

דוח מסכם – פרויקט מחקר

גלגול של טיל – למיצוע אי-ציריות דחף

ניב צוקרמן*

* הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, טכניון - מכון טכנולוגי, ישראל.

תקציר

כחלק מתהליך התכן של טיל מונע במנוע מגח נזזלי, נבחנו דרכים על מנת להפחית ככל האפשר השפעות של דחף שאינו צירי, בין השאר, נבדקה האפשרות של יציאה מיציבות, ופגיעה בביצועי התצורה. הסקירה המוצגת בדוח זה הינה העבודה שנעשתה בבחינת אמצעים שונים למיצוע דחף שאינו צירי באמצעות יצירת מומנט גלגול על התצורה.

במסגרת הדוח המפורט נבחנו לעומק זוג דרכים ליצירת מומנט גלגול. האחת, הטיה קבועה של מייצבים סימטריים ואילו השנייה הינה שימוש במייצבים שאינם סימטריים אשר מתקבל מהם עילוי וכיוצא בזאת גלגול בזווית התקפה אפס. הסקירה נעשתה באמצעות תוכנת MISDAT, אשר לה יכולות מוגבלות בתחום מייצבים לא סימטריים בזרימה על קולית. לכן, נבחר לייצר חוסר סימטריה באמצעות הטיית מדף.

מתוך התוצאות המוצגות בדוח זה עולה כי על מנת לייצב סטיית דחף אופיינית לטיל בעל מנוע מגח יש להשתמש בהטיות קטנות בזמן השיט בטווח 0.2~0.5 מעלות. בנוסף, עולה כי תוספת הגרר האופיינית המתקבלת בעת הטיה של מייצבים סימטריים מסוג משושה עומדת על פחות מאחוז וכי הטיות אלה חסרות השפעה על היציבות האורכית של התצורה. עבור ההטיות הללו חושבו קצבי הגלגול המתקבלים בהתאם, אשר מתקבלים להיות כ- 500 סיבובים לדקה. יש לציין כי קצב הגלגול המתקבל אינו קבוע ותלוי הן במומנט הגלגול המתמיד והן בהיסטוריית התנועה, אשר יש לבחון זאת לעומק באמצעות מימוש בסימולציית מעוף. ממצאים אלה מהווים בסיס לעבודה ניסויית בצורת ניסוי מנהרה, אשר מטרתם לבחון את קצב הגלגול המתקבל עבור מייצבים שונים. בסיס זה כולל את צורות הפרופילים אותן נרצה לבחון בצורה ניסויית ואף חישובית (CFD).

תוכן

1	תקציר
2	רשימת איורים
2	מבוא
3	התצורה הנבחרת
4	סכמת עבודה
4	פרופילים סימטריים
5	פרופילים שאינם סימטריים
6	תוצאות
6	פרופילים סימטריים
10	פרופילים שאינם סימטריים
12	מייצבים עוטפים
13	השוואה

15	קצב גלגול
18	סיכום
18	עבודה להמשך
19	מקורות
19	נספחים
19	ביצועי מנוע מגח אידיאלי

רשימת איורים

3	איור 1 – מידות תצורה נבחרת
5	איור 2 – פרופיל משושה למינימום גרר
6	איור 3 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים
7	איור 4 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת זווית ההטיה בפרופיל משושה סימטרי
7	איור 5 – שיפוע מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת כמות מייצבים
8	איור 6 – מקדם גרר כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים
9	איור 7 – מרווח יציבות סטטית כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים
9	איור 8 – מקדם גרר כנגד מאך, השפעת זווית ההטיה בפרופיל משושה סימטרי
10	איור 9 – עליה יחסית במקדם גרר כנגד זווית הטיה, פרופיל משושה סימטרי
11	איור 10 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת הטיית מדף וצורת פרופיל
11	איור 11 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת זווית הטיית מדף בפרופיל משושה
12	איור 12 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת אורך המדף בפרופיל משושה
13	איור 13 – מקדם גלגול כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי
14	איור 14 – מקדם ריסון בגלגול כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי
14	איור 15 – שיפוע קו עילי כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי
17	איור 16 – קצב גלגול במצד מתמיד כנגד זווית הטיה, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי
19	נספח 1 – סכמת מנוע מגח אידיאלי

מבוא

מנוע מגח הינו מנוע נושם אוויר שמתוכנן לפעול ללא חלקים נעים. כאשר הדחיסה של האוויר נעשית באמצעים אווירודינמיים בלבד, דהיינו במעבר דרך גלי-הלם. כתוצאה מכך, מנוע מגח הינו אטרקטיבי מטעם משקלו הנמוך, ופשטות התכן. אך למנגנון זה חיסרון מרכזי במהירויות נמוכות כאשר דחיסת האוויר אינה מספיקה על מנת להתניע את המנוע. חסרון זה מחייב האצה של הטיל למהירויות על קוליות ורק לאחר מכן התנעתו. שכן ניתן להבטיח זאת באמצעות הכללת שלב האצה המתאפשרת באמצעות תכן מאיץ נפרד או אינטגרלי שתפקידם להאיץ את המערכת למהירות מספיק גבוהה ולאפשר הפעלה יעילה של מנוע המגח. על כן, הדחף המסופק בשלב ההאצה הינו קריטי לטובת התנעת התצורה.

נחיר הפליטה של המנוע הינו רכיב משמעותי בקביעת הדחף הכולל המתקבל לכל שלבי הטיסה. כתוצאה מתהליכי ייצור רכיבי המנוע ואופי השריפה, ייתכן ותתקבל אי-ציריות בסילון הנפלט מנחיר המנוע. אי-ציריות זו יכולה להיות בלתי מזיקה אך עלולה לפגוע בביצועי התצורה. ביצועים אלה קריטיים בשלב ההאצה – לטובת התנעת התצורה, ואילו בשלב השיוט חשובים לא פחות מטעמי דרישות התכן והשלמת המשימה עבור טיל המגח.

כדי להימנע מפגיעה של אי-ציריות זו בביצועי התצורה, ניתן לדאוג למיצועה על-ידי סחרור "קל" של התצורה בעת המעוף. כך, למעשה הסחרור ידאג שכל סטייה בדחף הנוצרת אינה משפיעה רק בכיוון אחד והגלגול הקל שנוצר עצמו אינו מספיק מהיר כדי להשפיע על הביצועים. על-מנת לדאוג לסחרור קל עלינו ליצור מומנט גלגול טבעי של התצורה. עבור טיל **ללא היגוי** ניתן לעשות זאת בכמה דרכים, כחלק מהעבודה המוצגת בדוח זה נתמקד בשתיים:

- בחירת מייצבים שאינם סימטריים.
- הטיית המייצבים בכמה מעלות בודדות.

למעשה, זוג הדרכים הללו מנצלות יצירת עילוי בזווית התקפה אפס וכתוצאה מ'זרוע' כל מייצב מציר הגוף נוצר מומנט גלגול טבעי בזווית התקפה אפס – שכן היא הזווית הנומינלית לטיסה מיוצבת (עבור טיל שאינו מנוהג). בדוח זה נעבוד למען בחינת זוג שיטות אלה והשוואה בין קצבי הסיבוב המתקבלים בכל אחת מהשיטות. בנוסף, נשים דגש על ביצועי התצורה.

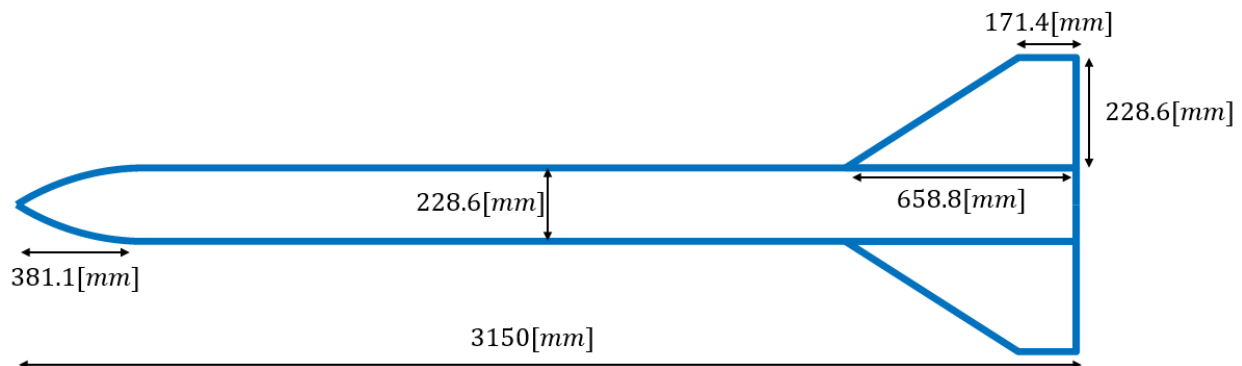
התצורה הנבחרת

התצורה שנבחרה מורכבת מחרטום אוגיבי אשר אורכו תוכנן כך שיתקבל גרר מינימלי, ושני זוגות מייצבים (סך הכל ארבעה) הנותנים מרווח יציבות כזה שיבטיח את יציבות הטיל לכל אורך המעוף.

d_{ref}	228.6[mm]
L_{body}	3150[mm]
L_{nose}	1.667d
Fins Chord	3d
Fins Exposed Span	d
Fins Taper Ratio	0.25

פרמטרי התצורה הנבחרת:

נציג את הגיאומטריה של התצורה הנבחרת באיור 1:



איור 1 – מידות תצורה נבחרת

סכמת עבודה

בפרק זה מפורטים דרכי הפעולה שננקטו על מנת להבחין בין השיטות השונות לגלגול קל של התצורה. כאשר לכל שיטה מפורטים הנחות העבודה, התיאוריה והעקרונות שעומדים מאחורי הסקירה שנעשתה. חשוב לציין כי עבור השיטות המוצגות, ניתן דגש רב הן ליצירת הגלגול והן לשמירה (ואף שיפור) ביועיי התצורה. כפי שצוין בדוחות הקודמים לפרויקט זה, עלינו לדאוג כי גרר התצורה יהיה נמוך ככל האפשר ושהמערכת יציבה בכל תחום המעוף.

פרופילים סימטריים

תת פרק זה דן בהטיית מייצבים סימטריים לקבלת מומנט גלגול בזווית התקפה אפס. מבחינה מעשית, שיטה זו אטרקטיבית מבחינה תהליך הייצור לשם ביצוע ניסויים לאימות התוצאות.

