

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ DBD ΠΛΑΣΜΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΟ BWB

Κολτσακίδης Σ¹., Καπαρός Π.², Παναγιώτου Π.³, Υάκινθος Κ.⁴

¹Διπλωματούχος Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ

²Διπλωματούχος Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ, Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΡΣ

³Διδάκτωρ Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ

⁴Καθηγητής Τμήματος Μηχ. Μηχανικών, ΑΠΘ, Διευθυντής ΕΜΡΣ

Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη
skoltsak@meng.auth.gr, pkaparos@auth.gr, peripan@auth.gr, kyak@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας ερευνάς είναι η πειραματική διερεύνηση του ενεργού ελέγχου ροής με τη χρήση ενεργοποιητών πλάσματος τύπου dielectric barrier discharge (DBD), σε μοντέλο blended wing body (BWB). Στην εργασία αυτή εξετάζονται δυο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο ο ενεργοποιητής τοποθετείται κατά μήκος της ακμής προσβολής της πτέρυγας με στόχο την καθυστέρηση της αποκόλλησης και την αποφυγή της απώλειας στήριξης (stall), ενώ στο δεύτερο σενάριο ο ενεργοποιητής τοποθετείται στο κεντρικό τμήμα του BWB για να ελεγχθεί η συμπεριφορά των δινών, το σημείο που διαλύονται καθώς και η παραγωγή lift. Για την ποιοτική αξιολόγηση της επιρροής του DBD ενεργοποιητή χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι επιφανειακής οπτικοποίησης με λάδι, καθώς και οπτικοποιήσεις με τη χρήση καπνού και κουρτίνας λέιζερ. Επιπλέον διεξήχθησαν μετρήσεις πεδίων ταχυτήτων με τη χρήση συστήματος Laser Doppler Anemometry (LDA). Τέλος μετρήθηκαν οι αεροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο με και χωρίς τον ενεργοποιητή. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε κλειστή υποηχητική αεροσήραγγα. Οι συνθήκες του πειράματος αντιστοιχούν σε αριθμό Reynolds της τάξης 2×10^5 βασισμένο στη χορδή της ρίζας του BWB.

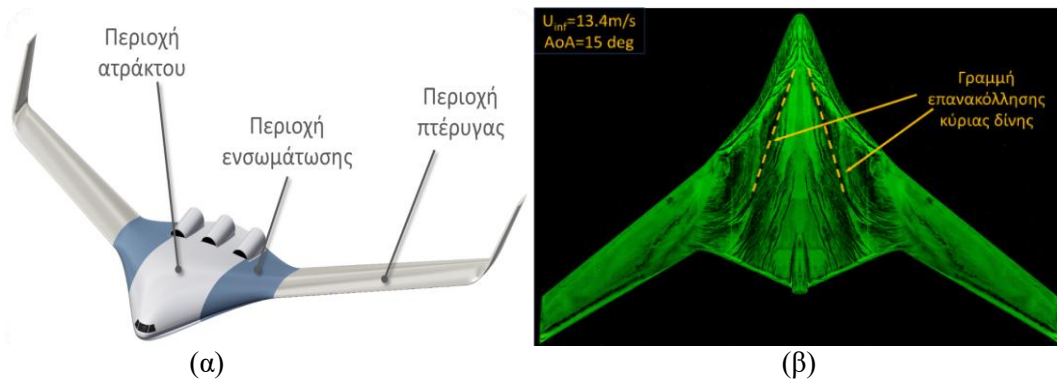
Λέξεις Κλειδιά: UAV, BWB, DBD, έλεγχος ροής, ενεργοποιητής πλάσματος, απώλεια στήριξης

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Blended wing body

Η γενική ιδέα της πλατφόρμας blended wing body (BWB) είναι ο σχεδιασμός αεροσκαφών χωρίς ουραίο τμήμα, με την πτέρυγα να ενσωματώνεται απευθείας στην άτρακτο (Lehmkuehler, 2012), με αρχικό σκοπό τη χρήση σε αεροσκάφη υποηχητικών ταχυτήτων. Στη γενική περίπτωση, αποτελείται από ένα μεσαίο τμήμα, αυτό της ατράκτου, ένα εξωτερικό τμήμα το οποίο είναι η πτέρυγα, ενώ η σύνδεση γίνεται μέσω μιας περιοχής ενσωμάτωσης (Εικόνα 1α). Διαθέτει μια σειρά πλεονεκτημάτων, όπως μικρή εκτεθειμένη επιφάνεια ως προς τον εσωτερικό διαθέσιμο όγκο, δυνατότητα ελλειπτικής κατανομής άντωσης, αυξημένη αεροδυναμική επίδοση, μειωμένες εκπομπές ρύπων λόγω χαμηλής αεροδυναμικής αντίστασης και επαρκή χώρο για την εγκατάσταση του κινητήρα στο άνω μέρος. Ως εκ τούτου, η γεωμετρία BWB είναι μία πολλά υποσχόμενη σχεδιαστική προσέγγιση για τα πολιτικά αεροσκάφη του μέλλοντος, ενώ είναι μια ιδανική λύση για άλλες εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας, όπως τα μεταγωγικά αεροσκάφη, τα αεροσκάφη μεταφοράς φορτίου και τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (Lehmkuehler et al, 2012) (Panagioutou et al, 2016). Λόγω των δυνατοτήτων του,

υπάρχουν αρκετές μελέτες που σχετίζονται με το BWB και διερευνούν τη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, την αεροδυναμική, την ευστάθεια και τον έλεγχο (Liebeck, 2014) ή τα ζητήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της πλατφόρμας (εκκένωση των επιβατών, πίεση του θαλάμου κ.λπ.) (Wittmann, 2004) (Yovanof et al, 2009).



