

דו"ח מסכם – פרויקט מחקר

כונס דו מימדי למנוע מגח

דור גונדה*

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

תקציר

מחקר זה עוסק בבחינת הזרימה בתוך כונס דו – מימדי למנועי מגח. במסגרת המחקר, בוצע סקר ספרות בנושא תכן כונסים דו מימדיים, כולל בעיות של אי-התנעה של הכונס במהירויות על קוליות. כן בוצע סקר ולמידה של נושא שיטת הקרקטריסטיקות לתכנון נחירים על קוליים ביחד עם אופן יישום השיטה.

העבודה מתרכזת בחקר ותכן כונס אויר דו – מימדי עם גיאומטריה משתנה, למנוע מגח עבור טיסה במאך 2.4. נבחנה אפשרות של סגירת שפת הכונס, בשלב המאיץ, בכדי להקטין את הגרר בזמן ההאצה. תוכננה גיאומטריית הארכה לכונס שתבטיח קיום גל הים משופע מחוץ לשפתי הכונס במאך העבודה הרצוי ובמספרי מאך עם סטייה של כ – 10% מערך מספר המאך בנקודת העבודה.

תוכננה תצורה המקיימת את הדרישות שהתקבלו מחטיבת מנור ברפאל, בנוגע לספיקת האויר הנדרשת על ידי המנוע, בנוסף לקיום תנאים גיאומטריים להפחתת הגרר על הטיל בשלב ההאצה.

תוכן עניינים

| | |
|----|--------------------|
| 1 | תקציר |
| 2 | רשימת איורים |
| 2 | רשימת סימנים |
| 3 | מבוא |
| 4 | סקר ספרות |
| 5 | שיטת הקרקטריסטיקות |
| 8 | תהליך תכן הכונס |
| 13 | התצורה הנבחרת |
| 15 | סיכום |
| 15 | סימוכין |

רשימת איורים

- איור 1- טיל ה - BrahMos. מונע באמצעות מג"ח אקסיסימטרי 3
- איור 2 - טיל ה - Meteor. מונע באמצעות מג"ח דו מימדי 3
- איור 3 - הדגמה של מערך גלי הלים משופעים וגלי דחיסה, סימוכין [1] 4
- איור 4 - דגם המנהרה עימו אומתו חישובי ה CFD, סימוכין [2] 4
- איור 5 - קווי התפשטות בחלק המתבדר של נחיר על קולי 6
- איור 6 - מבט מקורב על מספר גלי התפשטות מצומצם 6
- איור 7 - כונס אקסיסימטרי במצב עבודה 8
- איור 8 - משמאל, שטח הפרש הקונוסים. מימין, שטח החתך האפקטיבי מוצג על המישור 9
- איור 9 - תקריב של גיאומטריית הכונס האקסיסיטרי 9
- איור 10 - פילוג שטח החתך האפקטיבי לאורך הכונס 10
- איור 11 - כונס דו מימדי במצב עבודה 10
- איור 12 - שרטוט CAD 3D של הכונס הדו מימדי במצב האצה 11
- איור 13 - שרטוט CAD 3D של הכונס הדו מימדי במצב עבודה 11
- איור 14 - זווית הגל כפונקציה של מספר מאך וזווית הסיבוב לפי פונקצית פרנטל - מאייר 11
- איור 15 - שרטוט CAD, כונס במצב עבודה 13
- איור 16 - שרטוט CAD, כונס במצב האצה 14

רשימת סימנים

| הגדרה | סימן | יחידות |
|--------------------------|------------|------------|
| שטח חתך אפקטיבי | A | $[mm^2]$ |
| שטח חתך בכניסה לכונס | A_0 | $[mm^2]$ |
| רוחב הכונס | b | $[mm]$ |
| קוטר ייחוס | d_{ref} | $[mm]$ |
| גובה הקונוס | h | $[mm]$ |
| כח כולל הפועל על משטח | F_{tot} | $[N]$ |
| אורך ה"דלת" בכניסה לכונס | L_{door} | $[mm]$ |
| מספר מאך | M | ~ |
| לחץ סטטי | P | $[Pa]$ |
| רדיוס הקונוס | r | $[mm]$ |
| שטח הדלת | S_{door} | $[mm^2]$ |
| זווית התקפה | α | $[^\circ]$ |
| יחס קיבולי חום | γ | ~ |
| זווית ההפרעה | θ | $[^\circ]$ |
| זווית גל הלים | λ | $[^\circ]$ |
| פונקצית פרנדטל - מאייר | ν | $[^\circ]$ |

מבוא

מנוע מגח הינו מנוע סילון שאינו משתמש במדחס על מנת לדחוס את תערובת הדלק והאוויר. דחיסת האוויר קורית באמצעות גלי הלם, ניצבים או משופעים, בכניסה לכונס המנוע. למנועי מגח מספר יתרונות מובהקים על אמצעי הנעה אחרים. בין היתרונות הבולטים, למנוע מגח יכולת עבודה בלחץ אטמוספרי נמוך, מנועי מגח אינם מכילים חלקים מכניים נעים ובכך מונעים שחיקה וסיבוך של תהליך הייצור.

כיום קיים מגוון רחב של תצורות, הבולטים שבהם הינם: כונסים אקסיסימטריים וכונסים דו מימדיים.



איור 2 - טיל ה - Meteor. מנוע באמצעות מג"ח דו מימדי



איור 1 - טיל ה - BrahMos. מנוע באמצעות מג"ח אקסיסימטרי

למנוע מגח דו מימדי יש מספר יתרונות על פני מנועים אקסיסימטריים:

1. כונסים דו מימדים הינם חיצוניים לגוף, כלומר יש יותר נפח פנימי למטען מועיל, אלקטרוניקה, ראשי ביות, דלק ועוד.
2. כונסים דו מימדיים רגישים פחות מכונסים אקסיסימטריים להפרעות בתנאי הטיסה כגון זווית התקפה ושטף מסי.
3. יכולת תכנון הכונס על מנת לקבל מערכת של גלי הלם להגברת הנצילות של מנוע המגח ועבודה בתחום רחב של מספרי מאך.

