

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Ι. Καλογερόπουλος και Χ. Σαρίμβης*

Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

([*hsarimv@central.ntua.gr](mailto:hsarimv@central.ntua.gr))

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεγάλη πολυπλοκότητα των βιολογικών και βιοχημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), όπως επίσης τα ολοένα και αυστηρότερα όρια που αυτές πρέπει να πληρούν σε συνάρτηση με τις προσπάθειες μείωσης του ενεργειακού τους αποτυπώματος, καθιστούν το έργο ελέγχου τους μία μεγάλη πρόκληση.

Προς αυτή την κατεύθυνση, προτείνουμε την ανάπτυξη γραμμικού Οικονομικού Ελεγκτή Δυναμικού Μητρώου (Economic Dynamic Matrix Control, EDMC), όπου το πολυμεταβλητό σύστημα της διεργασίας κατασκευάζεται μέσω βηματικών επιβολών που πραγματοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης COST/IWA Benchmark Simulation Model No 1 ^[1] (BSM). Με τον όρο «Οικονομικό» δηλώνεται η ενσωμάτωση οικονομικών κριτηρίων λειτουργίας της εγκατάστασης στην αντικειμενική συνάρτηση του γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης που διαμορφώνεται και επιλύεται επαναληπτικά σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή. Τα κύρια οικονομικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά της ενέργειας που δαπανάται για τον αερισμό των αερόβιων δεξαμενών καθώς και της ενέργειας άντλησης των ρευμάτων ανακυκλοφορίας.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου εφαρμόστηκε στο μοντέλο BSM και από τα αποτελέσματα προκύπτει σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης συγκριτικά με την τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται από το BSM δίνοντας, ταυτόχρονα, παρόμοιες τιμές στην ποιότητα του ρεύματος απορροής. Επίσης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων και με μεθοδολογίες Οικονομικού Ελέγχου Προβλεπτικού Μοντέλου (Economic Model Predictive Control, EMPC) ^[2,3] που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την τελευταία δεκαετία έχει προταθεί πληθώρα συστημάτων και στρατηγικών ελέγχου που αφορούν μονάδες ΕΕΛ, οι οποίες στην πλειοψηφία τους επικεντρώνονται στον έλεγχο του αερισμού των αερόβιων δεξαμενών, καθώς η ενέργεια που δαπανάται σε αυτήν τη δραστηριότητα των ΕΕΛ αποτελεί το 45% με 75% της συνολικά δαπανώμενης ενέργειας τους^[4].

Ο Έλεγχος Προβλεπτικού Μοντέλου (Model Predictive Control, MPC) αποτελεί μία δημοφιλή τεχνική ελέγχου. Στη μέθοδο MPC, σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πεπερασμένου χρονικού ορίζοντα (ορίζοντας πρόβλεψης) όπου ελαχιστοποιείται μία κατάλληλα ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση. Μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι μελλοντικές τιμές των μεταβλητών ελέγχου, σε έναν εν γένει μικρότερο χρονικό ορίζοντα (ορίζοντας ελέγχου)^[5,6]. Μία κατηγορία των μεθοδολογιών MPC αποτελεί οι τεχνικές Ελέγχου Δυναμικού Μητρώου (Dynamic Matrix Control, DMC) όπου το γραμμικό προβλεπτικό μοντέλο της διεργασίας παράγεται από βηματικές επιβολές στις μεταβλητές χειρισμού αντλώντας δεδομένα από την απόκριση των μεταβλητών ελέγχου^[7,8].