Εικόνα 1 (α) Βασική διαμόρφωση γεωμετρίας BWB (β) Ανάπτυξη ροής στην επιφάνεια BWB μοντέλου

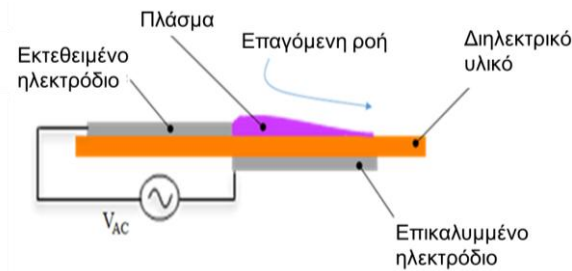
Ωστόσο, λίγες από αυτές τις μελέτες ασχολούνται με τα φαινόμενα ροής γύρω από τη διαμόρφωση του BWB. Όπως αναφέρουν πρόσφατες πειραματικές μελέτες (Panagiotou et al, 2016), η παραγωγή άντωσης είναι ένας συνδυασμός του συμβατικού μηχανισμού, δηλαδή της κυκλοφορίας που παράγεται από τις αεροτομές και των δινών ακμής προσβολής στη περιοχή της ατράκτου, οι οποίες είναι ανάλογες με τις δίνες σε πτέρυγες δέλτα (Εικόνα 1β). Ως εκ τούτου, ο έλεγχος της ροής πάνω από τη πτέρυγα και την άτρακτο θα μπορούσε να συμβάλει στην περαιτέρω βελτίωση των χαρακτηριστικών απόδοσης της πλατφόρμας. Ο έλεγχος της ροής μπορεί να γίνει μέσω της τεχνικής ενεργού ελέγχου ροής με χρήση πλάσματος και πιο συγκεκριμένα με την τεχνική ενεργοποίησης πλάσματος διηλεκτρικού φράγματος (Dielectric barrier Discharge Plasma Actuator – DBD PA).

1.2 Dielectric barrier discharge plasma actuator

Το DBD PA είναι μια καινοτόμος τεχνική ελέγχου ροής, η οποία χρησιμοποιείται για το έλεγχο του οριακού στρώματος καθώς και την καθυστέρηση της αποκόλλησης της ροής. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες αρκετοί ερευνητές εξέτασαν πειραματικά την επίδραση της τεχνικής DBD PA στα χαρακτηριστικά εξωτερικών ροών γύρω από σώματα. Ενδεικτικά, οι Simon et al. (2015) εξέτασαν την επίδραση ενός DBD PA στην ακύρωση των κυμάτων Tolmien-Schlichting ενώ οι Corke et al. (2004) απέδειξαν τη θετική επίδραση της τεχνικής DBD PA σε αεροτομή NACA 0015. Γενικά, η χρήση PA έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μηχανικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ροής. Συγκεκριμένα, απαιτούν μικρότερη κατασκευαστική πολυπλοκότητα, ενσωματώνονται σχετικά εύκολα σε μια αεροδυναμική επιφάνεια, όπως είναι η άτρακτος και η πτέρυγα ενός αεροσκάφους, παράγουν λιγότερους μηχανικούς κραδασμούς, λιγότερο θόρυβο και έχουν μικρότερο βάρος όπως αναφέρεται και στην μελέτη του Moreau (2007). Ο ενεργοποιητής πλάσματος διηλεκτρικού φράγματος (DBD PA) έχει διερευνηθεί ευρέως ως μια ενεργή τεχνική ελέγχου ροής, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά. Για παράδειγμα, οι Kotsonis et al. (2011) χρησιμοποίησαν πειραματικές μετρήσεις PIV προκειμένου να εξάγουν μια νέα τεχνική για την εκτίμηση του πεδίου δυνάμεων που ασκεί ο DBD PA, επίσης, οι Kelley et al. (2012) μέτρησαν πειραματικά την αύξηση της γωνίας stall σε μια υπερκρίσιμη αεροτομή χρησιμοποιώντας ένα DBD PA.

Ο ενεργοποιητής DBD PA, αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από διηλεκτρικό υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης (AC) στα ηλεκτρόδια, παράγεται ψυχρό πλάσμα με αποτέλεσμα, λόγω του ιονισμένου αέρα κοντά στη περιοχή του ενεργοποιητή, να παράγεται επιφανειακή ταχύτητα (επαγόμενη ροή) προσθέτοντας ορμή στο οριακό στρώμα. Σε μια συγκεντρωτική μελέτη που σχετίζεται με μη θερμικούς ενεργοποιητές PA, ο Moreau (2007) παρουσιάζει μια αναλυτική μελέτη στην οποία παρέχονται κατανομές της μέγιστης ταχύτητας ροής η οποία μπορεί να επιτευχθεί σε ακίνητο αέρα, σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά ενεργοποίησης ενός DBD PA. Γενικά, ο μηχανισμός αυτός

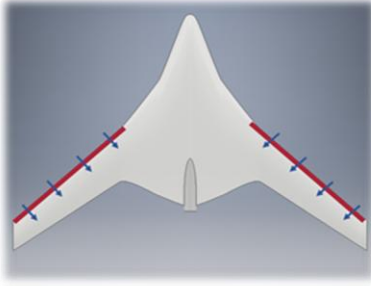
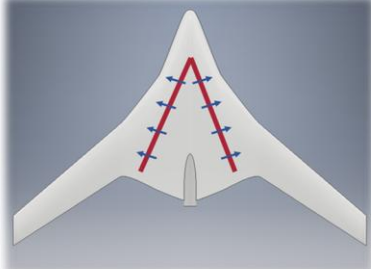
έχει άμεσο αντίκτυπο στον έλεγχο της ροής, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος, της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή καθώς και για την καθυστέρηση της απώλειας στήριξης στις πτέρυγες.



Εικόνα 2 Διαμόρφωση ενεργοποιητή πλάσματος DBD

1.2 Σκοπός

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η πειραματική διερεύνηση της εφαρμογής του ενεργοποιητή πλάσματος ως μέθοδος ενεργού ελέγχου ροής σε γεωμετρίες BWB. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 αναλύονται δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο ο ενεργοποιητής τοποθετείται κατά μήκος της ακμής προβολής της πτέρυγας για να καθυστερήσει την αποκόλληση της ροής και να αποτρέψει την απώλεια στήριξης (stall). Στο δεύτερο σενάριο ο ενεργοποιητής τοποθετείται παράλληλα στη γραμμή επανακόλλησης της κύριας δίνης ατράκτου, (Εικόνα 1β), με στόχο να επιτευχθεί έλεγχος των δινών της ακμής προσβολής που δημιουργούνται λόγω της γεωμετρίας της ατράκτου.