הטיית הפרופילים הסימטריים תהיה סביב אמצע המיתר ולמרות ששפת ההתקפה של המייצבים משוכה לאחור, ההטיה תתבצע סביב ציר סיבוב הניצב לגוף הטיל. במלים אחרות, תיווצר הטיה של המייצבים בצורת 'מונובלוק'.

גוף התצורה הינו עגול ואילו המייצבים ישרים, לכן בעת הטיה של המייצבים נוצרים מרווחים בין הגוף למשטח אשר מסייעים להשוואת לחצים. כתוצאה מכך, יעילות המשטח פוחתת אך במידה וההטיות הדרושות תהיינה קטנות, יש לצפות להפסדים נמוכים. בשלב זה לא ניתנה התייחסות ותיקונים כתוצאה מתופעה זו.

כידוע מתוך אווירודינמיקה של פרופילים על-קוליים, הביטוי עבור הגרר מושפע רבות מעובי הפרופיל. לכן, בעת תכן פרופילים ובפרט מייצבים עבור טיל עלינו לבחור פרופיל מייצבים בעל מנת עובי נמוכה יחסית. כאשר עובי הפרופיל קטן, בעיות מבניות עולות לפני השטח כחלק משיקולי התכן. כתוצאה מכך, הפרמטר שהופך למשמעותי בהשוואה בין פרופילים שונים הוא מומנט האינרציה של החתך סביב המיתר. כאשר מדובר בפרופילים סימטריים, נתבונן במומנטי האינרציה עבור פרופיל מעוין, ופרופיל משושה. כאמור, לא נבחנו פרופילים מעוגלים בשלב זה.

עבור פרופילים בעלי מיתר c , ועובי כולל t , לפי [1] מתקיים:

$$I_{Hexagonal} = \left(\frac{t}{c}\right)^3 \frac{c^4}{48} \cdot \left[1 + 3 \frac{l_{flat}}{c}\right] ; \quad I_{Diamond} = \left(\frac{t}{c}\right)^3 \frac{c^4}{48}$$

לכן, על מנת להשוות בין פרופילים בעלי מומנטי אינרציה זהים, (ומיתרים זהים), נוצרת תלות בין העובי של זוג הפרופילים:

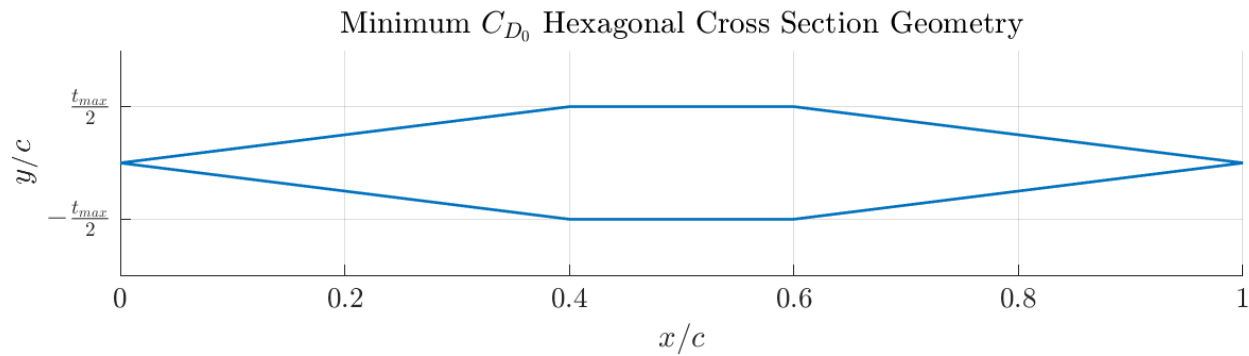
$$t_{Diamond} = t_{Hexagonal} \cdot \sqrt[3]{1 + 3 \frac{l_{flat}}{c}}$$

ניתן לראות שהעובי הדרוש לפרופיל מעוין הינו גבוה יותר מאשר זה של משושה. בעת השוואה בין פרופילים, נדאג שקשר זה בין עובי הפרופילים מתקיים.

מתוך הספרות, כאשר מתבוננים באיברים מובילים בביטוי לגרר הצורה בפרופיל משושה ניתן לקבל גיאומטריה אשר מניבה מינימום גרר. למעשה, תנאי זה מכתוב את האורך של המקטע השטוח בפרופיל - l_{flat} . בשלב זה, נתייחס לתנאי זה כקו מנחה בהשוואה בין הפרופילים, ואף נכליל לסימטריה בין שפת הזרימה לשפת ההתקפה, כאשר:

$$l_{flat} = \frac{1}{5}c ; \quad c_{t_{max}} = \frac{2}{5}c$$

כלומר, מתקבלים משפחת הפרופילים הבאה:



איור 2 – פרופיל משושה למינימום גרר

כלי העבודה אתו מבוצעת ההשוואה וסקירה של שיטה זו הינו MISDAT, כאשר סכמת הטיית המייצבים בתוכנה זו היא כך שהטיה חיובית של כל אחד מהמייצבים מניבה מומנט גלגול שלילי (נגד כיוון השעון במבט אחורי על התצורה) ללא זווית התקפה והחלקה. כאשר עבור כל אחד מהמייצבים ניתן להגדיר זווית הטיה שונה במקרה הצורך.

פרופילים שאינם סימטריים

תת פרק זה דן בבחירת מייצבים שאינם סימטריים לקבלת מומנט גלגול בזווית התקפה אפס. עבור פרופילים שאינם סימטריים מתקבל כוח עילוי בזווית התקפה אפס. לכן, ניתן לבחור שכוח העילוי מכל זוג מייצבים באותו המישור יהיה מכון לכיוונים מנוגדים, ובכך ליצור צמד כוחות המניב מומנט גלגול על התצורה גם בזווית התקפה אפס.

מייצבים לא סימטריים אשר מקובלים למטרת יצירת סיבוב קבוע (בטיסה על קולית) הם לרוב מאופיינים עם עקמון תחתון שטוח ועקמון עליון זהה למייצבים הסימטריים שנסקרו קודם לכן. מייצבים אלה אטרקטיביים מבחינת שיטת הייצור שלהם ואינם מוסיפים רבות לגרר התצורה. למרות זאת, בסכמת החישוב המפורטת בדוח זה (MISDAT), לא ניתן לחשב ביצועים של פרופילים מסוג זה מעבר למאך הקריטי עבורם. למרות שיש שיטות רבות להערכת ביצועי כנפיים בזרימה על קולית, הן נמנות בין מימוש מסובך עבור כנף בעלת עובי סופי (VLM), ולחילופין חוסר דיוק (למשל, קירוב מסדר שני לזרימה איזנטרופית).

לכן, שבירת סימטריית הפרופילים תתבצע באמצעות הטיית מדף קבועה. הטיית מדף למעשה משנה את העקמון הממוצע ובכך מניבה חוסר סימטריה מובנה במייצבים. בנוסף, שיטת הייצור עבור מייצבים כאלה היא אינה מסובכת ואף קיימת מראש במקרה של טיל מנוהג. נוסף על כך, בגרסה הקיימת בידנו של MISDAT קיימת שגיאה ידועה בהערכת כוח הגרר בעת שימוש בפרופילים שאינם סימטריים בזרימה על קולית, לכן לא נתייחס לתוספת הגרר בשלב זה.

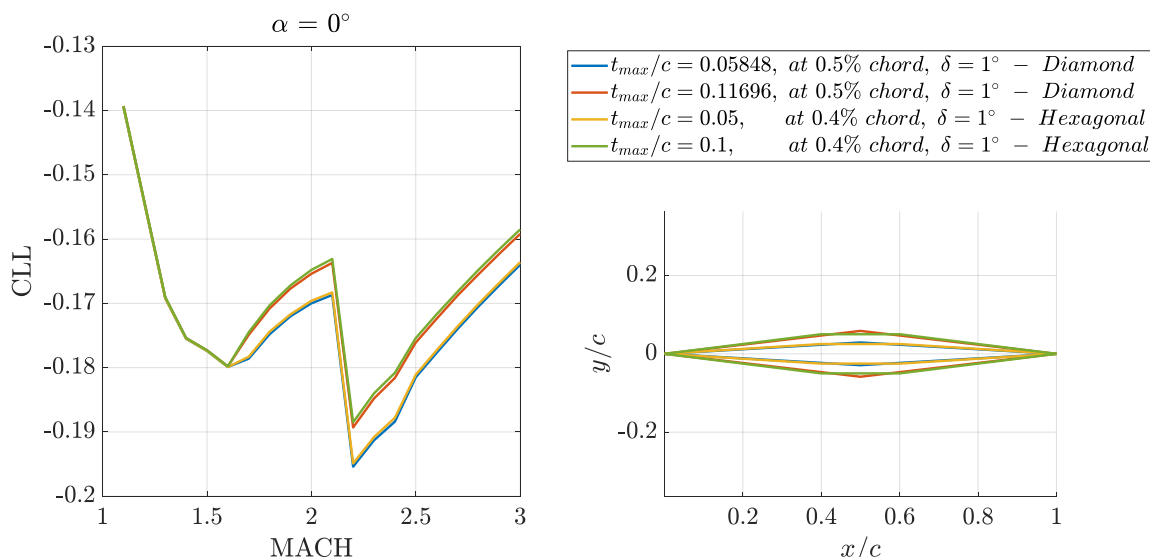
תוצאות

בפרק זה נסקרו תוצאות ההשוואות שנעשו באמצעות השיטות שהוצגו קודם לכן. במהלך הצגת התוצאות ניתן דגש למומנט הגלגול המתקבל מתוך התצורה הנבחנת. כאמור, נבחנה ההשפעה של המייצבים השונים גם על ביצועי התצורה, במטרה לא לפגוע בגרר וביציבות הכלי.

פרופילים סימטריים

בחלק זה נדון בתוצאות עבור תצורות בעלות פרופילים סימטריים, כאשר מגנון ייצור מומנט הגלגול נובע מהטיית המייצבים. נבחנו תצורת יהלום פשוטה ותצורת משושה כאשר ניתן דגש על מומנט אינרציה לחתך (כפי שהוצג בפרק 'פרופילים סימטריים') בזוויות הטיה $\delta \in [-2^\circ, 2^\circ]$.

