דו"ח מסכם

צוות אווירודינמיקה 2017

פרויקט פורמולה טכניון

הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

הטכניון, מוסד טכנולוגי לישראל

תקציר

מסמך זה מתאר את עבודתו של צוות אווירודינמיקה בפרויקט פורמולה טכניון 2017.

המסמך מרכז את תהליך התכן האווירודינמי והמכאני וכן תהליכי הייצור, ומרכז תובנות ולקחים למען עבודה עתידית בעולמות תוכן רלוונטיים.

תוכן עניינים

תקציר 2
רקע כללי 5
מטרות הפרויקט 5
התחרות על קצה המזלג 5
שיטת העבודה ומבנה הקבוצות 6
מטרת צוות אווירודינמיקה, משימות וגבולות אחריות 6
סקירה היסטורית 7
הישגים לאורך השנים 7
תמונות לאורך השנים: 8
תוכנית עבודה 9
אבני דרך (פרויקטאליים ואקדמיים) 9
מבנה הקבוצה 9
תכן אווירודינמי 10
מגבלות תקנון 10
עקרונות חוצי מכלולים 12
כנף קדמית 13
סיכום ריצות CFD עיקריות 15
מודל סופי 15
מפרט ונתונים כלליים 16
כנף אחורית 17
סיכום ריצות CFD עיקריות 22
מודל סופי 22
מפרט ונתונים כלליים 23
כנפי צד 23
סיכום ריצות CFD 24
מודל סופי 24
מפרט ונתונים כלליים 24
אנדרטריי 25

מפרט ונתונים כלליים ... 27
תמונות CAD ... 27
סימולציות CFD ... 28
שיטת העבודה ... 28
מודל רכב מלא ... 29
תוצאות ריצה מסכמת ... 31
סיכום סימולציה ומסקנות ... 37
תכן מכאני, שיטות ותהליכי ייצור ... 38
Front Wing's "Armadillo-plate" ... 39
Rear Wing Endplates ... 41
תהליכי ייצור בחומרים מרוכבים ... 47
תבניות ... 47
שלבי העבודה על תבנית ... 48
ריבוד אלמנטים ... 49
פוליאורתן ... 52
פרופילי אלומיניום ... 55
Endplates ... 57
Undertray ... 59
ממשקים להרכבת המכלולים ... 62
כנף קדמית ואנדרטריי ... 62
כנף אחורית ... 65
כנפי צד ... 67
תיקונים והתאמות במהלך נסיעות ותחרויות ... 69
כנפי צד ... 69
... 70
... 70
כנף קדמית ... 70
אנדרטריי ... 72
... 72
עבודת המשך על רכב 2017 ... 73
סיכום ... 74
תודות ... 74
נספח א' – שרטוטים ... 75
כנף קדמית ... 75

כנפי צד 80
כנף אחורית 81
אנדרטריי 83
תבניות 86
פרופילים 93
נספח ב' – אנליזת מאמצים לאלמנט 98
אנליזה איזוטרופית 98
הגדרת האנליזה 100
תוצאות האנליזה לחומר איזוטרופי 101
אנליזה אורתוטרופית 105
הגדרת האנליזה 105
תוצאות האנליזה לחומר אורתוטרופי 106
השוואת האנליזות 108
נספח ג' – אנליזת חוזק אנדפלייט כנף אחורית 109
נספח ד' – דו"ח גזירת כנף קדמית בהתנגשות 119

רקע כללי

ליגת formula student העולמית נוסדה בשנת 1975 ע"י איחוד מהנדסי הרכב העולמי - SAE

.(society of automotive engineers)

פרויקט הפורמולה הושק בטכניון לראשונה בשנת 2013 תחת הפקולטה להנדסת מכונות והשתלב במסגרת פרויקט הגמר של הסטודנטים. במהלך השנים נוצר צוות ייעודי לתחום אווירודינמיקת הרכב אשר הורכב מהסטודנטים מהפקולטה לאווירונאוטיקה וחלל, עם הזמן גם עבורם בתור פרויקט גמר. בפרויקט משתתפים גם סטודנטים מהפקולטות לתעשייה וניהול, אדריכלות, הנדסת חשמל, מדעי המחשב.

הפרויקט מתפרש על פני שנת לימודים אוניברסיטאית מלאה: בסמסטר חורף עוסק הצוות בלמידה ותכנון הרכב. בסמסטר אביב בייצור, בהרכבה ובביצוע ניסויים. במסטר קיץ מתקיימת הפעילות שבה הקבוצה טסה להתחרות באירופה מול קבוצות דומות ממדינות שונות בעולם.

מטרות הפרויקט

- מטרת פרויקט גמר לסיום התואר היא לתת פתרון הנדסי שיעמוד במפרט דרישות קבוע מראש ובמעטפת בצועים נתונה תוך עמידה במסגרת זמנים קשיחה ותקציב מוגבל.
  - הפרויקט יתבסס על עבודת צוות בין קבוצת סטודנטים המשלבים ידע מתחומים שונים.
  - הפרויקט יכלול תכן ראשוני (עד להקפאת התכנון) ותכן מפורט של המערכת (או חלק ממנה).
  - על הפרויקט הגמור לכלול מפרט, הצגת הפתרון, הצגת הביצועים, ביצוע ניסויים, יצור מודלים והפקת דו"ח פעילות מפורט.
- מטרת פרויקט הפורמולה היא לבנות רכב מרוץ שיעמוד בהנחיות קטגורית Formula student וישתתף בתחרויות בסבב העולמי.

התחרות על קצה המזלג

תחרות בסבב האירופי עורכת כשבוע מתוך חודשי הקיץ (יולי אוגוסט) וממוקמת באתר ייעודי המותאם לכך. ניקוד מצטבר משוקלל מהצלחת הצוות במקצים השונים בתחרות (סטטיים ודינמיים):

במקצים הסטטיים הפרויקט מציג את התכן, התכניות העסקיות ותהליכי הייצור של הרכב לפי הפירוט הבא:

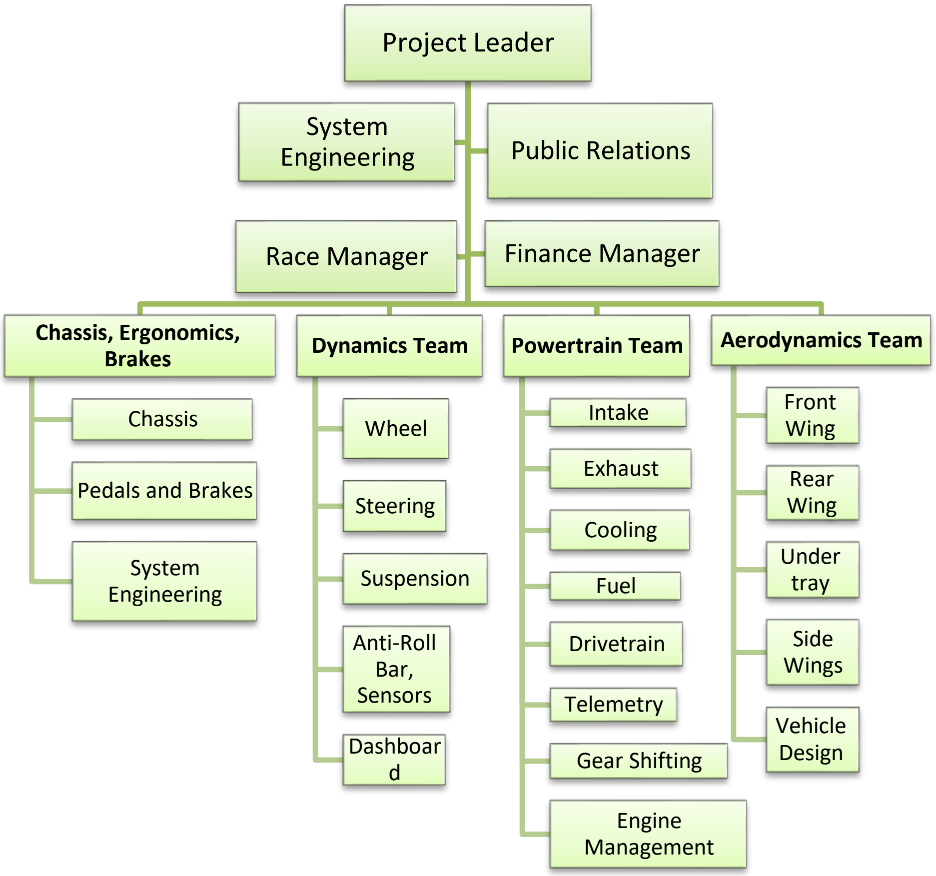
- COST – דו"ח עלויות ייצור ויעילות תעשייתית. (100 נק')
- DESIGN – הצגה של חדשנות טכנולוגית ופיתוח הנדסי מול בכירי תעשיית הרכב העולמית. (150 נק')
- BUSINESS – מצגת שיווק המדמה הליך גיוס משקיעים. (75 נק')

המקצים הדינמיים מהווים 2/3 מהניקוד הכללי בתחרות לפי הפירוט הבא:

- ACCELERATION – מקצה תאוצה בקו ישר למרחק של 75 מטר. (100 נק')
- SKID-PAD – נסיעה במעגלים ע"מ לבחון את התנהגות הרכב ועמידות לכוחות צד. (75 נק')
- AUTOCROSS – מקצה תמרונים, תחרות במסלול צר ומפותל התחום ע"י קונוסים. (150 נק')
- ENDURANCE – מקצה הסיבולת, בו נוסעים 22 ק"מ ומחליפים נהג באמצע, במקצה זה נמדדת גם צריכת הדלק של הרכב לאורך המרוץ. (400 נק')

שיטת העבודה ומבנה הקבוצות

פרויקט הפורמולה הינו הפרויקט הגדול והמקיף ביותר בטכניון. על מנת לעמוד באתגר העצום יש צורך במבנה ארגוני הדוק וחלוקת אחריויות באופן ברור: הפרויקט מורכב מ-4 צוותים מרכזיים, כל צוות אחראי לתחום אחר במכלול הרכב. בנוסף לאלו קיים צוות הנדסת מערכת שאחראי על הליווי, הבקרה והאינטגרציה של הפרויקט.
לפרויקט תפקידי מעטפת נוספים דוגמת אחריות על קשרי חוץ, כספים ומנהל נהגים. כל התפקידים מאוישים על ידי סטודנטים בלבד (בהתאם לתקנות בספר החוקים של התחרות). להלן המבנה הארגוני:



מטרת צוות אווירודינמיקה, משימות וגבולות אחריות

מטרת הצוות הינה לפתח, לתכנן ולייצר את כלל החבילה האווירודינמית במשקל הנמוך ביותר האפשרי שיעמוד בדרישות ביצועים לפי מפרט הדרישות שהוכתב ע"י הנדסת מערכת, תוך עמידה בכל תקנות התחרות.

תפקיד החבילה האווירודינמית הינה לשפר את ביצועי הרכב השלם על ידי הוספת כוח הצמדה וניתוב מיטבי של הזרימה סביב הרכב. החבילה כוללת: כנף קדמית, כנף אחורית, כנפי צד ואנדרטריי.

על הצוות לספק פתרון שלוקח בחשבון את צורת החיבור לרכב ואת הממשקים השונים שבאים באינטראקציה מכנית ו/או אווירודינמית כאשר הקו המנחה הינו הצלחת הרכב כמערכת של מערכות – system of systems ולא כאסופה של מכלולים מוצלחים שחוברו יחדיו.

הצוות ישמש כמוקד ידע ואחראי ישיר לכל נושא העבודה בחומרים מרוכבים (במפעל כנפית וכן בסדנה).

סקירה היסטורית

פרויקט הפורמולה נפתח לראשונה בטכניון בשנת 2013 בפקולטה להנדסת מכונות וזכה להכרה כפרויקט סוף תואר, מאז ועד היום הפרויקט גדל ומשתפר משנה לשנה באופן יוצא דופן וראוי לציון.

הישגים לאורך השנים

בשנת 2013 השתתפו בפרויקט 25 סטודנטים, וזכו בתחרות באירופה בקטגוריית Best rookie vehicle .

בשנת 2014 השתתפו בפרויקט 50 סטודנטים, וזכו בתחרות באירופה בקטגוריית Best looking vehicle .

בשנת 2015 השתתפו בפרויקט 60 סטודנטים, אשר התחרו באיטליה וזכו ב- Third place in business presentation event

בשנת 2016 השתתפו בפרויקט 40 סטודנטים, אשר התחרו בהונגריה וצ'כיה וזכו בהישגים 9th place Hungary-ו ו-8th place Czech .

בשנה הנוכחית (2017) השתתפו בפרויקט 45 סטודנטים, אשר התחרו באוסטריה וגרמניה, שתי התחרויות הנחשבות ביותר בסבב העולמי, וזכו להאפיל למקום ה-8 באוסטריה (ההישג המשמעותי ביותר של הפרויקט עד כה), וכן להתגבר על קשיים רבים ולסיים את כל המקצים בגרמניה – הישג אשר בתובנות הקשורות בו משמעותי אף יותר מהתחרות האוסטרית.

תמונות לאורך השנים:

רכב 2013	רכב 2014
רכב 2015	רכב 2016
רכב 2017	

תוכנית עבודה

אבני דרך (פרויקטאליים ואקדמיים)

SRR	7/11/16
PDR	5/1/17
מבחני הרשמה לתחרויות	8-18/1/17
CDR פנים פרויקטאלי	14/1/17
תחילת ייצור בכנפית	19/3/17
נסיעה ראשונה עם חבילה אווירודינמית	1/5/17
סקר פקולטי שני	18/6/17
אירוע חשיפה	21/6/17
שילוח רכב לאוסטריה	20/7/17

מבנה הקבוצה

בהמלצת צוותי שנים קודמות וכן הנדסת מערכת, חלוקת התפקידים בצוות הייתה לפי מכלולים – 4 מכלולים ולכן 4 צוותים.

- כנף קדמית – מיקו רטנר, מריה פיליפצ'וק
- כנף אחורית – נופר גלמידי, יעל חסלבסקי
- כנפי צד – גיל רולניק, גיא וייס
- אנדרטריי – מקסים פריידין, תומר הדר
- ראש קבוצה – עומר כהן

תצורת קבוצה זו תאמה ליכולת ביצוע התכן האווירודינמי במכלולים השונים – סימולציות נפרדות עבור כל מכלול "stand-alone configuration".

נציין כבר בשלב זה כי ידוע שבמשטר זרימה תת קולית לא ניתן להזניח השפעות הדדיות בין המכלולים וכנ"ל עם גוף הרכב. עם זאת, עקב הצורך בשליטה מתקדמת בתוכנות CFD לצורך ביצוע סימולציית רכב מלא וכן כוח מחשוב גדול, עבודת התכן בוצעה על מכלולים מופרדים, כאשר הצבנו לעצמנו כיעד למהלך השנה להשיג שליטה מספקת בתוכנה (וכן השגת המשאבים החישוביים הנדרשים) לצורך השגת סימולציית רכב מלא, ולו למען הדורות הבאים של הפרויקט.

במהלך הסמסטר הראשון התבצעה חלוקה טבעית בתוך הצוותים לאחראי תכן מכאני ולאחראי CFD.

תכן אווירודינמי

מגבלות תקנון

כלל המכלולים נדרשים לעמוד בתקנון אשר מגדיר את הנפח המותר לקיום משטחים אווירודינמיים, וכן לעמוד בשקיעות מוגדרות. התכוונות ראשונית של הפרויקט להתחרות באוסטריה וגרמניה דרשו עמידה בתקנון FS17, להלן הדרישות הרלוונטיות:

T7.1 Definition Aerodynamic Device

T7.1.1 A specifically designed structure mounted on the vehicle to guide the airflow around the vehicle, increasing the downforce on vehicle and/or lowering its drag. The mounting of this structure is not regarded as an aerodynamic device, unless it is intentionally designed to be one.

T7.2 Ground Effect Devices

T7.2.1 Power ground effects are prohibited. No power device may be used to move or remove air from under the vehicle except fans designed exclusively for cooling.

T7.3 Restrictions for Aerodynamic Devices

T7.3.1 Height restrictions:

- All aerodynamic devices forward of a vertical plane through the rearmost portion of the front face of the driver head restraint support, excluding any padding, set to its most rearward position, must be lower than 500 mm from the ground.
- All aerodynamic devices in front of the front axle and extending further outboard than the most inboard point of the front tire/wheel must be lower than 250 mm from the ground.
- All aerodynamic devices rearward of a vertical plane through the rearmost portion of the front face of the driver head restraint support, excluding any padding, set to its most rearward position must be lower than 1.2 m from the ground.

T7.3.2 Width restrictions:

- All aerodynamic devices lower than 500 mm from the ground and further rearward than the front axle, must not be wider than a vertical plane touching the outboard face of the front and rear wheel/tire.
- All aerodynamic devices higher than 500 mm from the ground, must not extend outboard of the most inboard point of the rear wheel/tire.

T7.3.3 Length restrictions:

- All aerodynamic devices must not extent further rearward than 250 mm from the rearmost part of the rear tires.

T7.3.4 All restrictions must be fulfilled with the wheels pointing straight and with any suspension setup with or without driver seated in the vehicle.

T7.4 Minimum Edge Radii of Aerodynamic Devices

T7.4.1 All forward facing edges of aerodynamic devices that could contact a pedestrian must have a minimum radius of 5 mm for all horizontal edges and 3 mm for vertical edges.

