

ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΕΜΠ

Νικόλαος Π. Κυρτάτος
Καθηγητής ΕΜΠ, Διευθυντής ENM

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας (ENM) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου ιδρύθηκε το 1979 από τον Καθηγητή Ι.Π.Ιωαννίδη που διετέλεσε Διευθυντής του έως το 2001. Το Εργαστήριο δραστηριοποιείται στην έρευνα για ναυτικούς κινητήρες και συστήματα προώσεως πλοίου, με έμφαση σε πειραματικές δοκιμές και θεωρητικές μελέτες της ζεύξης κινητήρα και έλικας, για την βελτίωση της απόδοσης ναυτικών κινητήρων (συνεπώς τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου) και την μείωση ρύπων.



Σχήμα 1. Το κτίριο Λ - Εργαστηρίων της Σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και η είσοδος ENM με την ιστορική ατμομηχανή

Το φάσμα δραστηριοτήτων του εργαστηρίου καλύπτει κύριες και βοηθητικές μηχανές, μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα επί πλοίου.

Το ENM στεγάζει ένα υπεσύγχρονο δοκιμαστήριο ναυτικών κινητήρων, το οποίο περιλαμβάνει κλίνες με ηλεκτρική και υδραυλική πέδη, που επιτρέπουν την διεξαγωγή πολύπλοκων πειραμάτων και δοκιμών λειτουργίας κινητήρων. Το εργαστήριο διαθέτει επίσης εκτεταμένη υπολογιστική ισχύ, που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τον σχεδιασμό κινητήρων, τη βελτιστοποίηση εγκαταστάσεων πρόωσης, τη μελέτη διεργασιών καύσης και την πρόβλεψη εκπομπών ρύπων.

Το εργαστήριο συμμετέχει τόσο σε ερευνητικά προγράμματα που επιδοτούνται από Ελληνικούς οργανισμούς, όσο και σε προγράμματα που επιδοτούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλους διεθνείς οργανισμούς. Ταυτόχρονα, διατηρεί στενούς δεσμούς με την Ελληνική Ναυτιλία.

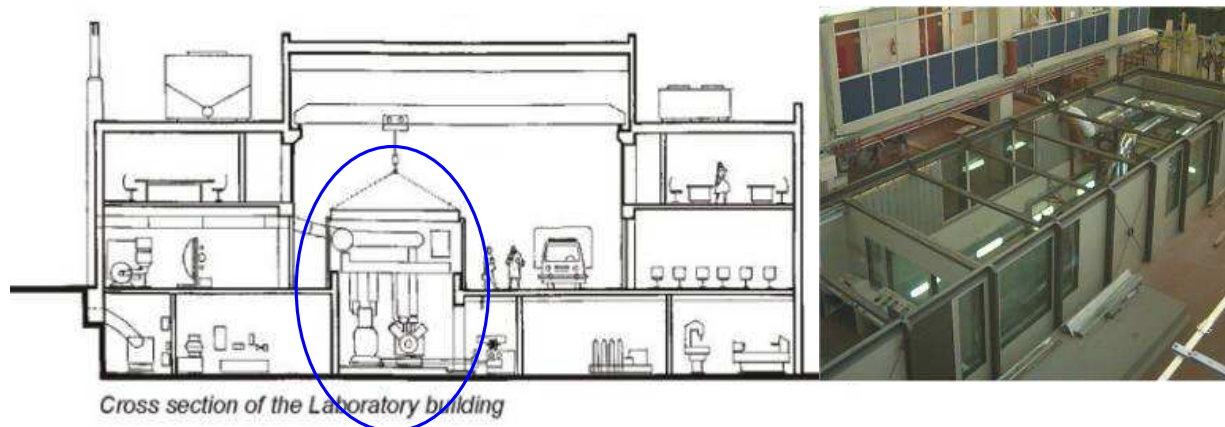
Με την συνεχή συμμετοχή του σε διεθνή ερευνητικά προγράμματα, το ENM έχει ενεργή συμβολή στην εξέλιξη της τεχνολογίας ναυτικών κινητήρων και παράλληλα στην διάδοση των νέων τεχνολογικών εξελίξεων στο χώρο της Ελληνικής Ναυτιλίας. Το ENM συνεργάζεται με τους μεγαλύτερους κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων, υπερπληρωτών και μηχανημάτων πλοίου τόσο μέσω της συμμετοχής του σε διεθνή ερευνητικά προγράμματα, όσο και μέσω ερευνητικών έργων με τους κατασκευαστές.