מנגד, חסרונות מנוע המגח:

1. לרוב גורר תוספת משקל לתצורה ולכן פוגע בביצועי הטווח.
2. מורכבות במידול אווירודינמי של הטיל.
3. תוספת גרר משמעותית בעקבות הגדלת שטח הפנים של הטיל.

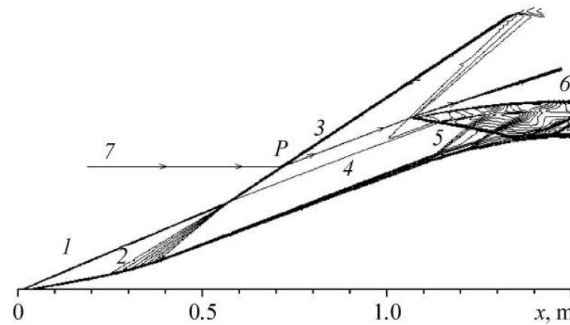
הדו"ח מתאר את העבודה אשר בוצעה לתכנון כונס דו מימדי למנוע מגח, הנדרש לעבוד ב - $M_\infty = 2.4$. התכנון בוצע תוך חישובי ביצועים המבוססים על תיאוריות בסיסיות בתורת הזרימה הדחיסה, ביחד עם מספר הנחות שיפורטו בהמשך.

בנוסף, מוצג סקר ספרות הנוגע לתכנון כונסים למנועי מגח תת - קוליים ועל קוליים ביחד עם בעיות אי - התנעה במנועי מגח על קוליים. נלמדה שיטת הקרקטריסטיקות לתכנון גיאומטריית החלק המתבדר של נחיר בזרימה על - קולית.

סקר ספרות

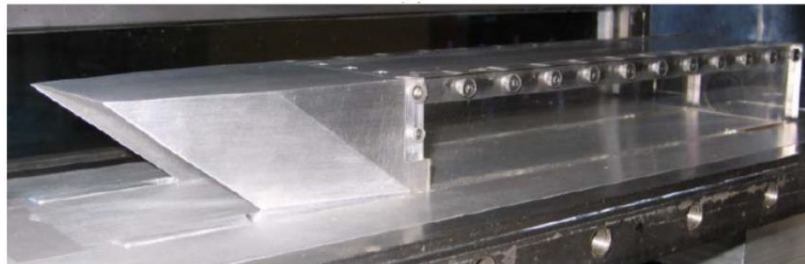
במסגרת העבודה נעשתה סקירה של מספר מאמרים הקשורים לנושא המחקר.

מאמר ראשון בנושא תכן כונסים דו מימדיים בדגש על הגדלת הספיקה בכונס, במספרי מאך על קוליים. במאמר זה מפרוטת שיטת *Gasdynamic Design* לתכן נחירים. על פי שיטה זו, באמצעות תכנון נכון של מדרגה בעלת שניים או יותר שיפועים משתנים, ניתן לקבל גל הלים משופע בתחילת המדרגה, וגלי דחיסה בהמשך. האינטרקציה של מערכות גלי הלים אלו יוצרת גל הלים משופע חזק יותר בפתח הכונס הגורר העלאה של הספיקה המסית בעשרות אחוזים.



איור 3 - הדגמה של מערך גלי הלים משופעים וגלי דחיסה, סימוכין [1].

מאמר שני בנושא אי התנעת כונסים מונעי מגח. מאמר זה בוחן את יכולת חיזוי בעיות אי ההתנעה באמצעות פותרן *RANS* מבוסס *Finite Volume* ומודל טורבולנציה *Spalart – Allmaras*. את ההפרות שגוררות בעיות אי – התנעה מידלו באמצעות הפרה מכנית במורד הזרם. ההפרה המכוונת מדמה מצב של עליה חדה בלחץ האחורי הגורמת לתהליך זמני הגורר אי – התנעה של המנוע. אי – התנעה של מנועים מהסוג הזה עלולה לגרום הפחתה חדה בדחף המתקבל מהמנוע. תוצאות החישוב אומתו אל מול ניסויי מנהריה מתאימים.



איור 4 - דגם המנהרה עימו אומתו חישובי ה *CFD*, סימוכין [2].

שיטת הקרקטריסטיקות

שיטה לתכנון נחירים על קוליים, לקבלת מספר מאך רצוי ביציאה תוך כדי קבלת זרימה אחידה בחלק המתבדר של הנחיר.

באמצעות שיטה זו ניתן לקבל את גיאומטריית החלק המתבדר של הנחיר מתוך שימוש במשוואות דחיסות שיפורטו בהמשך פרק זה.

ראשית, על מנת להשתמש בשיטה זו יש לבצע מספר הנחות על אופי הזרימה בנחיר:

- זרימה דו מימדית לאורך קו ישר או עקום במישור הצוואר.
- זרימה יציבה.
- זרימה איזנטרופית בחלק המתבדר.
- זרימה אי – רוטציונית.

תיאוריה

שיטת הקרקטריסטיקות היא שיטה נומרית לפתרון בעיית זרימה דחיסה דו מימדית. קרקטריסטיקות הם קווי זרם בזרימה על קולית אשר מוגדרים בכיוון הפרעה מסוים (גלי לחץ). שיטה זו מתייחסת לאזור אחרי הצוואר, בו הזרימה עוברת ממצב של $M = 1$ למצב שבו $M > 1$ על ידי מניפות התפשטות (או גלי הלם חלשים) כתוצאה מהתרחבות שטח חתך הנחיר. לפי התפשטות Prandtl – Meyer, האצת הזרימה קורית במעבר דרך מניפת התפשטות בעלת מרכז אחד. תופעה זו לרוב ממודלת בתור סדרה של גלי התפשטות אשר כל אחד מהם מסובב את הזרימה סביב ציר סיבוב זהה.