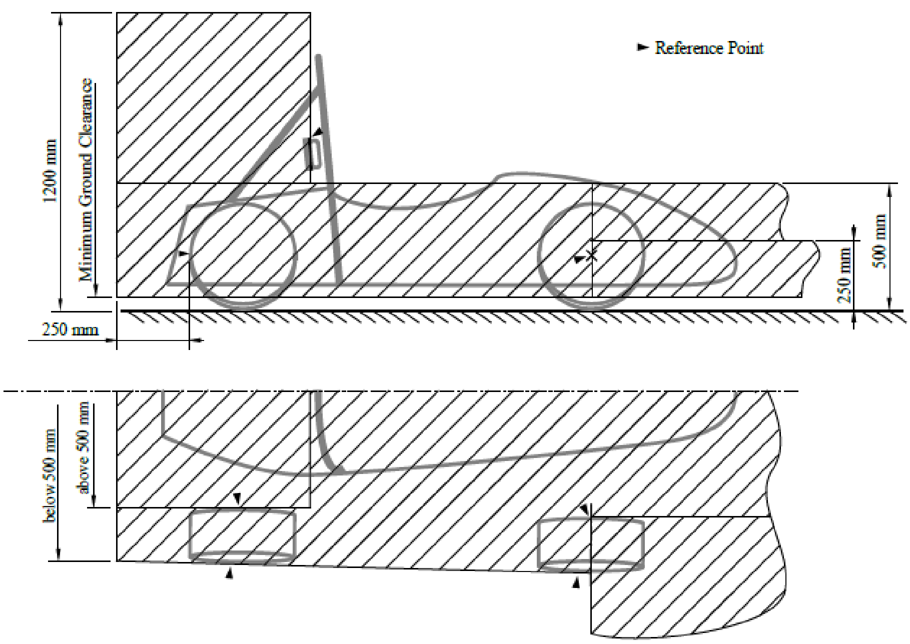


Figure 13: Maximum dimensions and positioning of aerodynamic devices. The positioning space is further restricted (see T 1.1).

T7.5 Aerodynamic Devices Stability and Strength

T7.5.1 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 200 N distributed over a minimum surface of 225 cm^2 and not deflect more than 10 mm in the load carrying direction.

T7.5.2 Any aerodynamic device must be able to withstand a force of 50 N applied in any direction at a point and not deflect more than 25 mm.

T 1.1.3 Open wheel vehicles must satisfy (see also Figure 1):

(a) The wheels/tires must be unobstructed when viewed from the side.

(b) No part of the vehicle may enter a keep-out-zone defined by two lines extending vertically from positions 75 mm in front of and 75 mm behind the outer diameter of the front and rear tires in the side view of the vehicle, with tires steered straight ahead. This keep-out zone will extend laterally from the outside plane of the wheel/tire to the inboard plane of the wheel/tire.

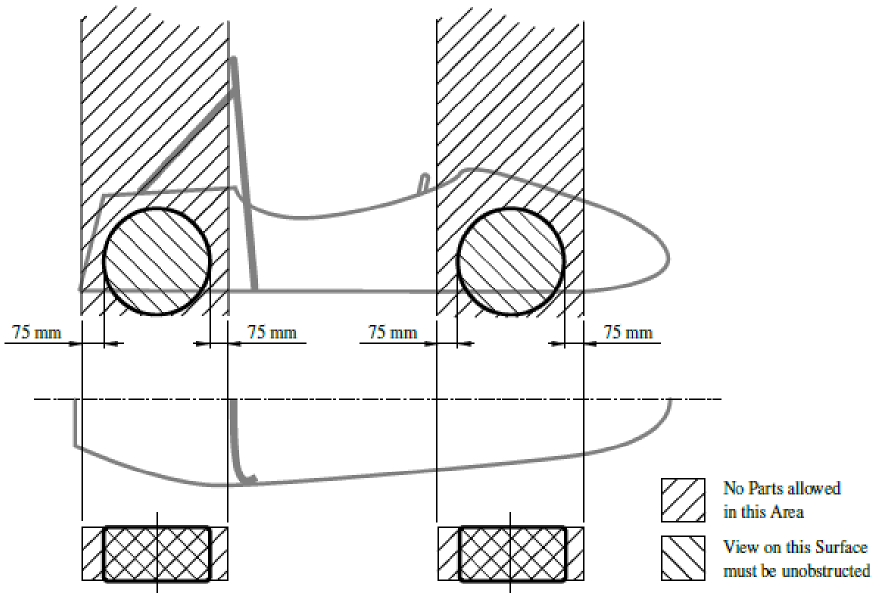


Figure 1: Keep-out-zones for the definition of an open-wheeled vehicle.

עקרונות חוצי מכלולים

מטרת הכנפיים היא כאמור יצירת כוח הצמדה לרכב בזמן נסיעתו, ע"מ להגדיל את כוח החיכוך בין הגלגלים ובין משטח הכביש ובכך להשיג תאוצות צד גדולות יותר, אשר משמעותן ביצועים דינמיים טובים יותר של הרכב.

הכנפיים וכן שאר המשטחים האווירודינמיים מותקנות בקונפיגורציה הפוכה לעומת זו שעל מטוס, כך שלמעשה הן מייצרות "עילוי הפוך", אשר נהוג לכנותו בעולם הספורט המוטורי "Down Force".

לאור המהירויות האופייניות בתחרויות formula student (מהירות ממוצעת 60 קמ"ש, מהירות מירבית כ-110 קמ"ש) אשר מוכתבות ישירות מהמסלולים האופייניים בתחרויות, מערכות ההינע האופייניות ברכבים מסוג זה מאפשרות עודף הספק גם במהירויות הגבוהות יחסית, ועל כן ישנה הצדקה להשגת downforce גם על חשבון הגרר אשר נוצר באופן טבעי.

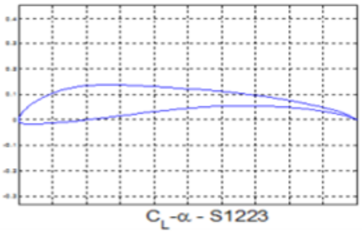
לצורך השגת עילוי רב יותר, מקובל לראות בתחרויות אלו (ובספורט מוטורי בכלל) כנפיים מרובות אלמנטים "multi element wing", אשר מורכבות ממס' אלמנטים המותקנים אחד מאחורי האחר בזווית התקפה הולכת וגדלה. עקרון העבודה של כנפיים אלו הוא יצירת פרופיל אפקטיבי אשר מסיט אוויר בעקמומיות גבוהה יותר לעומת מה שמתאפשר ע"י אלמנט יחיד בכנף, עקרון זה הוא בסיס פתיחת המדפים בכלל מטוסי הנוסעים המודרניים. עבור כנף multi element המתוכננת בקפידה מתקבל C_L גבוה באופן משמעותי לעומת single element wing, דבר אשר מוצדק בעולם התעופה באפשור מהירות המראה ונחיתה נמוכות ככל האפשר, גם על חשבון הגרר הנוסף במקרה זה, וכאמור, גם במקרה שלנו עבור תחום מהירויות בו למערכת ההינע של הרכב קיים עודף הספק אל מול הספק הגרר שמייצר האוויר מסביב לרכב.

מערבולות קצה כנף: לכל כנף סופית קיימת מערבולת קצה כנף מעצם הפרשי הלחצים בין המשטח העליון והתחתון (כאשר בכנפיים מייצרות עילוי המערבולת מתפתחת מלמעלה כלפי מטה ועבור כנפיים המייצרות כוח הצמדה המקרה ההפוך). המערבולת הנ"ל מייצרת את תופעת ה-downwash (עבור כנפיים הפוכות למעשה נוצר upwash על המשטח התחתון), אשר מקטין את זווית ההתקפה האפקטיבית של הכנף. ככל שמנת הממדים (AR) של כנף קטנה יותר, היא יותר רגישה למערבולות קצה הכנף.

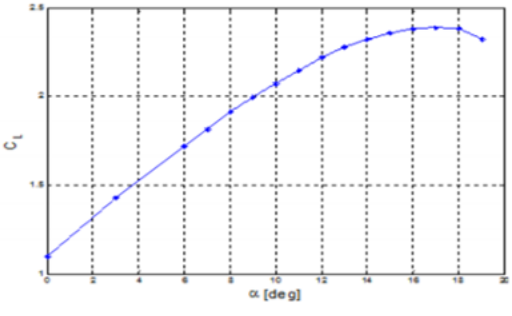
כיוון שמרבית האלמנטים במערכת בעלי AR נמוך, יש צורך במשטחי קצה – endplates אשר מפריעים להתפתחות המערבולת בקצה הכנף, ומרחיקים את המערבולת שנשארת מהפרופיל. ככל שהמשטחים גדולים יותר, כך הם אפקטיביים יותר בהקטנת מערבולת קצה הכנף והרחקתה ממשטח הכנף.

הפרופיל העיקרי שנבחר לעבודה הוא s1223rtl, ע"ב ניסיון התכן של הפרויקט בעונות קודמות וכן ע"מ לצמצם את דרגות החופש לכל צוות מכלול.

התכן האווירודינמי של כל מכלול מבוצע בתהליך איטרטיבי ע"ב סימולציות CFD, כשמטרתו בסופו של דבר היא קביעת כמות האלמנטים, מיתריהם, מוטותיהם, מיקומם היחסי וזוויותיהם היחסיות, תוך הקפדה על עמידה במגבלות התקנון, ומתן דעת לשיקולי עלויות ופשטות ייצור והרכבה.



C_L-α - S1223



$$C_{L_{MAX}} = 2.37 \ @ \ \alpha = 17°$$
$$L/D \ @C_{L_{MAX}} = 41$$

כנף קדמית

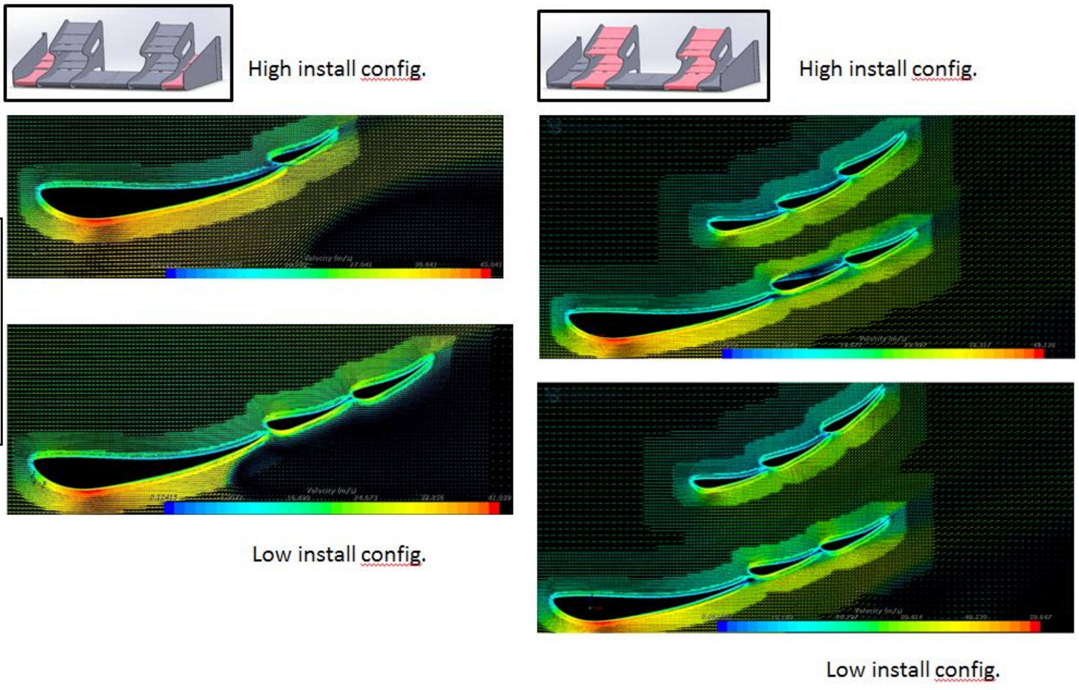
מכלול זה הינו הראשון שבא במגע עם הזרימה ולכן היא עודנה מסודרת, תכונה זו מפשטת במעט את היכולת לתכנן את מסלול הזורם ובאה לידי ביטוי בתאימות שבין הסימולציה החלקית (כנף + אף + גלגל) אל מול סימולציית הרכב המלא. חשוב לזכור כי מדובר בזרימה ת"ק ולכן הגוף במורד הזורם משפיע על משטר הזרימה בכל תחום הזורם, כלומר גם הכנף האחורית (כדוגמא לא טריוויאלית) תשנה את אופי הזרימה על המכלול הקדמי. מובן שככל שהמרחק גדל כך התלות קטנה אבל היא תמיד תתקיים וזו ההצדקה שבשאיפה לתכנן על סמך סימולציית רכב מלא.

המאפיין הכי בולט ביצירת כוח ההצמדה הינו "אפקט הקרקע": אפקט זה מעצים את הכוח הנוצר על הכנף ככל שהיחס בין מוטת הכנף למרחקה מהקרקע גדל (ניתן למצוא מידע נוסף ברשימות קורס בלד"ח) ולכן יש לשאוף למוטה גדולה ולהתקנה נמוכה ככל הניתן.

- היות ובמסלול התחרות יש חשיבות לביצוע פניות הדוקות במהירות גבוהה ללא מגע בקונוסים המסמנים את המסלול, עלתה דרישה מהנדסת מערכת שלא להגדיל את מוטת הכנף אל מעבר לקצה החיצוני של הגלגלים הקדמיים.
- היות ובזמן פניות הדוקות במהירות גבוהה נוצר כוח צד השואף לגלגל את הרכב (תנועה לא סימטרית), ומאחר ובכל שלב בתחרות אין ליצור מגע בין המכלולים האווירודינמיים לבין הכביש, עלתה דרישה מהנדסת מערכת לתכנן חיבור בין המכלול הקדמי למתלים הקדמיים של הרכב (נקודה קוואזי-סטטית נמוכה) שיאפשר התקנה נמוכה אך בטוחה בהיבטי הגבלות התקנון.

על מנת להקל על תהליכי הייצור הוחלט לצמצם את מגוון אלמנטי הכנפיים לשניים בלבד: בעלי אותו הפרופיל ושונים באורך המיתר.

בשלבי התכנון הראשונים, הוקדשה מחשבה רבה באיזה גובה למקם את הכנף כולה. מעבר לבדיקת יעילות אפקט הקרקע בגבהים השונים, הנ"ל משפיע על כמות האלמנטים האפשריים בכל קומה עקב מגבלת הגובה הכוללת של הכנף – 500 מ"מ מהקרקע, כאשר כנף בהתקנה נמוכה יותר מאפשרת יותר אלמנטים בכל אחת משתי הקומות לעומת כנף בגובה התקנה גבוה יותר.



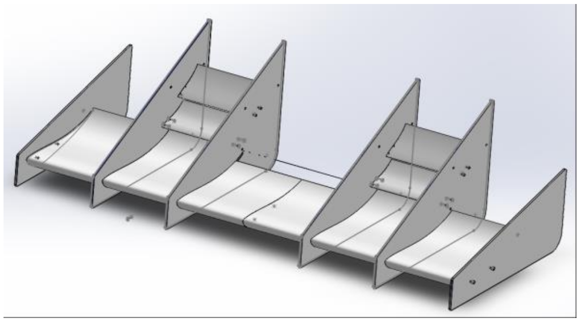
תוצאות סימולציות עבור תצורה לגובה התקנה נמוך (יותר אלמנטים) לעומת גובה התקנה גבוה (פחות אלמנטים)

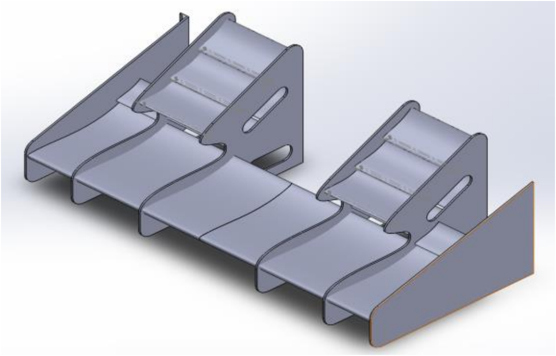
עקרון עבודה נוסף בבחירת כמויות האלמנטים היה עקרון כיסוי שטח מקסימלי ע"י אלמנטים רבים, בדיעבד הנ"ל מגדיל את כמות דרגות החופש בתכן האיטרטיבי מבוסס CFD, אשר מטרתו השגת נקודת עבודה מתקבלת על הדעת (עומדת בדרישות). להבא, יש להגביל את כמות האלמנטים בכל מכלול ולו משיקולי זמן אלו.

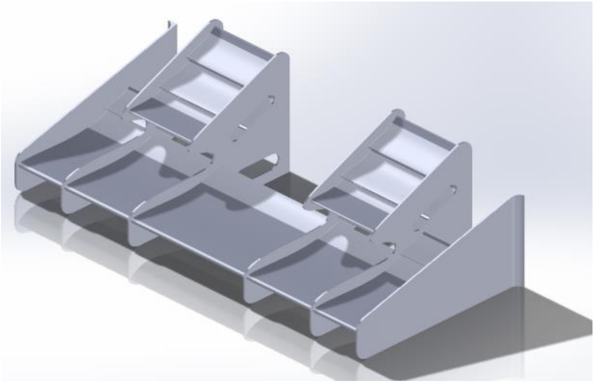
תצורות הכנף הראשונות כללו אלמנטים בקומה שניה אשר מוקמו מעל לאלמנטים הנוספים של הקומה הראשונה. על אף שבמהלך הריצות נבדקה השפעת קרבת הקומות זו לזו על יעילות הכנף, כיום אנו יודעים לומר כי עדיף למקם קומה שניה (באם יש צורך באחת שכזו) כמה שיותר רחוק הן בגובה והן במרחק האופקי בין האלמנטים, באופן זה מוקמו האלמנטים בקומה השנייה בתצורת הכנף הסופית.