Μια ιστορική ναυτική μηχανή, η ανακατασκευασμένη ατμομηχανή της θρυλικής θαλαμηγού “Χριστίνα” του Α. Ωνάση, κοσμεί την είσοδο του εργαστηρίου, συνδέοντας το ιστορικό

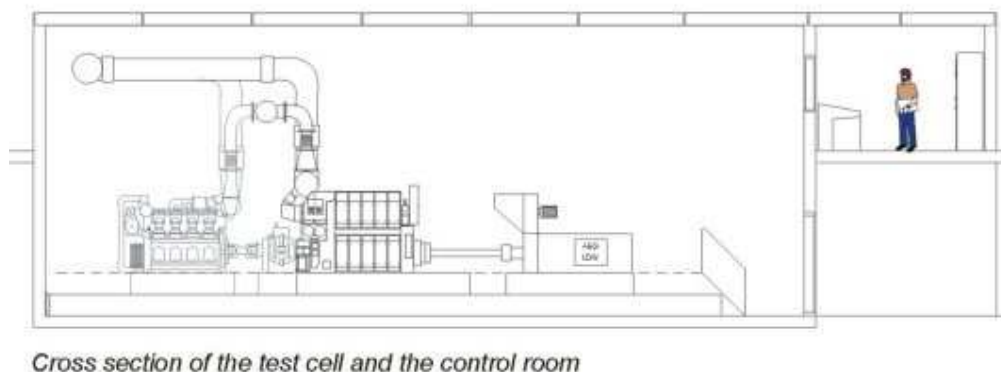
παρελθόν με την παρούσα πράξη της έρευνας και ανάπτυξης Ναυτικής Μηχανολογίας (Σχήμα 1).

Η ΚΛΙΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Το ENM διαθέτει μια μεγάλη κλίνη δοκιμών ναυτικών κινητήρων (Test Cell). Η κλίνη είναι ένας αυτόνομος, κλειστός χώρος 150 περίπου τετραγωνικών μέτρων, κτισμένος ο μισός κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και ο οποίος στεγάζεται ως αυτόνομο κτίσμα στο εσωτερικό του εργαστηρίου. Το κτίριο του ENM έχει στεγασμένη επιφάνεια μεγέθους 1400 τετραγωνικών μέτρων. Η κλίνη δοκιμών περικλείεται από ηχομονωτικό κάλυμμα και η εσωτερική στέγη αποτελείται από καπάκια που αφαιρούνται με την γερανογέφυρα του κτιρίου. Η εσωτερική βάση πάνω στην οποία τοποθετούνται οι υπό δοκιμή κινητήρες είναι μονομπλόκ όγκου 100 τόνων από οπλισμένο σκυρόδεμα, με βισκο-ελαστική έδραση στον πυθμένα του κτηρίου, για αποφυγή μεταφοράς κραδασμών στο υπόλοιπο κτήριο (Σχήμα 2). Η κλίνη δοκιμών διαθέτει εγκαταστάσεις για την απαγωγή των θερμικών φορτίων που παράγονται κατά τη λειτουργία των κινητήρων, με διπλό πρωτεύον/δευτερεύον κύκλωμα νερού μέσω εναλλακτών σε έναν πύργο ψύξης στο εξωτερικό του κτηρίου, και φυσητήρες απαγωγής /προσαγωγής αέρα στο χώρο δοκιμών. Ο αέρας καύσεως παροχετεύεται από χωριστό κύκλωμα με δυνατότητα ψύξης / θέρμανσης για προσομοίωση συνθηκών περιβάλλοντος. Η κλίνη διαθέτει επίσης μια σύγχρονη υποδομή αυτόματης πυρόσβεσης με ψεκασμό νερού /ατμού και κατάλληλα εξοπλισμένο χώρο ελέγχου (control room) απ' όπου γίνεται ο έλεγχος των πειραμάτων μέσω δικτύου υπολογιστών (Σχήμα 3).