פונקצית Prandtl – Meyer מוגדרת באופן הבא:

$$(1) \quad \nu(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2 - 1)} \right) - \tan^{-1} \sqrt{M^2 - 1}$$

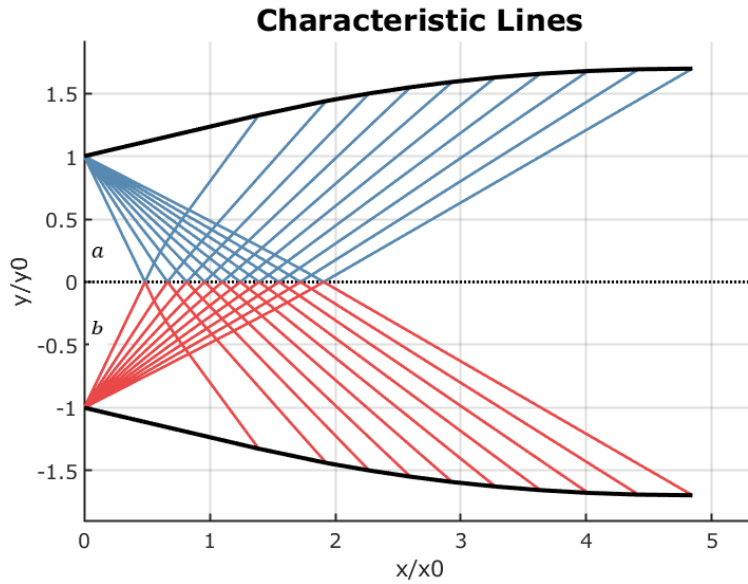
אפשר לומר שהפונקציה הזו מתארת את הזווית בה הזרימה צריכה להסתובב בכדי לשנות את מספר המאך מ $M = 1$ ל M_2 .

ובהתבוננות הפוכה,

$$(2) \quad M_2 = \nu^{-1}(\nu(M_1) + \theta)$$

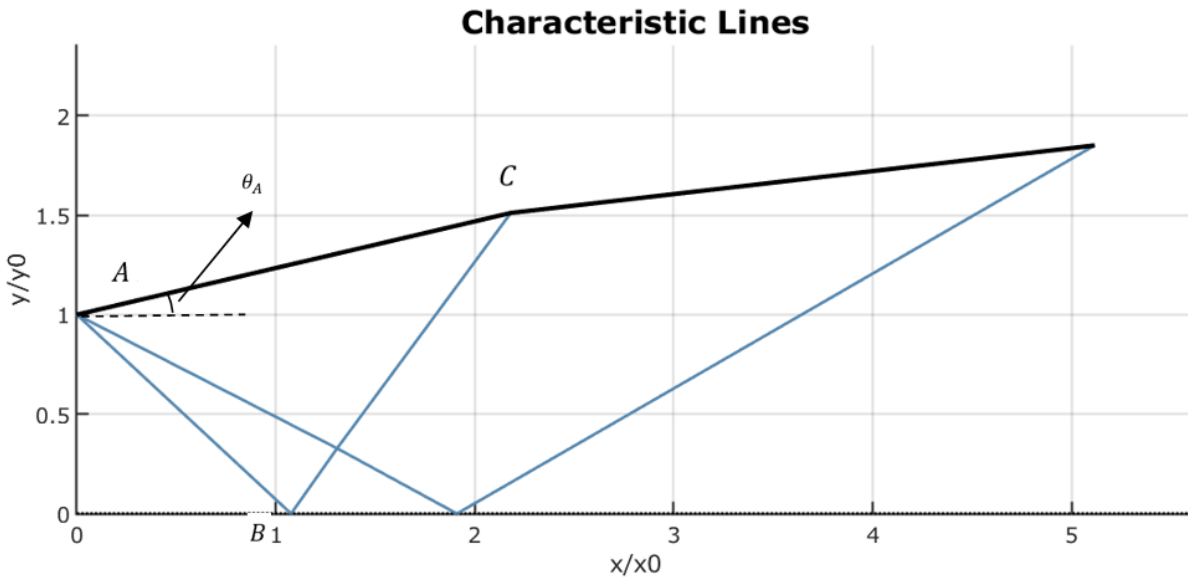
M_2 הינו מספר המאך שהתחיל ב M_1 והסתובב (באופן איזנטרופי) בזווית של θ .

באיור הבא נציג אופיין זרימה בתוך כונס אקסיסימטרי, עם ההנחות שפורטו לעיל:



איור 5 - קווי התפשטות בחלק המתבדר של נחיר על קולי

נתבונן בחיתוך בין שני קווים קרקטריסטיים, a ו b . מאחר והנחנו כי הזרימה דו מימדית וסימטרית, נניח שלכל קרקטריסטיקה שיוצאת מהחלק העליון של הנחיר קיימת קרקטריסטיקה זרה שיוצאת מהחלק התחתון, ומכאן מתקבל קו אי חדירה במרכז הכונס ($y = 0$). מעתה ואילך נתבונן רק על חצי נחיר.



איור 6 - מבט מקורב על מספר גלי התפשטות מצומצם

לצורכי פשטות בחלק הבא נסתכל רק על 2 קרקטריסטיקות.

מהתבוננות על הקו "BC", בהנחת זרימה איזנטרופית ושימוש בפונקצית פרנטל – מייר מתקבל:

$$(3) \quad \theta_C - v_C = \theta_B - v_B$$

אולם מתוך תנאי אי חדירה מתקיים כי $\theta_C = \theta_B = 0$ ולכן מתקיים הקשר:

$$(4) \quad v_C = v_B$$

מהתבוננות על הקו "AB", מתקבל:

$$(5) \quad \theta_A + v_A = \theta_B + v_B$$

מתוך תנאי אי חדירה - $\theta_B = 0$, בנוסף $v_B = v_{M_{exit}}$. בנוסף, מתוך ההגדרה של פונקצית פרנטל – מייר,

$$(6) \quad \theta_A = v(M_2) - \underbrace{v(M_1 = 1)}_{=0}$$

ולכן $\theta_A = v_A$. בסופו של דבר מתקבל התנאי הבא:

$$(7) \quad \theta_A = \frac{v_{M_{exit}}}{2}$$

את מיקום הנקודה C נגדיר באמצעות חיתוך בין הישר שיוצא מנקודה A בשיפוע θ_A עם הישר שיוצא מנקודה B בשיפוע v_B .