תחילה נציג את מומנט הגלגול המתקבל עבור ארבעה פרופילים, זוג פרופילי יהלום ומשושה בעלי מנת עובי שונה. מומנט הגלגול מוצג כתלות במספר מאך (הרלוונטיים לכל המעוף) בזווית התקפה אפס כאשר זווית ההטיה של כל המייצבים המוצגים הינה זהה ושווה למעלה אחת. מקדם הגלגול המתקבל במקרה כזה:

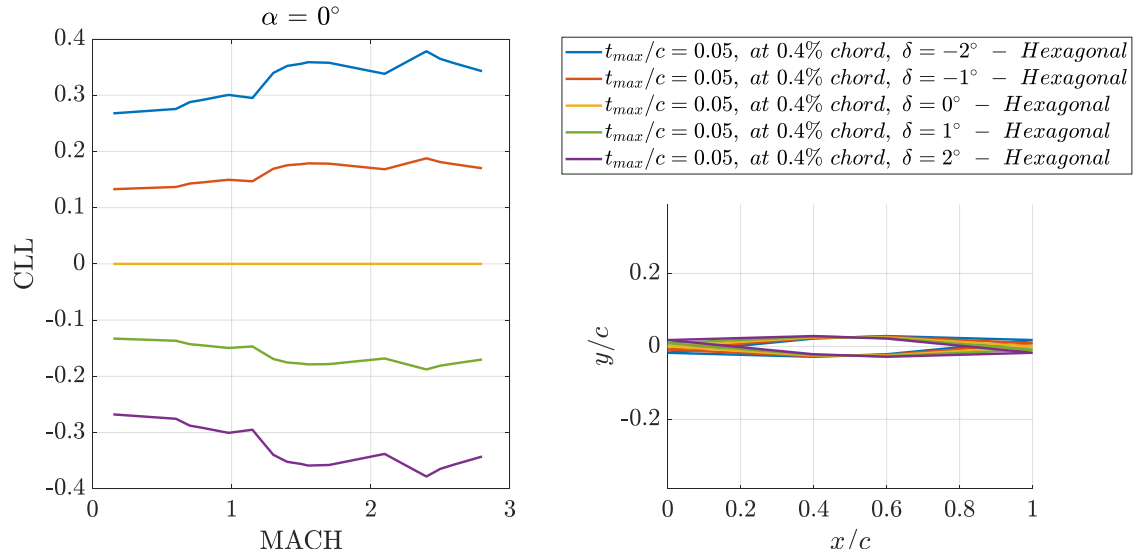


איור 3 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים

ניתן לראות כי אין לצורת הפרופיל ישנה השפעה מינורית על מקדם הגלגול המתקבל, אך לעובי ישנה השפעה גדולה יחסית בתחום העל קולי. בנוסף, נראה כי מומנט הגלגול המתקבל נע סביב ערכים אופייניים של 0.15~0.2 (לכל המעוף, בערכים מוחלטים). לאור התוצאות המוצגות מעלה, נתייחס למומנטי הגלגול המתפתחים מהטיית מייצבים משושים בלבד. כאשר בהמשך נדון בהבדלים ובהשפעות הפרופיל והעובי שלו על הביצועים הכוללים של התצורה. בנוסף, מתקבלת 'קפיצה' בערכים המוצגים באזור מאך 2.2 אשר נובעת (ככל הנראה) משגיאה באינטרפולציה הערכים הרלוונטים מתוך תוכנת ה-MISDAT.

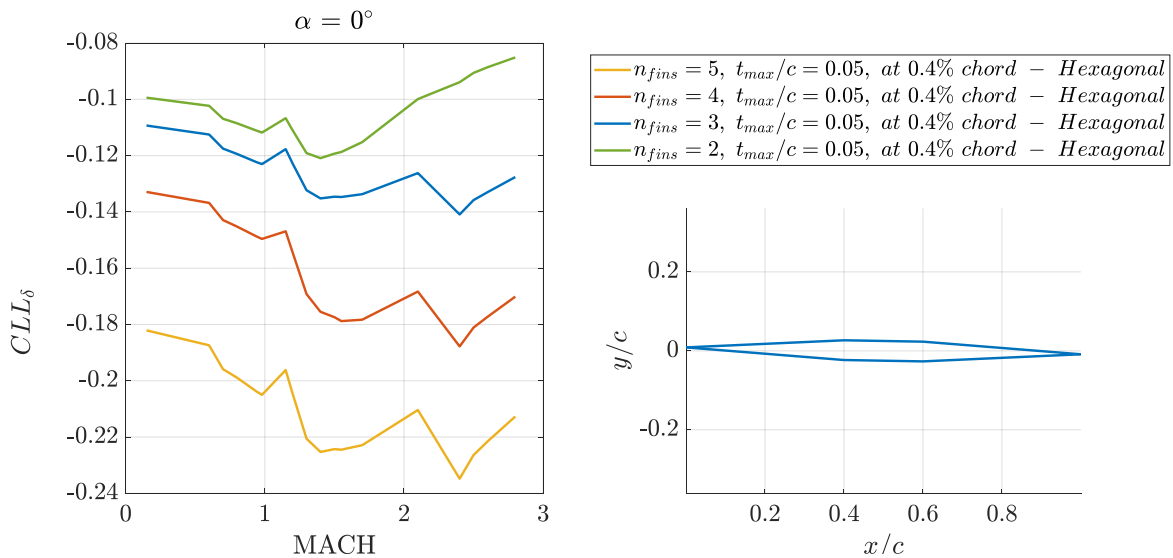
כידוע מתוך הספרות ([1]) לעובי המייצבים ישנה השפעה חזקה על הגרר המתקבל מהן ($C_d \propto t^2$). לכן, בנוסף למסקנה שהוזכרה, נבחר להמשיך להתבונן בעובי נומינלי של 5% מיתר עבור ההשוואות בפרופילים סימטריים. נתבונן במקדם הגלגול המתקבל עבור כנף משושה סימטרית בזוויות הטיה שונות כתלות במספר מאך:

Averaging A-Symmetric Thrust - Slow Rotation Examination



איור 4 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת זווית ההטיה בפרופיל משושה סימטרי

ניתן לראות מתוך איור 4 המתקבל כמצופה, ישנה השפעה רבה של זווית הטיית המייצבים על מקדם מומנט הגלגול האווירודינמי המתקבל. נציין רק שכיווני המומנט הינם כמוגדרים בתוכנה (הטיה חיובית של כלל המייצבים היא כזו המייצרת מומנט גלגול שלילי). יתר על כן, ניתן להבחין בליניאריות בתחום הזוויות שנבדק באיור הנ"ל, כפי שנאמר קודם בזוויות הטיה נמוכות העל קולית הינה כמעט לחלוטין ליניארית ובזרימה תת קולית המערבולות אינן יוצרות אינטראקציה עם המייצבים הנוספים והגוף. נמשיך להראות את תקפות הנחת הליניאריות של מקדם הגלגול לפי מספר המייצבים על תצורה מסוימת:



איור 5 – שיפוע מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת כמות מייצבים

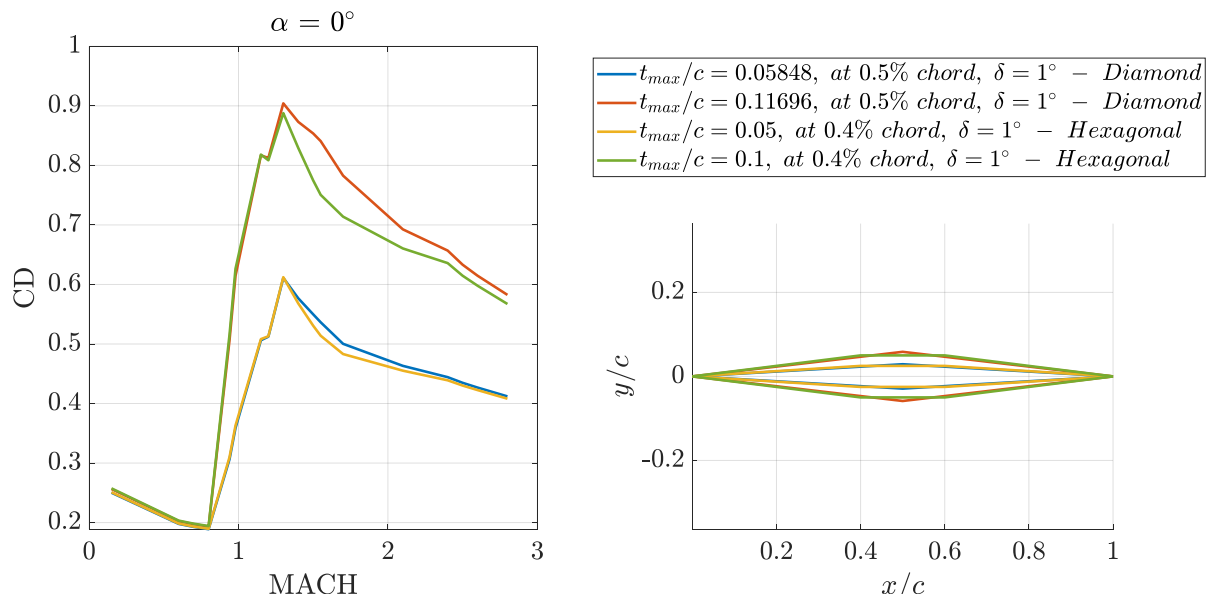
מתוך איור 5 המוצג מעלה, ניתן לראות כי הנחת הליניאריות מתקיימת כמעט לחלוטין גם עבור מספר מייצבים שונה, במילים אחרות, הגוף אינו תורם לגלגול התצורה. מתקבלת סטייה מליניאריות מקדם הגלגול עבור זוג מייצבים, את תוצאה זו אפשר להסביר מתוך העובדה כי התוכנה מבוססת על מאגרי ביצועי תצורות שונות, ומאחר ותצורה בעלת זוג מייצבים הינה קונבנציונלית ניתן להניח כי קיים יותר מידע עבורה. כלומר, מאחר והתוכנה מבצעת שכלול של הביצועים הקיימים במאגר לקבלת ביצועי התצורה עלולות להיות סטיות באזורים מסוימים ובזוויות הטיה גדולות.