Σχήμα 2. Το Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας και η κλίνη δοκιμών κινητήρων



Σχήμα 3. Η κλίνη δοκιμών κινητήρων και το δωμάτιο έλεγχου



Σχήμα 4. Το δωμάτιο ελέγχου (control room) της κλίνης δοκιμών

Η κλίνη δοκιμών έχει σήμερα δυο κινητήρες. Ο πρώτος είναι ένας MAN L16/24, 5-κυλινδρος, τετράχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel. Είναι εξοπλισμένος με υπερπληρωτή της ABB Turbosystems, αποδίδει ισχύ 500kW (680 HP) στις 1200rpm και είναι συνδεδεμένος στο ηλεκτρικό δυναμόμετρο 40.22-M της AEG. Η ογκώδης αυτή πέδη (συνεχούς ρεύματος) μπορεί να απορροφήσει από τον άξονα του κινητήρα ισχύ έως και 500 kW, ενώ έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί σε ηλεκτροκινητήρα που μπορεί να περιστρέψει τη μηχανή με τροφοδοσία από το δίκτυο ηλεκτρισμού.

με την πειραματική εγκατάσταση μπορούν να μελετηθούν σε πραγματικό χρόνο μεταβατικά φαινόμενα λειτουργίας του κινητήρα, κάτω από οποιοδήποτε προγραμματισμένο σενάριο φόρτισης, καθώς ο συνολικός έλεγχος γίνεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Σχήμα 4). Ο L16/24 έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτηθεί είτε με πετρέλαιο Diesel είτε με βαρύ πετρέλαιο, ανάλογα με τη φύση του πειράματος, καθώς μέσα στο εργαστήριο υπάρχουν οι αντίστοιχες υποδομές για την προετοιμασία και χρήση βαρέων καυσίμων (θερμαινόμενες δεξαμενές, σύστημα διαχωρισμού και ρύθμιση ιξώδους).



Σχήμα 5. Οι δυο τετράχρονοι κινητήρες Diesel με τα αντίστοιχα δυναμόμετρα τους

Η μέτρηση της κατανάλωσης γίνεται με ζυγιστική συσκευή (βοηθητική δεξαμενή πάνω σε ζυγαριά) και η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των 0.05 kg, ενώ υπό κατασκευή είναι διάταξη μετρήσεως Coriolis που δίδει δεκαπλάσια ακρίβεια. Στον άξονα που συνδέει κινητήρα και πέδη παρεμβάλλεται ροπόμετρο μεγάλης ακρίβειας, η ένδειξη του οποίου χρησιμοποιείται σε διάταξη βρόγχου για τον ακριβή έλεγχο της στιγμιαίας επιβαλλόμενης φορτίσεως της πέδης, ώστε να δοκιμάζεται ο κινητήρας σε οποιαδήποτε χρονοσειρά μεταβατικής φόρτισης όπως πχ σύμπλεξη / αποσύμπλεξη.

Ο δεύτερος κινητήρας του εργαστηρίου είναι ένας 8-κυλινδρος (διάταξης V), τετράχρονος, υπερπληρωμένος Caterpillar 3508 με ισχύ 750kW (1020 HP) στις 1800 rpm. Ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος με μια υδραυλική πέδη Zoellner 9n 38F ονομαστικής ισχύς 1200kW. Εξαιτίας των περιορισμών ελέγχου της υδραυλικής πέδης, η συγκεκριμένη εγκατάσταση δεν χρησιμοποιείται για την εκτέλεση πειραμάτων ακραίας μεταβατικής λειτουργίας αλλά για δοκιμές αργά μεταβαλλόμενου φορτίου (πχ φόρτιση έλικας) ή σταθερού φορτίου [π.χ. αξιολόγηση συστημάτων υπερπλήρωσης](Σχήμα 5).

