ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΚΥΡΤΑΤΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π., Διευθυντής ΕΝΜ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας (ΕΝΜ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ιδρύθηκε το 1977. 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 τη βελτίωση της απόδοσης ναυτικών κινητήρων (συνεπώς τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου) και τη μείωση ρύπων.

Σχήμα 1. *Το κτίριο Λ - Εργαστηρίων της Σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και η είσοδος με την ιστορική ατμομηχανή*

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

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

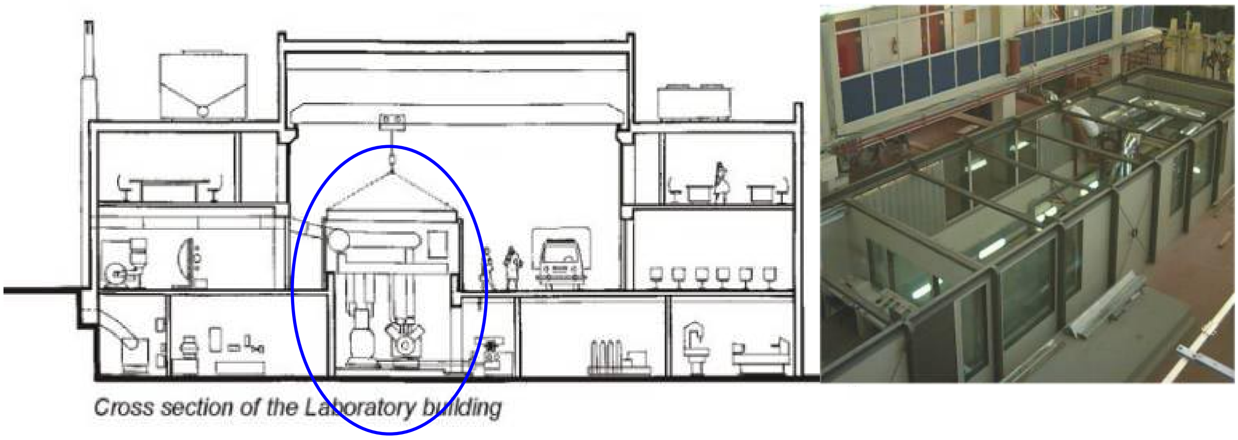
Το εργαστήριο συμμετέχει τόσο σε ερευνητικά προγράμματα που επιδοτούνται από Ελληνικούς οργανισμούς, όσο και σε προγράμματα που επιδοτούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλους διεθνείς οργανισμούς. Ταυτόχρονα, διατηρεί στενούς δεσμούς με την Ελληνική Ναυτιλία.

Με τη συνεχή συμμετοχή του σε διεθνή ερευνητικά προγράμματα, το ΕΝΜ έχει ενεργή συμβολή στην εξέλιξη της τεχνολογίας ναυτικών κινητήρων και παράλληλα στη διάδοση των νέων τεχνολογικών εξελίξεων στο χώρο της Ελληνικής Ναυτιλίας. Το ΕΝΜ 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).

