο-αερίου. Τα κριτήρια που υιοθετούνται για μια τέτοια επιλογή είναι πολλά και ετερόκλητα, τεχνικά, π.χ., εφικτότητα, λειτουργικότητα, ευελιξία, αξιοπιστία, ποιότητα, οικονομικά, π.χ., τιμή, ποσότητα, ανταγωνιστικότητα, στρατηγικά χαρακτηριστικά, περιβαλλοντικά, π.χ., πρόληψη μόλυνσης εδάφους, υδάτινων οδών και ατμόσφαιρας, μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, και κοινωνικά, π.χ., διαφύλαξη δημόσιας υγείας και επιπέδου ζωής, μείωση χρήσης γης για απόθεση αποβλήτων, δημιουργία θέσεων εργασίας, κλπ. Το πλήθος, ο ετερόκλητος χαρακτήρας και η πολυπλοκότητα των κριτηρίων καθιστούν δύσκολη τη δημιουργία και χρήση ενός ενιαίου κριτηρίου, με σκοπό τη χρήση κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Υπάρχει βέβαια και ο δρόμος της χρήσης δεικτών βιωσιμότητας που, με χρήση κοινών μονάδων αναφοράς, π.χ., διαθέσιμη ενέργεια (emergy), συνιστούν ενιαία κριτήρια για εφαρμογή κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Επειδή, όμως, οι δείκτες αυτοί δεν έχουν γίνει αποδεκτοί σε μεγάλο βαθμό, γίνεται ελκυστική η χρήση μεθόδων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (multiple-criteria optimization) (Chen, Batson, Dang, 2005).

Για τις τρεις τεχνολογίες, αναερόβιας ζύμωσης, κομποστοποίησης και πυρόλυσης, η απόφαση που χρειάζεται να γίνει είναι ταυτόσημη με την εύρεση του διανύσματος $w = (w_1, w_2, w_3)$ where $w_i = 0$ or 1 για $i = 1, 2, 3$. Η καθεμία τεχνολογία, Tc_i , $i=1,2, 3$, αξιολογείται με βάση το καθενα από τα κριτήρια Cr_j , $j = 1, \dots, 9$ (Cr1: τιμή ανά παραγόμενη μονάδα, Cr2: μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παραχθεί, Cr3: αξιοπιστία, Cr4: ευελιξία, Cr5: περιβαλλοντικό αποτύπωμα αερίων του θερμοκηπίου, Cr6: ρύπανση, Cr7: χαρακτηριστικό στρατηγικής φύσης, Cr8: κοινωνικά χαρακτηριστικά, Cr9: δυνατότητα κορεσμού) και βαθμολογείται με $a_{i,j}$, όπως δείχνει ο Πίνακας 1.

Πίνακας 1. Πίνακας τιμών κριτηρίων

Cr\Tc	Tc1	Tc2	Tc3
Cr1	2	2.1	2.4
Cr2	115	80	90
Cr3	100	95	85
Cr4	80	90	60
Cr5	1	1.1	1.1
Cr6	1	0.8	0.9
Cr7	100	80	100
Cr8	70	65	85
Cr9	70	65	80

Συνολικά διαθέσιμη ενέργεια: $J_2(w) = \sum_{i=1}^3 a_{2,i} w_i$

Κόστος ενέργειας: $J_1(w) = \sum_{j=1}^3 a_{1,j} a_{2,j} w_j$

Συνολική αξιοπιστία: $J_3(w) = \frac{\sum_{j=1}^3 a_{3,j} a_{2,j} w_j}{\sum_{j=1}^3 a_{2,j} w_j}$

Συνολική ευελιξία: $J_4(w) = \frac{\sum_{j=1}^3 a_{4,j} a_{2,j} w_j}{\sum_{j=1}^3 a_{2,j} w_j}$

Συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα: $J_5(w) = \sum_{j=1}^3 a_{5,j} a_{2,j} w_j$

Συνολική ρύπανση: $J_6(w) = \sum_{j=1}^3 a_{6,j} a_{2,j} w_j$

Αντίστοιχα: $J_7(w) = \sum_{j=1}^3 a_{7,j} a_{2,j} w_j$ $J_8(w) = \sum_{j=1}^3 a_{8,j} a_{2,j} w_j$ $J_9(w) = \sum_{j=1}^3 a_{9,j} a_{2,j} w_j$