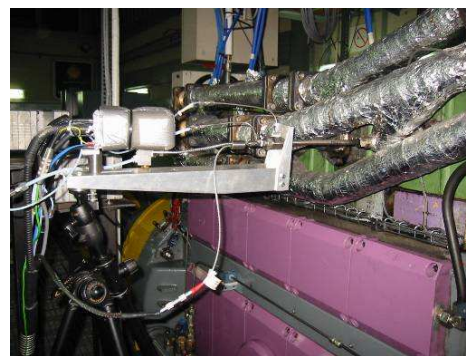
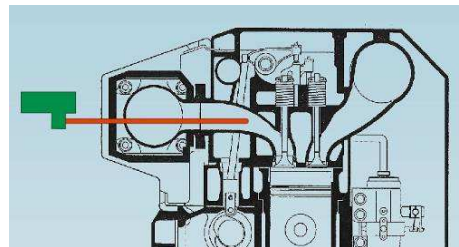
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πειραματικές δοκιμές σε ναυτικούς κινητήρες

Οι δοκιμές αυτές διεξάγονται τόσο στο εργαστήριο όσο και επί πλοίου.

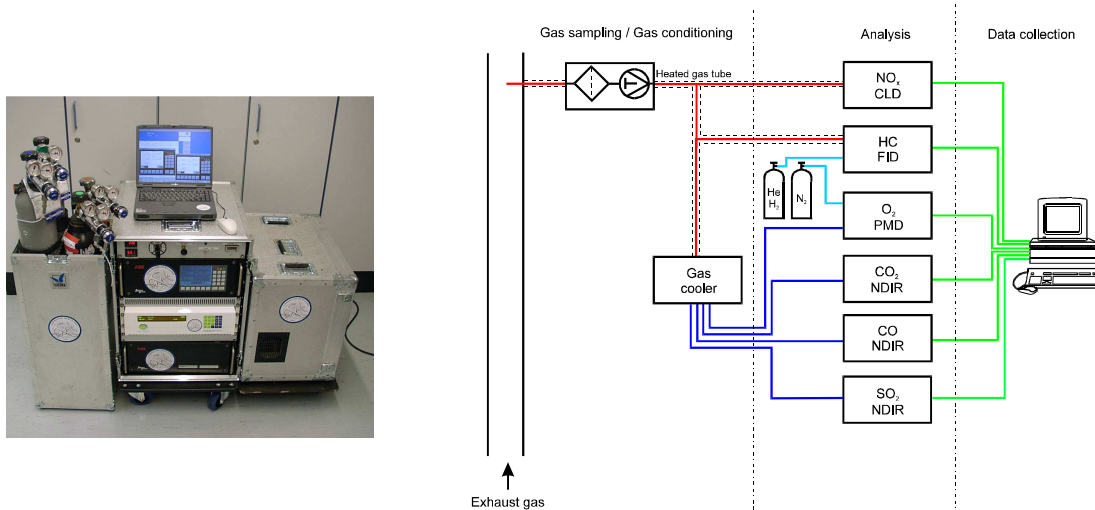
Μετρήσεις Ρύπων

Το ENM έχει την δυνατότητα υπέρ-ταχείας μέτρησης ρύπων οξειδίου του αζώτου NO. Διαθέτει το σύστημα “Cambustion fNO400 CLD” και ο δειγματολήπτης του συστήματος αυτού έχει αναπτυχθεί από το προσωπικό του εργαστηρίου και προσφέρει την δυνατότητα μέτρησης NO από συγκεκριμένο κύλινδρο ενός πολυκύλινδρου ναυτικού κινητήρα, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο [χρόνος απόκρισης περίπου 10ms] (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Ο ειδικός δειγματολήπτης NOx τοποθετημένος στον αυλό εξαγωγής της μηχανής και το σύστημα δειγματοληψίας Cambustion