על ידי אוסף נקודות אלו ניתן להגדיר את המעטפת החיצונית של הנחיר המבוקש. חשוב לציין שבפועל חישוב זה הינו מקורב בלבד מאחר והקרקטריסטיקות אינן מתוארות בהכרח באמצעות קווים ישרים.

תהליך תכן הכונס

במסגרת פרויקט זה נתבקשנו לתכנן כונס דו מימדי חיצוני, למנוע מגח עבור מאך עבודה של 2.4. במהלך העבודה הנחו אותנו מספר עקרונות:

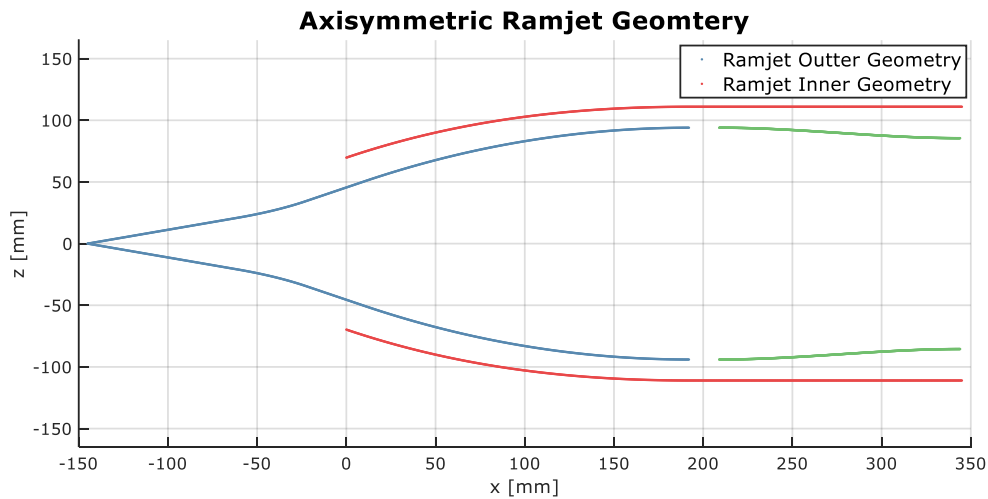
1. גיאומטריית הכונס הפנימית זהה לגיאומטריית הכונס האקסיסימטרי שהתקבלה מחטיבת מנור ברפאל.
2. גל ההלם המשופע יישב מחוץ לשפתי הכונס בזווית התקפה $\alpha = 0^\circ$.
3. קיום גל הלם ניצב בכניסה לשפתי הכונס.
4. קיום זרימה תת קולית בכונס, תוך כדי העלאת יחס הלחצים בין הלחץ הסטטי ללחץ בתא הבעירה.

הנחות מקלות

- תנאי הזרימה המציפה על הכונס זהה לתנאי הזרימה על הטיל כולו כלומר, דעיכת השפעת גל ההלם על מספר המאך ולחץ הסביבה שיווצר על גבי חרטום הטיל.
- עובי שכבת גבול זניחה בסביבת הכונס.
- זרימה איזנטרופית במהלך כל המעוף.
- אין סטייה בזווית ההתקפה של הכונס, $\alpha = 0^\circ$.

שיקולים אווירודינמיים

במסגרת פרויקט מנוע מגח על קולי אקסיסימטרי, התקבלה גיאומטריית המגח הבאה:



איור 7 - כונס אקסיסימטרי במצב עבודה

בכחול אפשר לראות את החלק הפנימי של הכונס, ה"עכבר", ובאדום את החלק החיצוני של הכונס, ה"חתול". על ידי תנועה קדימה של העכבר ניתן לסגור את פתח האוויר של המגח ובכך להקטין את הגרר עד לשלב העבודה. כאשר העכבר נע אחורה (המצב המתואר באיור 1), המנוע נמצא במצב עבודה בו יושב גל ההלם ניצב על שפתי הכונס.

פילוג שטח החתך שהתקבל לאורך הכונס מוצג באיור 4. פילוג השטח התקבל על ידי חישוב המרחק המינימלי לאורך הכונס בין שפת הכונס העליונה לתחתונה בחתך דו מימדי של הכונס.

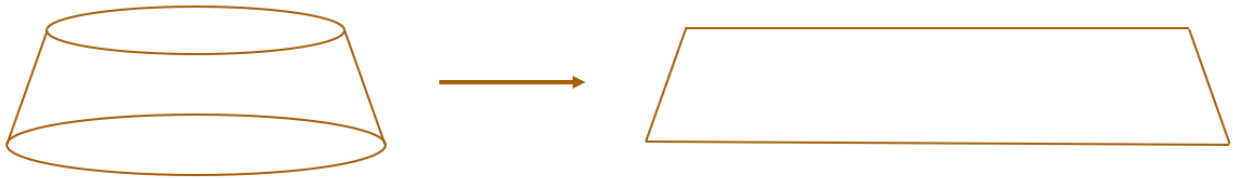
לאחר שנמצא פילוג המרחקים לאורך שפת הכונס העליונה, בוצע חישוב למציאת שטח החתך עבור כל אחד מהמרחקים המינימליים שנמצאו קודם, לכל אורך שפת הכונס העליונה באופן הבא:

$$(8) \quad A = \pi \cdot (r_{cat} \cdot h_{cat} - r_{mouse} \cdot h_{mouse})$$

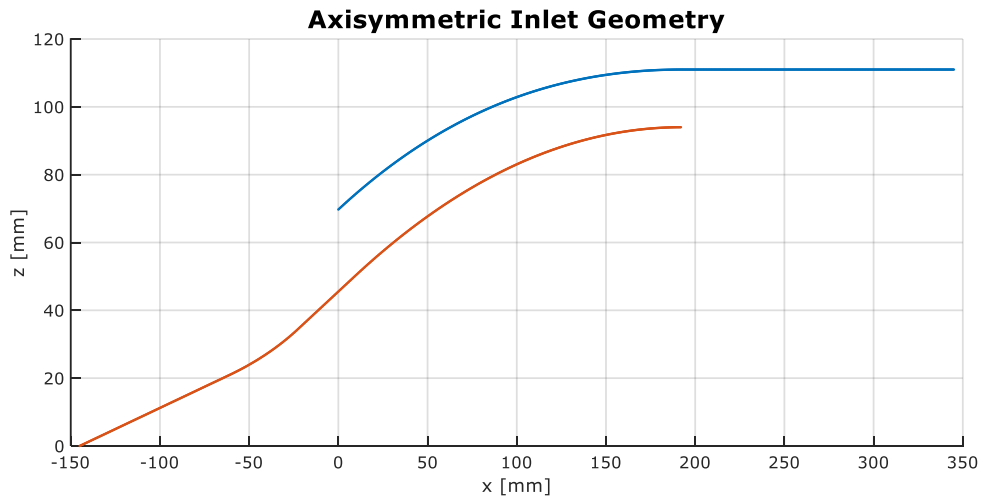
r מתאר את מרחק הנקודה על הכונס החיצוני והפנימי בהתאמה, לבין קודקוד הקונוס אשר נמצא על המשך המרחק הקצר ביותר בין ה"חתול" ל"עכבר".

h מתאר את גובה אותה נקודה אל ציר הסימטריה של המנוע הנמצא ב- $z = 0$.

נוסחה זו מתארת את הפרש השטחים של שני קונוסים כמתאור באיור הבא:



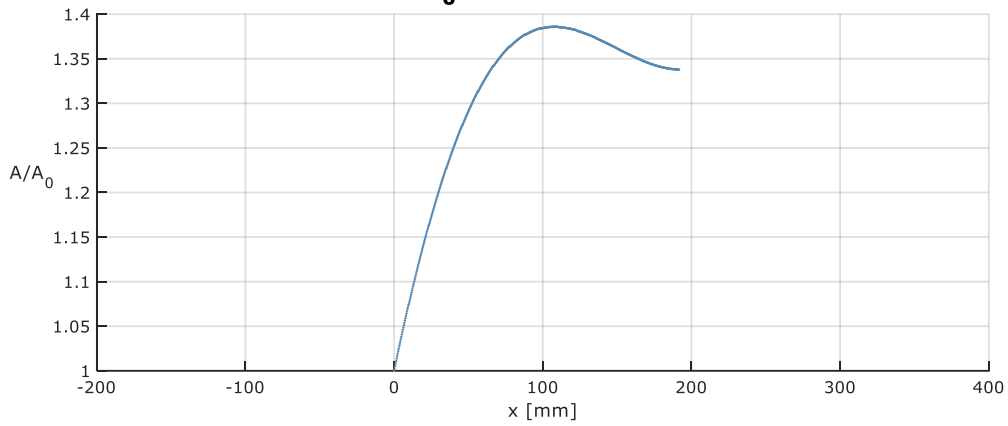
איור 8 - משמאל, שטח הפרש הקונוסים. מימין, שטח החתך האפקטיבי מוצג על המישור



איור 9 - תקריב של גיאומטריית הכונס האקסיסיטרי

Cross section area along the inlet

$$A_0 = 8183 \text{ [mm}^2\text{]}$$



איור 10 - פילוג שטח החתך האפקטיבי לאורך הכונס

באיור (4) ניתן לראות את פילוג שטח החתך לאורך הכונס האקסיסימטרי. זה יהיה פילוג שטח החתך איתו נעבוד בתכן הכונס הדו – מימדי.

רוחב הכונס הדו – מימדי נבחר להיות בשלב זה:

$$(9) \quad d_{ref} = 222[\text{mm}], \quad b = 0.766 \cdot d_{ref} = 170[\text{mm}]$$

תכנון הגיאומטריה החיצונית של הכונס

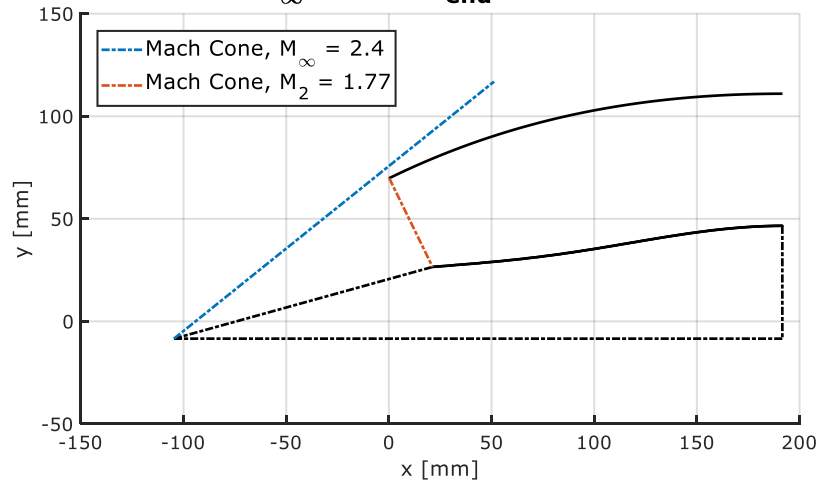
בשלב זה נרצה לבחון את היתכנות הכונס החיצוני. בתכנון הגיאומטריה החיצונית נלקחו בחשבון מספר פרמטרים:

1. קיום גל הלם משופע אשר יושב מחוץ לשפתי הכונס כתוצאה ממדרגה בכניסה לכונס.
2. סטייה של כ – 10% במאך העבודה לא תגרור כניסת הגל המשופע לכונס.
3. קיום גל הלם על שפתי הכונס בכדי להאט את הזרימה בהתרחבות הפנימית של הכונס ולהעלות את הלחץ הסטטי בתא הבעירה.
4. קיום כלל גיאומטרי אשר מאפשר פתיחה וסגירה של שפתי הכונס על גבי ציר סיבוב עבור שלב ההאצה ושלב העבודה, בהתאמה, לפישוט התכן המכני (ראה איור (6), (7) להמחשה).

