

Υπολογισμός «κρύας ροής» εντός κυλίνδρου μονοκύλινδρου πειραματικού κινητήρα MEK

Κάτσινος Αλέξανδρος^α, Τομπουλίδης Ανανίας^β

^α Υποψήφιος Διδάκτωρ, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη GR – 54124, Ελλάδα

^β Καθηγητής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη GR – 54124, Ελλάδα

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μηχανές έναυσης με σπινθήρα (Spark-Ignition, SI) εκτιμάται πως θα αποτελέσουν ένα σημαντικό μερίδιο στην αγορά των υβριδικών οχημάτων, που θα έχουν σημαίνοντα ρόλο τις επόμενες δεκαετίες, και αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις. Για τον λόγο αυτό σύμφωνα με το European Road Transport Research Advisory Council (ERTAC-Implementation Plan for H2020, 2013) υπάρχει συνεχής ανάγκη βελτίωσης και ανάπτυξης εξελιγμένων MEK που να λειτουργούν κάτω από συνθήκες αυξημένης πολυπλοκότητας. Σκοπός του παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση της δυνατότητας πρόβλεψης της απόδοσης και των εκπεμπόμενων ρύπων που προέρχονται από Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (MEK) έναυσης με σπινθήρα, με τη συνδυασμένη χρήση αριθμητικών και πειραματικών τεχνικών. Οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για την προσομοίωση φαινομένων που πραγματοποιούνται εντός του θαλάμου καύσης, και που εμπλέκουν τυρβώδη ροή και καύση, θα επαληθευτούν και θα επικυρωθούν. Η επικύρωση θα γίνει με την εφαρμογή προχωρημένων, καινοτόμων πειραματικών μεθόδων όπως επίσης και με τη χρήση υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας αριθμητικών μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν για να παράσχουν πρότυπες βάσεις δεδομένων (benchmark datasets). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μοντέλα LES είναι σε θέση να υπολογίσουν την από κύκλο σε κύκλο διακύμανση αλλά και τις μικρές δομές που αναπτύσσονται εντός του κυλίνδρου.

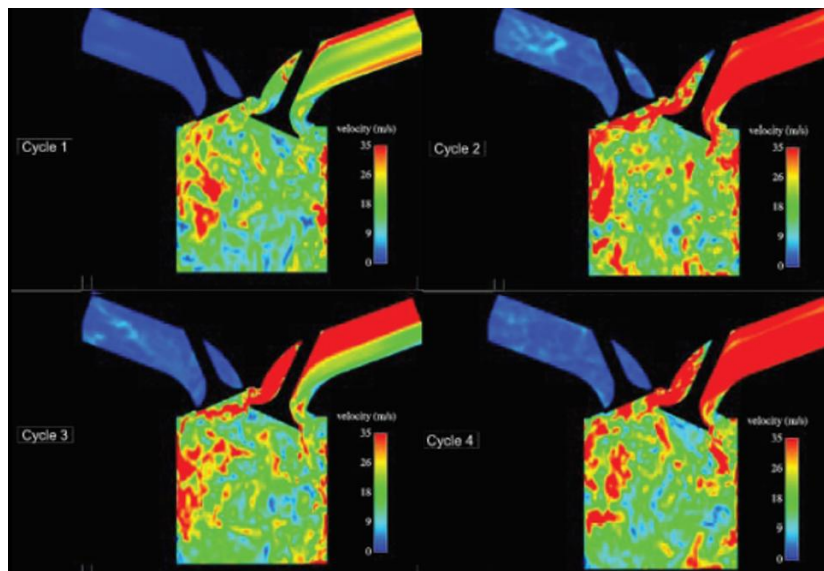
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Το Πρόβλημα

Τα μέτρα περιορισμού της κατανάλωσης καυσίμου και αερίων ρύπων στο περιβάλλον που έχει υιοθετήσει η αυτοκινητοβιομηχανία, στους κινητήρες έναυσης με σπινθήρα, είναι η ταυτόχρονη χρήση της απευθείας έγχυσης καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης της MEK, η μείωση του κυβισμού του κινητήρα (downsizing), η χρήση ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR) και η χρήση φτωχής καύσης. Οι τεχνολογικές αυτές εφαρμογές απαιτούν σημαντική μεγάλη κλίμακας κίνηση του ρευστού κατά τη φάση πλήρωσης και κυρίως ευσταθή αλλά και επαναλήψιμη διάσπαση της ανατροπής (tumble) στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Ωστόσο, οι προσπάθειες που καταβάλλονται σε αυτή τη κατεύθυνση δεν είναι αρκετές καθώς παρατηρείται από-κύκλο-σε-κύκλο διακύμανση (cycle-to-cycle variability, CCV) με συνεπακόλουθη δυσχερή επίδραση στα παραπάνω μέτρα, στη διαδικασία της καύσης και στον θερμικό βαθμό απόδοσης του κινητήρα [1].