Οι προαναφερθείσες τεχνικές ελέγχου, όμως, αποτελούν τεχνικές όπου γίνεται χρήση σταθερών τιμών λειτουργίας (set points). Ωστόσο, οι ΕΕΛ αποτελούν εγκαταστάσεις οι εισοδοί των οποίων υπόκεινται σε μεγάλες διακυμάνσεις. Έτσι, μπορούμε να συναντήσουμε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες το φορτίο του ρεύματος εισροής να είναι πολύ χαμηλό οδηγώντας με τη σειρά του σε

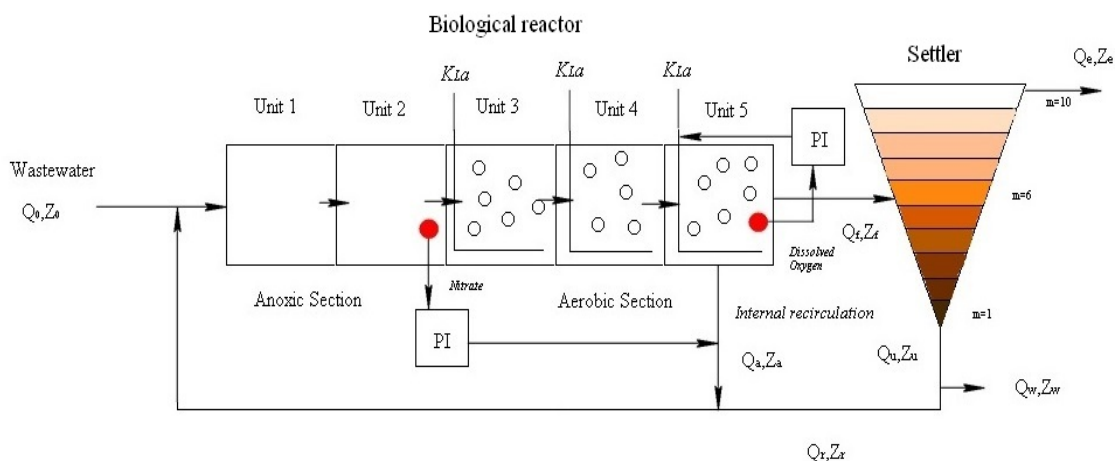
πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών του ρεύματος απορροής. Σε αυτήν την περίπτωση, οι προαναφερθείσες τεχνικές ελέγχου θα εξαναγκάσουν το υπό έλεγχο σύστημα να επιτύχει τα σταθερά σημεία λειτουργίας, οδηγώντας σε περίσσεια κατανάλωση ενέργειας.

Λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχεται να δώσει ο Έλεγχος Οικονομικού Προβλεπτικού Μοντέλου (Economic Model predictive Control, EMPC) όπου η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης ενσωματώνει απευθείας τα οικονομικά κριτήρια λειτουργίας του υπό έλεγχο συστήματος. Στην εργασία των Jing και Liu^[3] συναντάμε την εφαρμογή του EMPC σε ΕΕΛ, όπου το μοντέλο της διεργασίας είναι το πλήρες μοντέλο (145 μεταβλητές κατάστασης) του BSM υποθέτοντας πλήρη γνώση της μελλοντικής εξέλιξης της σύστασης του ρεύματος εισροής. Για αυτούς τους λόγους η συγκεκριμένη εργασία διαμορφώνει έναν θεωρητικό στόχο σε ότι αφορά στα αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει η χρήση της τεχνικής ελέγχου EMPC. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ωστόσο, η γνώση της μελλοντικής εξέλιξης όλων των μεταβλητών κατάστασης, όπως επίσης και των διαταραχών, είναι περιορισμένη.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μία καινοτόμος στρατηγική Οικονομικού Ελέγχου Δυναμικού Μητρώου (EDMC), όπου το προβλεπτικό μοντέλο της διεργασίας προκύπτει από βηματικές επιβολές που διενεργήθηκαν στο μοντέλο BSM. Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική ελέγχου, οι διαθέσιμες προς έλεγχο μεταβλητές χειρισμού της διεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πολυμεταβλητό μοντέλο όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου και μεταβλητών χειρισμού περιγράφονται μέσω των βηματικών επιβολών. Επιπλέον, αποτελεί μία προσέγγιση που είναι εύκολα υλοποιήσιμη σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δοκιμάστηκε στο μοντέλο προσομοίωσης BSM. Το BSM αναπτύχθηκε για να αποτελέσει ένα κοινό σημείο αναφοράς προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση διαφορετικών τεχνικών ελέγχου. Το μοντέλο BSM αποτελείται από έναν βιολογικό αντιδραστήρα πέντε διαμερισμάτων· τα δύο πρώτα (Unit 1 και 2) αποτελούν την ανοξική ζώνη, όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της απονιτροποίησης, ενώ τα υπόλοιπα τρία (Unit 3,4 και 5) συνιστούν την αερόβια ζώνη, όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της νιτροποίησης. Έτσι, η εγκατάσταση συνδυάζει νιτροποίηση και απονιτροποίηση σε μία διάταξη η οποία συναντάται πολύ συχνά σε πραγματικές ΕΕΛ. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η διάταξη BSM καθώς επίσης και η προτεινόμενη τεχνική ελέγχου, η οποία αποτελείται από δύο PI ελεγκτές. Ο πρώτος είναι υπεύθυνος για τον περιορισμό του νιτρώδους και νιτρικού αζώτου (μεταβλητή ελέγχου) στο τελευταίο ανοξικό διαμέρισμα χρησιμοποιώντας το εσωτερικό ρεύμα ανακυκλοφορίας ως μεταβλητή χειρισμού. Ο δεύτερος ελεγκτής συσχετίζει τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (μεταβλητή ελέγχου) με την σταθερά παροχής οξυγόνου (μεταβλητή χειρισμού) στο τελευταίο αερόβιο διαμέρισμα.