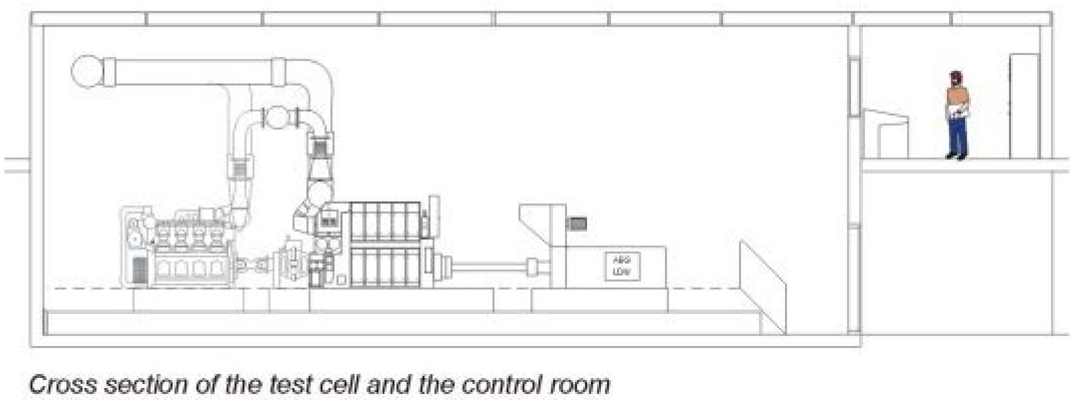
Η ΚΛΙΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Το ΕΝΜ 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 ΕΝΜ έχει στεγασμένη επιφάνεια μεγέθους 1400 τετραγωνικών μέτρων. Η κλίνη δοκιμών περικλείεται από ηχομονωτικό κάλυμμα και η εσωτερική στέγη αποτελείται από καπάκια που αφαιρούνται με τη 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 κτιρίου, για αποφυγή μεταφοράς κραδασμών στο υπόλοιπο κτίριο (Σχήμα 2).



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

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 κτιρίου 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 3. *Η κλίνη δοκιμών κινητήρων και το δωμάτιο έλεγχου*

Η κλίνη δοκιμών έχει σήμερα δύο κινητήρες. Ο πρώτος είναι ένας MAN L16/24, 5-κύλινδρος, 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.

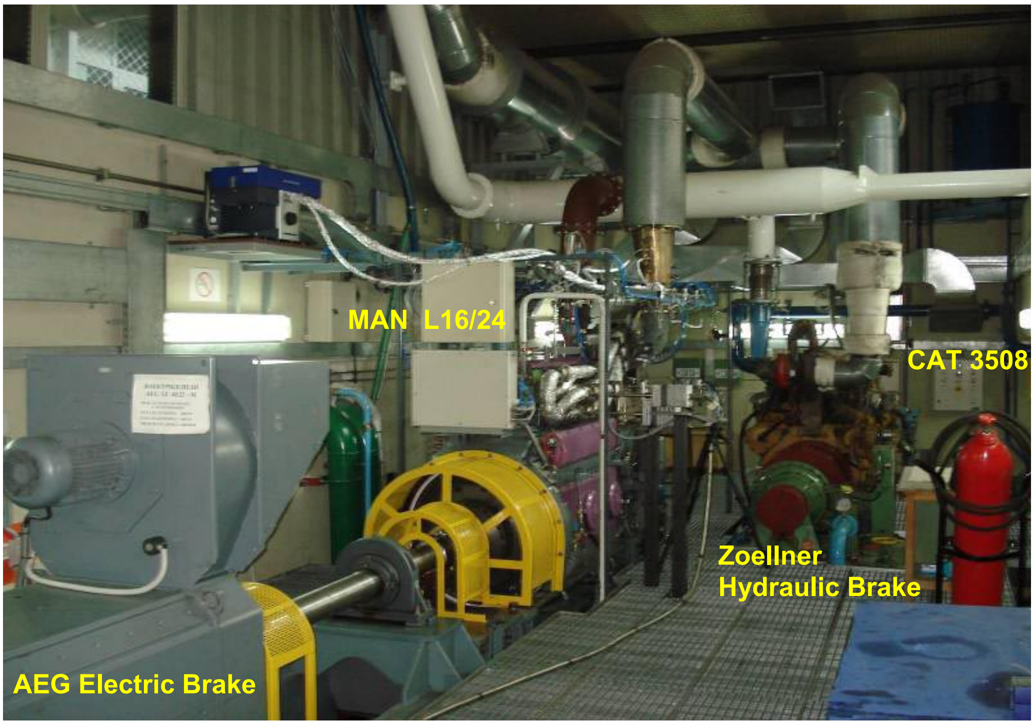
Με την πειραματική εγκατάσταση μπορούν να μελετηθούν σε πραγματικό χρόνο μεταβατικά φαινόμενα λειτουργίας του κινητήρα, κάτω από οποιοδήποτε προγραμματισμένο σενάριο φόρτισης, καθώς ο συνολικός έλεγχος γίνεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Σχήμα 4). Ο L16/24 έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτηθεί είτε με 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 4. *Το δωμάτιο ελέγχου (control room) της κλίνης δοκιμών*

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 π.χ. σύμπλεξη / αποσύμπλεξη.