2.2. Θεωρητικό Πλαίσιο

Κατά τη διάρκεια της εισαγωγής αέρα στον κύλινδρο του κινητήρα δημιουργούνται, λόγω των διαμορφώσεων του αυλού εισαγωγής, της βαλβίδας εισαγωγής, του θαλάμου καύσης και του εμβόλου, δευτερογενείς ροές αέρα μεγάλης κλίμακας. Αυτές είναι η ανατροπή, ο στροβιλισμός (swirl) και η αναρρόφηση (squish). Η εν λόγω έντονη κίνηση δεν είναι απαραίτητη μόνο για την ανάμιξη και την ομογενοποίηση του μίγματος αέρα-καυσίμου αλλά και γιατί εξασφαλίζει μια επαρκώς γρήγορη καύση σε έναν μειωμένου όγκου εμβολισμού και επομένως υψηλού φορτίου κινητήρα [7]. Η μεταφερόμενη κατά την εισαγωγή κινητική ενέργεια αποθηκεύεται στην ανατροπή και αναμένεται να απελευθερωθεί με έναν επαναλήψιμο και καθορισμένο τρόπο (μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης και έλεγχου της ροής στη βαλβίδα εισαγωγής, μεταβλητού χρονισμού και διάρκειας ανοίγματος βαλβίδων) ακριβώς πριν την έναυση εξαιτίας της διάσπασης αυτής (tumble breakdown) κοντά στο άνω νεκρό σημείο. Λόγω της διάσπασης αυτής θα δημιουργηθούν μικρής κλίμακας, έντονες τυρβώδεις δομές που θα ενισχύσουν τη διάδοση της φλόγας και θα επιταχύνουν τη διαδικασία της καύσης, αυξάνοντας έτσι τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κινητήρα που αποτελεί τον απώτερο στόχο της αυτοκινητοβιομηχανίας.



Εικόνα 1. Η από-κύκλο-σε-κύκλο διακύμανση του πεδίου ταχύτητας εντός του κυλίνδρου[8].

Η από-κύκλο-σε-κύκλο διακύμανση δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί/μελετηθεί με Unsteady-Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (URANS) μοντέλα, αφού αυτά επιλύουν τις μέσες τιμές των μεγεθών. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση μοντέλων Μεγάλης-Δίνης (Large-Eddy Simulation,LES) αλλά και Direct-Numerical-Simulation(DNS) [9].

Ειδικότερα, η μεθοδολογία LES ενδείκνυται για εφαρμογή σε MEK καθώς:

- Η ροή είναι μη μόνιμη λόγω των κινούμενων μερών
- Εμφανίζονται δομές μεγάλης κλίμακας
- Ο αριθμός Reynolds είναι μεσαίας τάξης (10.000-30.000)
- Όπως και ο όγκος ελέγχου

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις LES προσομοιώσεις με αυτές των RANS και τα πειραματικά αποτελέσματα απαιτείται η προσομοίωση πολλών συνεχόμενων κύκλων (25-50) και η μεσοποίηση συνόλου των αποτελεσμάτων (ensemble averaging) [10].

Τα LES μοντέλα λύνουν αναλυτικά τις δομές που είναι μεγαλύτερες από ένα συγκεκριμένο μέγεθος (filtering size) και μοντελοποιούν τις μικρότερες (subgrid-scale), διασπώντας την ταχύτητα στις δύο αντίστοιχες συνιστώσες, $u_i = \tilde{u}_i + u_i''$.

Με την εισαγωγή της διάσπασης της ταχύτητας στην εξίσωση Navier-Stokes εμφανίζεται ο όρος τ_{ij}^r που αντιπροσωπεύει τις subgrid-τάσεις. Όπως και στις RANS μεθοδολογίες η σύνδεση του όρου αυτού με το πεδίο ροής στηρίζεται στην υπόθεση Boussinesq, $\tau_{ij}^r = -2\nu_T \bar{S}_{ij}$. Η επιλογή και ανάπτυξη μοντέλων τύρβης έγκειται στην μοντελοποίηση του τυρβώδους-ιξώδους, ν_T .

Για την εμφάνιση μικροδομών μέσα στον κύλινδρο, μπορεί να επιλεγθεί ένα απλό μοντέλο τύρβης με χρήση μεγάλης πυκνότητας πλέγματος ή το αντίστροφο. Όσο πυκνότερο το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα των δομών που επιλύονται αντί να μοντελοποιούνται, όπως και οι μη-γραμμικοί όροι που ευθύνονται για τις δομές αυτές, και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια κατά τόπους φαινόμενα.

Επομένως, μοντέλα μικρού τυρβώδους-ιξώδους είναι επιθυμητά.

Καθώς οι τιμές του ν_T στα LES μοντέλα είναι μικρότερες των URANS, μπορούμε να μελετήσουμε πλέον καινούρια φαινόμενα, όπως η από-κύκλο-σε-κύκλο διακύμανση και οι σχεδιαστικές επιπτώσεις στην επίδοση της MEK[11].

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιούνται σήμερα και τα χαρακτηριστικά τους.