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου προσομοίωσης BSM.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν οι συνήθεις δείκτες απόδοσης των ΕΕΛ. Πρώτον, η ποιότητα του ρεύματος απορροής EQ ($\text{kg pollutants} \cdot \text{d}^{-1}$) από το άνω στρώμα του δοχείου καθίζησης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό δείκτη απόδοσης μίας ΕΕΛ. Υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα των συγκεντρώσεων διαφόρων συστατικών του ρεύματος απορροής και δίνεται από την ακόλουθη σχέση^[1]:

$$EQ = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_f} (2 * SS_e(t) + 1 * COD_e(t) + 30 * S_{Nkj,e}(t) + 10 * S_{NO,e}(t) + 2 * BOD_e(t)) * Q_e(t) dt \quad (1)$$

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες που σχετίζονται με τα κόστη λειτουργίας μίας ΕΕΛ. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο δείκτες κόστους, και πιο συγκεκριμένα το κόστος αερισμού της τελευταίας αερόβιας δεξαμενής:

$$AE_5 = \frac{S_{O,sat}}{1800 T} \int_{t_0}^{t_f} V_5 * K_L a_5(t) dt \quad (2)$$

καθώς επίσης και το κόστος άντλησης του εσωτερικού ρεύματος ανακυκλοφορίας:

$$PE_{Q_a} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_f} 0.004 * Q_a(t) dt \quad (3)$$

Όπου $K_L a_5$ είναι η σταθερά παροχής οξυγόνου στην τελευταία αερόβια δεξαμενή, V_5 η χωρητικότητα της τελευταίας αερόβιας δεξαμενής, $S_{O,sat}$ ο κορεσμός οξυγόνου για θερμοκρασία περιβάλλοντος $>15^\circ\text{C}$, Q_a η ροή του ρεύματος εσωτερικής ανακυκλοφορίας, και $T = t_f - t_0$ ο συνολικός χρόνος υπολογισμού.

Οπότε, το συνολικό κόστος δίνεται από το ακόλουθο άθροισμα:

$$CI(t) = AE_5(t) + PE_{Q_a}(t) \quad (4)$$

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το μοντέλο της διεργασίας που χρησιμοποιείται για την μελλοντική πρόβλεψη των μεταβλητών χειρισμού προέκυψε από βηματικές επιβολές στις μεταβλητές χειρισμού και παρατηρώντας τις αντίστοιχες αποκρίσεις των μεταβλητών ελέγχου χρησιμοποιώντας σταθερά δειγματοληψίας. Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταβλητές χειρισμού και τρεις μεταβλητές ελέγχου οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Δεδομένα διαμόρφωσης του προβλήματος ελέγχου.