באיור הבא מוצגת גיאומטריה הכונס שהתקבלה, בצירוף מיקום זוויות גלי ההלם בתנאי העבודה שהוגדרו לעיל.

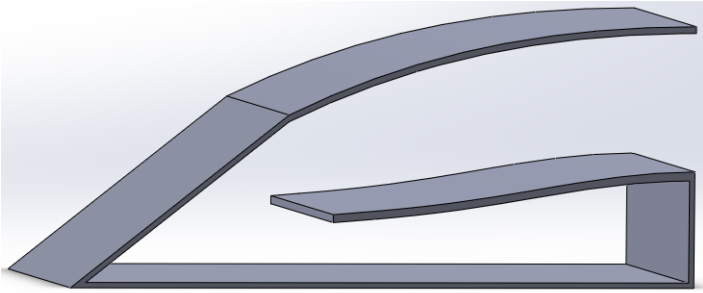
Work State

$$M_\infty = 2.4, \quad M_{end} = 0.283$$

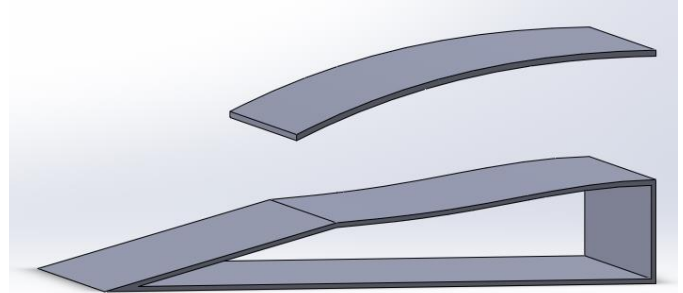


איור 11 - כונס דו מימדי במצב עבודה

באיורים הבאים מוצג הכוונס המתוכנן הן במצב האצה והן במצב עבודה:



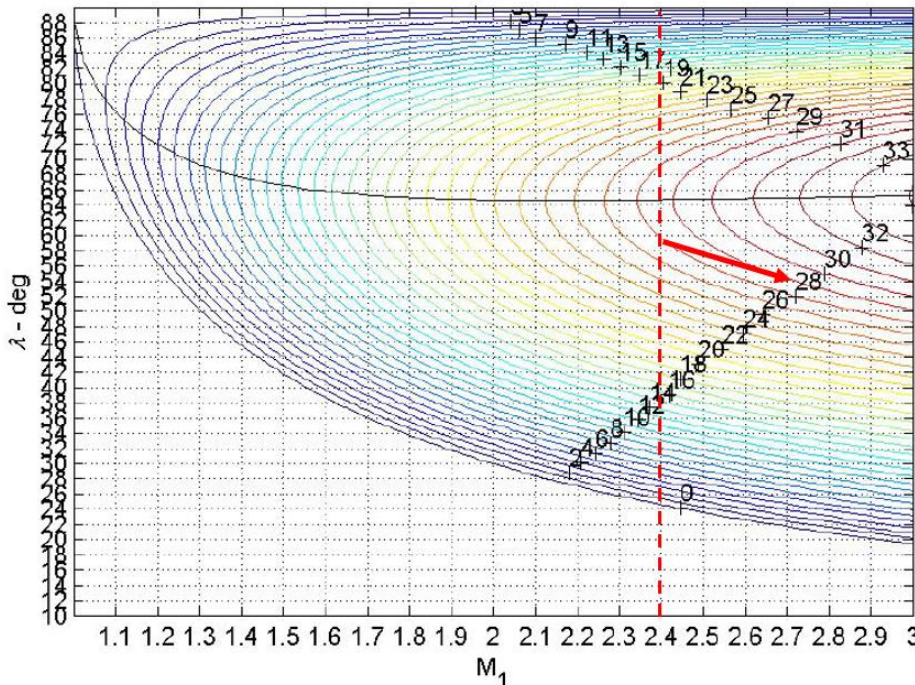
איור 12 – שרטוט CAD 3D של הכוונס הדו מימדי במצב האצה



איור 13 – שרטוט CAD 3D של הכוונס הדו מימדי במצב עבודה

חישובי כוחות

למטרת הערכה ראשונית של העומסים הפועלים על הדלת בזמן האצה, נעשה שימוש בחישובי אוורודינמיקה דחיסה. מאחר ולא מתקבל פתרון לפונקציית *Prandtl – Meyer*, מתקבל גל הלם מנותק בקדמת הדלת במצב האצה. במצב העבודה עם זאת, קיים גל הלם משופע.



איור 14 - זווית הגל כפונקציה של מספר מאך וזווית הסיבוב לפי פונקציית פרנטל - מאייר

באיור 8 ניתן לראות את העקומות המתקבלות מפונקציית *Prandtl – Meyer* המתוארת משוואה (1). ניתן לראות כי עבור מאך העבודה הרצוי, $M_1 = 2.4$, זווית הסיבוב המקסימלית אשר מאפשרת פתרון הינה

$$(10) \quad \theta_{max} \approx 28^\circ$$

עבור זוויות סיבוב גדולות מ- θ_{max} מתקבל גל הלם מנותק.

זווית הדלת אשר התקבלה מהדרישות בתחילת הפרק הינה $\theta = 36.8^\circ$, זווית זו אינה מקיימת את התנאי

$$(11) \quad \theta < \theta_{max}$$

ולכן מתקבל גל הים מנותק במעלה הזרם, ליד הדלת.

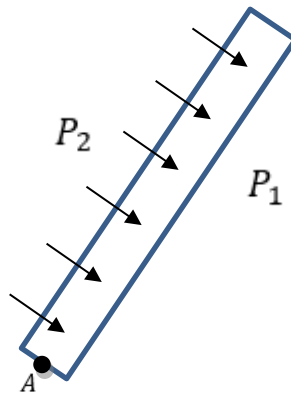
בתור הערכה ראשונית לעומסים הפועלים על הדלת, התחשבנו במקרה המחמיר והנחנו כי מפל הלחץ אחרי גל ההים המנותק זהה למפל הלחץ של גל הים ניצב.