Μοντέλο Τύρβης		Τυρβώδες Ιξώδες	Εξισώσεις Μεταφοράς	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
M1	Κανένα	Αριθμητικό Ιξώδες	0	Δεν απαιτείται μοντέλο	Εξαρτάται από τη διακριτοποίηση των εξισώσεων και του πλέγματος, δύσκολο να ελεγχθεί
M2	Constant Smagorinsky	Ναι	0	Εύκολο στην εφαρμογή	Απαιτείται βαθμονόμηση της σταθεράς C_s
M3	Dynamic Smagorinsky	Ναι	0	Ο όρος C_s είναι μεταβλητός	Μεγαλύτερη αριθμητική αστάθεια
M4	DSM	Όχι	1	Μεγαλύτερη φυσική σημασία	Δύσκολο να εφαρμοστεί σε time-implicit schemes

M1. Η απλούστερη περίπτωση, όπου δεν υπάρχει μοντέλο τύρβης. Η σκέδαση της κινητικής ενέργειας συμβαίνει λόγω των όρων ιξώδους μορφής που προκύπτουν από την διακριτοποίηση των εξισώσεων. Δεν συνιστάται για ροή σε MEK.

M2. Αλγεβρικό μοντέλο - δεν χρησιμοποιεί εξισώσεις μεταφοράς κινητικής ενέργειας. Βασίζεται στην υπόθεση της τοπικής ισορροπίας της SGS συνιστώσας της κινητικής ενέργειας (όση παράγεται τόση σκεδάζεται), με $\nu_T = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$ [12]. Οδηγεί σε μεγάλες τιμές τυρβώδους-ιξώδους και έτσι πρέπει να βαθμονομηθεί η σταθερά C_s και να χρησιμοποιηθεί πυκνό πλέγμα[13].

M3. Σημαντική αναβάθμιση του προηγούμενου μοντέλου, με τον συντελεστή C_s να είναι συνάρτηση της ροής και όχι σταθερά[14]. Αναπαριστά καλύτερα τη ροή ειδικά κοντά στα τοιχώματα[15].

M4. Μη-ιξώδες μιας-εξίσωσης μοντέλο. Οι SGS-τάσεις υπολογίζονται απευθείας με τη χρήση μιας εξίσωσης μεταφοράς της SGS κινητικής ενέργειας. Η εξίσωση αυτή αποτελεί ένα ισοζύγιο μεταξύ της επιλυμένης και της μοντελοποιημένης συνιστώσας της ταχύτητας, με $\nu_T = C_2 \Delta \sqrt{k}$ [16, 17]. Η ακρίβεια του μοντέλου αυτού φαίνεται πως είναι μικρότερη από αυτή του Dynamic Smagorinsky[18].

Η ποιότητα των προσομοιώσεων LES προκύπτει από τον λόγο της επιλυμένης κινητικής ενέργειας ως προς την συνολική και το λόγο του τυρβώδους ιξώδους ως προς το συνολικό. Ο πρώτος λόγος πρέπει

να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μονάδα, και σύμφωνα με τον Pope απαραίτητα μεγαλύτερος του 0.8, ενώ ο δεύτερος πιο κοντά στο μηδέν, και οπωσδήποτε μικρότερος του 0.2. Όσο οι λόγοι αυτοί φτάνουν στα βέλτιστα επιθυμητά όρια τους τότε η προσομοίωση LES συμπεριφέρεται σαν DNS ενώ όσο φτάνουν στο χειρίστο άκρο συμπεριφέρονται σαν URANS[19].

2.3. Μεθοδολογία

Πρώτο βήμα της διερεύνησης θα αποτελέσει η προσομοίωση της «κρύας ροής» του κινητήρα, δηλαδή χωρίς τη πραγματοποίηση καύσης.

Θα μελετηθούν τα αίτια της δημιουργίας των μεγάλης κλίμακας δομών εντός του κυλίνδρου, με τη μεταβολή της ορμής περιφερειακά των βαλβίδων εισαγωγής κατά την κίνηση τους να αναλύεται. Έμφαση θα δοθεί στην εξέλιξη της ανατροπής, από την φάση δημιουργίας της έως και την φυσική της διάσπαση. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η μεταβολή της έντασης και της θέσης της κατά της διάρκεια ενός πλήρους θερμοδυναμικού κύκλου. Θα ποσοτικοποιηθεί η σχετική συμβολή στο πεδίο ταχύτητας του μέσου πεδίου αυτής αλλά και των μεταβολών αυτού (RMS velocity), διάκριση που προκύπτει από την διάσπαση του πεδίου ροής κατά Reynolds.

Η επίδραση των μοντέλων τύρβης στη σχετική συνεισφορά του μέσου πεδίου αλλά και των διακυμάνσεων αυτού στο συνολικό πεδίο θα υπολογιστεί και θα δημοσιευθεί καθώς κατά τη σχετική βιβλιογραφική έρευνα του υποφαινόμενου δεν έχει παρουσιαστεί ακόμα μια τέτοια ανάλυση.

Για την επικύρωση και την επαλήθευση των υπολογιστικών μεθόδων θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- α) Χρήση προχωρημένων πειραματικών διαγνωστικών τεχνικών λέιζερ(PIV) εφαρμοσμένων σε κινητήρα οπτικής πρόσβασης (εγκατεστημένος στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας) για τη λήψη μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.
- β) Προσομοιώσεις ροής και καύσης χρησιμοποιώντας LES μοντέλα σε κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (StarCD) εφαρμοσμένα στον ίδιο εργαστηριακό κινητήρα.