Ο δεύτερος κινητήρας του εργαστηρίου είναι ένας 8-κύλινδρος (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 (π.χ. φόρτιση έλικας) ή σταθερού φορτίου [π.χ. αξιολόγηση συστημάτων υπερπλήρωσης](Σχήμα 5).



Σχήμα 5. *Οι δύο τετράχρονοι κινητήρες Diesel με τα αντίστοιχα δυναμόμετρά τους*

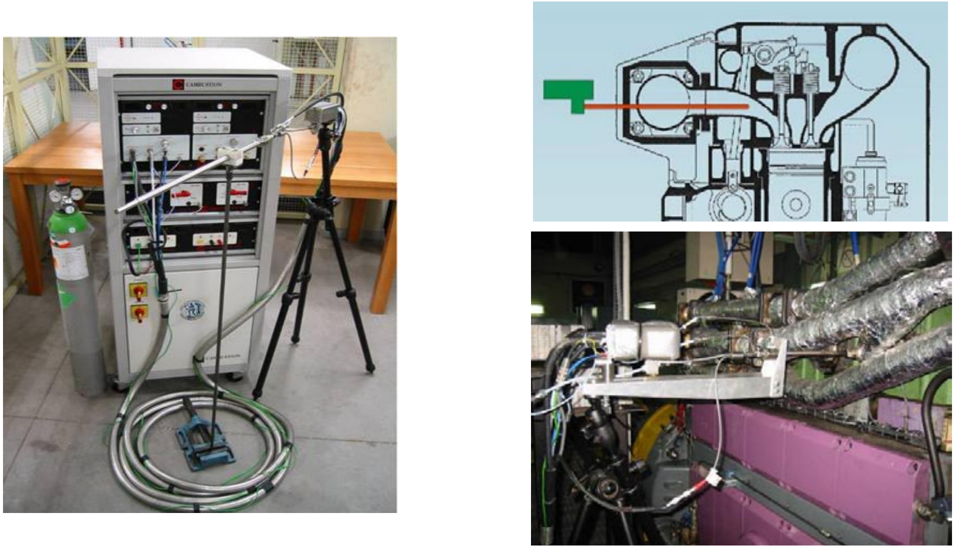
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πειραματικές δοκιμές σε ναυτικούς κινητήρες