Το εργαστήριο ανέπτυξε πρόσφατα κινητή μονάδα μέτρησης των ρύπων NO_x , HC, CO, CO_2 , SO_2 , η οποία έρχεται να συμπληρώσει τις ήδη υπάρχουσες μονάδες μέτρησης καπνού (Smoke-FSN) και αιθάλης (Opacity). Το σύστημα αυτό είναι μια ολοκληρωμένη κινητή (μεταφερόμενη) μονάδα μέτρησης ρύπων για κινητήρες diesel που χρησιμοποιούν βαρύ πετρέλαιο (επί πλοίου και για εγκαταστάσεις ξηράς), αποτελούμενη από συσκευές μέτρησης που πληρούν απολύτως τις προδιαγραφές της σχετικής νομοθεσίας και διεθνών κανονισμών IMO/MARPOL (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Μεταφερόμενη μονάδα μέτρησης ρύπων κινητήρων diesel

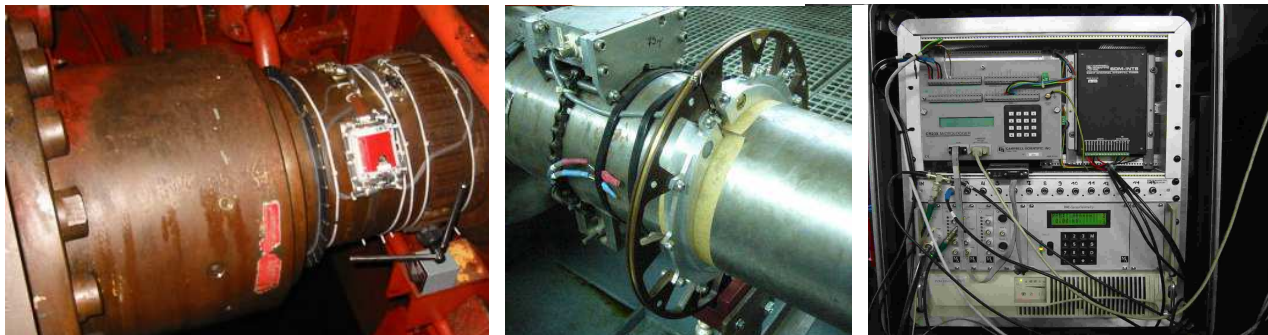
Τις μετρήσεις ρύπων συμπληρώνει μικρό χημικό εργαστήριο του ENM που χρησιμοποιείται για αναλύσεις και βαθμονόμηση των οργάνων (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Το χημικό εργαστήριο του ENM

Μετρήσεις Ροπής και Ώσης

Στο πλαίσιο μετρήσεων πεδίου που παρέχονται από το ENM έχει αναπτυχθεί συγκεκριμένη τεχνογνωσία, για ταυτόχρονη μέτρηση ροπής / ώσης σε εγκαταστάσεις πρόωσης πλοίων, καθώς και σε άλλες εγκαταστάσεις ισχύος. Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από γέφυρες επιμυκησιομέτρων (strain gauges) που προσαρμόζονται κατάλληλα στον άξονα που πρόκειται να μετρηθεί, μαζί με ένα περιστρεφόμενο σύστημα διαμόρφωσης και μετάδοσης του σήματος (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Επιμυκησιομέτρα στο αξονικό σύστημα και το φορητό σύστημα μέτρησης της ροπής με τηλεμετρία

Ένας σταθερός μεταδότης παρέχει επαγωγικά μέσω κεραίας την απαιτούμενη ισχύ για την λειτουργία του περιστρεφόμενου μεταδότη της διάταξης, επιτρέποντας απεριόριστο χρόνο δοκιμών και εξαλείφοντας προβλήματα λόγω τροφοδοσίας από μπαταρία. Τα δεδομένα μέτρησης, μετά από ενίσχυση, δειγματοληψία και επεξεργασία σήματος αποθηκεύονται σε φορητό Η/Υ συλλογής δεδομένων.