Διαστάσεις Μοντέλου ($n_{out} \times n_{in}$)	Μεταβλητές Ελέγχου	Μεταβλητές Χειρισμού	Τιμές Μόνιμης Κατάστασης	Μετρήσιμες Διαταραχές
3×2	$\begin{bmatrix} S_{NO,2} \\ S_{NH,5} \\ S_{NO,5} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Q_a \\ K_L a_5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_{NO,2}^{s.p.} = 3.66 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-3} \\ S_{NH,5}^{s.p.} = 1.73 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-3} \\ S_{NO,5}^{s.p.} = 10.42 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Q_{in} \\ S_{NH,in} \end{bmatrix}$

Σκοπός του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ΕΕΛ με ταυτόχρονη τήρηση των προδιαγραφών λειτουργίας. Έτσι λοιπόν η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης δίνεται από την Σχέση (5).

$$J_{eco}(t) = R_1 * \left(w_1 * AE_5(t) + w_2 * PE_{Q_a}(t) \right) + R_2 * \left(\rho_{min} \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{n_{out}} \varepsilon_{min,i}(t+k) + \rho_{max} \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{n_{out}} \varepsilon_{max,i}(t+k) \right) \quad (5)$$

Όπου, N_p ο ορίζοντας πρόβλεψης, n_{out} το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου, ε_{min} και ε_{max} η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή των μαλακών περιορισμών για τις μεταβλητές ελέγχου αντίστοιχα. Τέλος, R_1 , R_2 , w_1 , w_2 , ρ_{min} , και ρ_{max} τα αντίστοιχα βάρη των μεγεθών που λαμβάνουν μέρος στην αντικειμενική συνάρτηση οι τιμές των οποίων δίνονται στον Πίνακα 2.

Από τη Σχέση (5) γίνεται φανερό πως κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης διαδραματίζει το κόστος λειτουργίας της ΕΕΛ. Επίσης, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων του ρεύματος εισροής είναι σχεδόν απίθανο οι μεταβλητές ελέγχου να κυμαίνονται εντός προκαθορισμένων ορίων και για αυτό το λόγο έχουμε εισάγει μαλακούς περιορισμούς στη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα διαμορφώνεται και επιλύεται επαναληπτικά σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή t περιγράφεται από την σχέση (6).

$$\begin{aligned} & \min_{AE_5(t), PE_{Q_a}(t)} J_{eco}(t) \\ & s. t. \hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i|t) + f(t+k) + \sum_{i=1}^k g'_i \Delta d(t+k-i|t) \\ & u_{min} \leq u(t+k) \leq u_{max} \\ & y_{min} - \varepsilon_{min}(t+k) \leq y(t+k|t) \leq y_{max} + \varepsilon_{max}(t+k) \\ & \varepsilon_{min}(t+k), \varepsilon_{max}(t+k) \geq 0 \\ & \Delta u(t+k) = u(t+k) - u(t+k-1) \end{aligned} \quad (6)$$

Στην Σχέση (6), $\hat{y}(t+k|t)$ είναι οι μελλοντικές προβλέψεις των μεταβλητών ελέγχου υπολογισμένες τη χρονική στιγμή t ως συνάρτηση των συντελεστών g_i που προκύπτουν από τις βηματικές επιβολές, των μεταβολών των $\Delta u(t+k)$ των μεταβλητών χειρισμού, της ελεύθερης απόκρισης του συστήματος $f(t+k)$ και των μετρήσιμων διαταραχών. Επειδή η μελλοντική εξέλιξη των μετρήσιμων διαταραχών θεωρείται γνωστή εκ των προτέρων δεν θεωρούνται ως μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ως μετρήσιμες διαταραχές θεωρούνται η ροή του ρεύματος εισροής καθώς και η συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου του ρεύματος εισροής (βλ. Πίνακα 1).

Πίνακας 2. Τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης και οι αντίστοιχες τιμές τους.