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

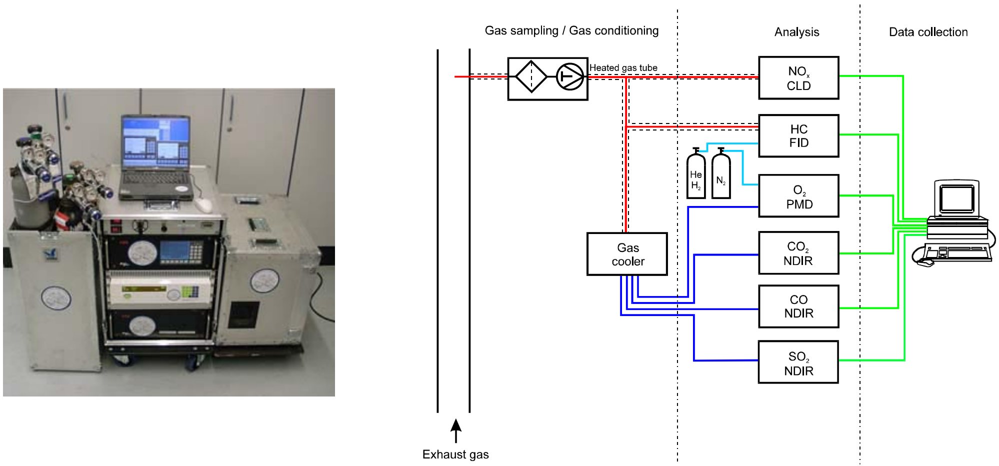
Μετρήσεις Ρύπων

Το ΕΝΜ έχει τη 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 τη 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 μετρήσεως που πληρούν απολύτως τις προδιαγραφές της σχετικής νομοθεσίας και διεθνών κανονισμών IMO/MARPOL (Σχήμα 7).



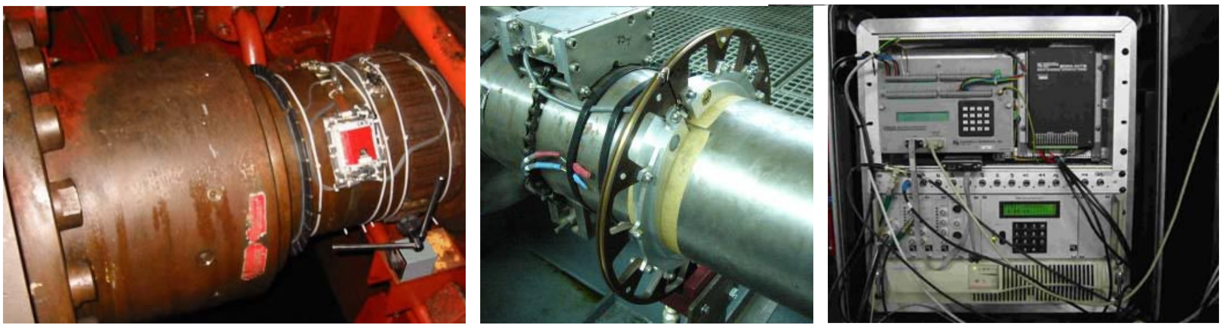
Σχήμα 7. *Μεταφερόμενη μονάδα μέτρησης ρύπων κινητήρων diesel*

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

Σχήμα 8. *Το χημικό εργαστήριο του ΕΝΜ*

Μετρήσεις Ροπής και Ώσης

Στο πλαίσιο μετρήσεων πεδίου που παρέχονται από το ΕΝΜ 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 επιμυκηνσιομέτρων (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. *Επιμηκυνσιόμετρα στο αξονικό σύστημα και το φορητό σύστημα μέτρησης της ροπής με τηλεμετρία*

Ένας σταθερός μεταδότης παρέχει επαγωγικά μέσω κεραίας την απαιτούμενη ισχύ για τη 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 επιμυκηνσιομέτρα, χρησιμοποιώντας επιπλέον μαγνητικές κεφαλές στροφών για την ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα της μηχανής.

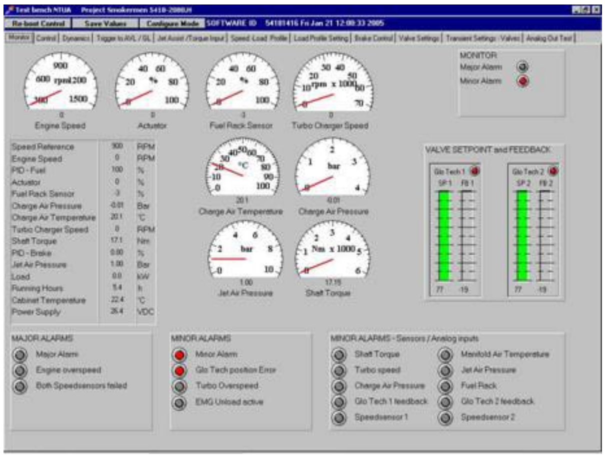
Το σύστημα μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα σε δύο άξονες.

Σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων απόδοσης κινητήρα στην κλίνη δοκιμών.