Διαμόρφωση	Τοποθεσία	Σκοπός
	Ακμή προσβολής πτέρυγας	Αποφυγή stall και αύξηση συντελεστή $C_{l_{max}}$
	Παράλληλα στη γραμμή επανακόλλησης της κύριας δίνης κορμού	Χειραγώγηση δίνης

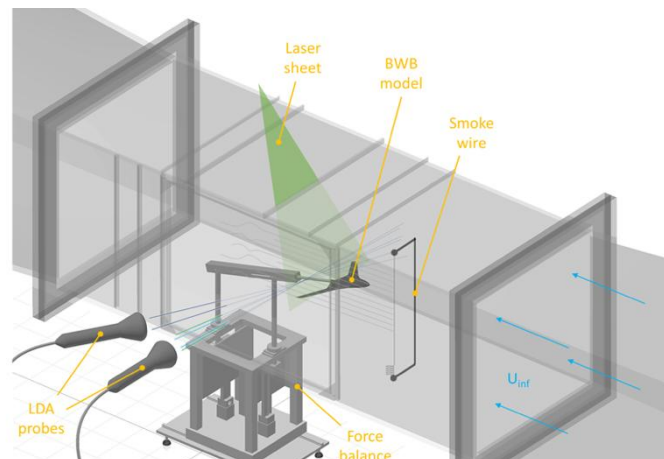
Εικόνα 3 Απεικόνιση της θέσης DBD PA για το σενάριο πτέρυγας (επάνω) και το σενάριο των δινών (κάτω). Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη θέση του ενεργοποιητή πλάσματος και οι μπλε φορείς αντιπροσωπεύουν τη ροή που προκαλείται από το πλάσμα.

Για να αξιολογηθεί η επίδραση της τεχνικής ελέγχου DBD PA στη πλατφόρμα BWB, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός επιφανειακών οπτικοποιήσεων με χρήση φωσφορίζουσας μπογιάς και θερμαινόμενου σύρματος. Επιπλέον διεξάγονται μετρήσεις πεδίων ταχυτήτων χρησιμοποιώντας ένα σύστημα 3D LDA, ώστε να εξεταστεί λεπτομερώς το πεδίο ροής του BWB, καθώς και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση του ενεργοποιητή πλάσματος και για τα δύο σενάρια εγκατάστασης του ενεργοποιητή. Επίσης γίνονται μετρήσεις των αεροδυναμικών δυνάμεων, συγκρίνοντας τους συντελεστές άντωσης και αντίστασης χωρίς και με ενεργοποιημένη την τεχνική ελέγχου ροής DBD PA.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

2.1 Εργαστηριακές εγκαταστάσεις

Τα πειράματα διεξάγονται σε κλειστού τύπου αεροσήραγγα χαμηλών ταχυτήτων, στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών (LFMT), στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Π.Θ. Η εγκατάσταση διαθέτει τμήμα δοκιμής 1810 mm x 600 mm x 600 mm (Εικόνα 4) και είναι ικανή να παράγει μέγιστη ταχύτητα 20 m/s. Όσον αφορά τις μελέτες οπτικοποίησης, χρησιμοποιείται μια τεχνική θερμού σύρματος που παράγει καπνό μαζί με μια ‘κουρτίνα’ λείζερ για να διερευνηθεί τη ροή γύρω από το μοντέλο BWB, ενώ η απεικόνιση της ανάπτυξης ροής στην άνω πλευρά του μοντέλου γίνεται με χρήση μείγματος φωσφορίζουσας μπογιάς. Για τις μετρήσεις του συντελεστή άντωσης χρησιμοποιείται μια διάταξη αεροδυναμικού ζυγού που αναπτύχθηκε στο LFMT. Τρεις δυναμοκυψέλες Omega LCEB (© Omega) επιτρέπουν τη μέτρηση δυνάμεων άντωσης και αντίστασης. Σχετικά με τις μετρήσεις LDA, οι λεπτομερείς μετρήσεις σημείου διεξάγονται χρησιμοποιώντας συστήματα 3D LDA από τη Dantec Dynamics. Όσον αφορά τους DBD PA που χρησιμοποιούνται στη μελέτη, η ίδια φιλοσοφία κατασκευής χρησιμοποιείται και στα δύο σενάρια. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων και η τοποθέτησή τους επί του μοντέλου BWB φαίνονται στην Εικόνα 5. Αυτή η διαμόρφωση της γεωμετρίας του DBD PA χρησιμοποιήθηκε επίσης στην εργασία των He et al. (2009). Για να παραχθεί η επιθυμητή εκκένωση πλάσματος με σταθερή ενεργοποίηση, εφαρμόστηκε ένα ημιτονοειδές σήμα στο εκτεθειμένο στον αέρα ηλεκτρόδιο χρησιμοποιώντας τη συσκευή Minipuls 4 από την GBS Elektronik GmbH, η οποία παράγει υψηλή τάση εναλλασσόμενου ρεύματος έως 24 kV (40 kVpp ή 14 kV RMS) με εύρος συχνοτήτων 5-20 kHz. Στην παρούσα εργασία, το πλάσμα παρήχθη με μέγιστη τάση εξόδου 10 kV και συχνότητα 4,15kHz, εξασφαλίζοντας ότι η διάρκεια ζωής του ενεργοποιητή θα είναι επαρκής για να ολοκληρωθεί το πείραμα χωρίς αστοχία.