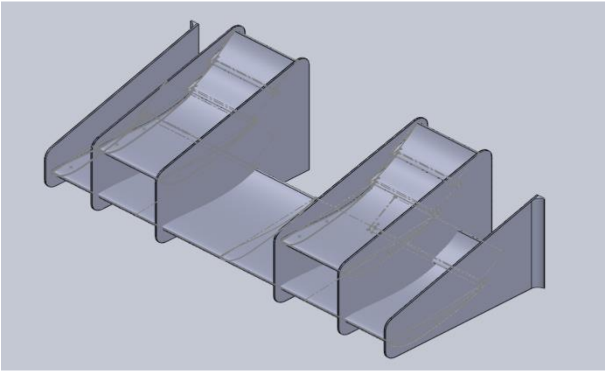
עקב כמות דרגות חופש רבה מדי עבור כמות האלמנטים שנבחרו, ועקב שינוי דרישת גובה התקנת הכנף (עליה ל-65 מ"מ מהקרקע) אשר גם כן גררה שינוי בתכן, הוחלט להישען על תכן כנף 2016, עם התאמתו לתקנון 2017 אשר הגביל את גובה האנדפלייטס מלפנים לגלגלים, ובתוספת קומה שניה אשר לה בוצעה אופטימיזציה במהלך תקופת הייצור.

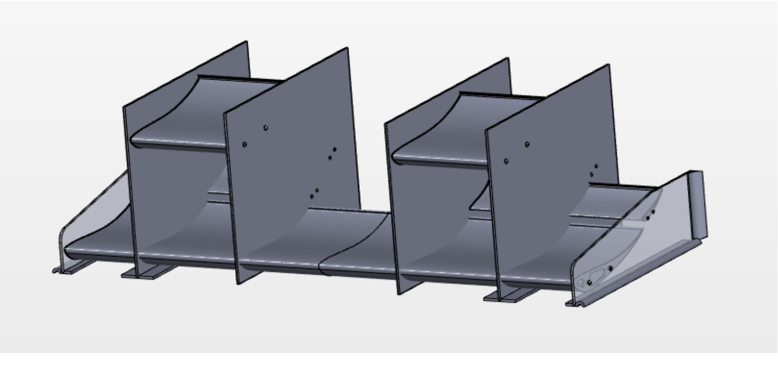
תצורות עיקריות במהלך התכן האיטרטיבי:







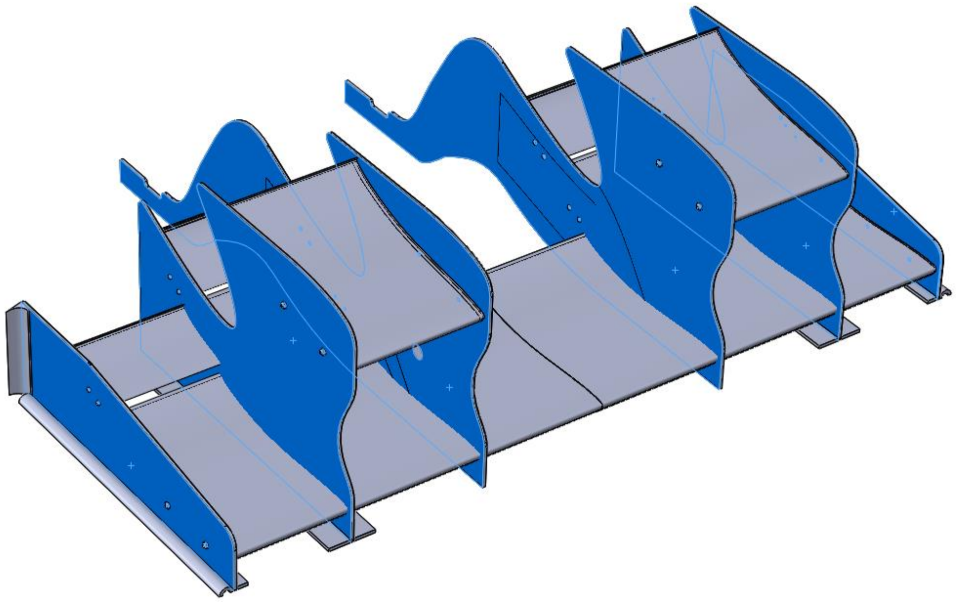


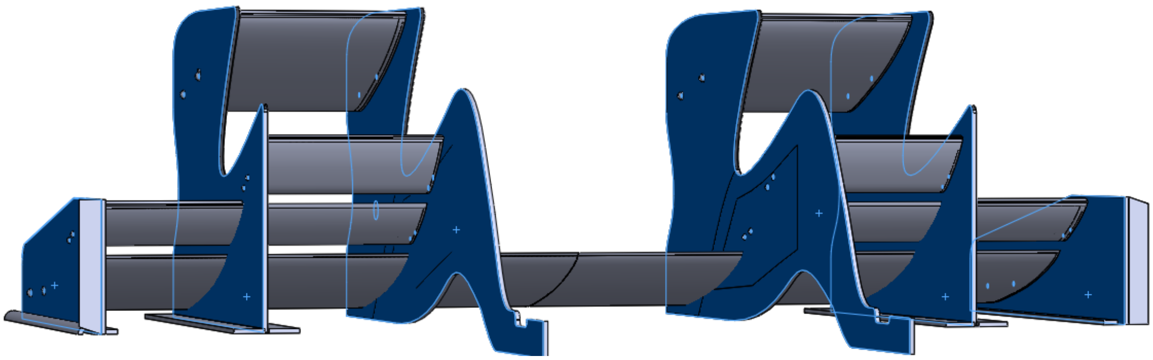


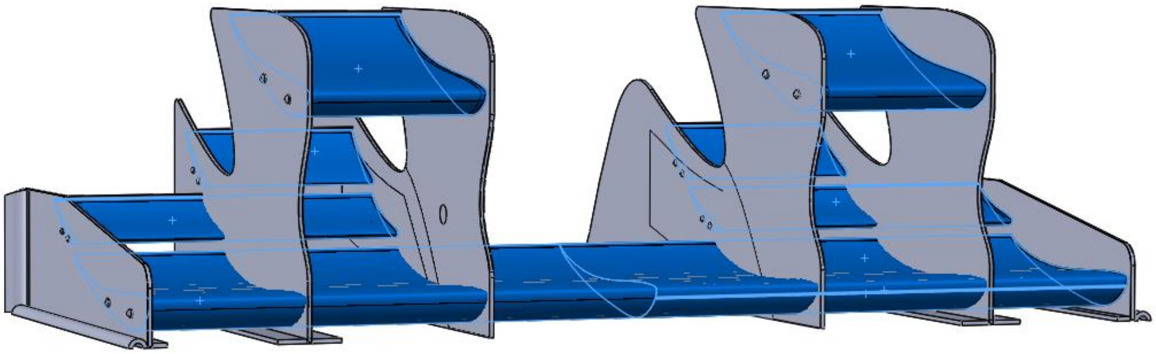
סיכום ריצות CFD עיקריות (stand-alone)

Simulation configuration	Drag (N)	Down force (N)	Mount height (cm)	Conclusions
Only front wing	100	450	12	**more elements - didn't follow regulation**
Only front wing	90	440	4.5	**more elements**
Only front wing	80	380	12	**less elements**
Only front wing	135	430	4.5	**longer 2nd floor**
With wheels,body	117	408	4.5	**front 2nd floor, lower outer EP**
With wheels,body	112	422	6.5	**added bottom "surf boards"**
WIth wheels,body	110	445	6.5	**increased distance between 1st, 2nd floors**
With wheels,body	120	475	6.5	**higher AOA 2nd floor**

מודל סופי







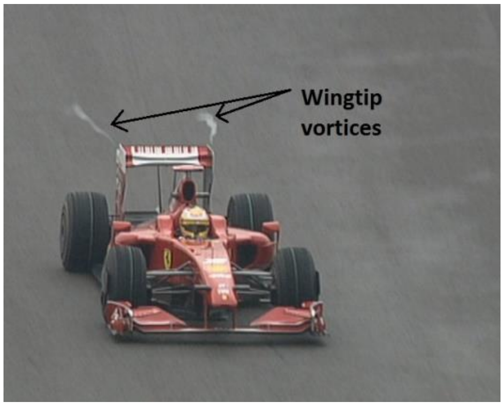
מפרט ונתונים כלליים

- 1 כנף ראשית, מוטה 1380 מ"מ, מיתר 360 מ"מ, מילוי פוליאורתן
- 2 כנפיים תחתונות קצרות, מוטה 240 מ"מ, מיתר 120 מ"מ, ללא מילוי
- 2 כנפיים תחתונות ארוכות, מוטה 450 מ"מ, מיתר 120 מ"מ, ללא מילוי
- 2 כנפיים עליונות, מוטה 240 מ"מ, מיתר 360 מ"מ, מילוי פוליאורתן
- משקל סופי (כולל אנדפלייטס סופיים): 6.8 kg
- 475 N : Downforce (stand-alone)
- 120 N : Drag (stand-alone)

כנף אחורית

מיקום הכנף במרחב הוגדר להיות כך שהחלק הקדמי של הכנף לא יעבור את מישור משענת הבטיחות של הרכב ואילו החלק האחורי של הכנף יהיה מותקן מקסימום 250 מ"מ מאחורי חלקו האחורי של הגלגל האחורי. בנוסף, על הכנף להימצא בין החלקים הפנימיים של הגלגלים ולא לחרוג מאזור זה. גובה הכנף המרבי המותר מהקרקע הינו 1.20 מטר.

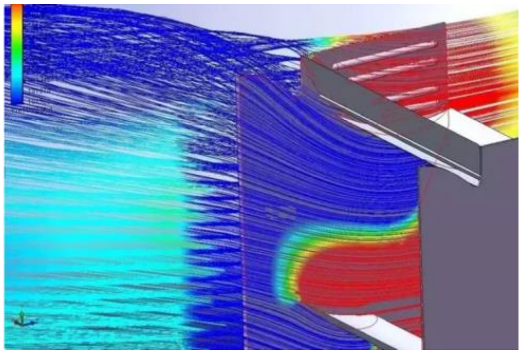
המיקום הנ"ל הוגדר על ידי תקנון התחרות ואין באפשרותנו לשנות קביעות אלו או לחרוג מהן. בנוסף להגבלות אלו, נדרשנו על ידי צוות הנדסת מערכת לקחת בחשבון מרווח ביטחון של 15 מ"מ מהתקנון, זאת על מנת להבטיח עמידה בתנאיו גם במידה ויהיו טעויות ייצור או הרכבה. כמו כן, הוגדר משקל יעד מקסימלי של 4.5 ק"ג עבור כלל המערכת.



מערבולות קצה כנף בF1

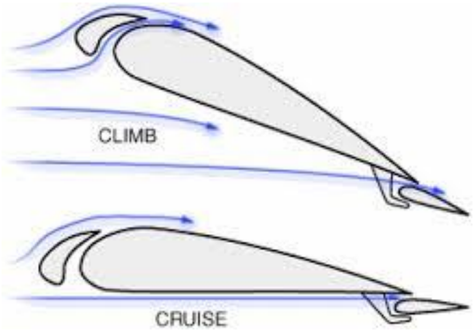
עקב AR נמוך, פתרון נוסף להפחתת מערבולות קצה כנף בנוסף לאנדפלייטס הוא הוספת חריצים באנדפלייטס עצמם (ראה איור), כך שאוויר מאזור הלחץ הגבוה שבין שני האנדפלייטס יעבור לאזור הלחץ הנמוך שמצדם השני ותיווצר מערבולת הפוכה למערבולת הנוצרת בקצהו העליון של האנדפלייט. כתוצאה מכך, סך הערבוליות יהיה קטן יותר.

סימולציית זרימה המדגימה את השפעות החריצים באנדפלייט



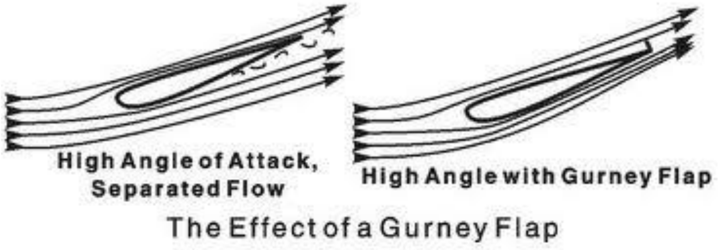
בשלבים הראשוניים של התכן אכן הוספנו חריץ שכזה אך מאחר ותכנון הכנף וחיבורה לשלדה לקח זמן רב ואנו מוגבלים בתאריך סופי עקב התחרויות נאלצנו לוותר על תכנון חלקים אשר נראו לנו פחות חשובים, חריץ זה ביניהם.

היבטים גיאומטריים נוספים עליהם חשבנו וזנחנו עקב אילוצי זמן היו סלאט (ראה איור) ופרופיל כנף נוסף אותו ניתן לראות בהמשך בתיאור ההתפתחות הכרונולוגית של הכנף. פרופיל זה נקרא BeamWing ויועד להתחבר בחלק התחתון של האנדפלייטס ומטרתו להגדיל את תת הלחץ מעל פתח הדיפיוזר של האנדרטריי ובכך להגדיל את יעילותו. סלאט הינו פרופיל קטנטן המתחבר בשפת ההתקפה של הפרופיל המרכזי ומצמיד יותר את הזרימה אל הפרופיל.



הדגמת עקרון ה-slat[1]

מנגד, אלמנט גיאומטרי שכן הוחלט להתמקד בו הוא גורני בפרופיל העליון ביותר. גורני הוא מדף אנכי קטן הנמצא בשפת הזרימה של הפרופיל ומייצר לחץ נמוך מאחוריו אשר מסייע למניעת ניתוק במשטח התחתון של הכנף. בכך, הגורני מאפשר הצבה של פרופיל בזוויות התקפה גבוהות יותר ללא ניתוק (ראה איור). ואכן, לאחר הוספת הגורני ראינו שיפור משמעותי בביצועי הכנף בתוכנת CFD.



גורני בשפת זרימה של כנף[2]

[1] מתוך www.zenithair.com/stolch701/7-design-wing.html
[2] מתוך https://paddockclubformula1.com/category/tecnica/

ישנו קונפליקט בין הרצון ליעילות האנדפלייטס לבין הרצון לזרימה כמה שיותר חלקה על הכנף כך שהיא תהיה יעילה ככל האפשר. על מנת שהזרימה על הכנף תהיה חלקה ככל הניתן, נרצה להציב את הכנף בגובה המירבי המתאפשר כך שהזרימה שהיא רואה לא תהיה מושפעת (או תהיה מושפעת מעט ככל האפשר) מסביבת הרכב ונוכחות הנהג.

מאחר ואנו מוגבלים מבחינת תקנון במיקום הכנף במרחב, והגבלה זו חלה על האנדפלייטס גם כן, במידה ונבחר להציב את הכנף גבוה ככל הניתן, יווצר מצב בו הפרופיל העליון של הכנף מוצב קרוב לקצה העליון של האנדפלייט ויעילות האנדפלייט פוחתת.

על פי סימולציות CFD, ראינו כי כאשר האלמנטים נמצאים בגובה המירבי המותר להם, הגרר המתקבל הוא עדיין בתחום שהוגדר על ידי הנדסת מערכת (ע"ב סימולציית כנף ללא רכב) ועל כן נעדיף להציב את הכנף בגובה זה ולספוג מעט יותר מערבולות.

אחד החלקים החשובים בתכן היה בחינת האפשרויות השונות לחיבור הכנף לרכב, ועקב השפעתו על התכן האווירודינמי נרחיב עליו כבר בשלב זה. בשנים עברו הכנף חוברה לרכב באמצעות מוטות אשר חוברו מצדם האחד לחלק התחתון של הפרופיל המרכזי ומצדם השני לשלדה. כאמור, שיטת חיבור זו הוכיחה את עצמה בעבר וצוות הפרויקט מיומן בהרכבת חיבורים אלו ועל כן בחיבור זה סיכונים מעטים. מנגד, חיבור באופן זה יוצר הפרעה רבה לזרימה תחת הפרופיל המרכזי של הכנף ולכן מקטין באופן משמעותי את פוטנציאל הכח אותו הכנף יכולה לייצר.

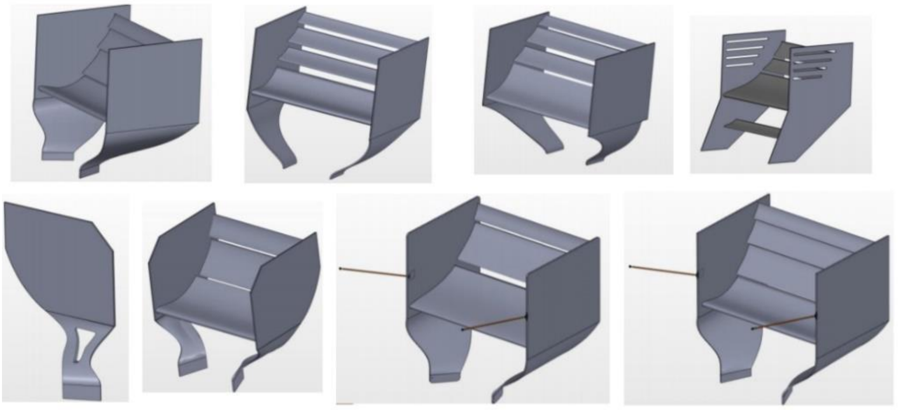
הוחלט כי השנה ננסה למצוא פתרון חלופי לחיבור הכנף לרכב.