באופן כללי, טענה הליניאריות הן במספר המייצבים והן בזווית ההטיה שלהם תקפה. לכן, נוכל לאפיין מקדם גלגול של תצורה מסוימת לפי:

$$C_L = n_{fins} \cdot C_{L\delta} \cdot \delta$$

Single Fin

לשם שלמות ההשוואה וסקירת שינוי מאפייני הפרופילים, יש לתת התייחסות לשינוי בגרר ובמרווח היציבות של התצורה בעבור פרופילי המייצבים המוצגים מעלה. תחילה נציג את ההשפעה של עובי הפרופיל על הגרר מאחר וזהו הפרמטר הקריטי ביותר לתצורה הקיימת בהתחשב בהדגמת יכולת התנעת מנוע המגח. נציג השוואה בין זוג עוביים ובין זוג הפרופילים (תוך שמירה על זווית הטייתם) בזווית התקפה אפס בכל תחום מספרי מאך עבור המעוף הרלוונטי:



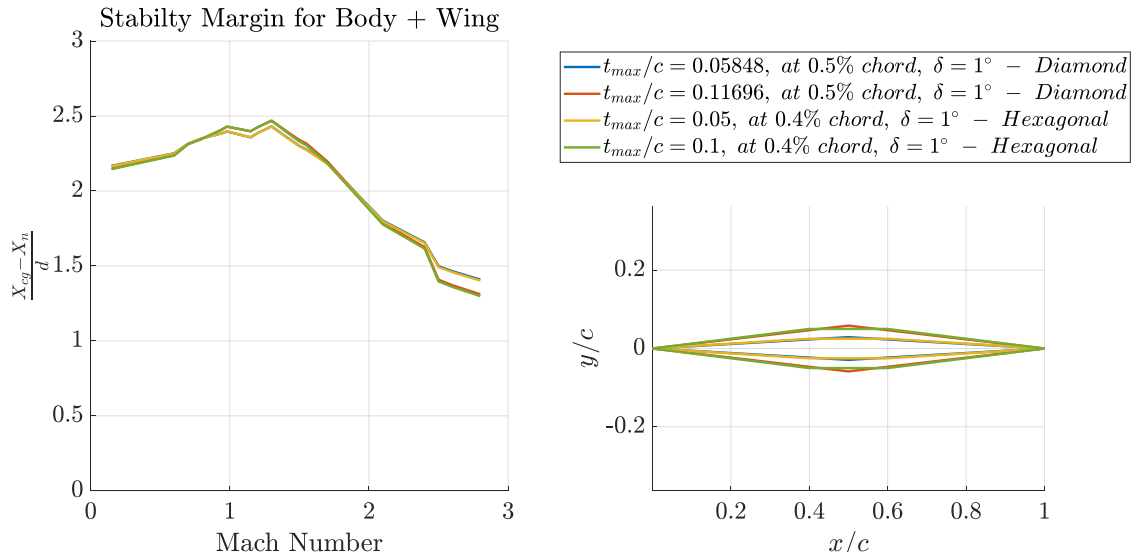
איור 6 – מקדם גרר כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים

מתוך איור 6 המוצג ניתן להבחין בהשפעה הגדולה של עובי המייצבים על התצורה כולה. לכן, משיקולי ביצועים וכן שיקולים חוזרים כפי שפורטו בפרק 'סכמת עבודה', נבחר להמשיך להתבונן בעובי נומינלי של 5% מיתר עבור ההשוואות בפרופילים סימטריים.

בנוסף, מהגרפים הללו נראה כי הגרר המתקבל עבור פרופילי יהלום הינו במעט גבוה יותר בתחום העל קולי ביחס לפרופיל משושה. הדבר מאופיין עם גודל זוויות סיבוב הזרימה על הפרופיל ובפרופיל משושה כמות הסיבובים גדלה וכן גודל כל סיבוב זרימה קטן בהתאמה. הטענה הזאת מחוזקת מאחר וההבדלים בין הפרופילים מחרף עם הגדלת העובי, שכן סיבובי הזרימה הינם גדולים יותר ומשמעותיים בקביעת גרר התצורה.

בנוסף, נציג את ההשפעה של שינוי פרופילי המייצבים על יציבות התצורה:

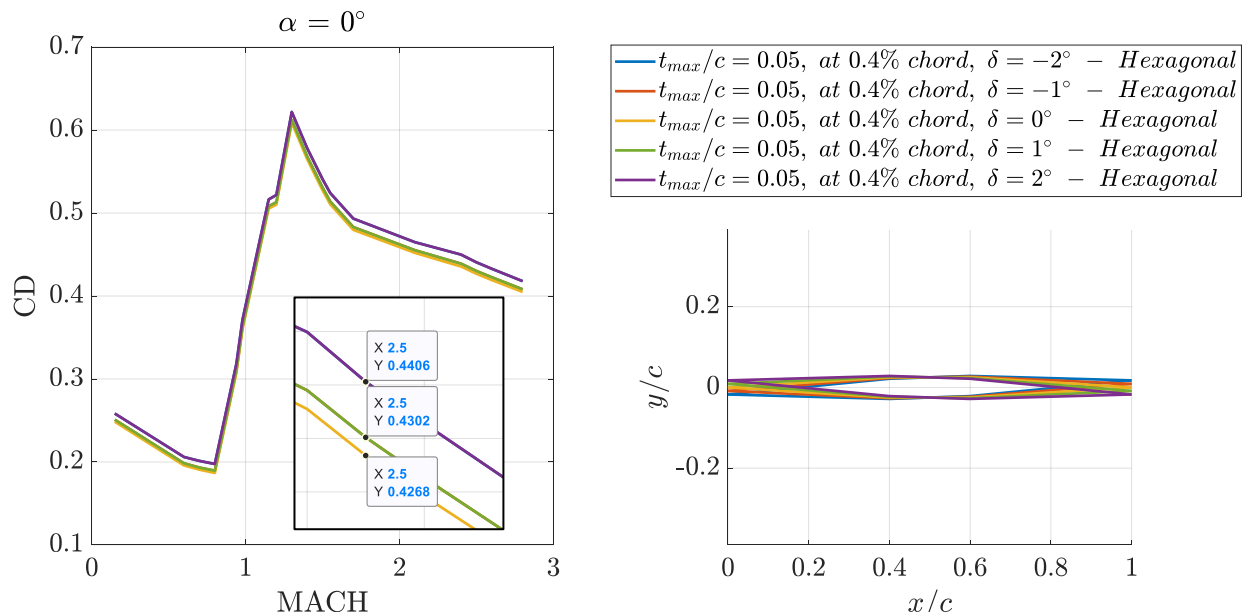
Averaging A-Symmetric Thrust - Slow Rotation Examination



איור 7 – מרווח יציבות סטטית כנגד מאך, השפעת עובי וצורת פרופילים סימטריים

ניתן לראות מתוך איור 7 כי ההשפעה הן של שינוי הפרופיל, והן של שינוי העובי הינה מזערית על יציבות התצורה. לכן, לא נתייחס ליציבות התצורה בהשוואות בין פרופילים.

לשם המשך בחינת המייצבים הסימטריים נמשיך להתבונן בפרופיל משושה בעובי הנומינלי (באופן זהה בעת בחינת מומנטי הגלגול), כאשר נבחן את מקדם הגרר המתקבל עבור זוויות הטיה שונות בזווית התקפה אפס על טווח מספרי מאך, כאשר מנת העובי תהיה 5%:

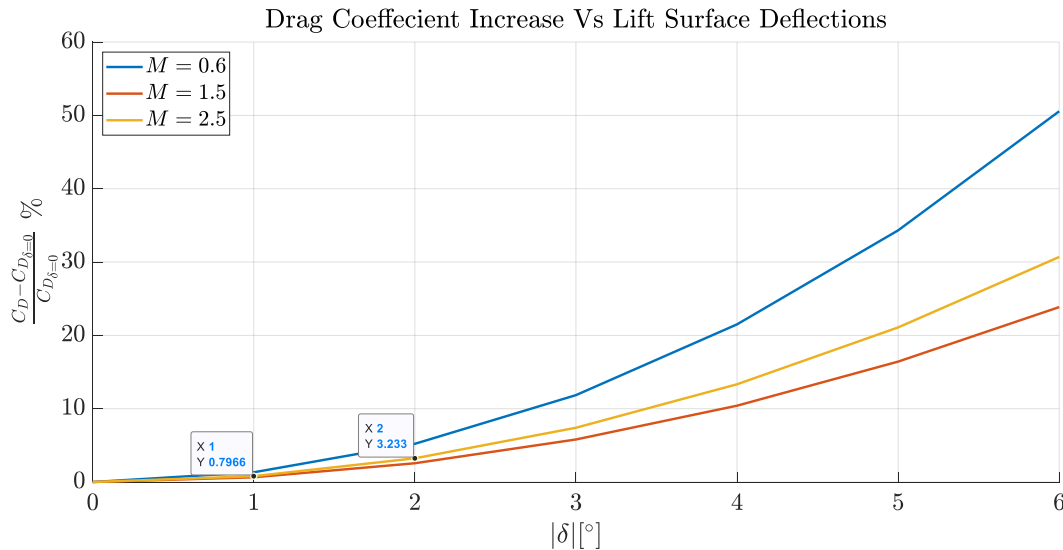


איור 8 – מקדם גרר כנגד מאך, השפעת זווית ההטיה בפרופיל משושה סימטרי

נראה מאיור 8 כי גרר התצורה כולה אינו מושפע באופן משמעותי מהטיה קבועה של המייצבים ואילו הטיה בזוויות בעלות ערך מוחלט זהה מניבות עלייה זהה בגרר. כאשר נאמוד את אחוזי שינוי הגרר כתוצאה מהטיית המייצבים בשיוט, נקבל:

$$\Delta C_{D_{\delta=1^\circ}} = 0.79\% \quad ; \quad \Delta C_{D_{\delta=2^\circ}} = 3.23\%$$

אפשר לחזור על התהליך למספר הטיות גדול יותר בכמה מתנאי הטיסה ובכך ליצור דיאגרמת 'תשלום' בגרר לעומת זווית הטיית המייצבים בכמה מספרי מאך שונים:



איור 9 – עליה יחסית במקדם גרר כנגד זווית הטייה, פרופיל משושה סימטרי

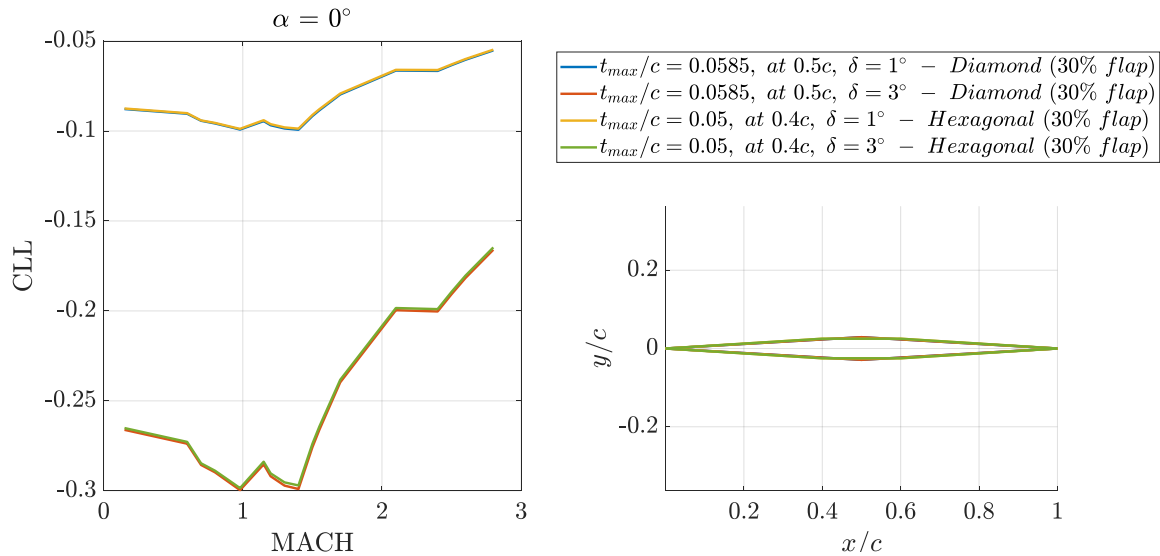
מתוך איור 9 נראה (כצפוי) כי עבור זוויות הטיה גדולות התוספת למקדם הגרר גדלה גם כן. בנוסף, עבור זרימה תת קולית תוספת הגרר נראית משמעותית יותר מאשר בזרימה על קולית. יתר על כן, נראה כי במאך השיט ($M = 2.5$) עבור הטיות קטנות העלייה בגרר איננה גבוהה. כלומר, זוהי נקודת חוזקה לשיטה זו עבור סחרור התצורה.

פרופילים שאינם סימטריים

בחלק זה נדון בתוצאות עבור תצורות בעלות פרופילים שאינם סימטריים, כאשר מגנון ייצור מומנט הגלגול נובע מעילוי בזווית הטיה והתקפה אפס עבור כל אחד מהפרופילים. כפי שהוזכר, נשתמש בעיקרון הליניאריות של מקדם המומנט (ומקדם העילוי) עבור מספר שונה של מייצבים, ובכך נוכל להשתמש בMISDAT על מנת להעריך את מקדם הגלגול רק בתחום התת קולי, ואילו עבור התחום העל קולי נעריך את הביצועים באמצעות שיטות חיזוי אנליטיות.

נבחר להתמקד בזוג פרופילים להשוואה - פרופיל משולש ופרופיל טרפזי, כאשר מנת העובי לא תשתנה ותשאר זהה לזו המוזכרת בפרק 'פרופילים סימטריים' (5%). בנוסף, מאחר ושבירת הסימטריה מתבצעת באמצעות הטיה קבועה של מדף, נבחר להתמקד בהטיית מדף בזוויות שונות בעוד שהמדף מוצב ב-30% ממיתר המייצבים. ולאחר מכן נבחנה השפעת אורך המדף.

תחילה, נציג השוואה של מקדמי הגלגול המתקבלים עבור זוג הפרופילים שנבחנו בזווית התקפה אפס בכל תחום מספרי המאך:

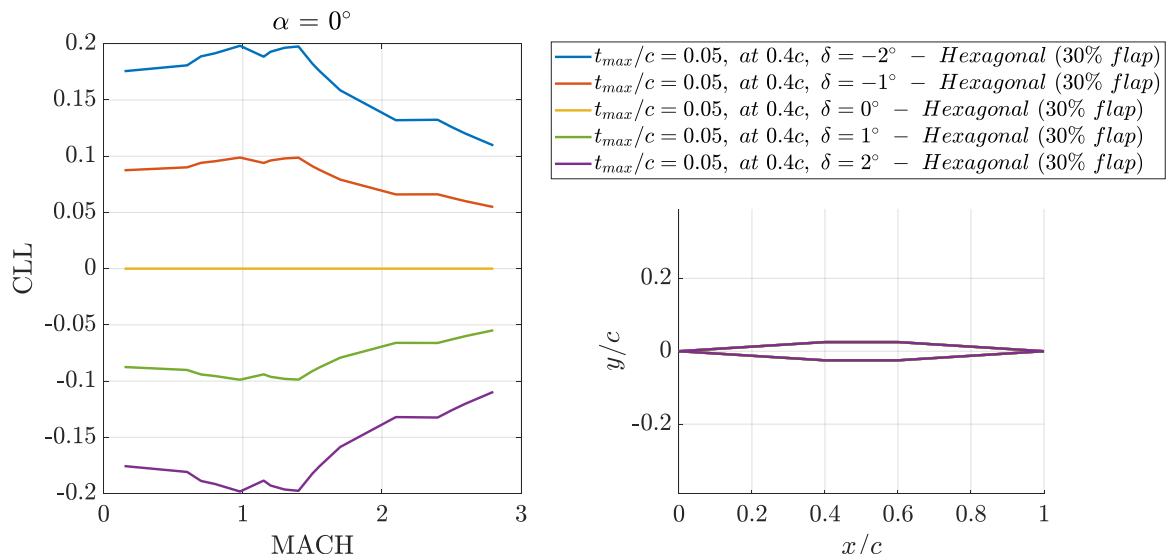


איור 10 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת הטיית מדף וצורת פרופיל

ניתן לראות מתוך איור 10 המוצג כי השפעת צורת הפרופיל על מקדם הגלגול המתקבל הינה זניחה. ניתן להסביר זאת מתוך העובדה שבעת הטיה מדף אחורי בזווית התקפה אפס כל העילוי נובע מההטיה בעוד שהמדף בכל אחד מהמקרים הגיאומטריה המוטת הינה זהה. בנוסף, ניתן לשער כי סכמת החישוב אינה לוקחת בחשבון דקויות שכאלה בחישוב מקדם המומנט המתקבל.

מתוך אינפורמציה בספרות ([2]) בגרסה הקיימת בידנו של MISDAT, קיימת שגיאה ידועה בהערכת כוח הגרר בעת שימוש בפרופילים שאינם סימטריים. לכן, לא נתייחס לתוצאות אלו בסקירה המוצגת בפרק זה.

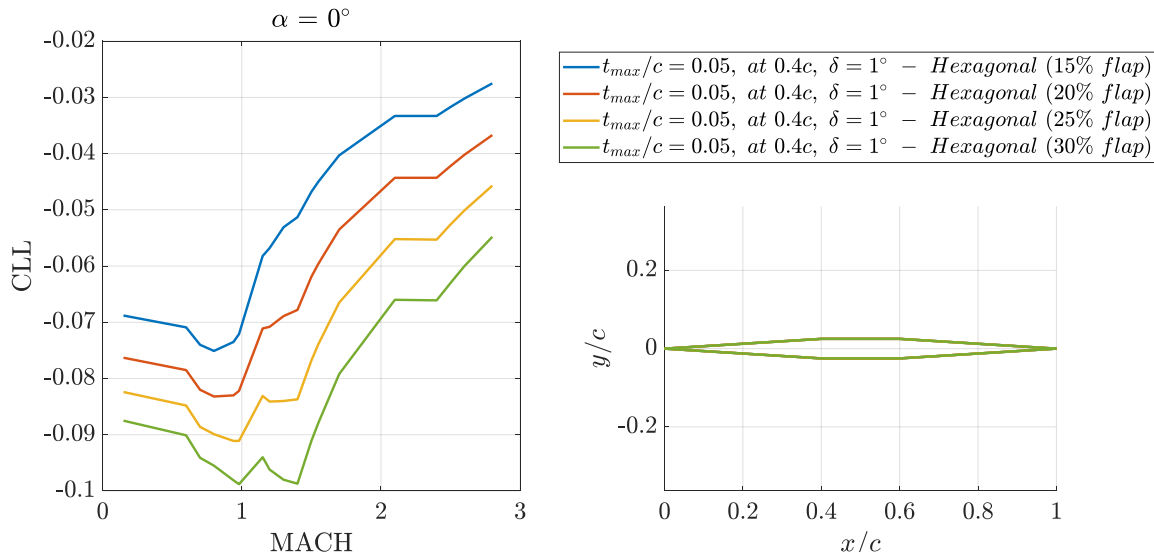
נמשיך להתבונן בפרופיל משושה בעובי הנומינלי, כאשר נבחן את מומנט הגלגול ואת הגרר המתקבל עבור זוויות הטיה שונות בזווית התקפה אפס על מרווח מספרי מאך, כאשר מנת העובי תישאר זהה:



איור 11 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת זווית הטיית מדף בפרופיל משושה

ניתן לראות מתוך איור 11 המתקבל כמצופה, ישנה השפעה רבה של זווית הטיית המייצבים על מקדם מומנט הגלגול האווירודינמי המתקבל. יתר על כן, ניתן להבחין בליניאריות בתחום הזוויות שנבדקו, שכן ההתנהגות דומה לזו הנראית עבור הטיית מייצבים סימטריים.

נוסיף לבדוק את השפעת אורך המדף (יחס מיתר המדף למיתר המייצב) על מומנט הגלגול המתקבל במייצב בעל פרופיל משושה עם מנת עובי נומינלית:



איור 12 – מקדם גלגול כנגד מאך, השפעת אורך המדף בפרופיל משושה

באיור 12 המוצג ניתן לראות את ליניאריות מומנט הגלגול ביחס לשינוי מיתר המדף. בדומה לשאר התופעות שהוזכרו קליניאריות, ניתן להסביר את ליניאריות תופעה זו מתוך זווית הטיה קטנה של המדף בכל אחד מהמקרים.

מייצבים עוטפים

מייצבים עוטפים הינם משפחת מייצבים לתצורת טילים אשר 'עוטפים' את פני הגוף הגלילי המרכזי. סוג מייצבים זה מאז ומתמיד היווה אמצעי ייצוב מבטיח לתצורות המשוגרות מן הקרקע, בשל צורתם העוטפת את גוף התצורה בזמן השיגור. גיאומטריית המייצבים הללו נקבעת מתוך קוטר הגוף ומספר המייצבים הנבחרים, כאשר המוטה המעוקמת הכוללת היא לרוב היקף הגוף.

למרות האטרקטיביות, השימוש בהם הינו מוגבל מחשש המתעורר מתוך התפתחות מומנט גלגול אווירודינמי ייחודי שאינו תמיד צפוי. תחת משטר זרימה תת קולי, הסיבה המרכזית ליצירת מומנט זה היא משיכת קווי הזרם משפת הזרימה של המייצב בכיוון רדיאלי הגוררת יצירת עילוי גם בזווית התקפה אפס. לעומת זאת, כאשר משטר הזרימה הינו בתחום העבר-קולי, מומנט זה קטן עד להפיכת הכיוון שלו.