Τα αποτελέσματα από τις παραπάνω προσεγγίσεις θα συγκριθούν και θα εξαχθεί η ακρίβεια των υπολογιστικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ανάλυση αυτή θα αποτελέσει βάση για την έρευνα πάνω σε καινοτόμες σχεδιαστικές παρεμβάσεις στον κινητήρα.

Η ποιότητα των αποτελεσμάτων θα κριθεί σε δύο επίπεδα. Αρχικά θα εκτιμηθεί η ποιότητα του LES βάσει των εκτιμητών ποιότητας που παρουσιάστηκαν, με το υπολογιστικό πλέγμα να επαναδημιουργείται συνεχώς μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας.

Στη συνέχεια τα υπολογιστικά αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα πειραματικά χρησιμοποιώντας ανάλυση POD (Proper-Orthogonal-Decomposition) και τη παράμετρο ευθυγράμμισης (alignment-parameter) για να ελεγχθεί η σύμπτωση τους κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Η από-κύκλο-σε-κύκλο μεταβολή θα ποσοτικοποιηθεί βάσει της μεταβολής της μέγιστης πίεσης, του πεδίου ροής και της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης (στην περίπτωση καύσης).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

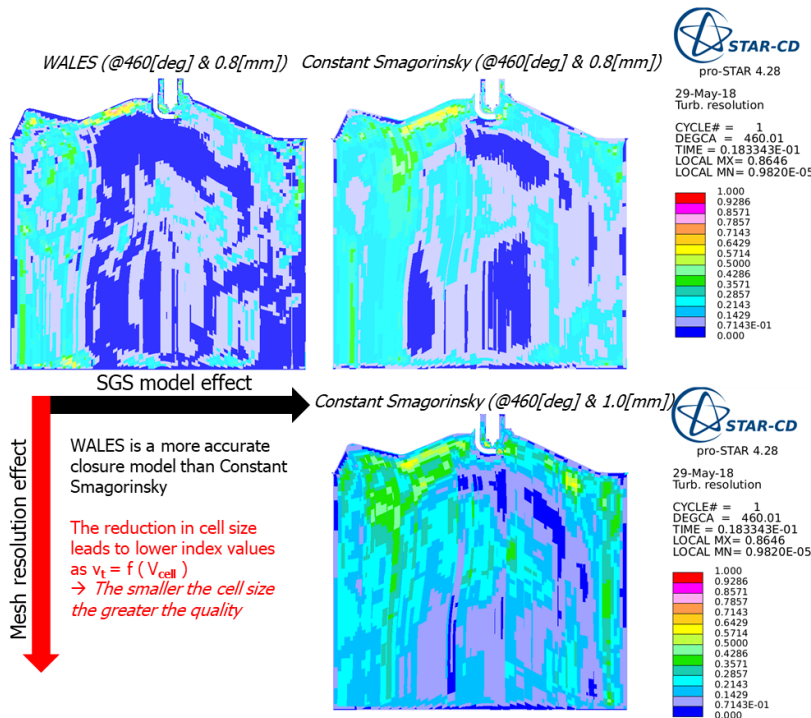
3.1 Ποιότητα πλέγματος

Η ποιότητα του πλέγματος είναι η επιθυμητή για LES προσομοιώσεις, Εικόνα 2.

Κάποια τοπική πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή των βαλβίδων θα βελτίωνε την ποιότητα των αποτελεσμάτων στην περιοχή αυτή, χωρίς βέβαια σημαντική διακύμανση των συνολικών αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο WALES δίνει για το ίδιο πλέγμα καλύτερο συντελεστή ποιότητας, επιλύονται δηλαδή περισσότερες δομές.

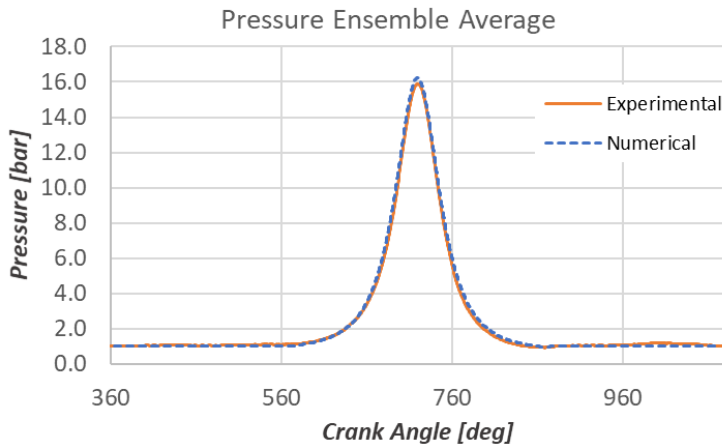
Επίσης όσο μεγαλώνει το μέγεθος του πλέγματος αυτό τόσο γίνεται λιγότερο κατάλληλο για προσομοιώσεις LES.