Το βασικό ζητούμενο είναι τα $J_2(w)$, $J_3(w)$, $J_4(w)$, $J_7(w)$, $J_8(w)$, $J_9(w)$ είναι μεγάλα και τα $J_1(w)$, $J_5(w)$, $J_6(w)$ να είναι μικρά, δηλαδή, $J_i(w) \geq J_i^*, i = 2,3,4,7,8,9$ και $J_i(w) \leq J_i^*, i = 1,5,6$ όπου οι τιμές των J_i^* είναι δεδομένες. Το πρόβλημα αυτό συνοψίζεται ως:

Find $w = (w_1, w_2, w_3)$, $w_i = 0$ or 1 , such that :
 $J_i(w) \geq J_i^*, i = 2,3,4,7,8,9$ and $J_i(w) \leq J_i^*, i = 1,5,6$ (A)

Παρόμοια προβλήματα είναι το πρόβλημα μεγιστοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας και το πρόβλημα ελαχιστοποίησης περισσοτέρων από ένα κριτηρίων

Find $w = (w_1, w_2, w_3)$, $w_i = 0$ or 1 , such that :
 $J_2(w)$ is maximized subject to :
 $J_i(w) \geq J_i^*, i = 3,4,7,8,9$ and $J_i(w) \leq J_i^*, i = 1,5,6$ (B)

και

Find $w = (w_1, w_2, w_3)$, $w_i = 0$ or 1 , such that :
 $- J_2(w), J_5(w), J_6(w)$ are minimized subject to :
 $J_i(w) \geq J_i^*, i = 3,4,7,8,9$ (Γ),

αντίστοιχα, με περιορισμούς οι διάφοροι στόχοι να είναι εντός αποδεκτών ορίων. Για το πρόβλημα (Γ) είναι δυνατό να βρεθούν λύσεις Pareto από το ισοδύναμο πρόβλημα

$$\begin{aligned} &\text{Find } w = (w_1, w_2, w_3), w_i = 0 \text{ or } 1, \text{ such that :} \\ &b_1(-J_2(w)) + b_2J_5(w) + b_3J_6(w) \text{ is minimized subject to :} \\ &J_i(w) \geq J_i^*, i = 3, 4, 7, 8, 9 \end{aligned} \quad (\Delta)$$

Οι παράμετροι b_i 's στο πρόβλημα (Δ) μπορεί να αφεθούν στη διάθεση του διαχειριστή, ή να προσδιοριστούν από ψηφοφορία των παραγόντων ή διαπραγμάτευση (bargaining) βασισμένη σε διαδικασία Nash ή Harsanyi ή Kalais-Smorodinsky (Owen, 1995). Σε όλα αυτά τα προβλήματα ο άγνωστος είναι το διάνυσμα $w = (w_1, w_2, w_3)$ $w_i = 0$ ή 1 , κατά συνέπεια είναι προβλήματα για ακέραιου προγραμματισμού (integer programming) (Branke et al, 2008). Για την επίλυση τους χρησιμοποιούνται μέθοδοι πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης (multi-criteria optimization) (Chen, Batson, Dang, 2005).

ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Για βιώσιμα συστήματα η ανάλυση του κύκλου ζωής (life cycle analysis) είναι πρωταρχικής σημασίας. Η χρησιμότητα της ενισχύεται όταν συνοδεύεται από αποτίμηση της αβεβαιότητας (uncertainty) και σχεδιασμό για έκτακτες περιπτώσεις (contingency planning) όταν το περιβάλλον, με την ευρεία έννοια (αγορά, τεχνολογία, κοινωνία, βιότοπος), του βιώσιμου συστήματος υφίσταται μη αναμενόμενες (απρόβλεπτες) αλλαγές. Σε περίπτωση αλλαγής των εξωτερικών συνθηκών η άσκηση του δικαιώματος του διαχειριστή του συστήματος να παρέμβει στην παραγωγή είναι ύψιστης σημασίας. Η απόφαση για το είδος της παρέμβασης μπορεί να βασιστεί σε μεθοδολογίες αποτίμησης της αβεβαιότητας. Μια τέτοια μεθοδολογία παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα.