מתוך קשרים של גל הים ניצב, התקבל מפל הלחץ הבא:

$$(12) \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_1^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} = 6.5533$$

שיקולים מכניים

על מנת להעריך את העומס שפועל על הדלת נניח כי פילוג הלחץ על הדלת זהה. בנוסף, נניח כי הלחץ בתוך הכוונס הינו לחץ אטמוספרי.



שטח הדלת:

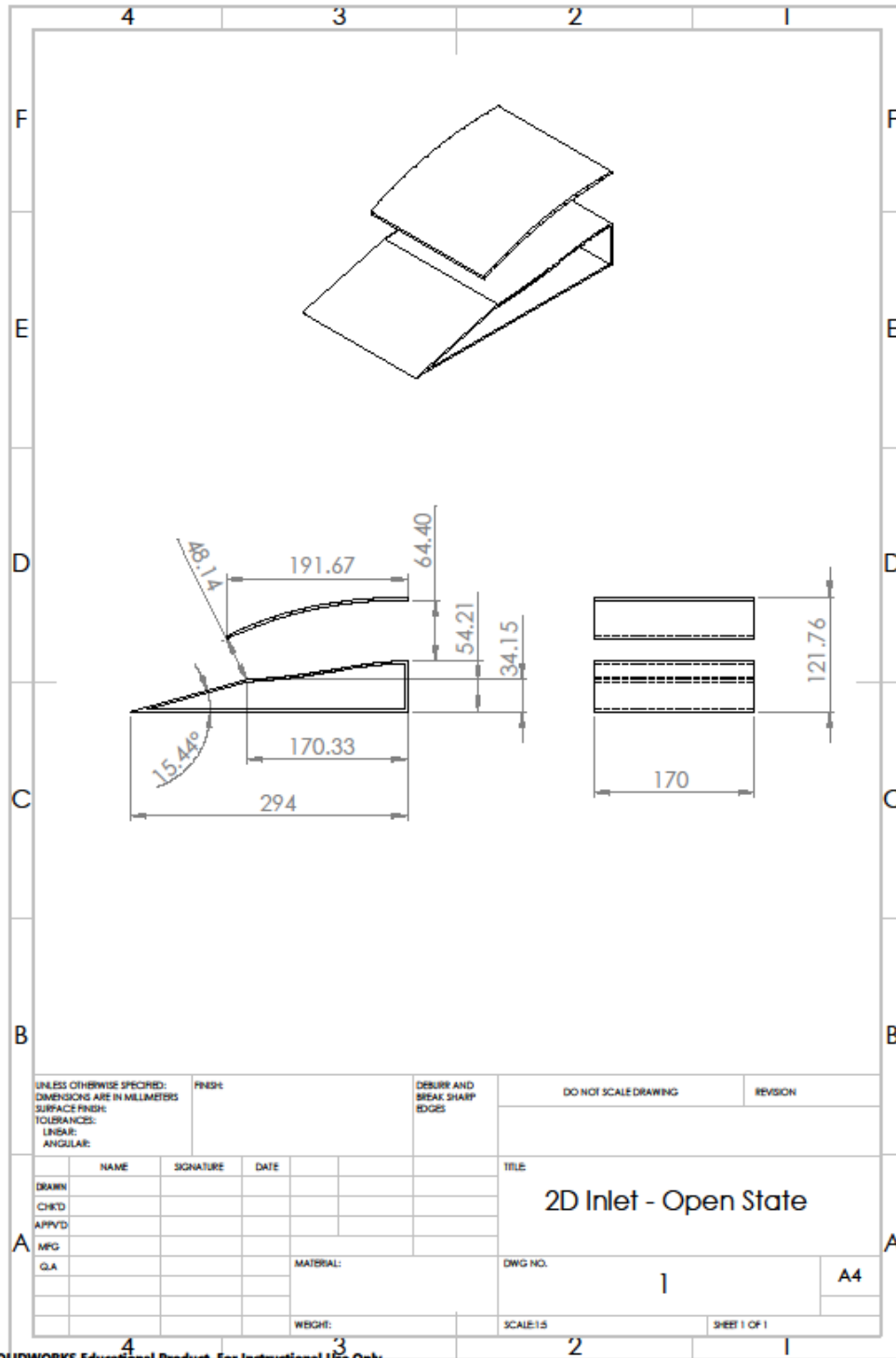
$$(13) \quad S_{door} = L_{door} \cdot b_{door} = 131.86[mm] \cdot 170[mm] = 0.0224[m^2]$$

הכח שפועל על הדלת כתוצאה מגל הים ניצב:

$$(14) \quad F_{tot} = \frac{P_2}{P_1} \cdot P_1 \cdot S_{door} = \frac{6.5533 \cdot 101325 \cdot 0.0224}{1000} = 14.88[kN]$$