Εάν παρεμβάλλεται μειωτήρας μεταξύ της κύριας μηχανής και της έλικας, μπορούν να ληφθούν επιπλέον σήματα στροφών, σε πλήρη συγχρονισμό με τα σήματα ροπής από τα επιμυκησιομέτρα, χρησιμοποιώντας επιπλέον μαγνητικές κεφαλές στροφών για την ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα της μηχανής.

Το σύστημα μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα σε δυο άξονες.

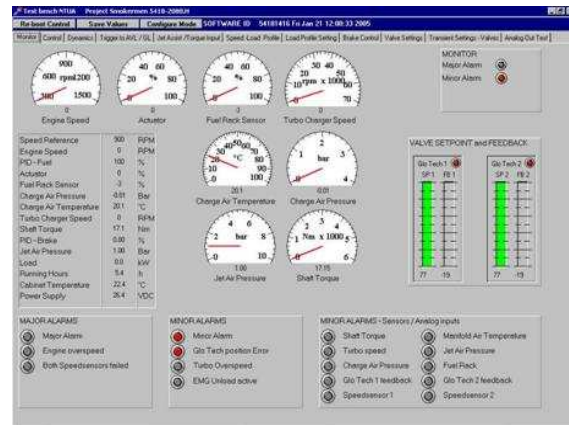
Σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων απόδοσης κινητήρα στην κλίνη δοκιμών.

Ο συνδυασμός λογισμικού για τον έλεγχο των μηχανών, δυναμόμετρων και για την συλλογή όλων των μετρήσεων έχει αναπτυχθεί από το προσωπικό του ENM. Το λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (Data Acquisition System) περιλαμβάνει 160 κανάλια καταγραφής στα 1kHz και 16 κανάλια στα 50kHz, που επιτρέπουν την πειραματική διερεύνηση περίπλοκων φαινομένων λειτουργίας ναυτικών κινητήρων σε μεταβατικές συνθήκες.

Ειδικά στον κινητήρα MAN έχει τοποθετηθεί μεγάλος αριθμός αισθητήρων ώστε να ελέγχονται και να καταγράφονται η πίεση και η θερμοκρασία σε διάφορα τμήματα του κινητήρα (π.χ. μέσα στον κύλινδρο, στο σύστημα εισαγωγής, εξαγωγής, στο σύστημα ψύξης, κλπ), παράμετροι σημαντικοί για την εποπτεία καλής λειτουργίας του κινητήρα.

Το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (data acquisition) βασίζεται στην πλατφόρμα AVL Indiset 620 και είναι δικτυωμένο με το σύστημα ηλεκτρονικού έλεγχου που

Βασίζεται στην πλατφόρμα Woodward ATLAS™, με real time operating system για πλήρη έλεγχο της πέδης και του κινητήρα (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Τα συστήματα AVL Indiset 620 (αριστερά) και ATLAS™ (δεξιά)

Το σύστημα εποπτείας της εγκαταστάσεως είναι χωριστό από το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας στοιχείων πειραμάτων και παρακολουθεί την καλή λειτουργία και ασφάλεια (monitoring, alarm and safety) όλων των μηχανημάτων.