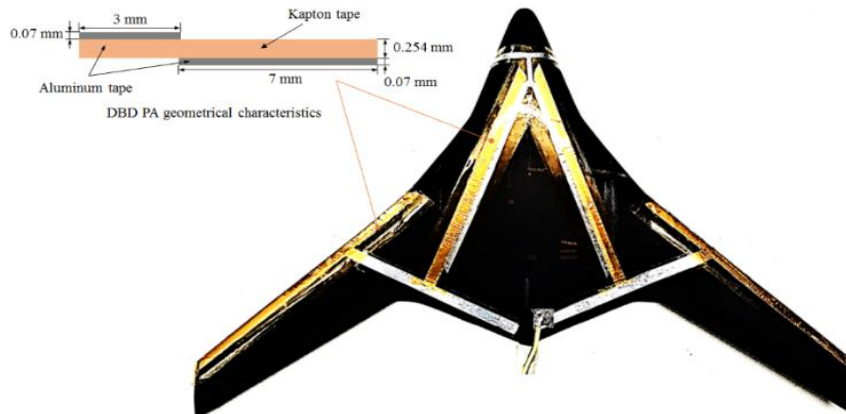
Εικόνα 4 Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης και των μηχανισμών μετρήσεων και οπτικοποιήσεων.

Όσον αφορά τις συνθήκες εισόδου της ροής εντός της αεροσήραγγας, η ελεύθερη ταχύτητα στο τμήμα δοκιμής ορίστηκε στα 13,4 m/s, διατηρούμενη σταθερή με διακύμανση 1%, αντιστοιχούσα σε αριθμό Reynolds $2,5 \times 10^5$ βάση της χορδής της ρίζας (κεντρική γραμμή), $1,4 \times 10^5$ με βάση τη μέση τιμή χορδής πτέρυγας και 33×10^3 με βάση τη χορδή ακροπτερυγίου. Αυτός ο αριθμός Reynolds συμφωνεί με προηγούμενες δημοσιευμένες μελέτες που σχετίζονται με τις δίνες ακροπτερυγίου (Panagiotou et al, 2017) και δίνες ακμής προσβολής (Panagiotou et al, 2015).

2.2 Μοντέλο

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων και η τοποθέτησή τους στο μοντέλο BWB φαίνονται στην Εικόνα 5. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από ταινία αλουμινίου και το διηλεκτρικό υλικό που χωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια αποτελείται από 4 στρώματα ταινίας Kapton.

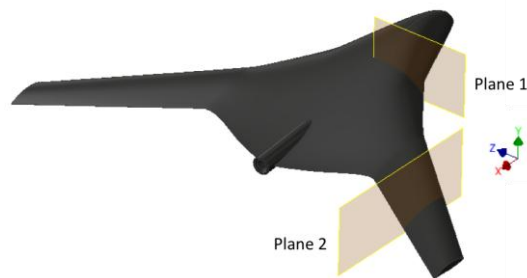
Τέλος, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη μελέτη είναι ένα μοντέλο BWB υπό κλίμακα 1:15, με οπισθόκλιση 40° και εκπέτασμα 400mm.



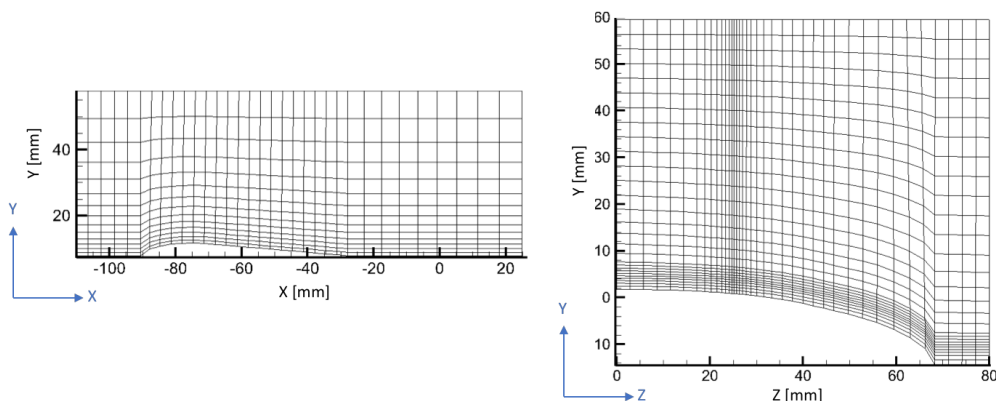
Εικόνα 5 Μοντέλο BWB με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενεργοποιητών πλάσματος

2.3 LDA μετρήσεις

Για τις μετρήσεις LDA. Επιλέγονται δύο επίπεδα μέτρησης, το πρώτο από τα οποία βρίσκεται στο $X/C_{root}=0.5$ (επίπεδο 1, Εικόνα 6), για να εξετάσει την επίδραση του DBD PA στην ανάπτυξη των LEVs και το δεύτερο στο $Z/C_{root}=0.26$ (επίπεδο 2, Εικόνα 6) για να αξιολογήσει την επίδραση του DBD PA στην πτέρυγα.



Εικόνα 6 Επίπεδα μετρήσεων LDA για τη διερεύνηση του σεναρίου δινών ακμής προσβολής (plane 1) και το σεναρίου της πτέρυγας (plane 2)



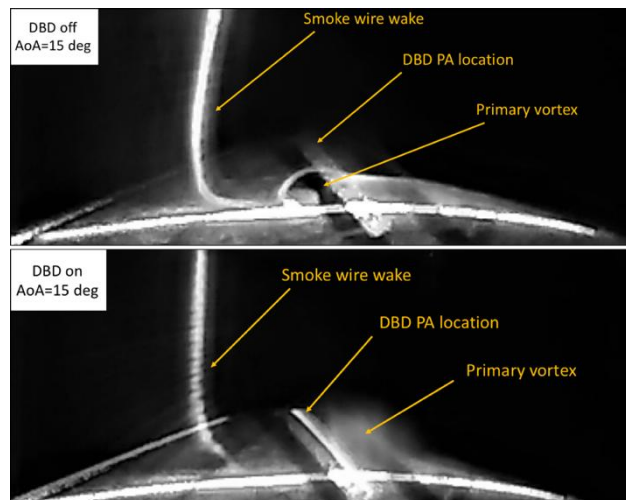
Εικόνα 7 Πλέγματα μετρήσεων LDA για τη διερεύνηση του σεναρίου δινών ακμής προσβολής (δεξιά) και το σεναρίου της πτέρυγας (αριστερά)