הוצעו שני פתרונות חיבור חלופיים:

- חיבור באמצעות האנדרטריי
- הארכת האנדפלייטס וחיבורם ישירות לשלדה

מאחר והשנה נעשו שינויים רבים באופן חיבור האנדרטריי לרכב ומאחר וגם הכנף הקדמית חוברה השנה דרכו, הוחלט להקטין סיכונים ולא להעמיס יותר מדי על רכיב זה ועל כן נבחר החיבור הישיר לשלדה.

חיבור הכנף לרכב עבר מספר איטרציות לאורך הדרך (ראה באיור - מימין לשמאל ומלמעלה למטה).



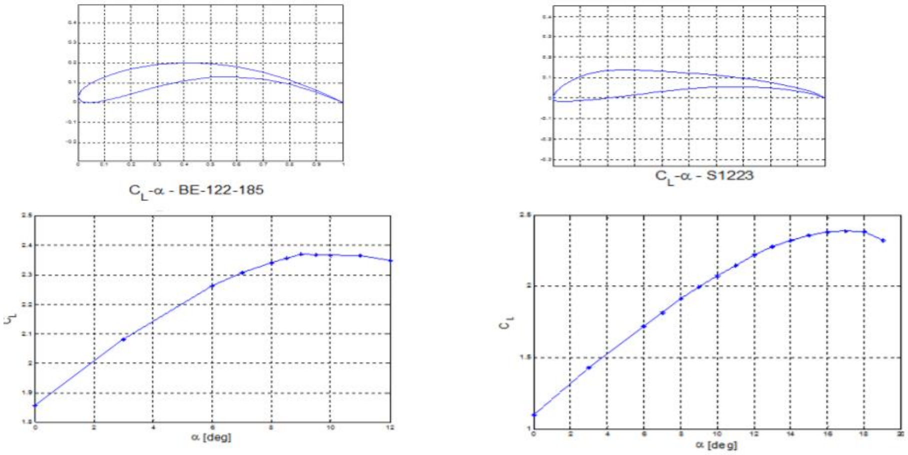
התפתחות התכן האווירודינמי והגיאומטרי של המבנה

תחילה האנדפלייטס תוכנן כולו להיות במישור אחד אך בחיבורו למודל ההרכבה של כלל הרכב מיד ראינו כי שלדת הרכב צרה יותר מרוחב הכנף ועל כן הצרנו את החלק התחתון של החיבור. לאחר מכן, על מנת לנצל את מלוא המרחק המותר לכנף מסביבת הנהג לקחנו את החיבור קדימה ואת הכנף עצמה אחורה. האנדפלייטס עצמם יחוברו באמצעות בראקטים שירותכו אל השלדה.

את עיקול האנדפלייטס תכננו כך שיהיה רחוק מן הפרופילים של הכנף ויפריע כמה שפחות לזרימה המציפה.

הכנף האחורית נבדלת במספר מאפיינים מבין שאר המכלולים האווירודינאמיים. אחד ממאפיינים אלו הוא שהכנף מורכבת בגובה מספיק כך שאינה מושפעת מאפקט קרקע, ולכן ניתן להשתמש באלמנט ראשי עקמומי יותר מהפרופילים הסטנדרטיים בהם משתמשים בתחרות. ייחודו הוא ב-CL גבוה כמו ה-S1223rtl אך עם L/D גבוהה משמעותית, ניתן לראות זאת בהשוואה הבאה בין הפרופילים:

השוואה בין הביצועים של הפרופילים האווירודינמיים



$$C_{L_{MAX}} = 2.37 \ @ \ \alpha = 9^\circ \qquad L/D \ \ @C_{L_{MAX}} = 63$$

$$C_{L_{MAX}} = 2.37 \ @ \ \alpha = 17^\circ \qquad L/D \ \ @C_{L_{MAX}} = 41$$

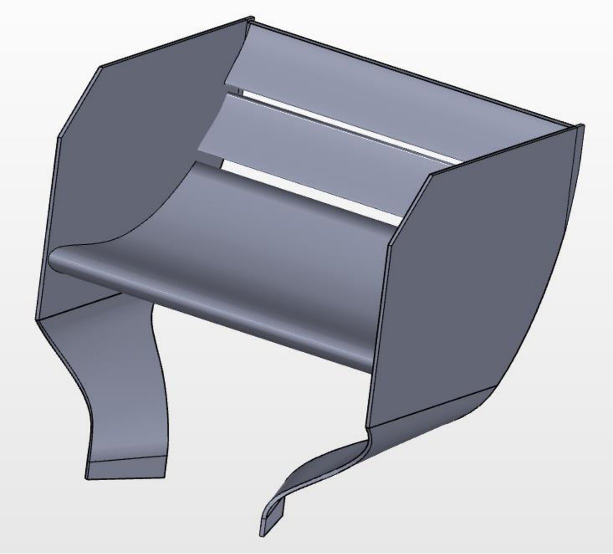
שאלה נוספת אותה בחנו היא האם עדיף להשתמש בארבעה פרופילים או בשלושה. שלושה פרופילים אל מול ארבעה יצרו כנף קמורה פחות אך בעלת פרופיל מרכזי גדול יותר. ככל שאנו שמים יותר פרופילים, אנו מגדילים את העקמומיות של הכנף האפקטיבית מאחר וכל פרופיל קטן שכזה מקבל זרימה בזווית גדולה יותר מקודמו. הבעיה בכמות אלמנטים גדולה היא שככל שכל אלמנט מותקן בזווית התקפה גדולה יותר, בסופו של דבר מקבלים אלמנטים כמעט אנכיים לכיוון הנסיעה, אשר מייצרים כוח אפקטיבי לאחור (הדאונפורס של האלמנט האחרון שבזווית גדולה מופנה לאחור ולכן הוא למעשה גרר).

לאחר קבלת כנף עם שלושה אלמנטים בגדלים שונים עם כוח הצמדה חסר תקדים של 680 N (סימולציה ללא רכב), במהלך האינטגרציה של מודל זה הובחן כי מרבית הכנף חסומה ע"י מושב הנהג ומשטח הראש. לכן הוחלט

להחליף לתכן של אלמנט ראשי גדול יותר ושני אלמנטים קטנים בגדלים אחידים נוספים (עם אותו המיתר של כנפי צד לצורך חסכון בתבניות), באופן זה ניתן יהיה להרים עד למגבלת המיקום את גובה הכנף מעל למכשולים.

עבור התכן הקודם (680N), בחקר האנליזה נתגלה כי החלק המעוקל של האנדפלייטס יוצר עילוי כלפי מעלה. תופעת לוואי זו יוצרת כח הפוך לזה אשר אנו מנסים ליצור באמצעות הכנף ועל כן, ועל מנת להפחית משקל נשקלה אופציית הוספת חורים בחלקים התחתונים של האנדפלייטס.

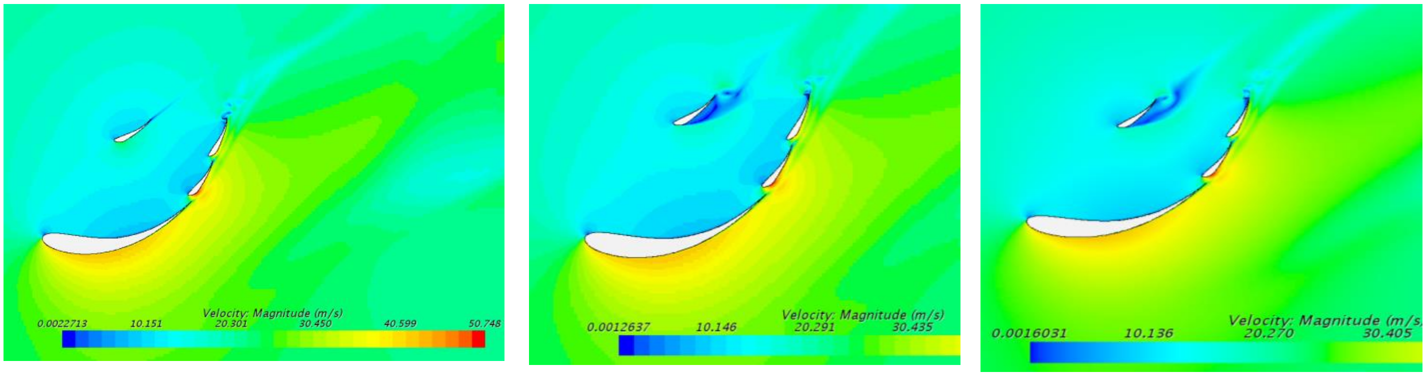
התכן של כנף עם אלמנט ראשי גדול יותר ושניים קטנים הניבה כעת רק כ- 528 N דאונפורס.



תצורת הכנף שהניבה 528 N

לאחר אנליזות זרימה רבות הבנו שעלינו לשפר את ביצועי הכנף. כאמור, מהנדסת מערכת קיבלנו דרישה לכוח הצמדה של 700 ניוטון ואילו מהסימולציות על הכנף קיבלנו כ- 560 ניוטון בסימולציית stand-alone.

לכן, החלטנו להוסיף פרופיל עילי שמטרתו היא לשפר את ביצועי הכנף. תרומת הפרופיל הרביעי עצמו היא 10 ניוטון של כוח הצמדה, אך כיוון שהוא מאלץ זרימה בלחץ גבוה יותר על שאר האלמנטים הוא משפר את כוח ההצמדה הכולל לכ-600 ניוטון ללא הפרעות.



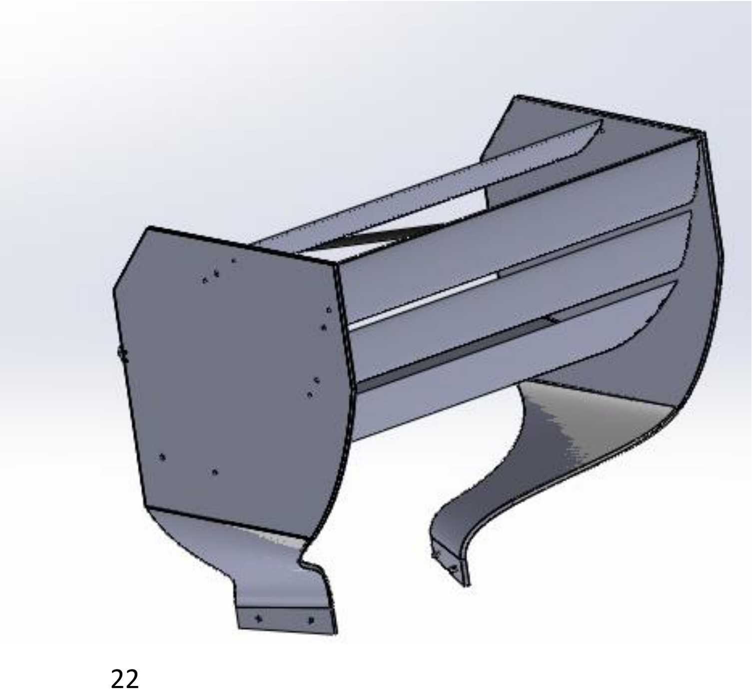
תוצאות סימולציות עבור זווית התקפה שונה לאלמנט בקומה השנייה

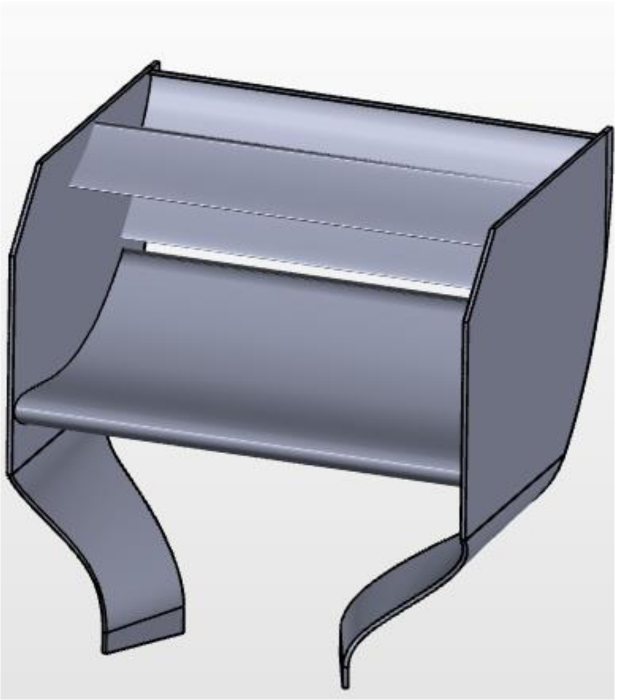
ראשית, אלמנט זה נבדק בחלק הקדמי עליון של הכנף, אך עקב עקמומיות האלמנט הראשי הנ"ל מייצר מעין מנהרה מתבדרת ולכן הזרימה על האלמנט העליון מנותקת. מיקום חדש נבחר במקום בו האלמנט הראשי מתעקל כלפי מעלה בכדי למנוע צורת מנהרה מתבדרת של חתך הצד, אכן במיקום החדש הפרופיל לא התנתק. נבדקו מס' זוויות, נבחרה זו עם יחס L/D מיטבי מבין השלוש.

סיכום ריצות CFD עיקריות (stand-alone):

Simulation configuration	Drag (N)	Down force (N)	Main element AOA	Conclusions
4 elements	230	460	9	
4 elements	276	566	11	
3 elements	275	564	11	
3 elements	320	680	11	big mid wing
3 elements	260	528	9	higher wing, smaller main element
3 elements	280	560	10	front upper wing
3 elements	301	590	10	mid upper wing, AOA 30 , main wing gains 15 more N in DF
3 elements	312	592	10	upper wing AOA 35 (deg)
3 elements	305	584	10	upper wing AOA 40 (deg)

מודל סופי





מפרט ונתונים כלליים

- אלמנט ראשי, מוטה 860 מ"מ, מיתר 550 מ, מילוי פוליאורתן
- 2 אלמנטים עליונים, מוטה 860 מ"מ, מיתר 150 מ"מ, מילוי פוליאורתן
- משקל סופי (כולל חיזוקים באנדפלייטס) 7 kg
- 590 N – Downforce (stand-alone)
- 305 N – Drag (stand-alone)

כנפי צד

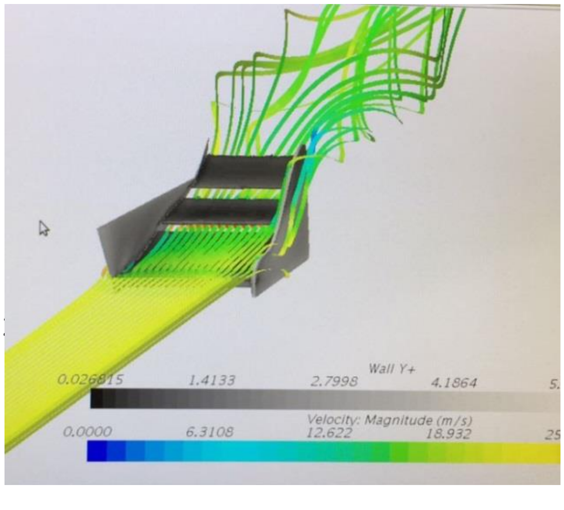
מכלול זה נבנה בפעם הראשונה בעבור רכב הפורמולה ללא רפרנסים משנים קודמות.

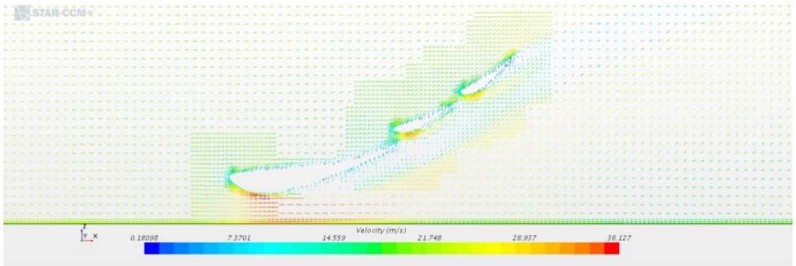
כנפי הצד באות במגע עם זרימה טורבולנטית כתוצאה מכנף קדמית והגלגלים הקדמיים. בעייתיות זו הקשתה עלינו להגיע למסקנות בנוגע לאפקטיביות המכלול בהיבט הרכב השלם, כאשר בשלב התכן האווירודינמי כלי התכן הזמין היה סימולציות כל רכיב בנפרד.

עקב הראשוניות, ביצענו סימולציות בשיטת 'ניסוי וטעייה' מאחר וישנו מספר גדול של דרגות חופש אשר משפיעות על ביצועי המכלול, כגון: זוויות התקפה של כל כנף, מרחק אנכי ומרחק אופקי בין שתי כנפיים סמוכות, גודל מוטת הכנף וכו'. כמות דרגות החופש כמובן גדלה ככל שמשתמשים ביותר אלמנטי כנף במכלול. לכן, לאחר הרצת תוכנת תכן ראשוני שקבעה באופן ראשוני את גודל מיתרי הכנף שבהם נשתמש וגודל זווית ההתקפה, השתמשנו בסימולציות CFD על מנת לקבל את אופי הזרימה בסביבת הכנפיים וכמובן לקבל את נתוני כח ההצמדה שהמכלול מייצר.