Θεωρητικές μελέτες, αναλύσεις και προσομοιώσεις

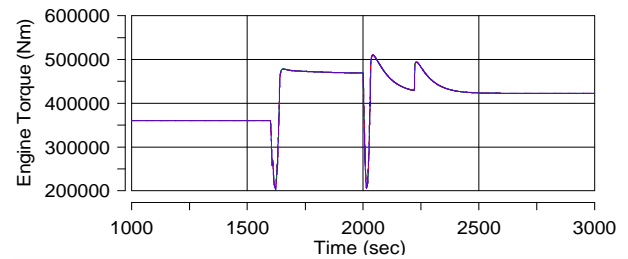
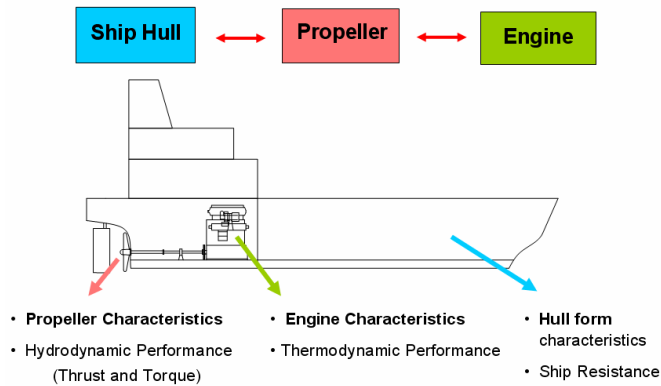
Το ENM έχει αναπτύξει κατάλληλους κώδικες λογισμικού για θεωρητικές μελέτες, αναλύσεις και προσομοιώσεις σε όλο το φάσμα της Ναυτικής Μηχανολογίας:

- Λειτουργία πλοίου-μηχανής-έλικας
- Δυναμική συμπεριφορά εγκαταστάσεων πρόωσης
- Κατάλληλη επιλογή κινητήρα -υπερπληρωτή (Engine-turbocharger matching)
- Βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρα
- Βελτιστοποίηση εγκαταστάσεων πολλαπλών κινητήρων
- Μειωτήρες, συμπλέκτες, συστήματα μετάδοσης
- Ανάλυση κραδασμών και στρεπτικών ταλαντώσεων
- Αυτόματος έλεγχος συστημάτων πρόωσης και ενέργειας
- Μελέτες αστοχίας τμημάτων μηχανής

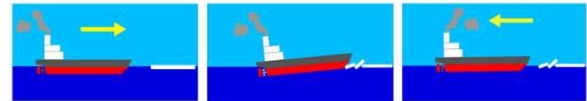
Παραδείγματα των υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ο θερμοδυναμικός κώδικας προσομοίωσης διεργασιών κινητήρων MOTHER (Motor Thermodynamics), που έχει αναπτυχθεί από το ερευνητικό προσωπικό του εργαστηρίου
- Κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD - Computational Fluid Dynamics όπως STAR-CD και KIVA) για ανάλυση των φαινομένων της καύσης και του πεδίου ροής σε κινητήρες
- Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων (FEA - Finite Element Analysis) για μελέτες προβλημάτων ακουστικής, κραδασμών και θορύβου
- Ο κώδικας SPSM (Ship Propulsion Simulation Model) που έχει αναπτυχθεί από το ερευνητικό προσωπικό του εργαστηρίου σε περιβάλλον Matlab/Simulink για την δυναμική προσομοίωση εγκαταστάσεων πρόωσης πλοίου [Πλοίο -Έλικα - Μηχανή] (Σχήμα 11).

Three basic modules:



Case 2: Ice ramming cycle



Σχήμα 11. Στοιχεία (modules) του μοντέλου SPSM και προσομοίωση παγόθραυσης από πετρελαιοφόρο στην Αρκτική

ΑΛΛΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ

Το εργαστήριο διαθέτει ένα Ηλεκτροπαραγωγικό Ζεύγος, MAN D2866, με μια γεννήτρια ANK DKBN 49/265kVA που χρησιμοποιείται για δυο σκοπούς. Για τη διεξαγωγή πειραμάτων από τους φοιτητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και ως εφεδρική μονάδα παροχής ηλεκτρισμού σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος.