Βάρος	Τιμή
R_1	1
R_2	10^{-1}
w_1	1
w_2	20
ρ_{min}	10
ρ_{max}	10

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφεται στην ^[1], δηλαδή μία περίοδος διάρκειας 150 ημερών υπό σταθερό φορτίο εισροής

χωρίς θόρυβο μέτρησης ακολουθούμενη από μία ξηρά περίοδο δεκατεσσάρων ημερών και τέλος άλλες δεκατέσσερις μέρες δυναμικού φορτίου εκ των οποίων οι τελευταίες επτά χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του συστήματος ελέγχου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το αρχείο με τα μετεωρολογικά δεδομένα της ξηράς περιόδου. Οι προσομοιώσεις διενεργήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον MatLab/Simulink®, ενώ τα προβλήματα βελτιστοποίησης διαμορφώθηκαν με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης Yalmip® και τη χρήση του επιλυτή GUROBI® 7.0. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί ορίζοντες πρόβλεψης (βλ. Πίνακα 3), ενώ η περίοδος δειγματοληψίας θεωρήθηκε ίση με την περίοδο δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται από το μοντέλο BSM, δηλ. ίση με 15 λεπτά.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις περιγράφονται στους Πίνακες 3 και 4. Αρχικά στον Πίνακα 3 βλέπουμε τα αποτελέσματα των τελευταίων επτά ημερών της προσομοίωσης για τις συγκεντρώσεις του ρεύματος απορροής των ρυπαντών που σχετίζονται άμεσα με τις μεταβλητές ελέγχου που χρησιμοποιεί το απλοποιημένο μοντέλο πρόβλεψης. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές συγκέντρωσης νιτρώδους αμμωνίας είναι υψηλότερες συγκριτικά με την προτεινόμενη τεχνική ελέγχου λόγω της μειωμένης κατανάλωσης αερισμού. Ωστόσο, το άθροισμα $\bar{S}_{NH,eff} + \bar{S}_{NO,eff}$ παρουσιάζει σημαντική μείωση. Παράλληλα, το κόστος αερισμού, και κατ' επέκταση το συνολικό κόστος, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ορίζοντας πρόβλεψης ίσος με 24 χρονικές στιγμές παρουσιάζει μείωση της τάξης του 10% ενώ την ίδια στιγμή η συνολική ποιότητα του ρεύματος απορροής (δεν συμμετέχει στην αντικειμενική συνάρτηση) παρουσιάζει αύξηση μόλις 1,21%.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου από προσομοιώσεις στο BSM.

Τύπος Ελεγκτή	$\bar{S}_{NH,eff}$ (g N.m ⁻³)	$\bar{S}_{NO,eff}$ (g N.m ⁻³)	$\bar{S}_{NH,eff} + \bar{S}_{NO,eff}$ (g N.m ⁻³)	EQ (kg.d ⁻¹)	AE_5 (kWh.d ⁻¹)	PE_{Q_a} (kWh.d ⁻¹)	CI (kWh.d ⁻¹)
Default_PI	2.54	12.42	14.96	6123.2	854.39	74.23	928.6222
EDMC_24	3.13	10.95	14.08	6185.3	750.33	93.29	843.6195
EDMC_48	3.27	10.66	13.93	6208.4	762.03	100.31	862.3382
EDMC_72	3.40	10.43	13.83	6238.0	759.71	105.81	865.5198
EDMC_96	3.47	10.28	13.75	6250.3	766.83	111.91	878.7397