בשונה מכך (לפי [3]), בזרימה על קולית מתייצב גל הלם מנותק (גל קשת) אל מול שפת ההתקפה של המייצב המגיב אחרת עם המשטח העיליון והתחתון (קמור וקעור בהתאמה) של המייצב. בצד הקעור, גל ההלם יוצר עלייה של לחץ באזור מרכז העקמומיות – אשר הולך וקטן עם העלייה במספר מאך. עבור הצד הקמור, נראה כי יש עלייה יחסית בלחץ ליד החיבור של המייצב עם הגוף אשר מתעצמת עם עלייה במספר מאך. התוצאה מכך היא כוח שקול הפועל ממרכז העקמומיות 'החוצה' הקטן עם מספר מאך.

יש לציין שמומנט גלגול זה קטן עם קיום של פלומת מנוע, מאחר וקווי הזרם 'נדחסים' ובכך לא נוצרת העליה בלחץ בצד הקעור. עבור התצורה המדוברת, פעולת המנוע הכרחית הן בשלב ההאצה והן בשלב השיט, ולכן יש לשער כי אופן פעולת המייצבים הללו, ואיתם מומנט הגלגול, נפגם ([4]). בנוסף, טכניקת הייצור של המייצבים הללו הופכת למורכבת במייצבים בעלי זוויות משיכה גדולות.

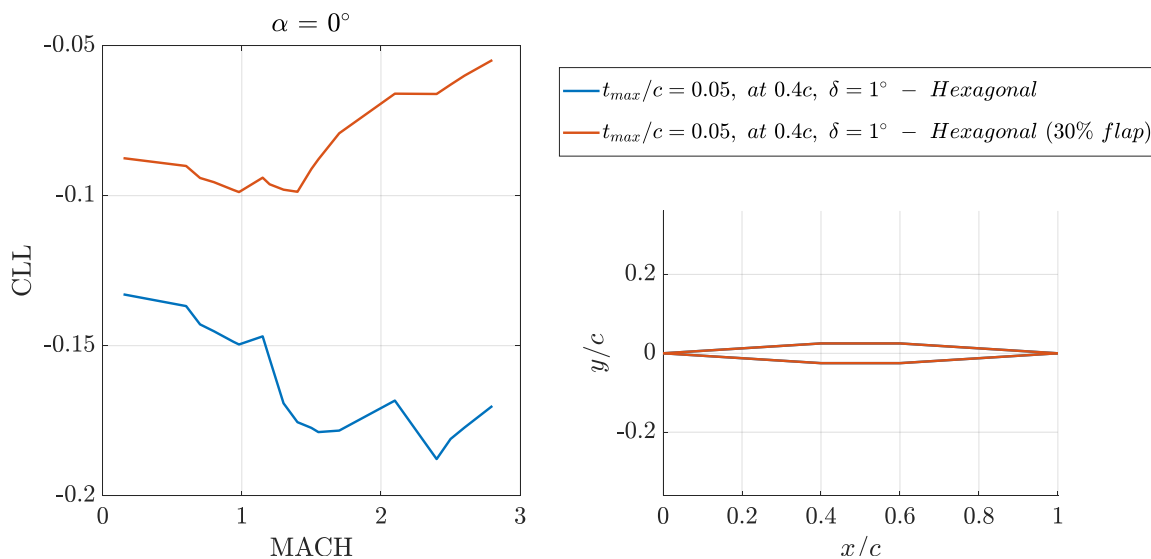
כתוצאה מכך, יש להניח כי שילוב של מייצבים עוטפים מחייב חישובים נוספים בעלי תקפות גבוהה יותר מאלה הנעשים בדוח זה – ועל כן, לא ניתנה התייחסות עבורם.

השוואה

בעת מעוף חופשי של טיל סימטרי בעל מייצבים מוטים או לא סימטריים הנתון לקצב גלגול (בקירוב קבוע) מסוים, פועלים עליו שני מומנטים עיקריים. האחד, התורם לתנועת הגלגול, הוא תוצאה של כוח העילוי מכל אחד מהמייצבים. השני, הפועל מנגד, הינו מומנט ריסון כתוצאה מבניית זוויות התקפה הפוכות בסימן עבור זוג מייצבים נגדיים.

כדי להעריך אילו מן הדרכים ליצירת קצב גלגול קבוע (המפורטות מעלה) מניבה פתרון טוב יותר עבור התצורה שנבחרה, נערוך השוואה בין זוג תצורות נומינליות עבור כל אחת מהשיטות הללו. התצורות שנבחרו להשוואה הינן פרופיל משושה בעל מנת עובי של 5%, כאשר האחד סימטרי ומוטה בזווית של מעלה אחת ביחס לכיוון הגוף ואילו השני בעל מדף ב-30% האחוריים של הפרופיל, שגם הוא מוטה בזווית של מעלה אחת ביחס לכיוון הגוף (ושאר הפרופיל). עבור ההשוואה נבחרו הטיית זהות מאחר וזהו בסיס להשוואה בין פרופיל סימטרי מוטה לפרופיל לא סימטרי ללא הטייה כלל, ועל כן עלינו ליצור קריטריון משלים אשר יהווה קריטריון השוואה מספיק.

תחילה נבחן את מומנט הגלגול הסטטי המתקבל מהמייצבים הללו בזווית התקפה אפס על טווח מספרי המאך:

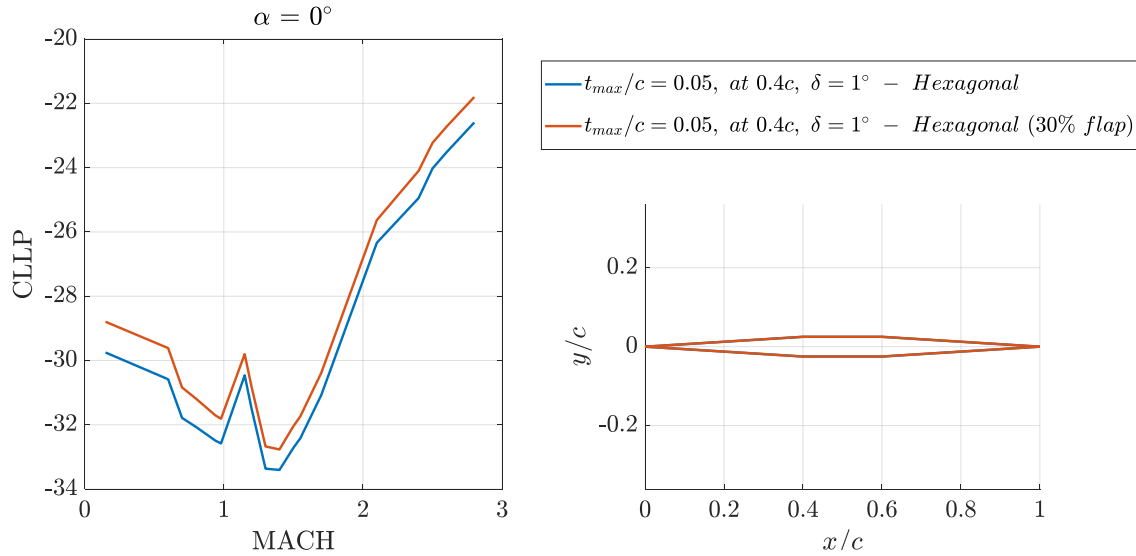


איור 13 – מקדם גלגול כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי

מתוך איור 13 המתקבל, ניתן לראות כי עבור המייצב הסימטרי המוטה מתקבל מומנט גלגול גדול יותר מאשר הפרופיל בו מוצב המדף. שכן ניתן להסביר זאת באמצעות העובדה כי מנגנון יצירת העילוי בזווית התקפה אפס הינו זהה בשני המקרים. אך עבור המדף, העילוי הנוצר בזווית התקפה אפס הינו נמוך יותר וכתוצאה מכך מומנט הגלגול הינו קטן יותר.

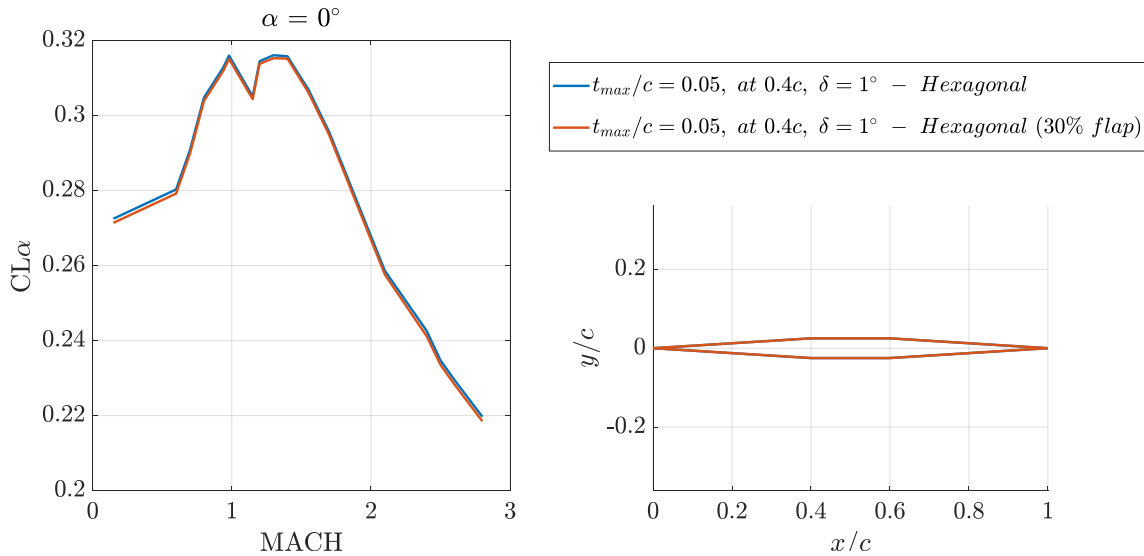
נמשיך בבחינה של מקדם הריסון בגלגול עבור זוג המייצבים השונים. כאשר מקדם הריסון בגלגול מנורמל לפי:

$$C_{L,p} = \frac{1}{qSd} \cdot \frac{\partial L_p}{\partial \left(\frac{pd}{2V}\right)}$$



איור 14 – מקדם ריסון בגלגול כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי

מתוך איור 14 המוצג ניתן לראות כי המקדם הינו די דומה עבור שני המקרים וערכו נע סביב 22~35 כאשר המגמה זהה. מאחר ומקדם ריסון זה בעל קשר ישיר לשינוי מקדם העילוי בזווית ההתקפה, נראה את השינוי בשיפוע קו העילוי בזווית התקפה אפס לטווח מספרי המאך המדובר:



איור 15 – שיפוע קו עילוי כנגד מאך, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי

מאיור 15 ניתן לראות כי בעוד שהשינוי מינורי, הוא קיים. המייצבים בעלי הטיית מונבולוק נראים רגישים יותר במעט לשינוי בזווית התקפה לטווח מספרי המאך הנל. כתוצאה מכך, נראה כי קיים ריסון גבוה יותר לגלגול עבור פרופילים אלו. שכן החישוב עבור תרומת המייצבים למומנט הגלגול המרסן הוא:

$$\mathcal{L}_p = \rho \cdot \frac{pV}{2} \int_{S_{fin}} \left(\frac{dC_L}{d\alpha} \right) y^2 dS$$

קצב גלגול

בעת גלגול של התצורה ניתן לרשום את משוואת הגלגול באופן הבא:

$$I_x \ddot{\phi} = \frac{1}{2} \rho S d V^2 C_L - \frac{1}{2} \rho S d V^2 \left(C_{L,p} \frac{pd}{2V} \right)$$

בזמן מעוף במספר מאך שהוא בקירוב קבוע, ואילו זווית ההתקפה תשמר סביב האפס מתוך היציבות הסטטית של התצורה, לכן ניתן להתייחס אל המקדמים השונים כאלה קבועים לצורך חישוב קצב הגלגול במצב מתמיד. על כן, משוואת הגלגול תראה מהצורה:

$$I_x \ddot{\phi} + K_{damp} \dot{\phi} V = K_{static} V^2$$

בעת מעוף חופשי משוואת התנועה בכיוון ציר הגוף (כאשר נניח הפרעות בעלרוד וסבסוב נמוכות):

$$m \dot{u} = T - \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D \Rightarrow m \dot{V} = T - K_{drag} V^2$$

באופן כללי, ניתן לפתור עבור הגלגול באמצעות פתרון איטרטיבי מלא (שש דרגות חופש) עבור התצורה הכללית. אך לצורכי הערכת קצת הגלגול במצב מתמיד אין זה מחייב. כאשר נייחס את המשוואות הללו למעוף התצורה במצב מתמיד לאחר שלב ההאצה ניתן יהיה לפשט אותן רבות עד להגעה לפתרון עבור קצב הגלגול במצב מתמיד המתקבל. בתור שלב ראשון נציג את החלפת המשתנים לפי המשתנה הבלתי תלוי z , אשר מסמל את המרחק הקרקעי, לפי [5]. עבורו מתקיים:

$$V = \frac{dz}{dt} \Rightarrow \frac{d}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d}{dz} = V \frac{d}{dz}$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = V^2 \frac{d^2}{dz^2} + V \frac{dV}{dz} \frac{d}{dz}$$

לאחר הצבת החלפת המשתנים הזו במשוואת הגלגול:

$$\phi'' + \phi' \left(\frac{V'}{V} + \frac{K_{damp}}{I_x} \right) - \frac{K_{static}}{I_x} = 0 \quad ; \quad [\dots]' = \frac{d[\dots]}{dz}$$

עבור משוואת תנועת הגוף נקבל:

$$\frac{V'}{V} = \frac{1}{m} \left(\frac{T}{V^2} - K_{drag} \right)$$

עבור מנוע מגח אידיאלי (ללא הפסדי לחץ סטגנציה) בעת שמירה על פרמטרי תא הבעירה בעת המעוף, ניתן לרשום ביטוי לדחף כתלות במהירות (כפי שמוצג בנספח 'ביצועי מנוע מגח אידיאלי'):

$$T = \frac{K_{ramjet}}{V^2}$$

לאחר הצבת הקשרים הללו אל משוואת הגלגול, נקבל משוואה מסדר שני בעלת מקדמים קבועים עבור זווית הגלגול, ופתרונה:

$$\phi = B + sz + Ae^{\frac{-K_{static} z}{I_x}}$$

כאשר A, B הינם קבועים הנקבעים לפי תנאי גבול הבעיה (מצב התחלתי ומעוף) ואילו s הינו קצב הגלגול הקבוע של המערכת (ביחידות של מעלות ליחידת מרחק) וערכו:

$$s = \frac{-K_{static}}{K_{damp} + \frac{I_x}{m}(K_{ramjet} - K_{drag})}$$

כלומר, קצב הגלגול הקבוע מתקבל לפי:

$$p_{Steady}^{State} = s \cdot \frac{V \cdot 60}{2\pi} [RPM]$$

בהינתן הקשר המוצג, נוכל להעריך את קצב הגלגול במצב מתמיד עבור שלב השיוט לכל אחת התצורות אותה אנו בוחנים. את החישוב נבצע עבור תחילת השיוט לאחר התנע מנוע המגח, שכן לשלב זה נבחר את הערכים האופייניים הבאים:

$$\begin{aligned} M_{cruise} &= 2.5 \\ \text{Standart SL Conditions} &\Rightarrow K_{ramjet} \cong 0.17 \quad ; \quad I_x = 0.94 [kgm^2] \\ A_{nozzle} &= 0.8 \cdot A_{body} \quad \Rightarrow V_{cruise} = 850 [m/s] \quad ; \quad m = 89 [kg] \\ T_{04}/T_0 &\approx 5 \end{aligned}$$

תחת ההנחות הבאות, קצבי הגלגול המתקבלים עבור הפרופילים בינהם ערכנו את ההשוואה יהיו:

<i>Symmetric (monoblock)</i>	<i>a – Symmetric (flap)</i>
$p_{Steady}^{State} = 2668 [RPM]$	$p_{Steady}^{State} = 960 [RPM]$

הערה – בעוד שניתנה התייחסות גדולה לרכיב הקבוע של מהירות הגלגול המתקבלת, יש לציין כי המצאות של מומנט גלגול קבוע הפועל על התצורה משפיעה גם הוא על מהירות זו. מתוך המשוואות המוצגות נראה כי קיים רכיב דועך לאורך מעוף התצורה התלוי בזמן (ובמרחק, מאחר ותלויים בזמן המעוף). במילים אחרות, מהירות הגלגול המתפתחת כתלות במרחק הינה מהצורה:

$$p = p_{Steady}^{State} + \frac{-K_{static} \cdot A \cdot V}{I_x} e^{\frac{-K_{static_z}}{I_x}}$$

בשלב זה לא ניתן לקבוע האם רכיב זה מגדיל את מהירות הגלגול או מקטין אותה. כאשר הקובע הינו הפרמטר A שתלוי בתנאי התחלת הבעיה ואינו ניתן להערכה באמצעות כלים אנליטיים או סמי-אמפיריים (בדומה לאלה שנעשה בהם שימוש בדוח זה). במילים אחרות, קצב הגלגול המתפתח הוא איננו קבוע וכדי להעריכו בצורה מדויקת יותר עלינו להתחשב גם בהסטוריית התנועה, ולשם כך שימוש בסימולציה מלאה הינו הכרחי.

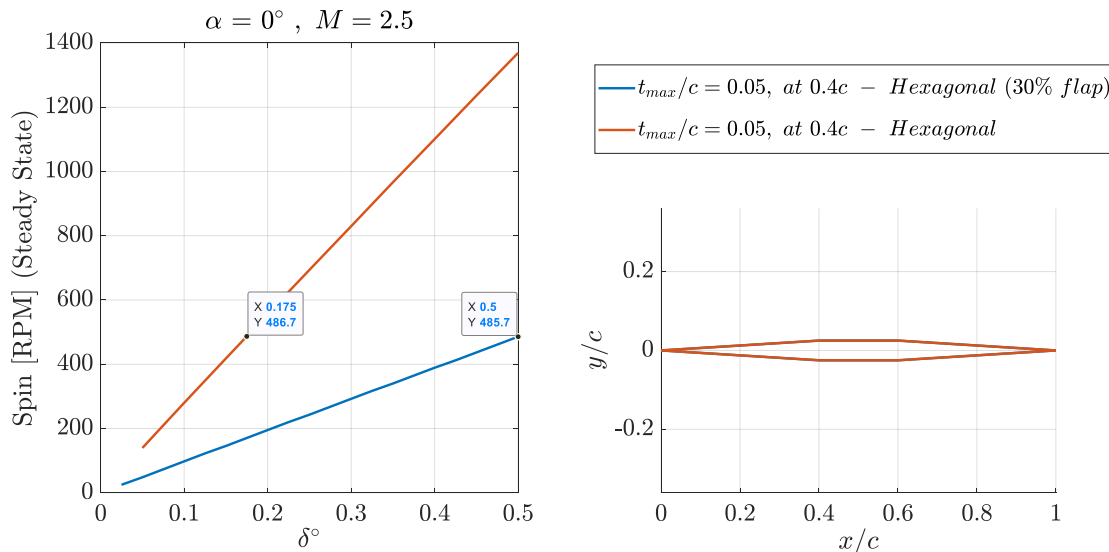
במידה ורכיב זה מגדיל את מהירות הגלגול המתקבלת אל מעבר למהירות מסוימת אשר גוררת הרעה בביצועי התצורה, כגון גרר מוגבר מהמייצבים או חוסר יציבות, יש לשקול מחדש את שיטה זו למיצוע אי ציריות בדחף.

גדלים אופייניים

מקובל כי עבור מנוע בגודל כזה, מתוך המידע שהתקבל מהמזמין, סטייה דחף אפשרית נעה בין שלושה לחמישה מילי-ראדיאן מציר הסימטריה של התצורה. שכן, מיצוע סטייה זו מתאפיינת לרוב עם קצב סיבוב נמוך בהרבה מאשר זה שקיבלנו עבור זוג התצורות הנתונות להשוואה. שכן הערך האופייני של סיבוב הינו באזור עשרות בודדות לשנייה, כלומר בערך 500 סיבובים לדקה.

מעל לקצבי סיבוב אלה, התצורה נתונה לדינמיקה ולנחות שונים מאשר תצורה אווירודינמית 'קלאסית' וכתוצאה מכך עלולה להגרם הרעה בביצועים כגון גרר מוגבר מהמייצבים או חוסר יציבות. לכן, נציע למצע אי ציריות דחף בעזרת זוויות הטיה קטנות יותר.