Αποτιμάται μια ευκαιρία να επενδυθούν $I_o = €104 \text{ M}$ ($\text{M} \equiv 10^4$) σε βιομηχανική παραγωγή που ένα χρόνο αργότερα θα δώσει αναμενόμενα έσοδα (cash flow) €180 M αν η αγορά ανέβει ($V^+ = €180 \text{ M}$) ή €60 M αν η αγορά κατέβει ($V^- = €60 \text{ M}$). Η ακαθάριστη αξία (gross project value) του έργου (project) παριστάνεται με V . Η πιθανότητα να ανέβει ή να κατέβει η αγορά είναι η ίδια, $q = 0.5$. Η αγορά μπορεί να ανέβει 80% ή να κατέβει 40% σε ένα οποιοδήποτε χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό τον κίνδυνο, η απόδοση της επένδυσης (return on investment) είναι

$$k = \frac{0.5 \times 1.8 + 0.5 \times 0.6}{1.0} - 1.0 = 20\%$$

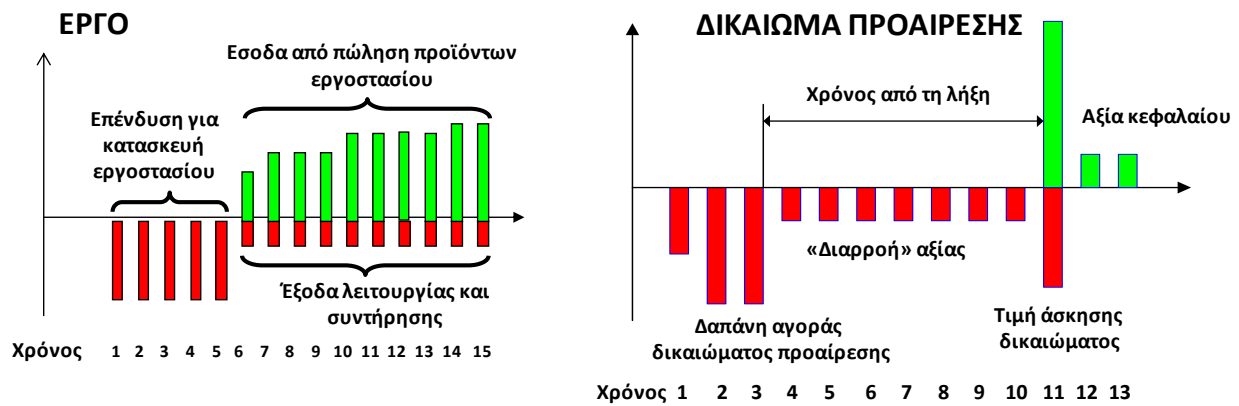
Ακαθάριστη (gross) και καθαρή (net) παρούσα αξία (present value) του έργου είναι

$$V_o = \frac{qV^+ + (1-q)V^-}{1+k} = \frac{0.5 \times 180 + 0.5 \times 60}{1 + 0.20} = 100 \text{ M}$$

$$NPV = V_o - I_o = 100 - 104 = -4 \text{ M}$$

Με βάση την καθαρή παρούσα αξία του, NPV , το έργο δεν πρέπει να προχωρήσει.

Για να ξεπεραστούν οι ανεπάρκειες της συμβατικής μεθόδου υπολογισμού της καθαρής παρούσας αξίας, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η δυνατότητα μελλοντικών πράξεων από τη διαχείριση για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι ή ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση επενδυτικών δικαιωμάτων προαίρεσης (options) καθώς οι έργα βιομηχανικής παραγωγής (projects) έχουν χαρακτηριστικά δικαιωμάτων προαίρεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 και τον Πίνακα 2



Σχήμα 3. Ομοιότητες έργων παραγωγής και δικαιωμάτων προαίρεσης

Πίνακας 2. Αναλογία έργου και δικαιώματος προαίρεσης

<u>Δικαίωμα προαίρεσης</u>	<u>Μεταβλητή</u>	<u>Έργο</u>
Τιμή μετοχής	S	Παρούσα αξία
Τιμή άσκησης δικαιώματος	X	Έξοδα ανάπτυξης έργου
Χρόνος από τη λήξη	t	Χρόνος για να ληφθεί απόφαση
Επιτόκιο μηδενικού κινδύνου	r	Επιτόκιο μηδενικού κινδύνου
Stock Volatility	s	Volatility of Project Value

Οι τιμές των μετοχών ακολουθούν στοχαστική διεργασία Wiener (η οποία, επίσης, περιγράφει συγκρούσεις σωματιδίων στη φυσική) (Trigeorgis, 1995):

$$dS = \alpha(S, t) + \sigma(S, t)dz \quad (7)$$

όπου dz είναι το διαφορικό για το οποίο η μέση τιμή και η διασπορά είναι $E(dz) = 0$ and $Var(dz) = dt$, αντίστοιχα. Κατ' ακολουθία, $E(dS) = \alpha(S, t) dt$, όπου $\alpha(S, t)$ είναι η μετατόπιση (drift), και $Var(dS) = s^2(S, t) dt$, όπου $s^2(S, t)$ είναι η μεταβλητότητα (volatility). Αντισταθμιστικά (hedge) χαρτοφυλάκια (portfolios) θεωρούνται εκείνα για τα οποία ισχύει $N S - C = B$, όπου C είναι η

αξία του δικαιώματος προαίρεσης (option value), και B το ποσό του δανείου για να αγοραστούν N μετοχές στην τιμή S .