Για κάθε επίπεδο και γωνία προσβολής που εξετάζονται παράγονται πλέγματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Η πυκνότητα και γεωμετρία του πλέγματος επιλέγεται με στόχο την αύξηση του αριθμού των σημείων που μετριοούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

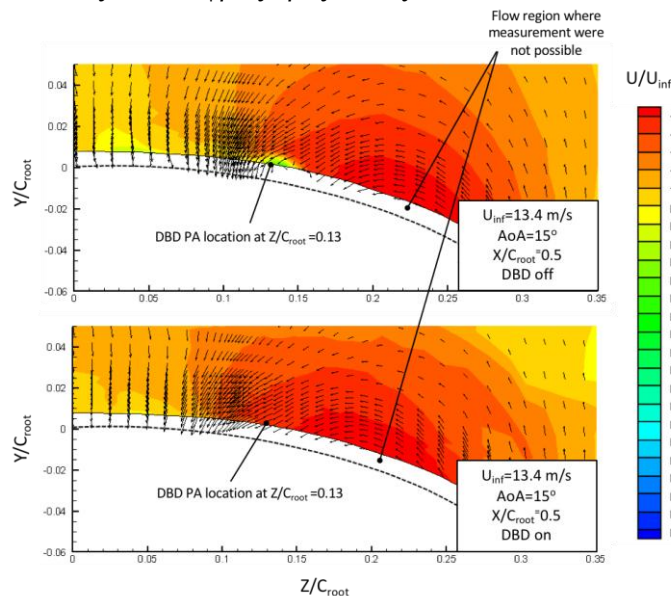
3.1 Αποτελέσματα σεναρίου δίνης

Ως πρώτο βήμα, τα φαινόμενα ροής πάνω από το κεντρικό σώμα και την πτέρυγα διερευνώνται χρησιμοποιώντας τις τεχνικές οπτικοποιήσεων θερμού σύρματος και κουρτίνας λέιζερ. Ειδικότερα, στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η επίδραση του DBD PA στην ανάπτυξη LEV υπό γωνία προσβολής 15 μοιρών. Όταν ο DBD PA είναι απενεργοποιημένος, τα κύρια χαρακτηριστικά της δίνης μπορούν να προσδιοριστούν με σαφήνεια. Με την ενεργοποίηση του DBD PA το κέντρο της δίνης γίνεται θολό, υποδηλώνοντας ότι έχει προηγηθεί η αποδόμηση της (Budovsky et al, 2009). Επιπλέον, η δίνη μετατοπίζεται ελαφρά προς τα δεξιά, μακριά από τη θέση του PA που προηγουμένως συνέπιπτε με το κέντρο της δίνης.



Εικόνα 8 Οπτική απεικόνιση των LEV με χρήση θερμού σύρματος καπνού/κουρτίνας λέιζερ, πάνω από το κεντρικό σώμα του BWB σε γωνία προσβολής $AoA=15$ deg στο επίπεδο 1 με $X/C_{root}=0.5$

Τα αποτελέσματα μέτρησης LDA του επιπέδου 1 φαίνονται στην Εικόνα 9. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την περιοχή όπου οι μετρήσεις δεν είναι δυνατές λόγω της αντανάκλασης της δέσμης λέιζερ και της παρουσίας οριακού στρώματος που δημιουργεί συνθήκες ανεπαρκής ποσότητα καπνογόνου. Τα αποτελέσματα των ερευνών LDA είναι σε μερική συμφωνία με τις μελέτες οπτικοποίησης της ροής, καθώς η δίνη μετατοπίζεται ελαφρώς προς τα δεξιά.



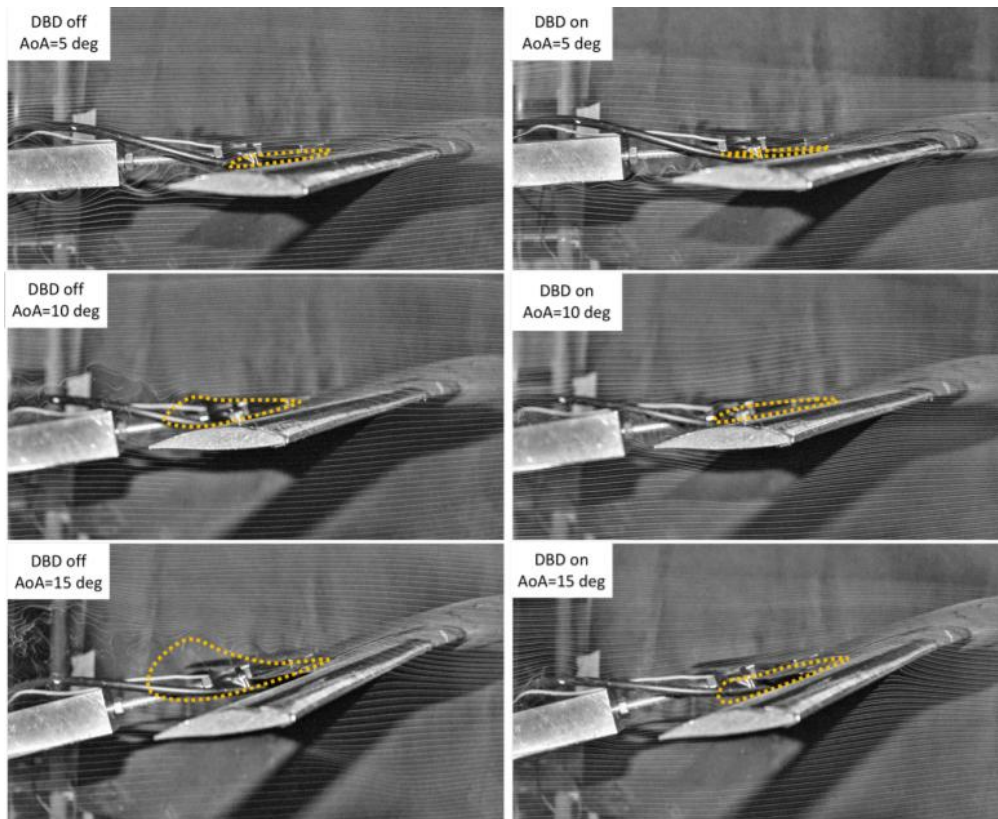
Εικόνα 9 Χρονική μέση αξονική ταχύτητα στο επίπεδο 1 $X/C_{root} = 0.5$