Εικόνα 2. Αποτελέσματα συντελεστή ποιότητας LES

3.2. Πίεση

Για την επίτευξη της ίδιας μέγιστης πίεσης εντός του κυλίνδρου, αφού για τον ίδιο λόγο συμπίεσης το πείραμα έδειχνε αισθητά χαμηλότερη μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου λόγω των απωλειών αέριας μάζας (blow-by), έγινε μεταβολή του λόγου συμπίεσης στο μοντέλο.



Εικόνα 3. Ίχνος πίεσης εντός του θαλάμου καύσης

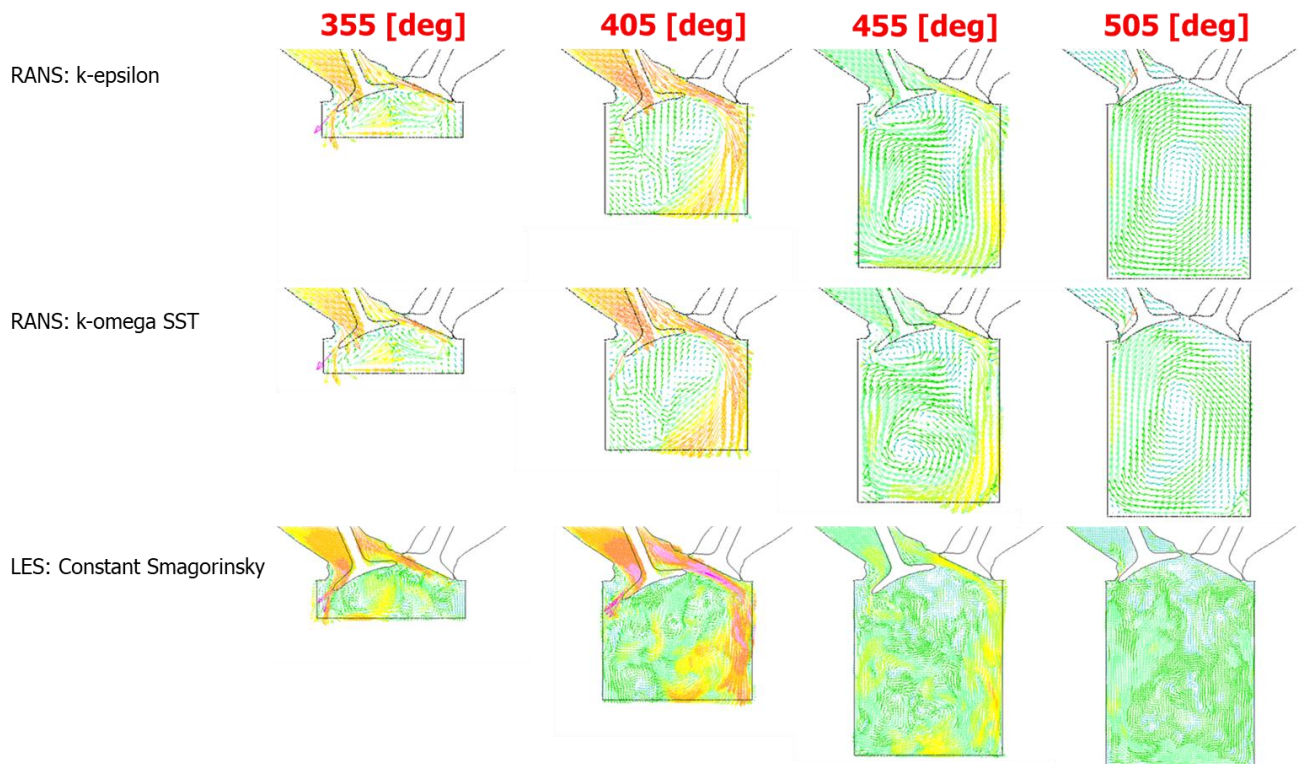
Έτσι πλέον το ίχνος της πίεσης συμπίπτει ακριβώς με το πειραματικά μετρημένο.

3.3. RANS vs LES

Τα μοντέλα k-ε και k-ω SST της οικογένειας των RANS δίνουν όμοια αποτελέσματα, εκτός κάποιων περιοχών όπου το τελευταίο δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

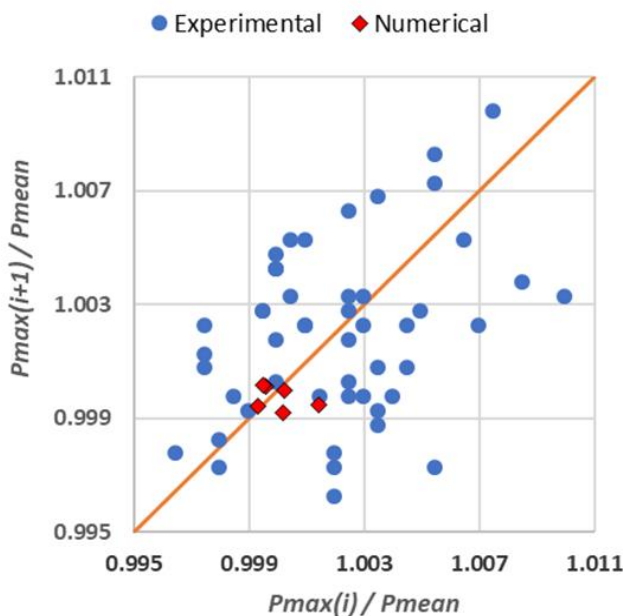
Παρόλα αυτά κανένα από τα δύο δεν μπορεί να προβλέψει τις μικρές δομές.