כאמור, מאפיין בולט של תכנון כנפיים בעלות מנת ממדים נמוכה הוא תופעות קצה כנף. על מנת להפחית את התופעה הזו ולעמוד בדרישות כוח ההצמדה:

- Endplates בקצוות הקיצוניים.
- ניצול מלוא אורך מוטה המותר על פי התקנון על מנת להשיג מוטה גדולה ככל האפשר.



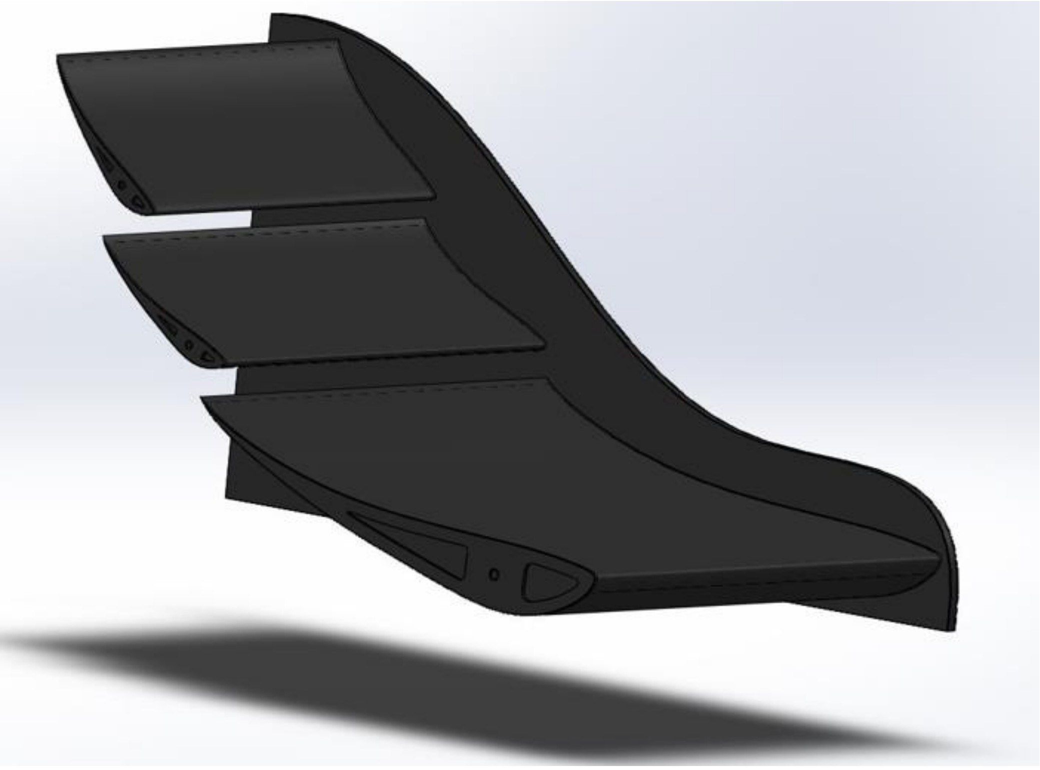


תוצאות אנליזה למערך כנפי צד

סיכום ריצות CFD (stand-alone):

Drag (N)	Down force (N)
37	**113**
56	**147**
69	**279**
74	**300**
81	**320**

מודל סופי



מפרט ונתונים כלליים

- 1 כנף תחתונה, מוטה 250 מ"מ, מיתר 400 מ"מ, מילוי פוליאורתן
- 2 כנפיים עליונות, מוטה 250 מ"מ, מיתר 150 מ"מ, ללא מילוי
- משקל כולל של המכלול: 3 ק"ג.

אנדרטריי

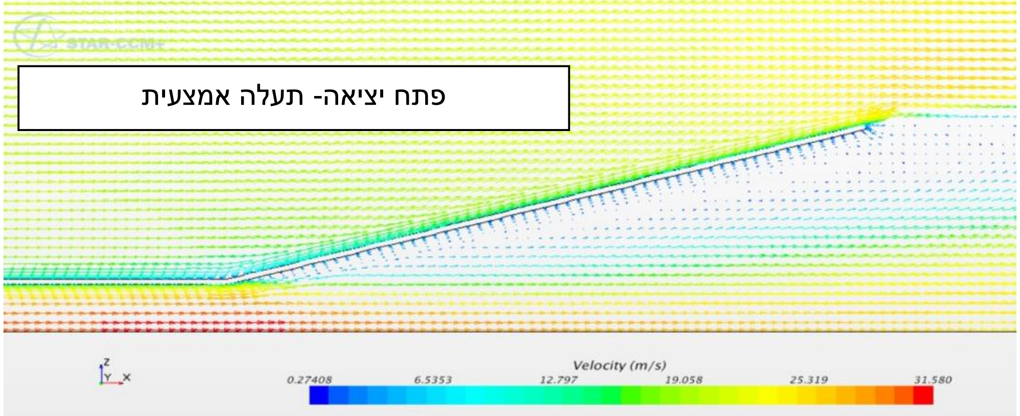
הרצפה האווירודינמית של רכב מרוצים, המכונה אנדרטריי, יוצרת אזור לחץ נמוך מתחת לכלי הרכב ובכך יוצרת כוח יניקה המצמיד את הרכב לקרקע.

הקווים המנחים לתכן האנדרטריי כפי שנקבע על ידי הנדסת מערכת וצוות אנדרטריי הם:

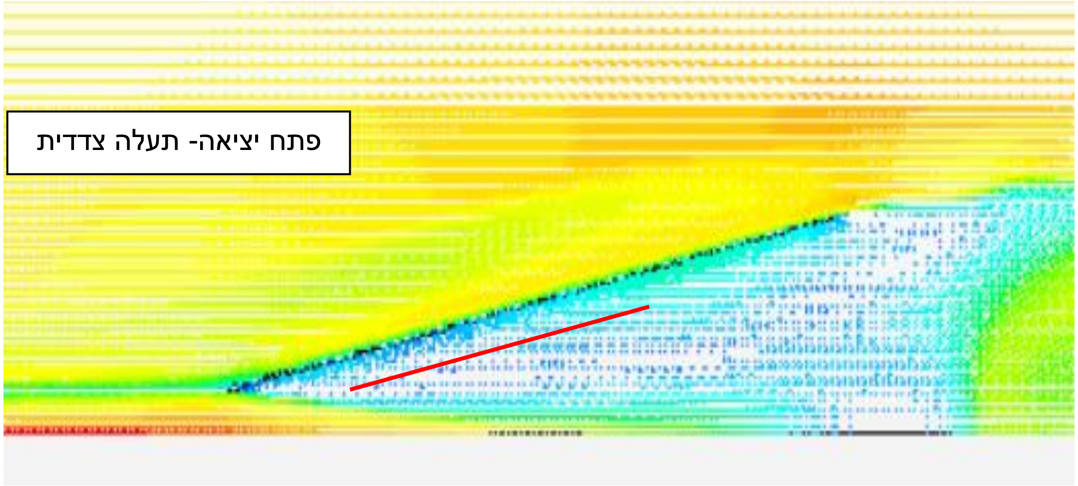
- כיסוי שטח מרבי:
  - הכוח המצמיד לקרקע יושפע בצורה חזקה מכמה שטח מכסה האנדרטריי, כיוון שזהו השטח שבו הזרימה תואץ מעבר למהירות הנסיעה. עיקרון זה אופייני לבעיות אווירודינמיקה – יותר שטח, יותר כח. לכן נרצה אנדטרטריי שמנצל את כל השטח מתחת לרכב תוך וזאת תוך כדי שמירת מרחק מכנפי צד, כנף קדמית, השלדה ורכיבים אחרים.
- דיפיוזרים בעלי שטח חתך מרבי ביציאה:
  - אחד העקרונות עליו מסמך תכן זה הוא שחתך היציאה של הדפיוזר יהיה מתואם עם הסביבה כיוון שהזרימה הינה תת קולית ובלתי דחיסה. מתוך זה נובע שהגדלת שטח חתך היציאה של הדפיוזר יביא למהירות גבוהה יותר בשטח חתך הצר ביותר מתחת לרכב – רצפת האנדרטריי. נרצה לתכנן לדפיוזר גדול ביותר שיעמוד בתקנון ולא יפריע לרכיבי המנוע של הרכב הנמצאים בחלקו האחורי.
- הארכת הכונס קדמי כך שיגיע עד הכנף הקדמית:
  - החלק האמצעי של הכנף הקדמית לא מתפקד ככנף אלא ככונס עבור הזרימה שנכנסת אל מתחת לכי הרכב. על מנת "לתפוס" זרימה זו שהואצה ע"י הכנף הקדמית, נרצה להאריך את האנדטרטריי כל שיהיה רצף של משטחים שימנע זליגה של אוויר לצדדים או לחלק שמעל לאנדרטריי.
- חיבור רכיב האנדרטריי אל המתלים של הרכב:
  - בעקבות תופעת ה"גלגול" של האנדטריי שזוהתה לאורך השנים בפרויקט, הוחלט שיש השפעה חזקה של זליגת האוויר החוצה לצדדים במהלך פניות. לכן השנה נרצה לנתק את הצימוד של שלדת הרכב והאנדרטריי ולהקטין את האבדות של כח ההצמדה בפניות.

בוצעו הסמסטר מספר אנליזות CFD על מנת לבדוק את התנהגות הזרימה בתעלות האנדרטריי ולבדוק את כמות ה-Down Force המתקבל במהירות נסיעה של 80 קמ"ש.

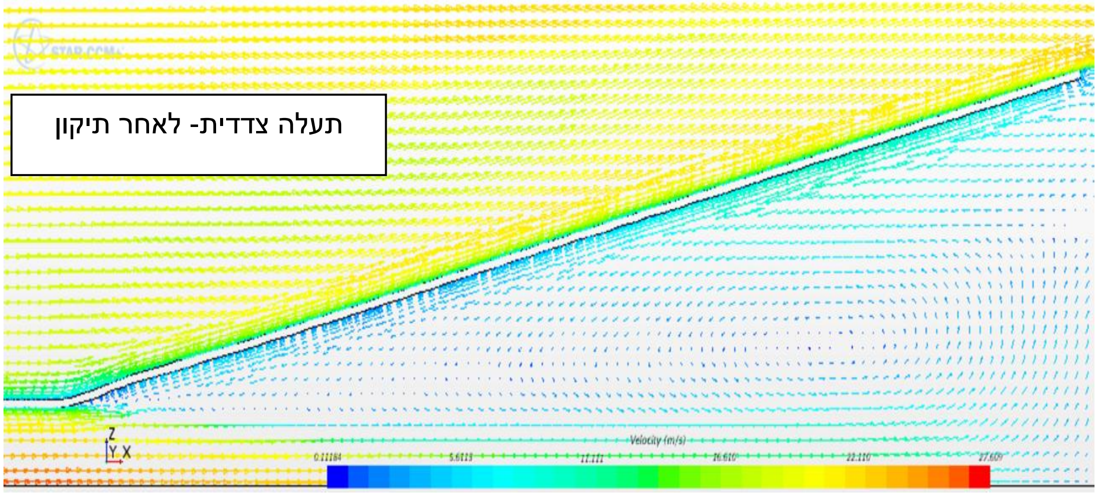
לאחר חישובים קיבלנו שעל מנת לקבל ערך מרבי לכוח ההצמדה, עלינו לתכנן את זוויות פתחי היציאה כך שלא תעלנה על 16 מעלות, חריגה מזווית זו תביא לניתוקי זרימה, ניתוקים אלה יביאו לירידה דרסטית באפקטיביות של האנדרטריי.
חלק מהאנליזות ביצענו ברשת גסה, משם התקבלו תוצאות טובות, אך כאשר ביצענו את אותן אנליזות אך ברשת עדינה התקבלו ניתוקי זרימה.



מהתמונה של **פתח היציאה של התעלה האמצעית** ניתן ללמוד שקיימים ניתוקי זרימה (ניתן לראות מעל הפס האדום המסומן, היכן שהרקע לבן **ואינו** מלא בחיצים).
הניתוקים נבעו כתוצאה מזווית הגדולה מ-16 מעלות.
לכן, לאחר אנליזה זו תיקנו את פתח היציאה לזווית המתאימה.



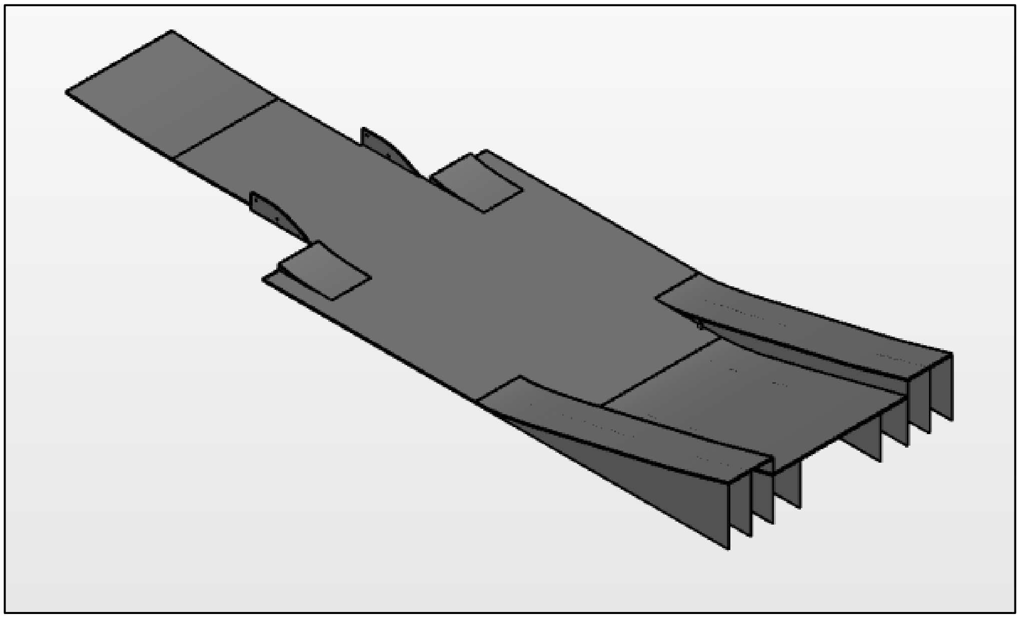
בפתח היציאה של התעלה הצדדית ניתן ללמוד גם כן שישנם ניתוקי זרימה, בעיקר בתחילת הפתיחה (סביב הפס האדום).
גם כאן, ניתוקי הזרימה באו עקב זווית לא נכונה.
לאחר בחינת הנתונים תוקנה זווית הפתיחה במקומות הנחוצים.

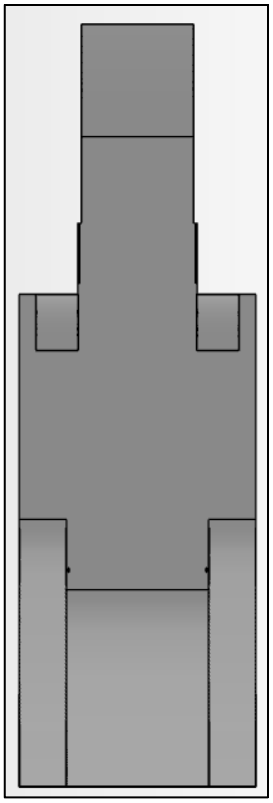


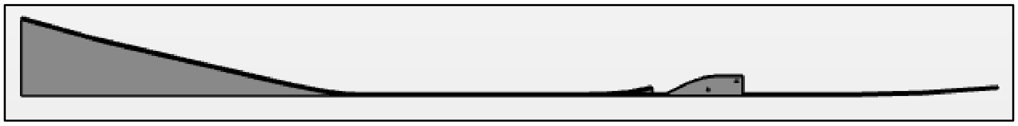
מפרט ונתונים כלליים

- משקל : 6.5 ק"ג
- רוחב מרבי: 0.84 מ'
- אורך מרבי: 2.7 מ'
- שטח חתך הדיפיוזר הצידי: 0.034 מ"ר
- שטח חתך הדיפיוזר המרכזי: 0.079 מ"ר
- גובה מתוכנן מעל לקרקע: 5 מ"מ
- עובי האנדרטריי: 7 מ"מ סנדוויץ', 4 שכבות קארבון – שכבת דיוינסל – 4 שכבות קארבון
- כל שכבת קארבון: 0.23 מ"מ כלומר כל צד סנדוויץ הוא 0.92 מ"מ ושכבת הדיוינסל ממלאת את הנותר

תמונות CAD







סימולציות CFD

סימולציות ממוחשבות הן כלי שימושי מאוד בעולם התכן הראשוני וכן התכן הסופי. יתרונות הסימולציות בהשוואה לניסויי מנהרה: מהירות, זולות ואינן מצריכות בניית דגמים. חסרונן העיקרי הוא חוסר הוודאות בנוגע לתיקופן. על מנת לבצע סימולציה מהימנה על מהנדס הסימולציה לתקף את תוצאותיו או לבסס על תוצאות קיימות בשל מגוון סיבות:

- צפיפות תאי הרישות משפיעה על זמן התכנסות ועל התוצאות.
- סוג תאי הרישות לעיתים משפיע על התוצאות.
- סוג המודל משפיע על התוצאות (למשל שימור במודלים טורבולנטים שונים).
- הגדרות נכונות של משטחים ומכלולים נעים (באופן כללי הגדרת תנאי שפה).