Στο ENM στεγάζεται επίσης και ένα μικρό μηχανουργείο με τόρνο, φρέζα, στράντζα, κ.α. που κατασκευάζονται ή τροποποιούνται ήδη υπάρχοντα εξαρτήματα που χρειάζονται για την διεξαγωγή πειραμάτων (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Το Η/Ζ MAN D2866 και το μηχανουργείο του ENM

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

Το σύνολο της υποδομής του Εργαστηρίου χρησιμοποιείται στην εκπαιδευτική πράξη της Σχολής Ναυπηγών. Υπάρχουν δυο αμιγή εργαστηριακά μαθήματα στο 8^ο και 9^ο εξάμηνο αντίστοιχως με 18 εργαστηριακές ασκήσεις, καθώς και συμβολή σε άλλα μαθήματα, Διπλωματικές εργασίες και Διδακτορικές διατριβές.

ΜΕΓΑΛΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Αναφέρονται παρακάτω τα πρόσφατα μεγαλύτερα έργα που έχουν ολοκληρωθεί επιτυχώς από το ENM στην περιοχή των Ναυτικών Μηχανών, μαζί με μερικούς από τους σημαντικότερους συνεργάτες στα έργα αυτά:

1. ACME (Adaptive Control of Marine Engines) - Προσαρμοστικός έλεγχος ναυτικών κινητήρων για βελτιστοποίηση συμπεριφοράς σε μεταβατικές καταστάσεις (MAN-B&W Diesel A/S, ABB Turbosystems, HAPAG-LLOYD, 1997 - 2000)
2. LIFETIME (Low In Fuel and Emissions Two-stroke Intelligent Marine Engine) - Σύστημα βελτιστοποίησης λειτουργίας ναυτικών κινητήρων με έλεγχο των εκπομπών ρύπων (MAN-B&W Diesel A/S, Germanischer Lloyd, DANAOS Shipping Co., ABB, 2000-2003)
3. SMOKERMEN (SMOKE Emission Reduction in Marine ENgines) - Μείωση εκπομπών καπνού από ναυτικούς κινητήρες σε μεταβατική φόρτιση (ABB Turbo Systems, WOODWARD, Germanischer Lloyd, 2002-2006).
4. HERCULES (High Efficiency engine R&D for Combustion with Ultra-Low Emissions for Ships) - Ανάπτυξη σειράς νέων τεχνολογιών για την δραστική μείωση εκπομπών ρύπων (40 συμμετέχοντες μεταξύ των οποίων: MAN, WARTSILA, ABB, MAHLE, HUT, ETH, MIBA, DLR, AALBORG, OMT, 2004-2007) - είναι το μεγαλύτερο παγκοσμίως έργο στους ναυτικούς κινητήρες.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Το ENM με την υψηλής στάθμης έρευνα, σε συνεργασία με τους πρωτοπόρους στη τεχνολογία κατασκευαστές κινητήρων και εξαρτημάτων ναυτικών μηχανών και την συμμετοχή του σε διεθνή ερευνητικά προγράμματα, εξασφαλίζει την συνεχή αναβάθμιση τόσο των υπηρεσιών του όσο και του εξοπλισμού του, ώστε να μπορεί να παραμένει στην αιχμή της έρευνας των ναυτικών κινητήρων, παρέχοντας συγχρόνως υψηλότατης στάθμης υποδομή για εργαστηριακά μαθήματα της Σχολής Ναυπηγών ΕΜΠ.

Στην παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών και τεχνικής υποστήριξης το ENM έχει σημαντική εμπειρία σε μετρήσεις:

- Ροπής / Ώσης
- Εκπομπών αερίων ρύπων
- Απόδοσης ναυτικών κινητήρων
- Κραδασμών και Θορύβου

Περισσότερες πληροφορίες για το Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας αναφέρονται στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου www.lme.naval.ntua.gr. Στοιχεία επικοινωνίας με τον Διευθυντή του ENM, Καθηγητή Νικόλαο Κυρτάτο (nkryrt@naval.ntua.gr).