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4** το μοντέλο LES Constant Smagorinsky είναι σε θέση να προβλέψει τις μικρές αυτές δομές, καθώς και την από κύκλο σε κύκλο διακύμανση **Εικόνα 5**.



Εικόνα 4. RANS vs LES

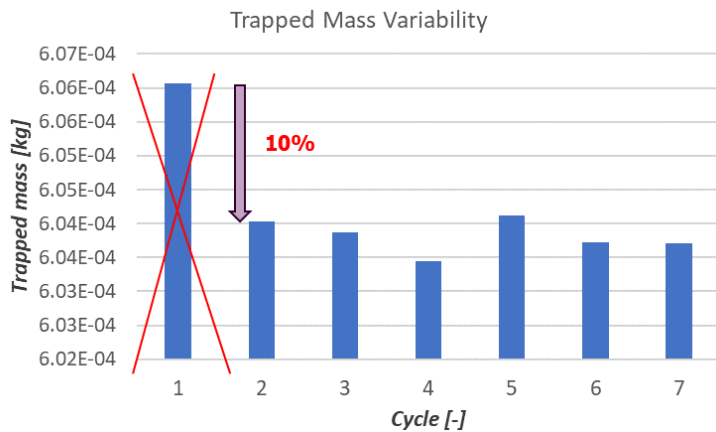
3.4. Η από κύκλο σε κύκλο διακύμανση



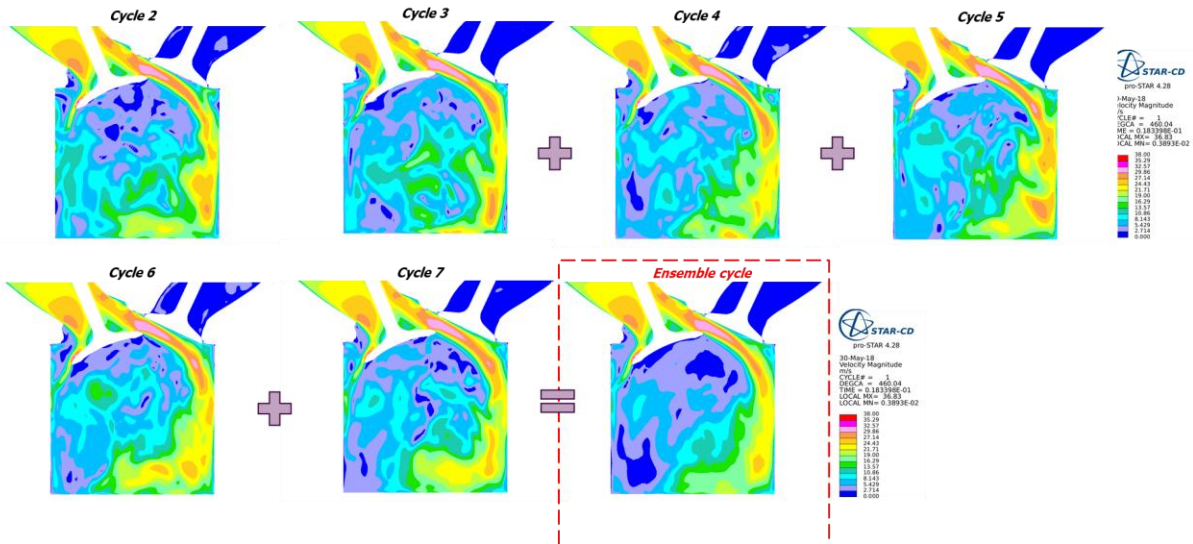
Εικόνα 5. Η από κύκλο σε κύκλο διακύμανση της μέγιστης πίεσης

Η από κύκλο σε κύκλο διακύμανση που προβλέπεται είναι της ίδιας τάξης με τη μετρούμενη. Δεν παρατηρήθηκε κάποια αλληλουχία και δυνατότητα συσχέτισης της πίεσης από τον έναν κύκλο στον άλλον αλλά η μεταβολή είναι τυχαία.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός κύκλος της προσομοίωσης αποκλείστηκε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων γιατί επηρεάζονταν ισχυρά από την αρχικοποίηση, Εικόνα 6.