Ωστόσο, αυτή η μετατόπιση είναι σημαντικά μικρότερη, πιθανώς λόγω της μεγαλύτερης ελεύθερης ταχύτητας ροής. Επιπλέον, δεν μπορεί να εξαχθεί οριστικό συμπέρασμα σχετικά με τη δομή της δίνης. Μια μέθοδος μέτρησης στιγμιαίας ταχύτητας, όπως η Particle Image Velocimetry (PIV), θα μπορούσε να προσφέρει περισσότερες πληροφορίες.

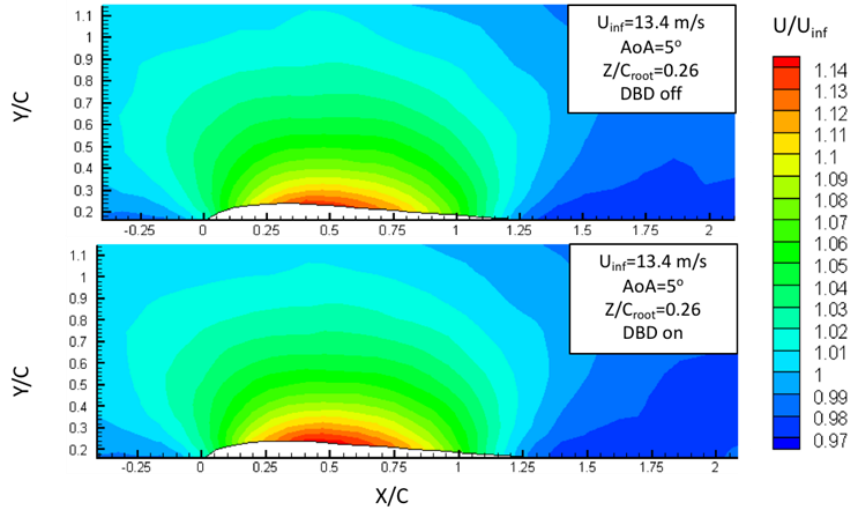
Όπως και στην περίπτωση των οπτικοποιήσεων καθώς και των μετρήσεων LDA, οι υπολογισμοί των αεροδυναμικών δυνάμεων διεξάγονται υπό γωνία προσβολής 15 μοιρών. Τα αποτελέσματα επισημαίνουν ότι η επιλεγμένη ρύθμιση του DBD PA έχει αρνητική επίδραση στην παραγωγή άντωσης, ενώ συγχρόνως προκαλεί αύξηση της αντίστασης. Ενδεικτικά, ενεργοποιώντας το PA, υπάρχει μείωση του συντελεστή άντωσης (C_L) και αύξηση του συντελεστή αντίστασης (C_D) 2,5% και 3,5% αντίστοιχα. Αυτή η μείωση στον συντελεστή C_L μπορεί να εξηγηθεί από την υπόθεση που έγινε προηγουμένως, δηλαδή ότι η δίνη έχει διαλυθεί υπό την επίδραση της δευτερογενούς ροής λόγω PA.

3.2 Αποτελέσματα σεναρίου πτέρυγας

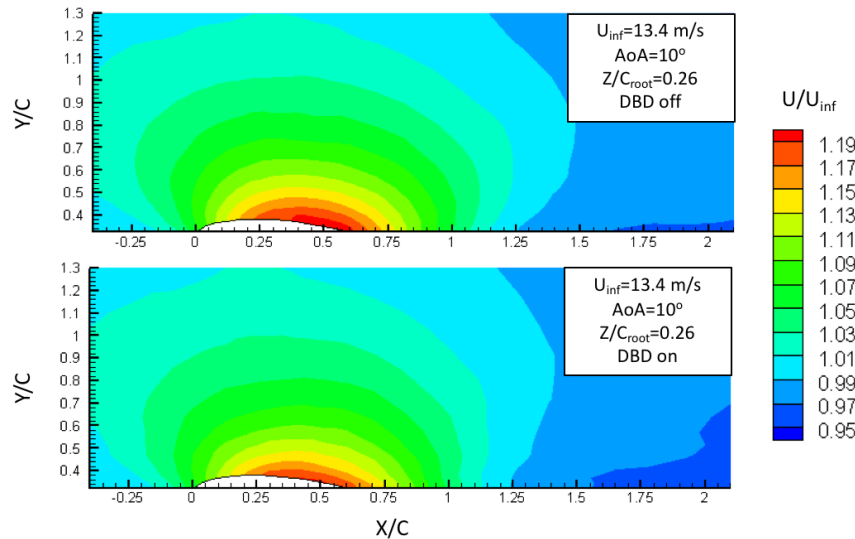
Ο κύριος στόχος των οπτικοποιήσεων ροής στο σενάριο της πτέρυγας είναι να προσδιοριστούν τα φαινόμενα που επικρατούν και η αντίστοιχη τοπολογία τους, προκειμένου να διαστασιοποιηθούν με ακρίβεια τα πλέγματα για τις πιο χρονοβόρες έρευνες LDA. Τα αποτελέσματα του θερμού σύρματος καπνού παρουσιάζονται στο Εικόνα 10. Το DBD PA επηρεάζει σαφώς τη ροή πάνω από την κύρια πτέρυγα ακόμη και σε χαμηλές γωνίες, μειώνοντας το μέγεθος του απόρρου και μειώνοντας τη καμπυλότητα των ροικών γραμμών. Το αποτέλεσμα είναι πιο εμφανή στην περίπτωση των 15 deg. Αν και αρχικά η αποκολλημένη ροή καλύπτει ολόκληρη την πλευρά αναρρόφησης, η ενεργοποίηση του PA ανασχηματίζει δραστικά το πεδίο επανακολλώντας τη ροή. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειράματα αυτά διεξάγονται σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας (2m/s), έτσι ώστε ο καπνός να μπορεί να είναι ορατός. Ως εκ τούτου, η επίδραση του DBD PA αναμένεται να είναι μικρότερη σε υψηλότερη ταχύτητα ελεύθερης ροής.