Ο συνδυασμός λογισμικού για τον έλεγχο των μηχανών, δυναμόμετρων και για τη συλλογή όλων των μετρήσεων έχει αναπτυχθεί από το προσωπικό του ΕΝΜ. Το λογισμικό συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (Data Acquisition System) περιλαμβάνει εκατόν εξήντα κανάλια καταγραφής στα 1kHz και δεκαέξι 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, κ.λ.π.), 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

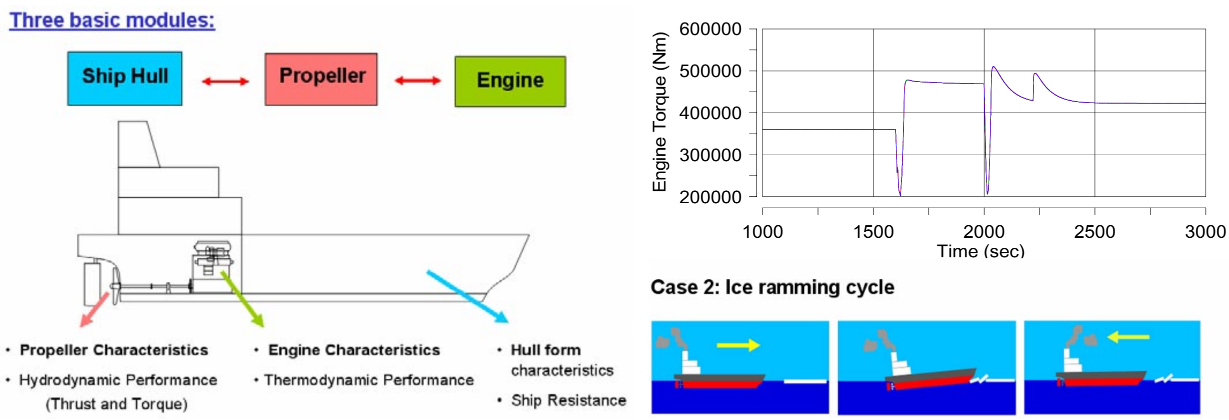
Το ΕΝΜ έχει αναπτύξει κατάλληλους κώδικες λογισμικού για θεωρητικές μελέτες, αναλύσεις και προσομοιώσεις σε όλο το φάσμα της Ναυτικής Μηχανολογίας:

- 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 τη δυναμική προσομοίωση εγκαταστάσεων πρόωσης πλοίου [Πλοίο –Έλικα – Μηχανή] (Σχήμα 11).



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 AvK DKBN 49/265kVA που χρησιμοποιείται για δύο 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 ΕΝΜ στεγάζεται, επίσης, και ένα μικρό μηχανουργείο με τόρνο, φρέζα, στράντζα, κ.ά. που κατασκευάζονται ή τροποποιούνται ήδη υπάρχοντα εξαρτήματα που χρειάζονται για τη διεξαγωγή πειραμάτων (Σχήμα 12).

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

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

Το σύνολο της υποδομής του Εργαστηρίου χρησιμοποιείται στην εκπαιδευτική πράξη της Σχολής Ναυπηγών. Υπάρχουν δύο αμιγή εργαστηριακά μαθήματα στο 8ο και 9ο εξάμηνο, αντιστοίχως, με δεκαοκτώ 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 ΕΝΜ 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 τη δραστική μείωση εκπομπών ρύπων (σαράντα 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 ΕΝΜ με την υψηλής στάθμης έρευνα, σε συνεργασία με τους πρωτοπόρους στην τεχνολογία κατασκευαστές κινητήρων και εξαρτημάτων ναυτικών μηχανών και τη συμμετοχή του σε διεθνή ερευνητικά προγράμματα, εξασφαλίζει τη 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 Ε.Μ.Π.

Στην παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών και τεχνικής υποστήριξης το ΕΝΜ 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 το Διευθυντή του ΕΝΜ, Καθηγητή Νικόλαο Κυρτάτο (nkyrt@naval.ntua.gr).