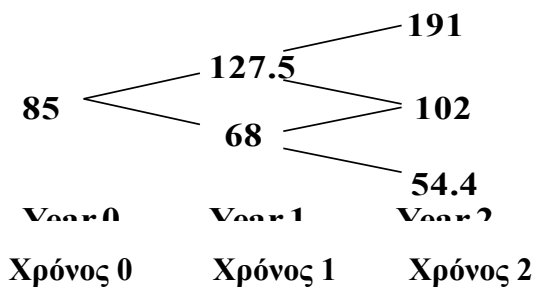
Έργα βιομηχανικής παραγωγής (projects) και επενδυτικά δικαιώματα προαίρεσης (options) περιγράφονται από στοχαστικές εξισώσεις του τύπου

$$\frac{1}{2} \sigma^2 S^2 C_{SS} + rSC_S - C_t - rC = 0 \quad (8),$$

που επιλύονται είτε με τεχνικές πεπερασμένων διαφορών είτε με προσομοιώσεις Monte Carlo.

Οι πράξεις που αναμένεται να παρθούν από τη διαχείριση σε περίπτωση μεταβολών στις εξωτερικές συνθήκες περιλαμβάνουν

1. Αναβολή της επένδυσης για ένα χρόνο: ισοδυναμεί με το δικαίωμα της προαίρεσης πώλησης με ακαθάριστη παρούσα αξία έργου V ίσης με τις δαπάνες του επόμενου χρόνου I_t ,
2. Αύξηση της επένδυσης: η διαχείριση έχει την ευελιξία να διατηρήσει το ίδιο μέγεθος χωρίς επιπλέον έξοδα ή να διπλασιάσει το μέγεθος και να αποκτήσει διπλάσια παρούσα αξία έργου με πληρωμή πρόσθετων εξόδων €80 M,
3. Μείωση της επένδυσης: κόστος εκκίνησης (start-up cost) €5 M πληρώνεται αμέσως και γίνεται επένδυση €58.3 M (μελλοντική αξία €54 M) σε ένα οποιοδήποτε χρόνο. Ως εναλλακτική λύση για €58.3 M επένδυση ικανή να διατηρήσει το παρόν μέγεθος του έργου, η διαχείριση μπορεί να υποδιπλασιάσει το μέγεθος και την αξία του έργου με μικρότερη δαπάνη $I_t = €25$ M,
4. Προσωρινή παύση (shut down) του έργου σε συγκεκριμένο χρόνο αν τα έσοδα δεν είναι αρκετά για να καλύψουν τα πάγια έξοδα εκείνο το χρόνο. Πληρωμή σε μετρητά (Cash Payout), $C = 0.3V$. Πάγια έξοδα (Fixed Costs), $FC = €18.3$ M. Μεταβλητά έξοδα (Variable Costs), $VC = €40$ M,
5. Παύση του έργου για υπολειμματική αξία (salvage value) που μεταβάλλεται ως εξής:



και

6. Αθέτηση πληρωμής δόσης: €40 M πληρώνονται αμέσως σαν κόστος εκκίνησης (start-up cost), και το υπόλοιπο \$64 M κατατίθεται σε δεσμευμένο λογαριασμό (escrow account) με επιτόκιο μηδενικού κινδύνου (risk-free rate) planned για να πληρωθούν οι δόσεις τα επόμενα χρόνια.

Όταν γίνουν οι υπολογισμοί για τις παραπάνω επιλογές, προκύπτει ο Πίνακας 3.