**Εικόνα 10** Οπτικοποίηση θερμού σύρματος στη πτέρυγα του BWB, στο επίπεδο 2 με $Z/C_{root}=0.26$ και ταχύτητα ελεύθερης ροής 2m/s

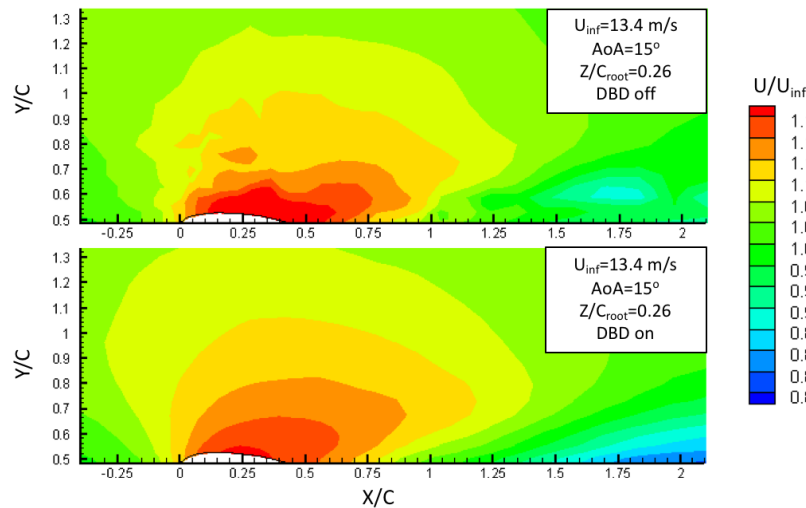
Οι Εικόνες 11, 12 και 13 παρουσιάζουν τις μετρήσεις LDA πάνω από την πτέρυγα. Στις 5 μοίρες δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές, παρόλο που η ενεργοποίηση του PA αυξάνει ελαφρώς την περιοχή επιτάχυνσης της ροής πάνω από την πτέρυγα. Είναι ενδιαφέρον ότι η τάση αυτή αντιστρέφεται για γωνία προσβολής 10 μοιρών, όπου το DBD PA φαίνεται να μειώνει την περιοχή επιτάχυνσης. Το πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα, όμως, είναι εμφανές για μια γωνία προσβολής των 15 μοιρών, όπου εμφανίζεται αποκόλληση της ροής πάνω από την πτέρυγα. Η ενεργοποίηση του DBD PA ανασχηματίζει το πεδίο ροής, δημιουργώντας μια ομαλότερη εικόνα και υποδηλώνοντας ότι ο απόρροος έχει μειωθεί σε μέγεθος.



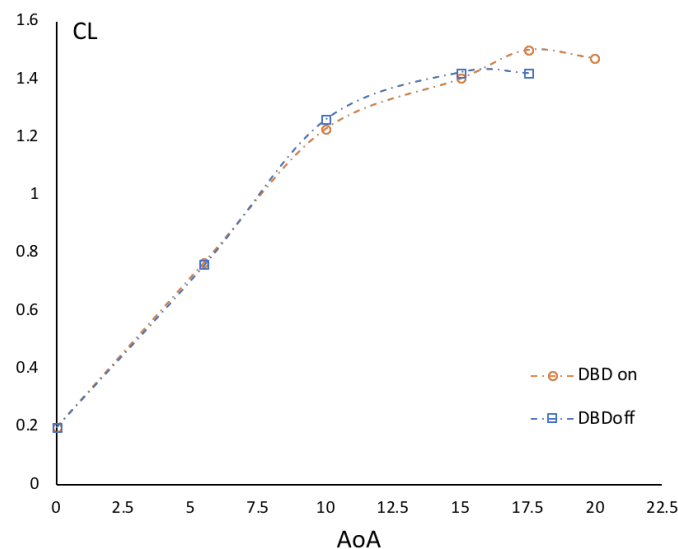
Εικόνα 11 Χρονική μέση αξονική ταχύτητα στο Επίπεδο 2 με $Z/C_{root}=0.26$, $AoA=5$ deg



Εικόνα 12 Χρονική μέση αξονική ταχύτητα στο Επίπεδο 2 με $Z/C_{root}=0.26$, $AoA=10$ deg



Εικόνα 13 Χρονική μέση αξονική ταχύτητα στο Επίπεδο 2 με $Z/C_{root}=0.26$, $AoA=15\text{ deg}$



Εικόνα 14 Αποτελέσματα συντελεστή ανύψωσης, DBD PA εγκατεστημένο στην πρόσθια άκρη του πτερυγίου, $U_{inf} = 13,4\text{m/s}$