Στον Πίνακα 4 φαίνονται συγκριτικά αποτελέσματα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου με αντίστοιχες μεθοδολογίες EMPC που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Προκειμένου να καταστεί εφικτή αυτή η σύγκριση, έγινε χρήση των αποτελεσμάτων που αναφέρονται μεταξύ της όγδοης και δωδέκατης ημέρας από την περίοδο της δυναμικής προσομοίωσης. Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι το προτεινόμενο σύστημα από του Zeng και Liu^[3] επιφέρει σημαντικές μειώσεις στους δείκτες κατανάλωσης με σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα του ρεύματος απορροής. Ωστόσο, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στην συγκεκριμένη εργασία το πλήρες μοντέλο του BSM χρησιμοποιείται ως μοντέλο πρόβλεψης, ενώ ταυτόχρονα και οι τρεις δείκτες που περιγράφονται από τις Σχέσεις 1-3 λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως, αυτή η μεθοδολογία αποτελεί και το θεωρητικό στόχο ως προς τα αποτελέσματα που μπορούν αν επιφέρουν οι μεθοδολογίες EMPC σε ΕΕΛ. Τέλος, συγκριτικά με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται από Revollar et al.^[2], βλέπουμε ότι στην περίπτωση των EMPC-NH και EMPC-OCI+NH το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου παρέχει ταυτόχρονα καλύτερης ποιότητας ρεύμα απορροής με ταυτόχρονη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Ενώ, στην περίπτωση του HEMPC-OCI+NH (υπάρχει η ενσωμάτωση και ενός όρου παρακολούθησης τιμής αναφοράς) η ποιότητα του ρεύματος απορροής είναι βελτιωμένη σε σχέση με την προτεινόμενη

τεχνική ελέγχου αλλά οι δείκτες κατανάλωσης ενέργειας εξακολουθούν να κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα.

Πίνακας 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων προτεινόμενου συστήματος ελέγχου με μεθοδολογίες EMPC που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Controller Type	$\bar{S}_{NH,eff}$ (g N.m ⁻³)	EQ (kg.d ⁻¹)	AE ₅ (kWh.d ⁻¹)	PE _{Q_a} (kWh.d ⁻¹)	CI (kWh.d ⁻¹)
Zeng&Liu_EQ	2.12	5671.9	846.99	140.19	987.19
Zeng&Liu_EQ_OCI	2.30	5693.6	715.77	143.42	859.19
4-day Default PI	3.08	6686.4	935.01	85.13	1020.14
Revollar_HEMPC-OCI	3.21	6783.9	958.27	109.78	1068.05
Revollar_HEMPC-OCI+NH	2.74	6584.7	986.27	79.98	1066.25
Revollar_EMPC-OCI+NH	3.47	7617.0	997.27	0.38	997.65
Revollar_EMPC-NH	2.37	7315.3	1433.3	0	1433.27
4-day EDMC_3by2_24	3.59	6768.4	838.22	100.33	938.54

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία καινοτόμος στρατηγική Οικονομικού Ελέγχου Δυναμικού Μητρώου (EDMC). Αρχικά περιγράφηκε το μοντέλο προσομοίωσης BSM πάνω στο οποίο αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου. Στην συνέχεια, δόθηκαν οι δείκτες αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να αποτιμηθούν τα οφέλη που προσφέρει το προτεινόμενο σύστημα και παρουσιάστηκε αναλυτικά το πρόγραμμα βελτιστοποίησης που διαμορφώνεται και επιλύεται επαναληπτικά κάθε διακριτή χρονική στιγμή. Ακολούθησε, παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων καθώς και σύγκρισή τους με άλλες μεθοδολογίες EMPC που βρίσκονται στη βιβλιογραφία. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το προτεινόμενο σύστημα επιφέρει μεγάλη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας μίας ΕΕΛ συγκριτικά με το προτεινόμενο από το BSM σύστημα ελέγχου, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει παρόμοιες τιμές στην ποιότητα του ρεύματος απορροής. Τέλος, από τη σύγκριση με τις άλλες προτεινόμενες μεθοδολογίες προέκυψε ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου παρουσιάζει το μικρότερο λειτουργικό κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Alex et al., Report by the IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs 2008.
- [2] S. Revollar, P. Vega, R. Vilanova, M. Francisco, *Appl. Sci.* 7(813) (2017).
- [3] J. Zeng and J. Liu, *I&EC Research* 54 (2015) 5710-5721.
- [4] D. Rosso, L.E. Larson, M. K. Stenstrom, *Water Science and Technology* 57(7) (2008).
- [5] J.M. Maciejowski, Pearson Education (2002).
- [6] J.B. Rawlings, D.Q. Mayne, Nob Hill Publishing (2012).
- [7] M. Mulholland, Wiley-VCH (2016).
- [8] C.R. Culter, B.L. Ramaker, AIChE 86th National Meeting (1979).