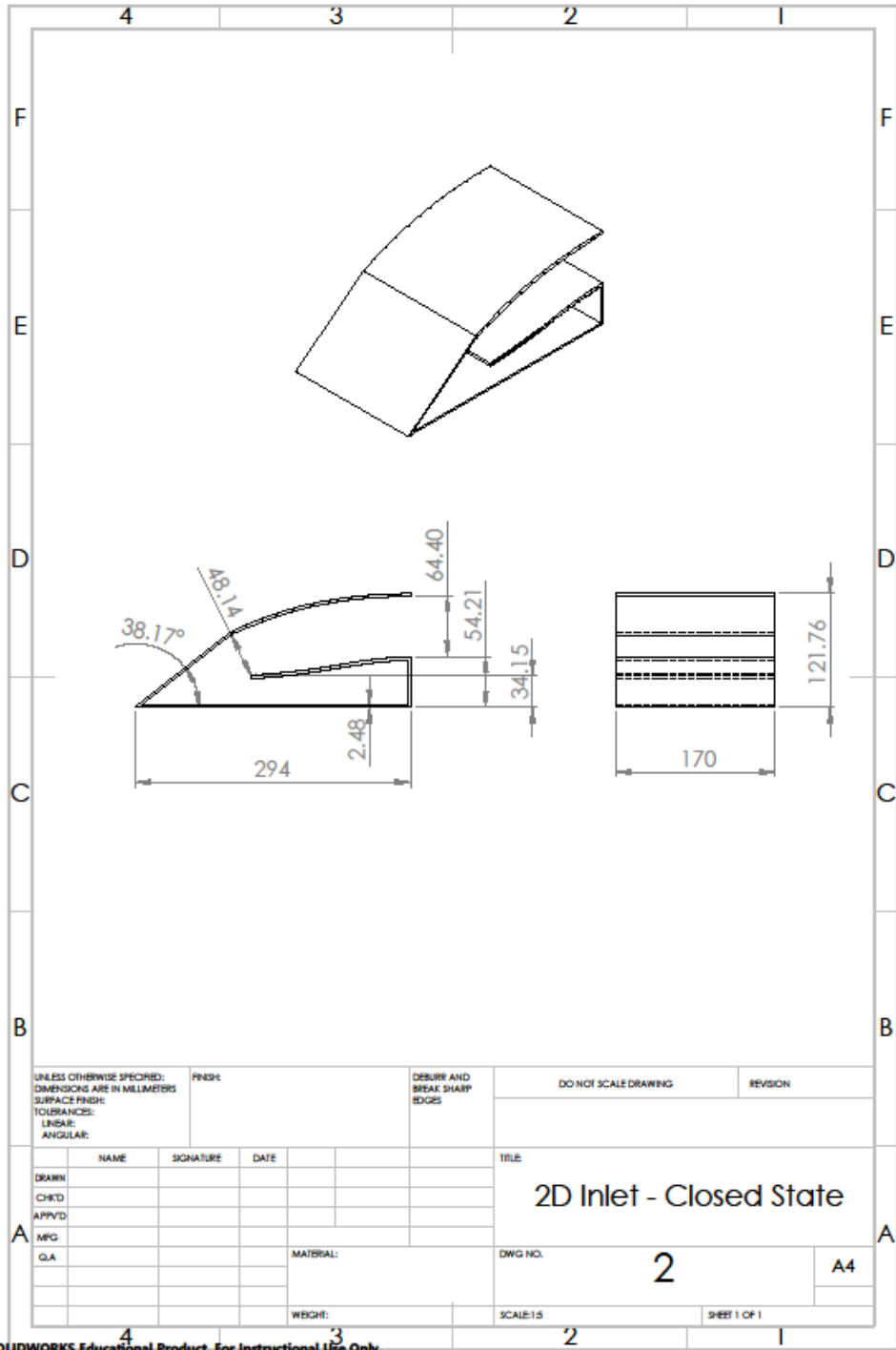
כאשר במשוואה (14) הנחנו כי הלחץ P_1 שווה לאטמוספירה אחת. התקבל כח מפולג של $F_{tot} = 14.88[kN]$ על חתך הדלת. את הכח הנ"ל ניתן להמיר לכח נקודתי ומומנט סביב הנקודה A.

התצורה הנבחרת



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

איור 15 - שרטוט CAD, כונס במצב עבודה



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

איור 16 - שרטוט CAD, כונס במצב האצה

סיכום

דו"ח זה עסק בתכנון אווירודינמי של כונס דו – מימדי למנוע מגח. מטרת הדו"ח היא להציג ולהציע אפשרות חלופית למנוע מגח אקסיסימטרי שתצורתו התקבלה מחטיבת מנור ברפאל. תוכן כונס דו – מימדי על בסיס שטח החתך שהתקבל מהכונס האקסיסימטרי ומשם בוצע תכן על פי דרישות אווירודינמיות ומכניות עבור מהירות עבודה $M = 2.4$.

בנוסף לתכן האווירודינמי נעשה סקר ספרות בנושא בעיות אי התנעה של מנועי מגח על קוליים, שיטת הקרקטריסטיקות ותכן כונסים דו מימדיים. מתוך ההבנה שלי, בעיות אי התנעה נובעות קודם כל בשל העובדה שבמספרי מאך על-קוליים נמוכים מנקודת העבודה, קיים גל הלם מנותק לפני הכונס, ויש צורך לבלוע אותו על מנת שהכונס יתחיל לעבוד כמתוכנן. בנוסף, בעיות התנעה עלולות להופיע כתוצאה מתופעות של זרימה לא תמידיות בסביבת הכונס, עלייה בלחץ האחורי ביחס ללחץ הכניסה לכונס ושפיכת מסה בפתח הכונס. כמו כן עלולים לעורר בעיות התנעה הקשורות לעליה בזווית ההתקפה. כתוצאה מהתופעות שצוינו לעיל, בעת ההתנעה קיימת עלייה משמעותית של הגרר וההאטה דרסטית במהירות הטיסה ועל כן יש להאיץ את מנוע המגח למהירות גבוהה ממהירות העבודה המתוכננת. למיטב הבנתי יש לתכנן את שלב ההאצה ל - $2.9 \div 2.7 \approx M_{booster}$ על מנת להגיע למצב עבודה במהירות $M_{work} = 2.4$ (ערכים אילו אינם מבוססים וזו הערכה של הכותב).

מומלץ לבצע חישובים נומריים על בסיס התצורה שחושבה בדו"ח זה, על מנת לקבל הבנה מעמיקה יותר של התופעות האווירודינמיות בשלב ההתנעה של הכונס. כמו כן, נחוץ לקבל הערכה טובה יותר של יחס הלחצים אחרי גל ההלם המנותק. חשוב מאד לבחון השפעה האפשרית של לחץ תא הבעירה ומספר מאך בתא הבעירה על ביצועי הכונס, כולל התנעתו.

סימוכין

- [1] – Gasdynamic design of a two-dimensional supersonic inlet with the increased flow rate factor, Yu.P. Goukko and I.I Mazhul
- [2] - A numerical study of the unstart event in an inlet/isolator model, I. Jang, R. Pecnick, P. Moin
- [3] – AIAA Multi-criteria Design Optimization of Two-Dimensional Supersonic Inlet, Gerald.C, Doyle.K
- [4] – Unstart Coupling Mechanism Analysis of Multiple-Modules Hypersonic Inlet, Jichao.H, Juntao.C