למשל, כדי להתקרב יותר אל ערכים אופייניים אלה, נציע הטיית נמוכות יותר. עבורן:



איור 16 – קצב גלגול במצד מתמיד כנגד זווית הטיה, השוואה בין פרופיל סימטרי ללא סימטרי

נראה כי עבור הטיה של חצי מעלה ניתן להגיע לקצב גלגול מספיק עבור הטיית מדף באורך שלושים אחוז ממיתר הפרופיל. לעומת זאת, ניכר כי על מנת להגיע לאותו קצב גלגול באמצעות הטיה בצורת מונבולוק, יש להטות בזווית שהיא די קטנה. בעוד שכשמדובר בהטיית קטנות בסדרי הגודל הללו, זווית ההטיה רגישה רבות לשגיאות בהתקנה.

מתוך האיור המוצג והדיון המוביל אליו, ניתן להסיק כי האופציה ה'ריאלית' ביותר הינה לבחור בפרופיל שאינו סימטרי בעל שבירת סימטריה קלה יחסית (באזור 30% מיתר). בכך, באמצעות הטיה קטנה אך ישימה על סך חצי מעלה ניתן להגיע לקצב סיבוב מספיק למיצוע אי ציריות דחף המפורטת מעלה ובו בזמן לא לפגוע ביציבות התצורה.

יש לציין כי בעת דיוק בהטיית המייצבים ניתן גם להגיע לתוצאה זאת באמצעות הטיה ריאלית של 0.2 מעלות בצורת מונבולוק. אך מאחר והמייצבים הקיימים הינם די גדולים (כמפורט בפרק 'התצורה הנבחרת'), לא ניתן באמת להבטיח דיוק זה לחלוטין (הטיה זו מסתכמת בהטיה של שני מילימטרים בקצה כל מייצב). על כן, הטיה אחידה של המייצבים איננה עדיפה במקרה זה. יש לשקול שילוב של פחות מייצבים בהטיה זו על מנת להגדיל את זווית ההטיה אל טווח ישים או לחילופין לבחור בשיטה אחרת.

סיכום

בדוח זה מוצגות דרכים ליצירת קצב גלגול מתמיד בשיט של מנוע מגח נזלי על-מנת למצע השפעות סטיית דחף אפשרית. כחלק מהדיון, נבחנו שתי שיטות ליצירת מומנט גלגול וכיוצא בזאת קצב גלגול במצב מתמיד. זוג השיטות מנצלות יצירת עילוי על כל מיצב בזווית התקפה אפס, האחת באמצעות הטיה של המייצבים ביחס לגוף ('מונובלוק') ואילו השנייה באמצעות שימוש בפרופיל שאינו סימטרי – בצורת הטיה מדף אחורי. יתר על כן, נסקר הנושא של שימוש במייצבים עוטפים, אך מאחר ולא ניתן לבצע עבודה אנליטית משמעותית לתצורה בעלת פלומת מנוע, נושא זה לא קיבל התייחסות נרחבת. בנוסף, מוצגים הממצאים עבור זוג השיטות שנבחנו תוך דגש משני לביצועי התצורה – מקדם גרר ויציבות.

זוג השיטות המוזכרות לעיל, יושמו אל מול שני סוגי פרופילים למייצבי התצורה, יהלום ומשושה. בנוסף, נבחנו השפעות של מנת העובי על הגלגול והן על ביצועי התצורה ככלל. מתוך התוצאות שהתקבלו נראה כי אין הבדל ניכר במומנט הגלגול בין צורות הפרופילים, אך קיים הבדל בגרר לטובת פרופיל המשושה. לכן, באופן כללי נמליץ להשתמש בפרופיל המשושה המתואר בדוח זה.

מתוך התוצאות שהתקבלו, בטווח הטיית זוויות קטנות ניתן להתייחס לאווירודינמיקה כלינארית לחלוטין. לכן, ניתן להתייחס למומנט הגלגול המתקבל בתצורה מסוימת לפי שיפוע מומנט הגלגול המתקבל עבור מייצב אחד. בכך ניתן להעריך את מומנט הגלגול של התצורה כולה מתוך אפיון מייצב יחיד. תוצאה זו מהווה ביסוס לשימוש בכלי חישובי (CFD) על מנת להעריך את מומנט וקצב הגלגול המתקבל.

קצב הגלגול חושב לפי משוואת מומנטים סביב ציר הגלגול, כאשר הונחו מספר הנחות מקלות ומודל מנוע משוער. כאשר בשילוב עם משוואת התנע בכיוון המעוף התקבל מודל לחישוב זווית הגלגול המתפתחת לאורך המסלול וכיוצא בזאת את קצב הגלגול במצב מתמיד. תוך התחשבות בגדלים אופייניים למיצוע סטיות דחף אפשריות, התקבלו זוג דרכים ליצירת קצב גלגול קבוע מתאים – בערך 500 סיבובים לדקה (פחות מעשרה סיבובים לשנייה):

- הטיה של 0.2 מעלות עבור כל ארבעת המייצבים בעלי פרופיל משושה סימטרי עם מנת עובי של 5%.
- הטיה של 0.5 מעלות עבור מדף ב-30% האחוריים של ארבעת המייצבים (פרופיל משושה מנת עובי 5%).

בעוד שהטיות אלה משפיעות מעט מאוד על גרר התצורה בשיט (~1%) וכלל לא על היציבות האורכית המתקבלת, יש לציין כי לא התבצעה סקירה של הטיית חלק מהמייצבים על מנת להפחית את תוספת הגרר.

עבודה להמשך

הממצאים העולים מדוח זה מהווים בסיס להמשך סקירת שיטות למיצוע סטיית דחף אפשרית במנוע מגח נזלי עבור התצורה שנבחרה. על חלק ניכר מהמשך העבודה לכלול אימות של הממצאים בדוח זה על ידי ניסויי מנהרה עבור קצה הגלגול המתקבל, וכן בחינה של מייצבים שאינם סימטריים (מבלי הטיית מדף). נוסף על כך, ניסויים אלה יעניקו הערכה טובה יותר לתוספת הגרר המתקבלת בעת הטיה המייצבים השונים אשר הכרחית להמשך הפרויקט.

נציין כי ניתן במקביל לבצע חישובי זרימה נומריים על מנת להעריך הן את מומנטי הגלגול עבור פרופילי מייצבים שונים והן את קצבי הגלגול המתקבלים בהתאם. בעוד שסדרת החישובים המרכזית תכלול את צורות המייצבים שנסקרו בדוח זה ואף מייצבים נוספים. במקרה הצורך, סדרת חישובים נוספת תכלול הערכת ביצועי מייצבים עוטפים עבור התצורה בעת פעולת מנוע בשיט תוך דגש הן על קצב הגלגול והן על תוספת הגרר. כמו כן, פלטפורמות החישובים הללו עשויות לכלול חישובי CFD ואף חישובי U/VLM .

בנוסף, חלק מהעבודה בהמשך יכולה לכלול שיטות נוספות ליצירת גלגול בזוויות התקפה אפס, כגון שימוש באלמנט המגיע מתוך אווירודינמיקה של מכונות מרוץ – *Gurney flap*. שיטה זו מספקת הרחבה לשימוש במייצבים שאינם סימטריים תוך התקנת 'מכשול' לזרימה בשפת הזרימה אשר מטה את הזרימה (לרוב תת-קולית) ויוצרת עילוי ומומנט גלגול (בתקווה, עבור טיל משייט במהירות על-קולית).

לבסוף, יש לתקף את שיטת הפחתת השפעות סטיות דחף אפשריות זו באמצעות סימולציית מעוף (3DOF, 6DOF).

מקורות

- [1] A. Ferri, "Elements of Aerodynamics of Supersonic Flows." Dover Phoenix Editions, 2005.
- [2] C. Rosema, J. Doyle, L. Auman, M. Underwood, and W. Blake, "MISSILE DATCOM User 's Manual," 2011.
- [3] B. L. Wilks, "Aerodynamics of Wraparound Fins in Supersonic Flow," no. A, p. 62, 2006.
- [4] A. SEGNER and B. BAR-HAIM, "Aerodynamics of wraparound fins," *J. Spacecr. Rockets*, vol. 20, no. 4, pp. 339–345, 2008.
- [5] R. Boltz and J. D. Nicolaides, "A Method of Determining Some Aerodynamic Coefficients from Supersonic Free-Flight Tests of a Rolling Missile," *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 17, no. 10, pp. 609–621, 1950.

נספחים

ביצועי מנוע מגח אידיאלי

עבור מנוע מגח אידיאלי המתואר ב'נספח 1' ניתן לרשום את ביטוי עבור הדחף מתוך שימור תנע באופן הבא:

$$F_{net} = q(V_4 - V_0) \quad ; \quad q = \frac{mass}{flow} = \rho_4 A_4 V_4$$

מתוך שימור אנרגיה בנחיר הפליטה האידיאלי, ומקשרים אזנטרופיים:

$$\frac{V_4^2}{2} = C_p T_{03} \left(1 - \frac{T_4}{T_{03}}\right) = C_p T_{03} \left(1 - \frac{T_4}{T_{04}}\right) = C_p T_{03} \left(1 - \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_4^2\right)^{-1}\right)$$

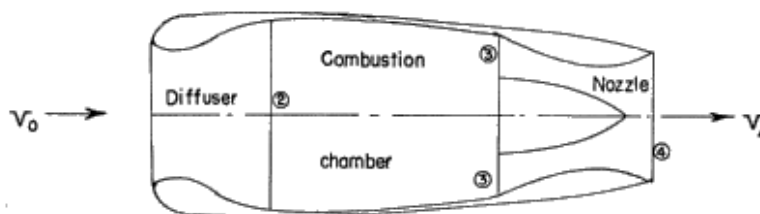
ואילו עבור מנוע מגח אידיאלי, ללא הפסדים בלחץ הסטגנציה התא הבעירה, מתקיים, $M_4 = M_0$. ולכן, ניתן לרשום את הקשר בין המהירויות באופן הבא:

$$\frac{V_4}{V_0} = \sqrt{\frac{T_{04}}{T_0}}$$

מכאן הביטוי עבור הכוח יהיה:

$$F_{net} = \gamma M_0^2 A_4 p_0 \left(1 - \sqrt{\frac{T_0}{T_{04}}}\right) \Rightarrow F_{net} = K_{ramjet} V_0^2$$

בעוד שמספר תנאי הסביבה בשיוט אינם משתנים הרבה, ניתן להניח כי K_{ramjet} קבוע.



נספח 1 – סכמת מנוע מגח אידיאלי