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέτρησης δυνάμεων με το DBD PA να είναι εγκατεστημένο στην κύρια πτέρυγα. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο DBD PA επηρεάζει τη ροή πάνω από την πτέρυγα σε υψηλή γωνία προσβολής ($AoA=17,5\text{deg}$), αυξάνει τη γωνία stall και το συντελεστή C_{Lmax} κατά περίπου 2,5 μοίρες και 5% αντίστοιχα. Παρόλο που η γενική τάση είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα LDA, προτείνεται επίσης η διεξαγωγή επιπρόσθετων μετρήσεων ταχύτητας LDA σε γωνίες προσβολής 17,5 και 20 μοιρών για να καταστεί σαφέστερη η κατανόηση των αντίστοιχων φαινομένων ροής.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, διεξήχθησαν σειρά πειραμάτων για να διερευνηθεί η επίδραση και η πιθανή χρήση του DBD PA σε ένα μοντέλο BWB. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κλειστού τύπου, υποηχητική αεροσήραγγα περιλαμβάνοντας οπτικοποιήσεις ροής, μετρήσεις ταχύτητας με χρήση LDA, και μετρήσεις δυνάμεων. Το μοντέλο BWB που χρησιμοποιήθηκε είναι υπό κλίμακα 1:15, αναπαράσταση ενός BWB UAV (Panagiotou et al, 2016). Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη ο DBD PA είναι τοποθετημένος στην ακμή προσβολής της κύριας πτέρυγας ενώ στην δεύτερη ο DBD PA τοποθετήθηκε κατά μήκος της κύριας γραμμής επανακόλλησης των δινών ακμής προσβολής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τεχνική ενεργού ελέγχου ροής με χρήση ενεργοποιητών τύπου DBD PA

είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου της ροής και στις δύο περιπτώσεις. Η επίδραση του ελέγχου μέσω DBD PA εξαρτάται περισσότερο από την ταχύτητα ελεύθερης ροής παρά από το χαρακτηριστικό μήκος του αντίστοιχου φαινομένου. Συνολικά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος ενεργού ελέγχου μέσω DBD PA μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την καθυστέρηση της αποκόλλησης και της απώλειας στήριξης σε πτέρυγα όσο και για χειρισμό δινών πάνω από το κεντρικό σώμα της διαμόρφωσης BWB.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-01262).



5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- K. Lehmkuehler, K.C. Wong, D. Verstraete, Design and test of a UAV blended wing body configuration, 28th Congr. Int. Counc. Aeronaut. Sci. 2012, ICAS 2012. 1 (2012) 432–442. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84878596216&partnerID=40&md5=398b6e27eb89d5209f0875a3aae794a9>.
- P. Panagiotou, S. Fotiadis-Karras, P. Tsormpatzoglou, K. Yakinthos, Investigation of the BWB Concept For Fixed-Wing UAV Applications, in: 7th EASN Int. Conf. Innov. Eur. Aeronaut. Res., n.d.
- R.H. Liebeck, Design of the Blended Wing Body Subsonic Transport, J. Aircr. 41 (2004) 10–25. doi:10.2514/1.9084.
- R. Wittmann, Passenger Acceptance of Bwb Configurations, Distribution. (n.d.).
- N. Yovanof, A. Velicki, V. Li, Advanced Structural Stability Analysis of a Non-Circular, BWB-Shaped Vehicle, in: 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2009. doi:10.2514/6.2009-2452.
- B. Simon, T. Nemitz, J. Rohlfing, F. Fischer, D. Mayer, S. Grundmann, Active flow control of laminar boundary layers for variable flow conditions, Int. J. Heat Fluid Flow. 56 (2015) 344–354. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.09.003.
- T.C. Corke, M.L. Post, Separation Control Using Plasma Actuators - Stationary and Oscillating Airfoils, Aiaa 2004-0841. (2004). doi:10.2514/6.2004-841.
- E. Moreau, Airflow control by non-thermal plasma actuators, J. Phys. D. Appl. Phys. 40 (2007) 605–636. doi:10.1088/0022-3727/40/3/S01.
- M. Kotsonis, S. Ghaemi, L. Veldhuis, F. Scarano, Measurement of the body force field of plasma actuators, J. Phys. D. Appl. Phys. 44 (2011) 45204. doi:10.1088/0022-3727/44/4/045204.
- C.L. Kelley, P. Bowles, J. Cooney, C. He, T.C. Corke, B. Osborne, J. Silkey, J. Zehnle, High Mach number leading-edge flow separation control using AC DBD plasma actuators, 50th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo. (2012) 1–22. doi:10.2514/6.2012-906.
- P. Panagiotou, G. Ioannidis, I. Tzivinikos, K. Yakinthos, Experimental Investigation of the Wake and the Wingtip Vortices of a UAV Model, Aerospace. 4 (2017) 53. doi:10.3390/aerospace4040053.
- C. He, T.C. Corke, M.P. Patel, Plasma Flaps and Slats: An Application of Weakly Ionized Plasma Actuators, J. Aircr. 46 (2009) 864–873. doi:10.2514/1.38232.
- P. Panagiotou, A. Sideridis, K. Yakinthos, A. Goulas, Turbulence Kinetic Energy Balance in the Wake of a Sharp-edged Highly Swept Delta Wing, Flow, Turbul. Combust. 95 (2015) 121–142. doi:10.1007/s10494-015-9611-7.
- A.D. Budovsky, A.A. Sidorenko, A.A. Maslov, B.Y. Zanin, I.D. Zverkov, Plasma Control Of Vortex Flow On Delta-Wing At High Angles Of Attack, (2009) 2009. doi:10.2514/6.2009-888 10.2514/6.2009-888.

Experimental investigation of DBD plasma actuators on a BWB aerial vehicle model

ABSTRACT

The aim of the present study is to experimentally investigate the application of the Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators (DBD PA) as an active flow control technique, on a Blended Wing Body (BWB) configuration. Two different scenarios are examined. The first one is placing the actuator along the leading edge of the wing platform to delay flow separation and prevent stalling. The second one is placing the actuator over the centerbody, to manipulate the Leading Edge Vortices (LEVs), to control the vortex brake down and lift production. To evaluate the effect of the DBD PA technique on the BWB, a combination of surface oil flow visualization, of smoke wire and laser sheet methods are employed. Velocity measurements are also conducted, using a 3D Laser Doppler Anemometry (LDA) system, to examine the flow field of the BWB in detail and quantify the effect of the DBD plasma actuator for both scenarios. Furthermore, force balance measurements are carried out, to compare the lift production without and with the flow control technique activated. All the flow experiments were conducted in a closed-loop, subsonic windtunnel. The flow conditions of the experiments yield a Reynolds number of 2.5×10^5 based on the root chord.