Πίνακας 3. Καθαρή παρούσα αξία έργου για διάφορες επιλογές της διαχείρισης

<u>Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)</u>	
1. Αναβολή της επένδυσης για ένα χρόνο	\$25.1 M
2. Αύξηση της επένδυσης	\$33.0 M
3. Μείωση της επένδυσης	(\$2.2 M)
4. Προσωρινή παύση	\$8.2 M
5. Παύση του έργου για υπολειμματική αξία	\$0.4 M
6. Αθέτηση πληρωμής δόσης	\$1.1 M
Συμβατική Μέθοδος (DCF)	(\$4.0 M)

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι η συμβατική μέθοδος υπολογισμού (DCF) της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) δεν οδηγεί σε σωστά συμπεράσματα. Η πραγματική παρούσα αξία αποτελείται από δύο μέρη, αυτό που υπολογίζεται από τη συμβατική μέθοδο και εκείνο που υπολογίζεται από την ευελιξία της διαχείρισης για παρεμβάσεις όταν μεταβάλλονται οι εξωτερικές συνθήκες του συστήματος. Αν υπάρχει σχέδιο αντιμετώπισης των ανταγωνιστών στην αγορά, στην πραγματική παρούσα αξία προστίθεται ένα τρίτο μέρος που σχετίζεται με τη στρατηγική της διαχείρισης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση της βιωσιμότητας (sustainability) σε βιομηχανικά συστήματα απαιτεί τη δημιουργία ανάλογου λογισμού (calculus) για τη διαχείριση πόρων, την επιλογή τεχνολογιών παραγωγής και την εξασφάλιση της παρέμβασης της διαχείρισης όταν μεταβάλλονται απροσδόκητα οι εξωτερικές συνθήκες του συστήματος.

Πόροι (resources) στην περίπτωση βιώσιμων βιομηχανικών συστημάτων δεν είναι μονάχα οι φυσικοί πόροι και τα προϊόντα τους αλλά και τα απόβλητα με ολόκληρη την ιεραρχία εκμετάλλευσής τους, πρόληψη, ελάττωση, ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, και επεξεργασία για ανάκτηση ενέργειας και υλικών.

Η βιωσιμότητα, με βάση το σύνθετο σκοπό της, να εξασφαλίζει ισορροπία στις πολύπλοκες αλληλοεπιδράσεις κοινωνίας, περιβάλλοντος και οικονομίας (αγοράς), επιβάλλει πολλαπλά και ετερόκλητα κριτήρια αποδοτικότητας στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων και υπηρεσιών. Το πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων ποικίλου χαρακτήρα, π.χ., κοινωνικά, οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά, μπορεί να λυθεί με κοινό σύστημα αναφοράς, π.χ., διαθέσιμη ενέργεια (emergy), ομαδοποίηση τους σε δείκτες οικονομικής και περιβαλλοντικής

αποδοτικότητας. Το πρόβλημα με τους δείκτες είναι ότι στην παρούσα φάση δεν υπάρχουν δείκτες γενικής αποδοχής.

Η διαχείριση των πόρων σε μορφή αποθέματος (stock) ή ροής (flow), μια και χρειάζεται διευκρίνιση ως προς την αναφορά της βιωσιμότητας σε αποθέματα ή ροές πόρων, ανάγεται σε μελέτη του δυναμικού συστήματος που συνιστούν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

Η επιλογή τεχνολογίας παραγωγής ώστε το σύστημα να είναι βιώσιμο, λόγω των πολλαπλών ετερόκλητων κριτηρίων, βασίζεται σε επίλυση προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού (integer programming) με μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (multi-criteria optimization).

Τέλος, η εξασφάλιση της ευελιξίας της διαχείρισης να παρεμβαίνει σε περιπτώσεις μεταβολής των εξωτερικών συνθηκών μπορεί να γίνει με μεθόδους από τη θεωρία επενδυτικών δικαιωμάτων προαίρεσης (options theory).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Branke, J., Kalyanmoy D., Miettinen, K., Slowinski, R. *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*, Springer (2008).

Chen, D-S., Batson, R.G., Dang, Y. *Applied integer programming – Modeling and solution*, Wiley (2010).

Coelho, H.M.G, Lange, L.C. and Coelho, L.M.G. Proposal of an environmental performance index to assess solid waste treatment technologies. *Waste Mngmnt* 32(2012), 1473-1481.

Ebert, U. and Welsch, H. Meaningful environmental indices: a social choice approach. *J. Env. Econ. & Mngmnt* 47(2004), 270-283.

Fogler, H.S., Gürmen, M.N. *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Prentice Hall (2005).

Lou, H., Kulkarni, M.A., Singh, A., Hopper, J. Sustainability Assessment of Industrial Systems. *Ind. Eng. Che. Res.* 43(2004), 4233-4242.

Luenberger, D. G. *Introduction to Dynamic Systems: Theory, models and applications*, Wiley (1979).

Owen, G. *Game Theory*, Academic Press (1995).

Popp, J., Hoag, D., Hyatt, D.E. Sustainability indices with multiple objectives. *Ecol. Indic.* 1(2001), 37-47.

Trigeorgis, L. *Real Options*, MIT Press (1995).