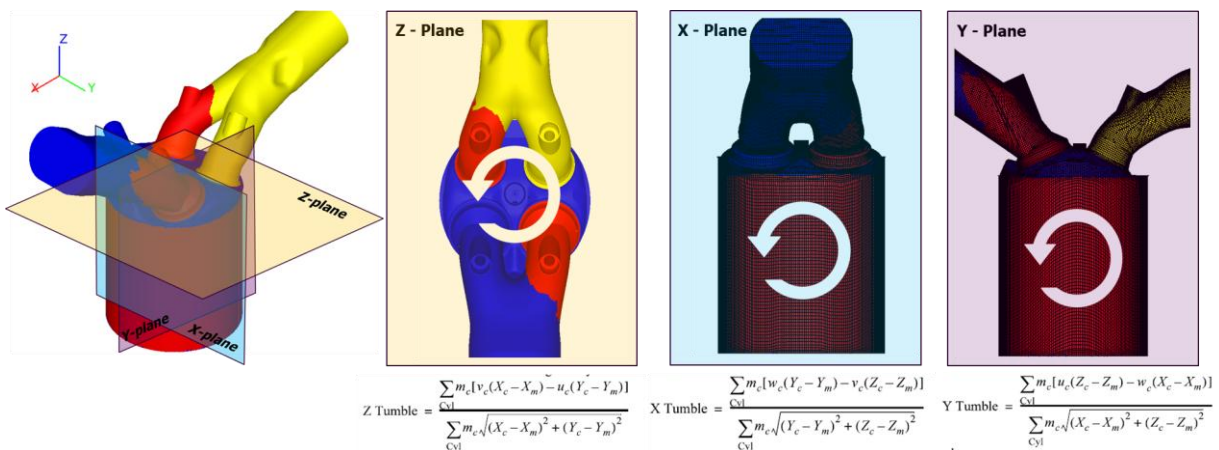
Εικόνα 6. Η επίδραση των αρχικών συνθηκών



Εικόνα 7. Στιγμαία και μέσο πεδίο

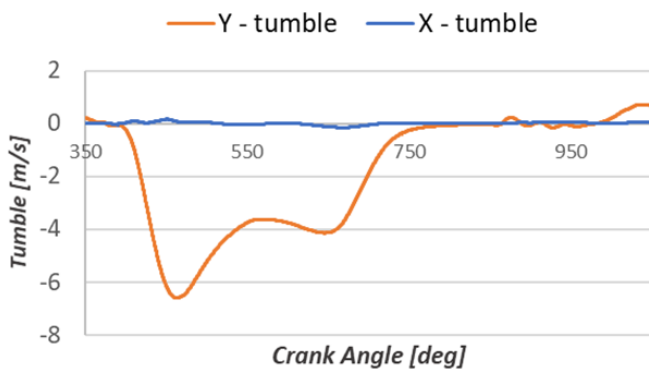
3.5. Ανατροπή

Ανάλογα το επίπεδο που εξετάζουμε έχουμε και την αντίστοιχη συνιστώσα της ανατροπής, της ροπής της ορμής δηλαδή γύρω από κάποιον άξονα.



Εικόνα 7. Υπολογισμός ανατροπής

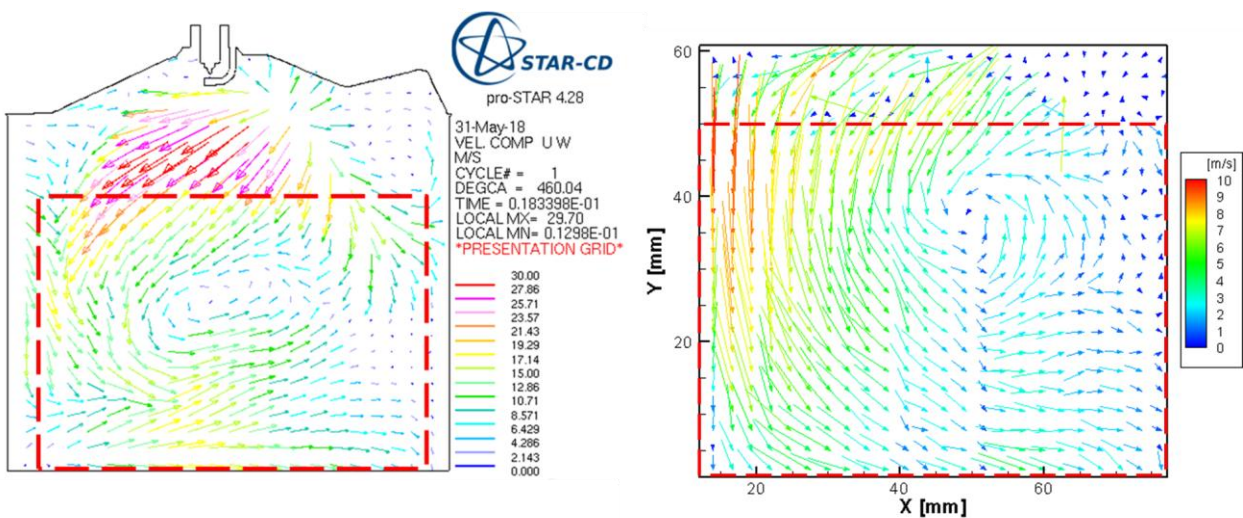
Αυτό που φαίνεται ξεκάθαρα από τους υπολογισμούς είναι πως η ανατροπή κατά τη φάση εισαγωγής μέχρι και το τέλος της φάσης της συμπίεσης είναι δισδιάστατη και γίνεται τρισδιάστατη στο τέλος αυτός κατά τη διάσπαση της, Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Ανατροπή γύρω από άξονες

3.6. LES vs PIV

Η δομή της ανατροπής προβλέπεται και από τους υπολογισμούς αλλά και από τα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 9. LES vs PIV

4. ΣΥΝΟΨΗ

Το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε είναι κατάλληλο για την πραγματοποίηση LES προσομοιώσεων.

Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα η χρήση των μοντέλων LES υπερτερεί των RANS στη πρόβλεψη της από κύκλο σε κύκλο διακύμανσης αλλά και υπολογισμού των μικρών δομών.

Η μεγάλη δίνη μπορεί να προβλεφθεί και είναι συγκρίσιμη με τα πειραματικά αποτελέσματα. Κατά τη φάση της εισαγωγής και μέχρι το τέλος της συμπίεσης αυτή είναι δισδιάστατη και ύστερα κατά τη διάσπαση της ανατροπής γίνεται τρισδιάστατη,

Με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε το ίχνος πίεσης ταυτίζεται απόλυτη με το πειραματικά μετρημένο.

Για το ίδιο πλέγμα το μοντέλο WALES δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το Constant Smagorinsky.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Moureau, I. Barton, C. Angelberger, and T. Poinso, "Towards Large Eddy Simulation in Internal Combustion Engines: Simulation of a Compressed Tumble Flow," *SAE Int.*, pp. 1–10, 2004.
- [2] Schmitt, M., Frouzakis, C. E., Wright, Y. M., Tomboulides, A. G., & Boulouchos, K. (2014). Investigation of cycle-to-cycle variations in an engine-like geometry. *Physics of Fluids*, 26(12). <https://doi.org/10.1063/1.4903930>
- [3] Schmitt, M., Frouzakis, C. E., Tomboulides, A. G., Wright, Y. M., & Boulouchos, K. (2014). Direct numerical simulation of multiple cycles in a valve/piston assembly. *Physics of Fluids*, 26(3). <https://doi.org/10.1063/1.4868279>
- [4] Schmitt, M., Frouzakis, C. E., Wright, Y. M., Tomboulides, A. G., & Boulouchos, K. (2015). Direct numerical simulation of the compression stroke under engine-relevant conditions: Evolution of the velocity and thermal boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 948–960. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.031>
- [5] Schmitt, M., Frouzakis, C. E., Wright, Y. M., Tomboulides, A., & Boulouchos, K. (2016). Direct numerical simulation of the compression stroke under engine relevant conditions: Local wall heat flux distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 718–731. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.074>
- [6] Montorfano, A., Piscaglia, F., Schmitt, M., Wright, Y. M., Frouzakis, C. E., Tomboulides, A. G., Onorati, A. (2015). Comparison of Direct and Large Eddy Simulations of the Turbulent Flow in a Valve/Piston Assembly. *Flow, Turbulence and Combustion*, 95(2–3), 461–480. <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9620-6>
- [7] Heywood, J.B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw and Hill Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, New-York (1988)
- [8] Vermorel, O., Richard, S., Colin, O., Angelberger, C., Benkenida, A., and Veynante, D. Multi-cycle LES simulations of flow and combustion in a PFI SI 4-valve production engine. *SAE paper 2007-01-0151*, 2007.
- [9] B. Enaux *et al.*, "Large eddy simulation of a motored single-cylinder piston engine: Numerical strategies and validation," *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 86, no. 2, pp. 153–177, 2011.
- [10] I. Celik, M. Klein, M. Freitag, and J. Janicka, "Assessment measures for URANS/DES/LES: An overview with applications," *J. Turbul.*, vol. 7, no. January, pp. 1–27, 2006.
- [11] C. J. Rutland, "Large-eddy simulations for internal combustion engines - A review," *Int. J. Engine Res.*, vol. 12, no. 5, pp. 421–451, 2011.
- [12] Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Weather Rev.*, 1963, 91(3), 99–164.
- [13] I. Ko, A. D'Adamo, S. Fontanesi, and K. Min, "Study of LES Quality Criteria in a Motored Internal Combustion Engine," *SAE Tech. Pap.*, no. Ccv, 2017.
- [14] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Phys. Fluids A: Fluid Dyn.*, 1991, 3(7), 1760–1765.
- [15] M. S. Toledo, L. Le Penven, M. Buffat, A. Cadiou, and J. Padilla, "Large eddy simulation of the generation and breakdown of a tumbling flow," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 28, no. 1 SPEC. ISS., pp. 113–126, 2007.
- [16] Pomraning, E. and Rutland, C. J. Dynamic one equation non-viscosity large-eddy simulation model. *AIAA J.*, 2002, 40(4), 689–701.
- [17] Chumakov, S. G. and Rutland, C. J. Dynamic structure subgrid-scale models for large eddy simulation. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 2005, 47(8–9), 911–923.
- [18] I. Ko, K. Min, F. Rulli, A. D'Adamo, F. Berni, and S. Fontanesi, "Investigation of Sub-Grid Model Effect on the Accuracy of In-Cylinder les of the TCC Engine under Motored Conditions," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2017–Septe, no. Ccv, 2017.
- [19] Pope, S. B. Ten questions concerning the large eddy simulation of turbulent flows. *New J. Phys.*, 1999, 6(35), 1–24.