נדרש ידע מוקדם וניסיון בתחום הסימולציות הממוחשבות על מנת להפיק תוצאות מהימנות מסימולציית זרימה מורכבות. בתחילת השנה עברנו הדרכה מפורטת על ידי המנחה שלנו, אלון דהן, נוסף על צפייה בסרטוני הדרכה וביצוע תרגולים מובנים של תוכנת הסימולציה.

קישור לסרטוני ההדרכה של מפתחי התוכנה:

https://www.youtube.com/playlist?list=PL7YxfLbuHksWQjs0EeVhatoVxJqio4E89

עקב הזמן שנדרש להכרת התוכנה, צבירת ניסיון בה והבנת מתודת העבודה, אופן ביצוע התכן האווירודינמי במהלך השנים הקודמות בפרויקט היה על מכלולים נפרדים מהרכב, שכן אנליזה שכזו הינה מורכבת למדי ודורשת בשלות בעבודה עם תוכנות מסוג זה. בפרקים הקודמים הראינו תוצאות חלקיות של העבודה על המכלולים השונים בנפרד, נקדיש את חלק זה על העבודה על מודל הרכב המלא ותוצאותיו.

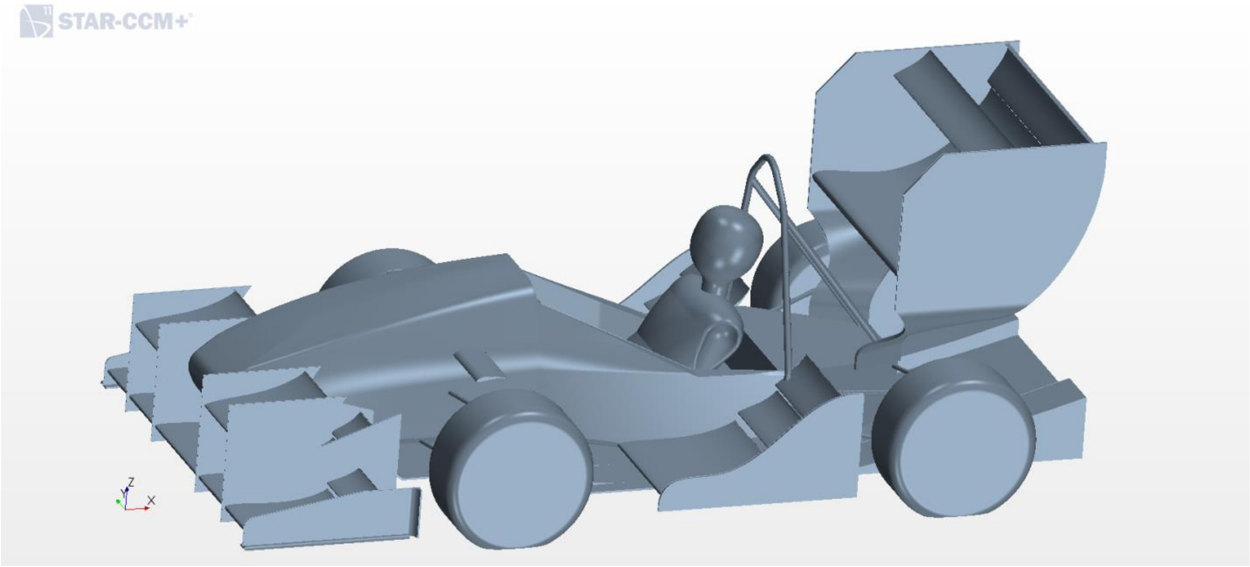
שיטת העבודה

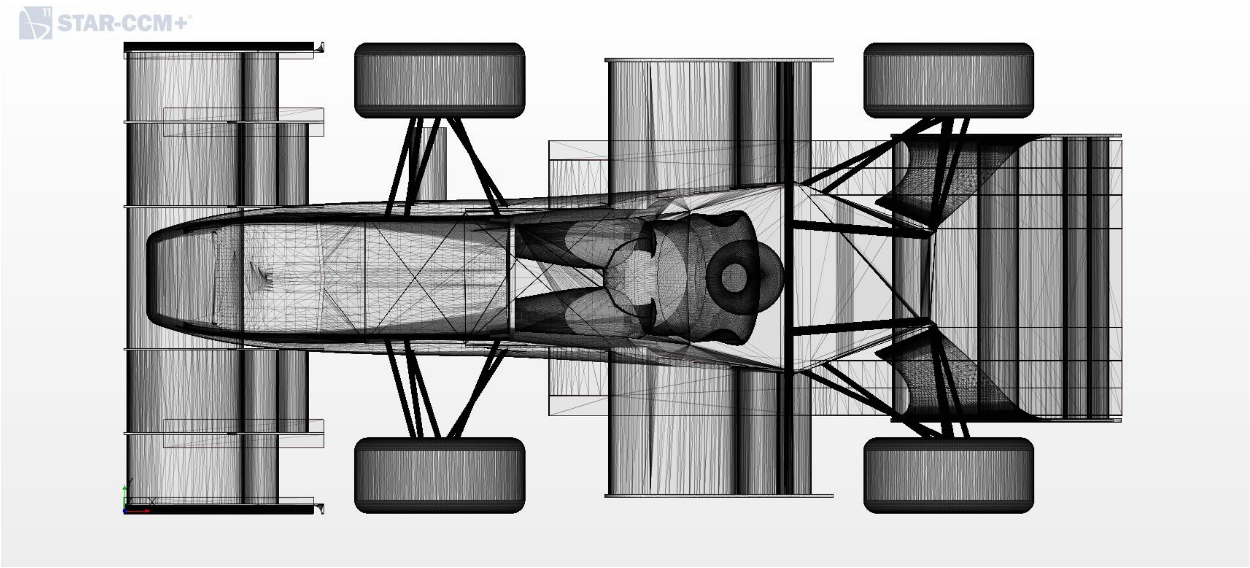
סדר העבודה עם הסימולציות:

- הכנת מודל מפושט ב Solid . הדגש הוא למלא את כל המכלולים מבלי להשאיר חללים ריקים. הכוונה במודל מפושט הוא מחיקת כל המכלולים המורכבים, כגון מנוע, בלמים וכל מכלול אשר עשוי להקשות על הריצה.
- טעינת המודל בתוכנה STAR-CCM. בדיקת המודל לפני התחלת העבודה בדגש על מכלולים אשר חודרים מכלולים אחרים.
- הכנת הסימולציה לריצה בדגש על רישות מתאים בדגש על ציפוף תאים בחלקים ספציפיים.
- הרצה וניתוח הסימולציה. בניתוח הסימולציה חשוב לבדוק את תקינות "מנהרת הרוח" בהיבט הגודל, תאים "רעים", Wall y+ וציפוף מתאים (למשל בעקבת הרכב).
- לאחר הניתוח ותיקון במידת הצורך, יש צורך לבחון אי-תלות בסוג הרשת, אי תלות בכמות התאים ואי תלות במודל.

כאמור, עד היום עבדנו בצורת מכלולים נפרדים. לאחר הרצת סימולציות על הרכב השלם גילינו כי עבודה בצורה הזאת אינה אפקטיבית מכיוון שכל מכלול משפיע על כל מכלול (ישנם גם מכלולים נוספים של הרכב, כגון גלגלים), והתוצאות אשר מתקבלות מסימולציות נפרדות שונות מאוד מהתוצאות אשר מתקבלות מסימולציית רכב שלם (לעיתים במאות אחוזים). מלכתחילה יש לגשת לבעית האוירודינמיקה של רכב מסוג זה מתוך בחינת ההשפעות ההדדיות בין המכלולים במהלך התכן האיטרטיבי.

מודל רכב מלא





פרמטרים בריצה הסופית:

Mesh:

- Polyhedral Mesher. 40M Cells.
- Prism Layer Mesher. 12 Prism Layer.

Models:

- All y+ Wall Treatment
- RANS

- Constant Density
- Segregated Flow
- Exact Wall Distance
- Gas
- K-W Turbulence
- SST (Menter) k-w
- Steady
- 3D
- Gradients

Solver:

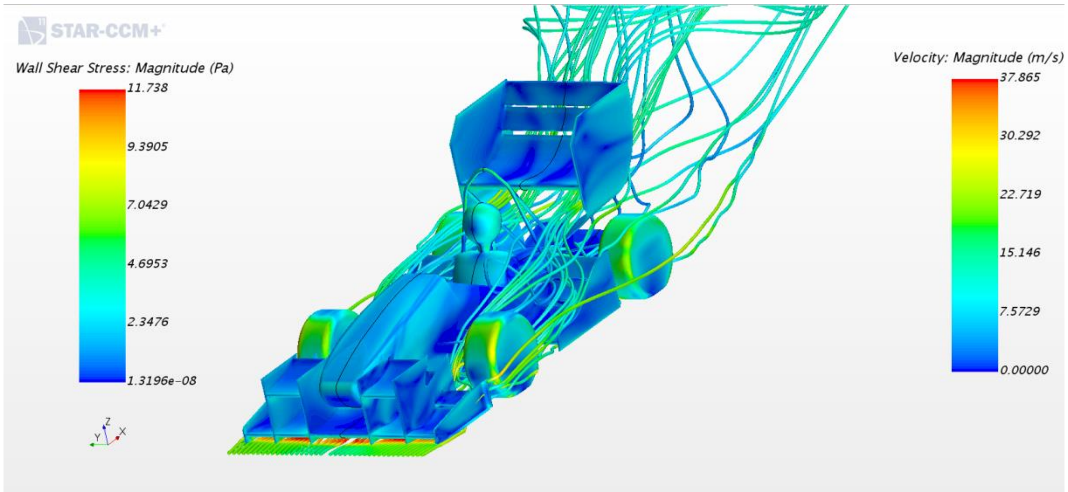
- Segregated Flow

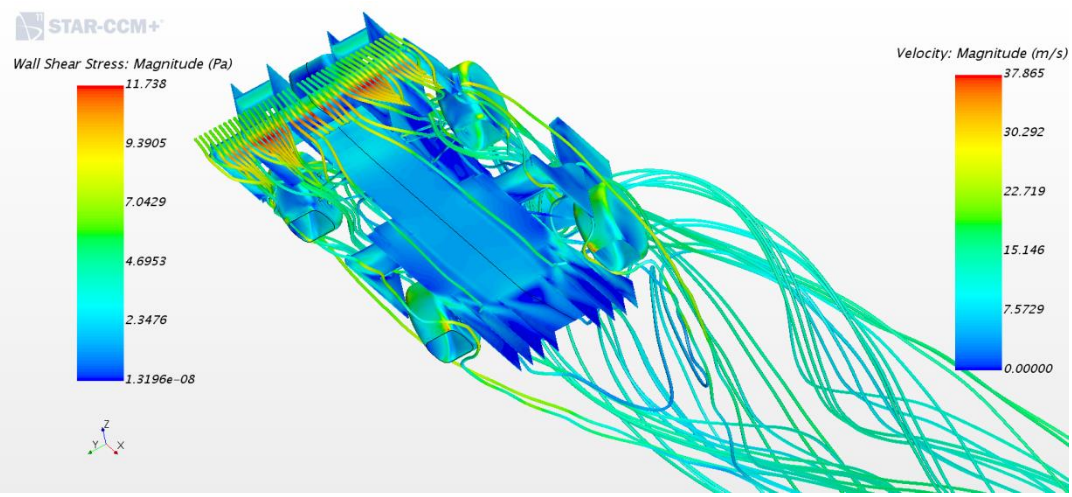
Computation:

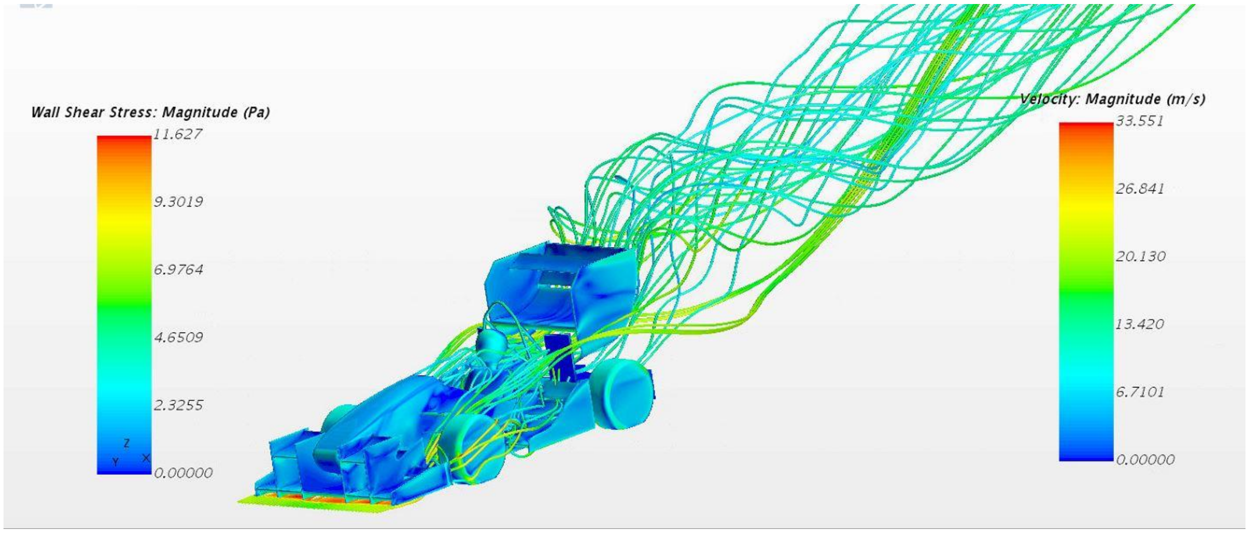
- CPU: 2 Intel Xeon CPU E5-2683 v4 @ 2.10GHz.
- 32 cores.
- Memory: 128 GB.
- Total of 10000 iterations.
- About 168 hours.

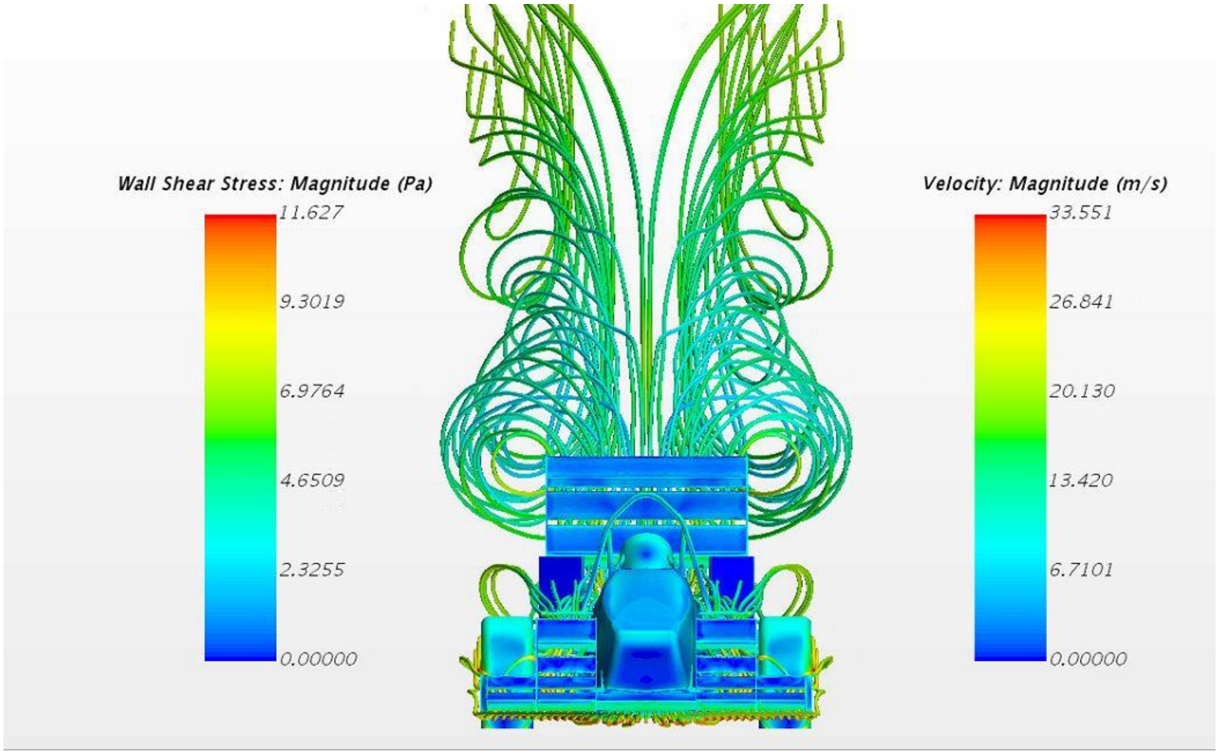
תוצאות ריצה מסכמת

קווי זרם:

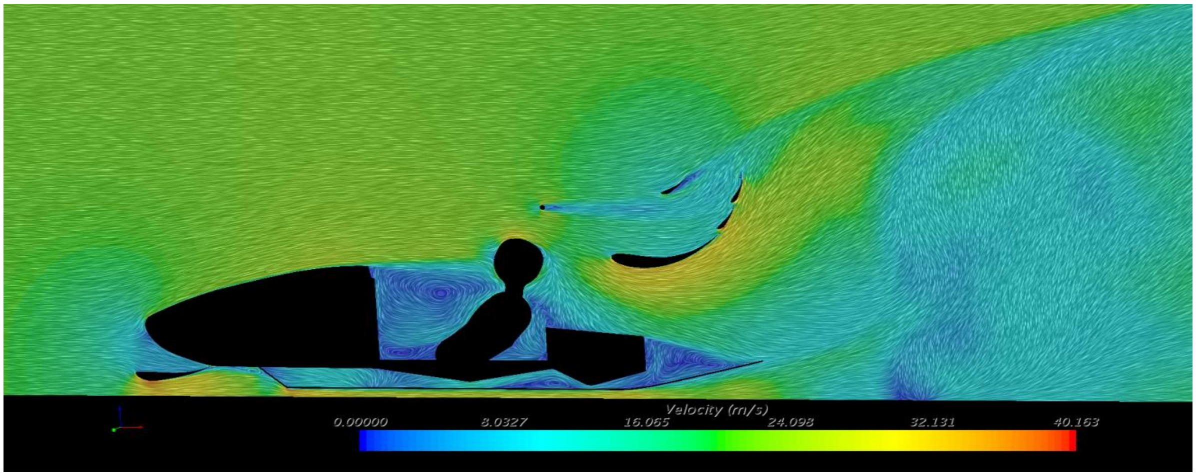


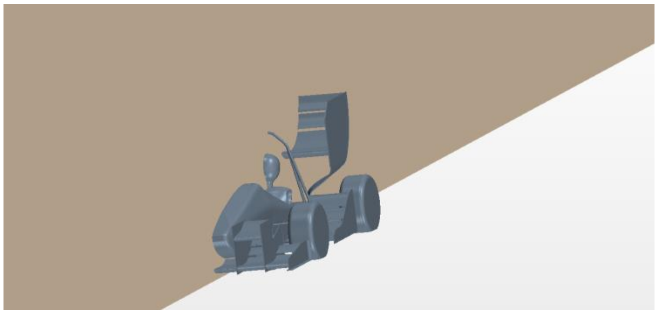


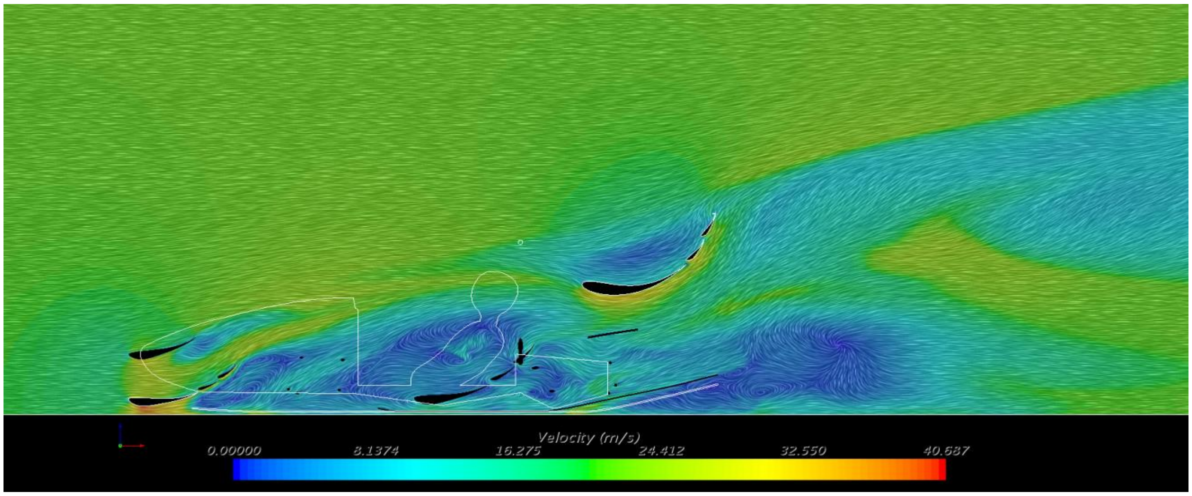

Wall Shear Stress: Magnitude (Pa)
11.627
9.3019
6.9764
4.6509
2.3255
0.00000
Velocity: Magnitude (m/s)
33.551
26.841
20.130
13.420
6.7101
0.00000

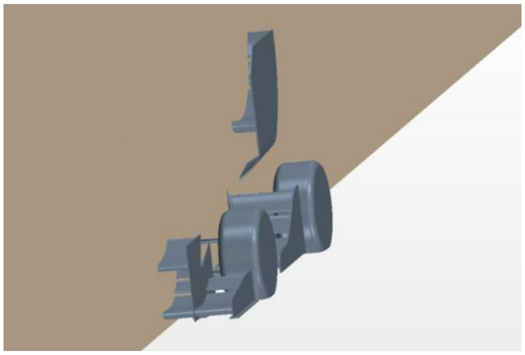

Wall Shear Stress: Magnitude (Pa)
11.627
9.3019
6.9764
4.6509
2.3255
0.00000
Velocity: Magnitude (m/s)
33.551
26.841
20.130
13.420
6.7101
0.00000

גודל המהירות בחתכים מיוחדים:



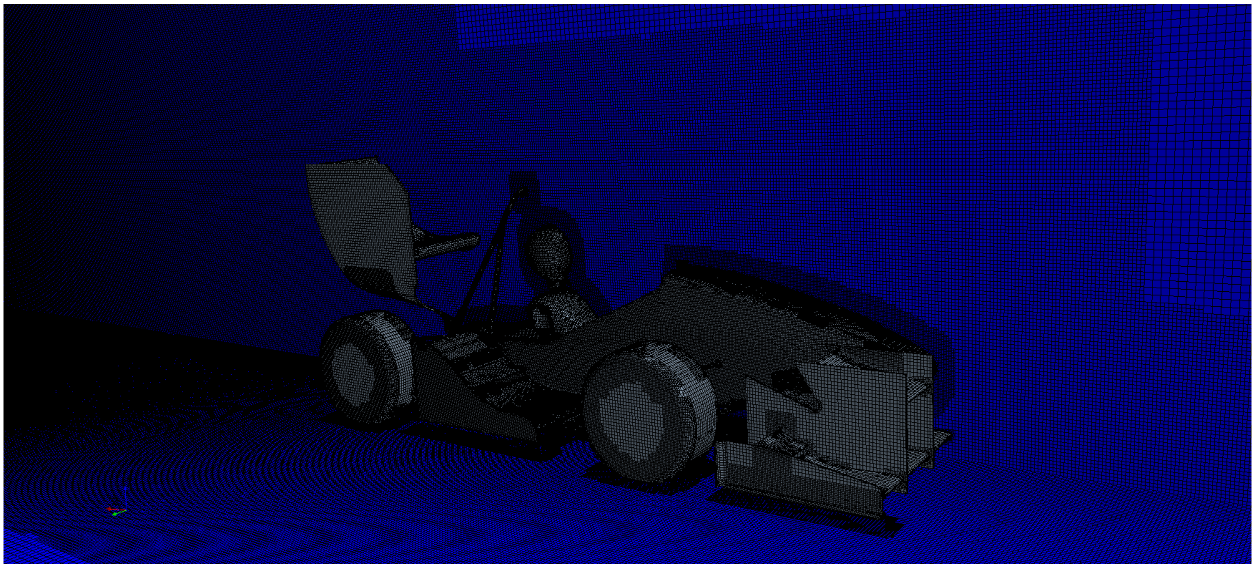




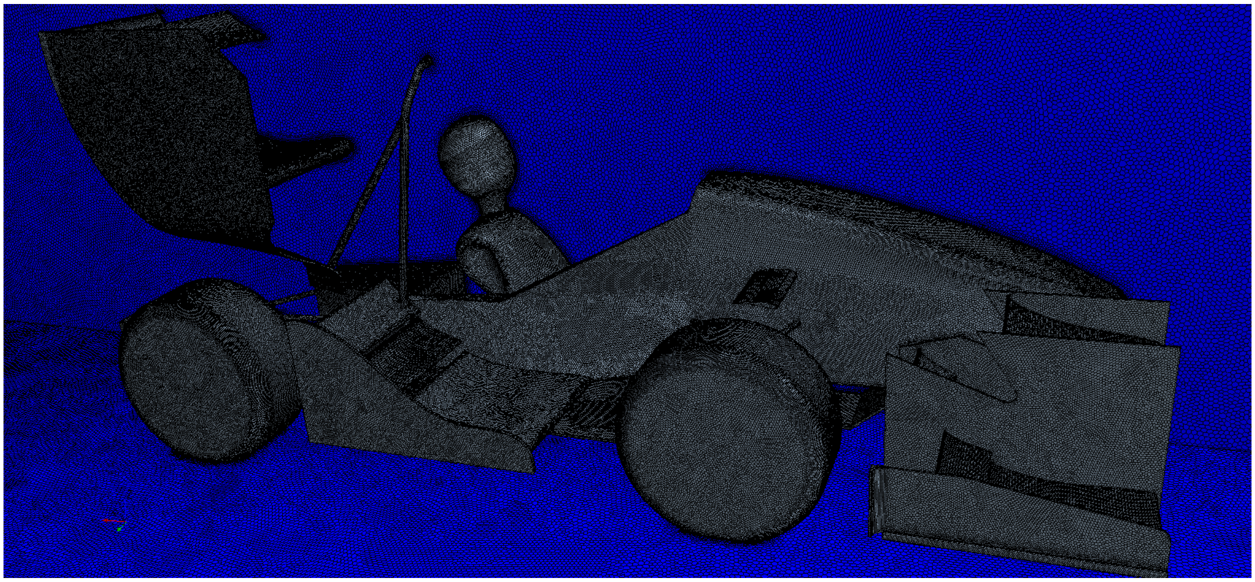


רישות:

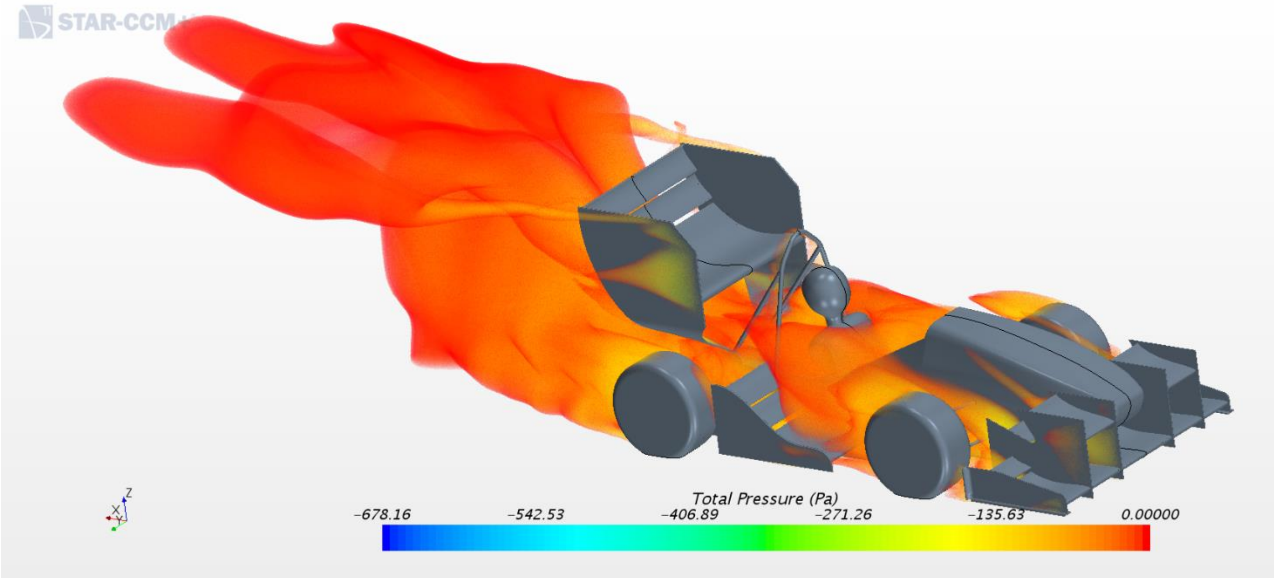
רישות גס:

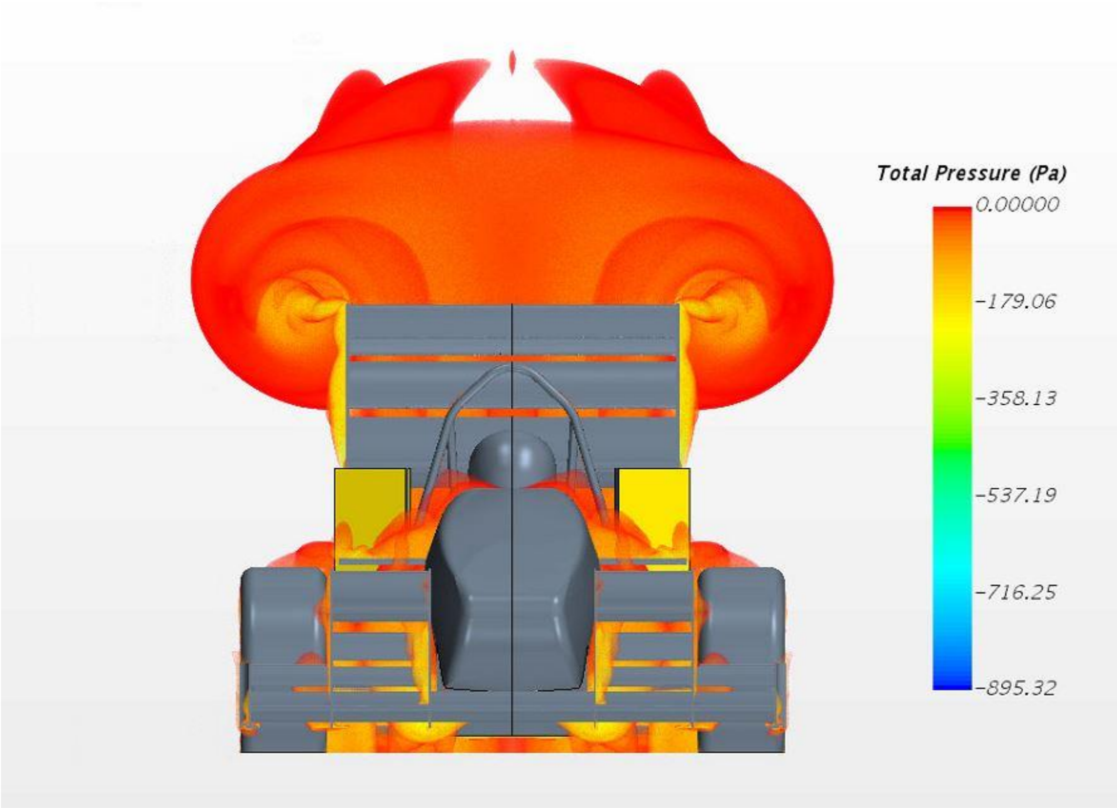


רישות עדין:

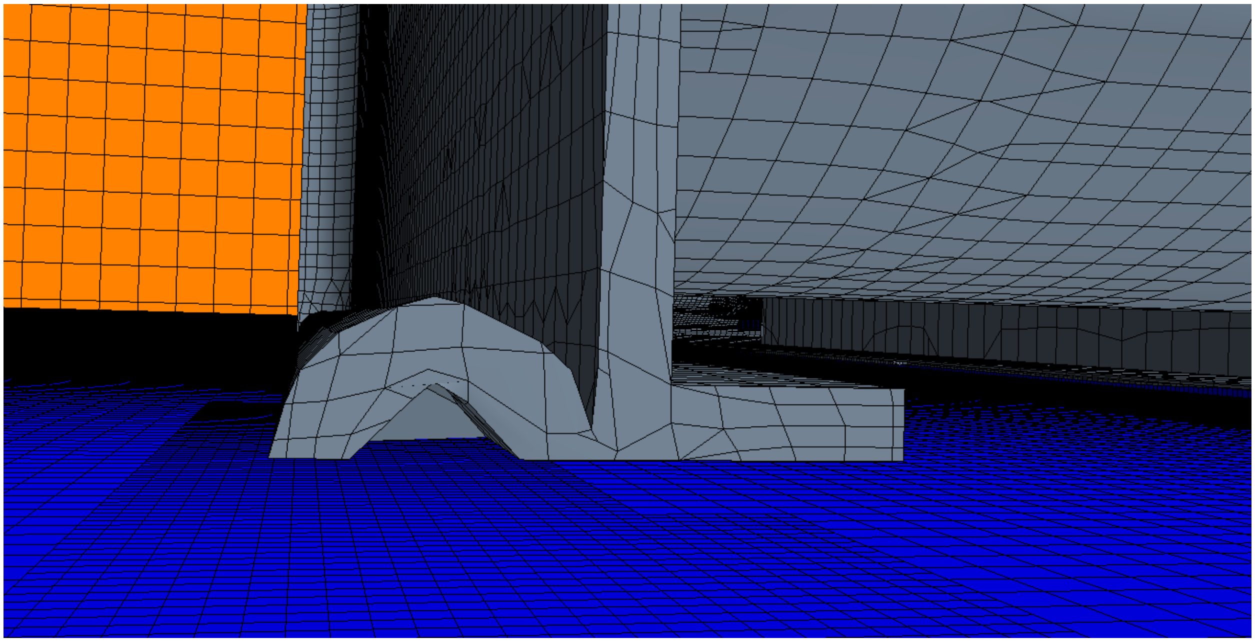


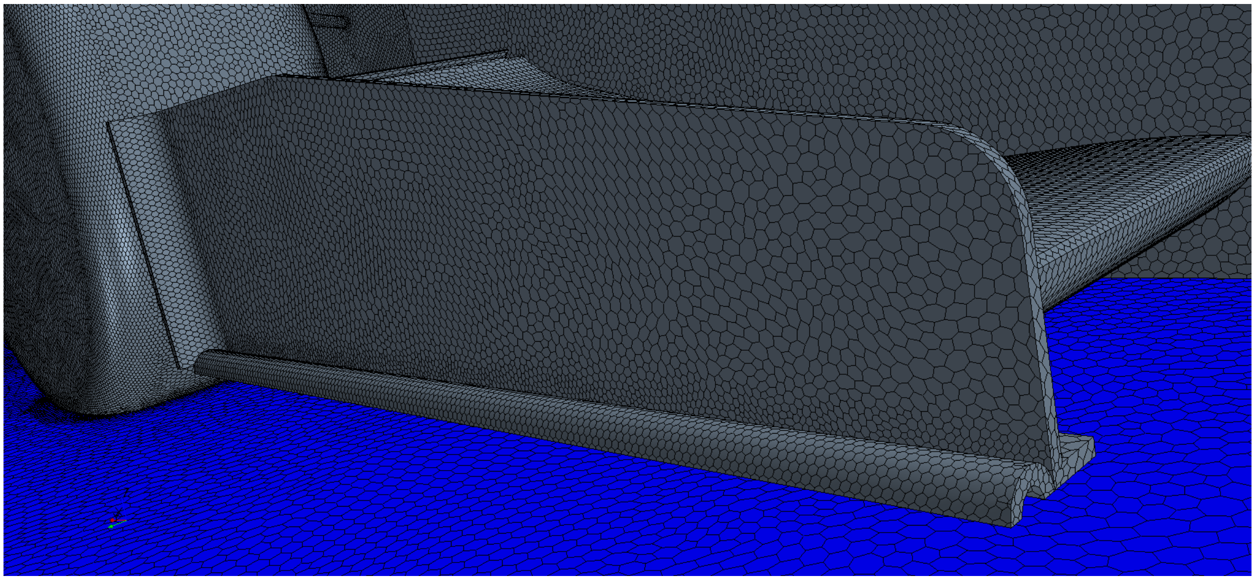
חקירת אזורי לחץ נמוך ותופעות לא איזנטרופיות (כגון מערבולות וניתוקים):





שימוש בשני סוגי רישות:





סיכום סימולציה ומסקנות

הטבלה הבאה מרכזת את נתוני הסימולציות הנפרדות של המכלולים אל מול הממצאים מסימולציית הרכב המלא:

		Downforce N	Drag N	Cl	Cd	Cl/Cd	DF efficiency	Cl/Cd efficiency
Rear wing	stand-alone	590.00	301.00	1.13	0.58	1.96	0.52	**0.88**
	full vehicle	305.30	177.00	0.58	0.34	1.72		
Front wing	stand-alone	475.00	120.00	0.91	0.23	3.96	0.59	**0.90**
	full vehicle	281.72	79.00	0.54	0.15	3.56		
Side wings	stand-alone	320.00	80.84	0.48	0.08	4.21	0.35	**0.21**
	full vehicle	112.00	194.38	0.17	0.19	0.87		
Undertray	stand-alone	138.00	39.43	0.26	0.08	3.50	0.68	**0.89**
	full vehicle	94.00	30.08	0.18	0.06	3.13		
total vehicle		793.02	480.46	1.28	0.78	1.65		

ניתן לראות באופן חד משמעי את השפעת כלל הרכב בהפחתת כלל הכוחות האווירודינמיים על המכלולים השונים. עמודה שניה משמאל – "DF (Down Force) efficiency" מטרתה להראות מעצם המעבר לסימולציה מלאה, כמה כוח הצמדה אנחנו "מפסידים" מעצם התקנת הכנף על הרכב. העמודה השמאלית ביותר – "Cl/Cd efficiency" מטרתה להראות לנו כמה אנחנו משלמים בגרר יחסי מעצם התקנת הכנף על הרכב.

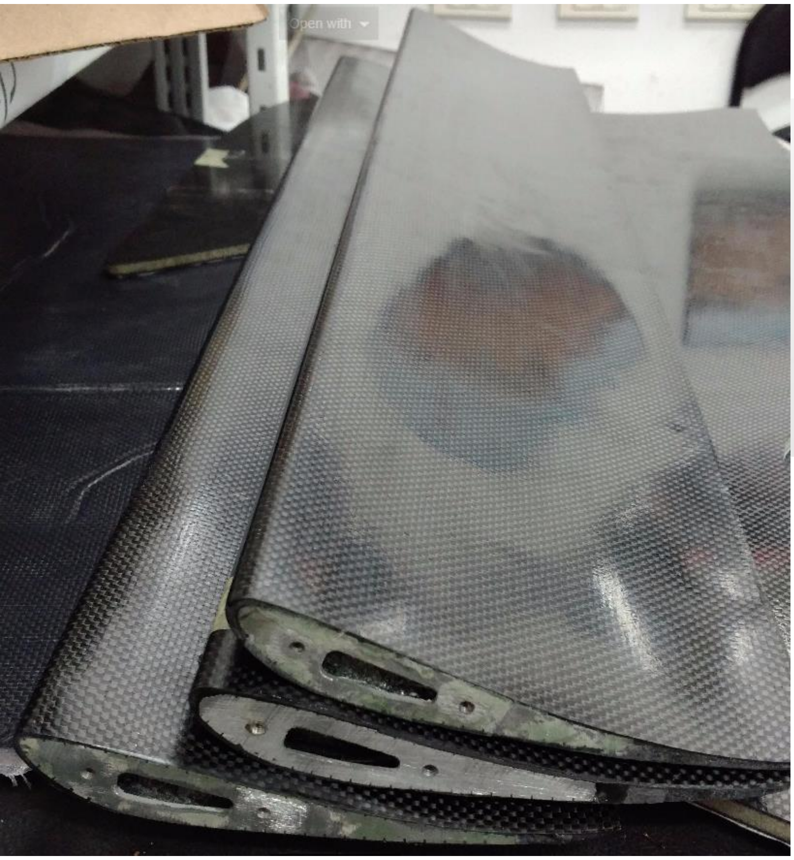
מטרת הטבלה היא הבנה כמותית של אופן "הפגיעה" במכלולים השונים במעבר לסימולציה מלאה, ומכאן לפתח אסטרטגיה לעונות הבאות באיזה מהמכלולים יש לשים דגש ולמה, תחת הבנה שלא ניתן להפריד את התנהגות הרכב השלם לסך חלקיו.

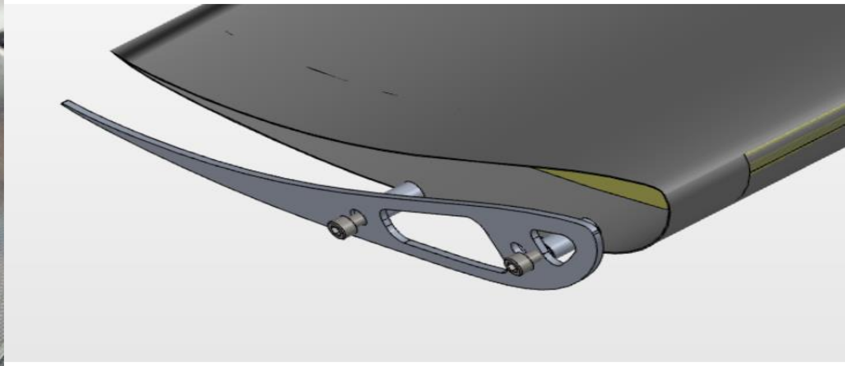
תכן מכאני, שיטות ותהליכי ייצור

תכן כלל האלמנטים:

- הנחה רטובה של carbon fiber 195 בצורת אריג
- סקין חיצוני עשוי משתי שכבות בד (צמצום מ-3 שכבות בשנים קודמות)
- שרף עיקר בשימוש – אפוקסי EP520, שרף משני כתלות בזמינות EP5052
    - סיבה עיקרית לשימוש ב-EP520 יותר בריא למשתמש (פחות אלרגני)
- מילוי מרבית האלמנטים בפוליאוריתן מוקצף לצורך יציבות מבנית
- פרופיל אלומיניום בכל קצה אלמנט לצורך חיבור חיצוני לאנדפלייט\ברקט בשלדה
    - מחובר לסקין האלמנט בעזרת אפוקסי DP460
    - חיבור חיצוני בעזרת אינסטרים עם הברגה פנימית (m4/m6)

נספח ג' מציג בהרחבה אנליזה אורתוטרופית לחוזק אלמנט כנף בתכן הנ"ל.





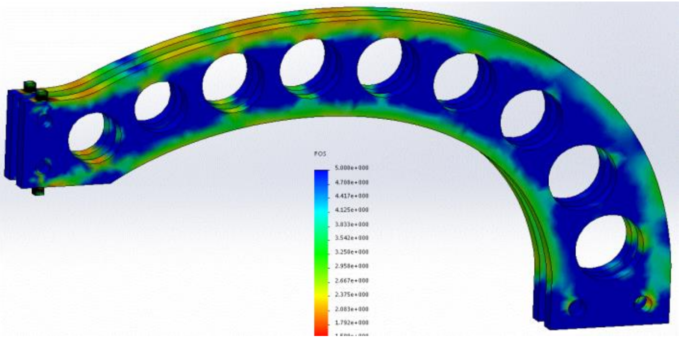
מודל אלמנט כנף הכולל את הסקין, מילוי פוליאורתן, פרופיל אלומיניום, איסרנט ובורג לחיבור חיצוני

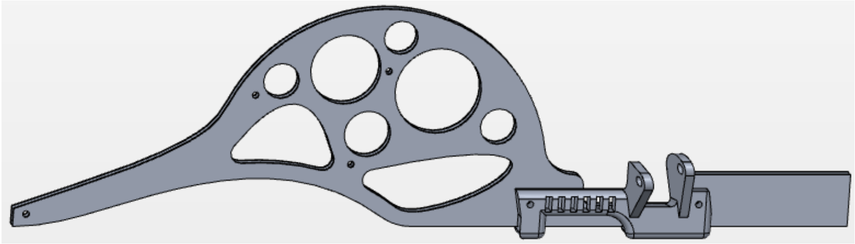
אלמנטים מוטה 860 מ"מ מיתר 150 מ"מ לכנף אחורית

Front Wing's "Armadillo-plate"

כחלק מקונספט החיבור לנק' במערך המתלים הקדמיים (עליה יורחב בהמשך) אשר ממוקמת יחסית רחוק ממרכז הכובד של הכנף, נוצר צורך בתכן גשר קל וחזק, אשר מטרתו להעביר אחורה אל נק' החיבור את כלל הכוחות והמומנטים שהכנף מייצרת הן מכוחות אווירודינמיים והן מאינרציאליים.

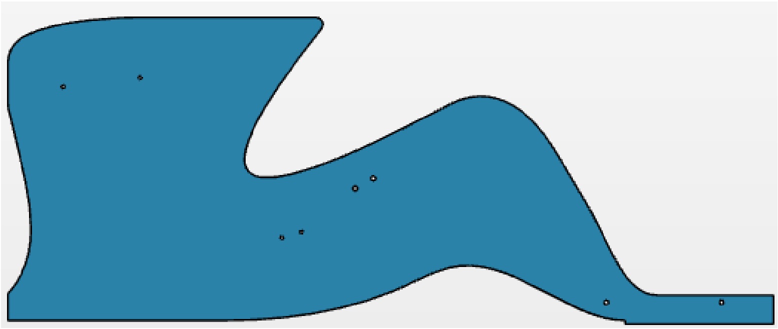
התכן עבר גרסאות רבות, הראשונות שבהן מאלומיניום, אך בסופו של דבר על מנת לחסוך במשקל (וכן על מנת לאתגר את יכולות התכנון והייצור של הצוות) הוחלט על יחידה בודדה אשר בחלקה הקדמי משמשת כאנדפלייט מרכזי בתוך הכנף, ובחלקה האחורי מהווה את הגשר להעברת הכוחות אל נקודת החיבור האחורית במתלים.





איטרציות גשר מבני לכנף קדמית

- באחת האיטרציות פרופיל גשר החיבור דמה לפרופיל ראשו של ארמדיל, ומכאן הגרסה הסופית זכתה בשמה: "armadillo-plate".



מודל ארמדילופלייט

פורמולה טכניון – צוות אווירודינמיקה – 2017

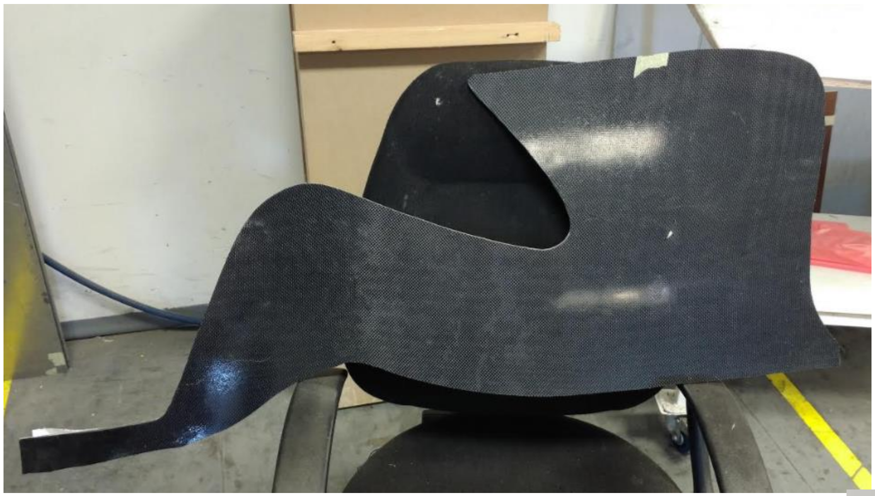
הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הטכניון, ישראל

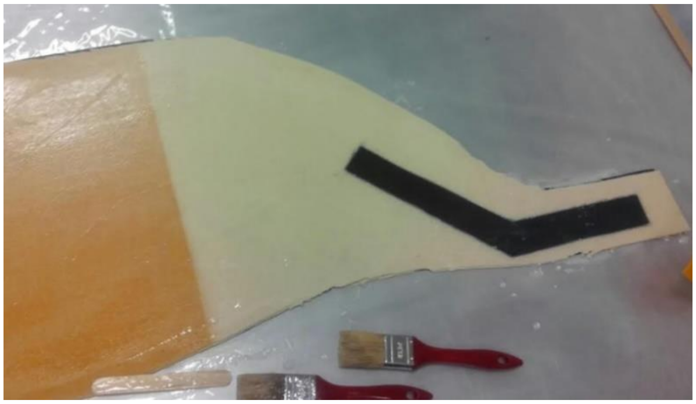
חלקו האחורי של הארמדילופלייט מתוכנן באופן שיעביר את הכוחות והמומנטים ע"י מגע גיאומטרי עם מחבר אלומיניום יעודי אשר מתממשק לרוקר (עליהם יורחב בהמשך).

תחת הבנה כי הרכיב יזדקק לעמוד בעומסים רבים וכן בדרישות שקיעה מחמירות ביותר עבור הכנף ולאור הקושי בייצור סימולצית חוזק אמינה לחומרים מרוכבים, הוחלט לייצר גרסת ניסוי ראשונית, ולהסיק מסקנות על התכן הסופי ואופן הייצור בהתאם להתנהגותה בפועל.

הארמדילו אשר תוכנן יורכב כאנדפלייט בעל 4 שכבות בד מכל צד של הדוויניסל, ובעל שתל חיזוק (25 שכבות בד) בחלקו האחורי אשר מטרתו לשאת בעומסי הכפיפה בצוואר האחורי וכן כחיזוק בנקודות החיבור לאלומיניום.

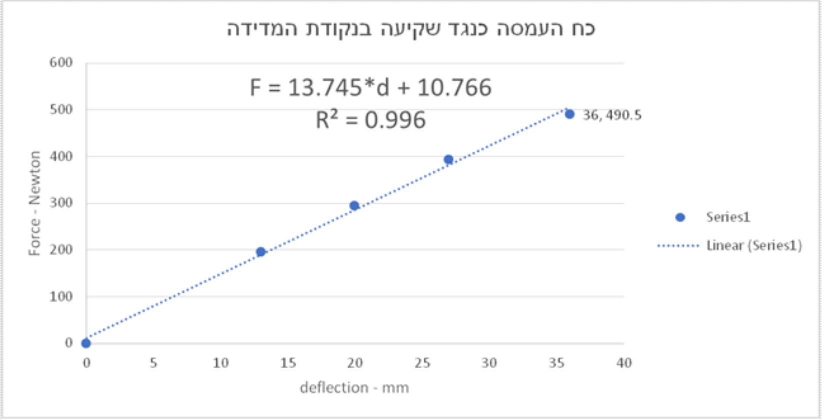
גיאומטריית השתל תוכננה בעזרת אנליזות איטרטיביות ב-solidworks בעיקר לצרכי הבנת מגמות.





ייצור ארמדילופלייט ראשוני לניסוי

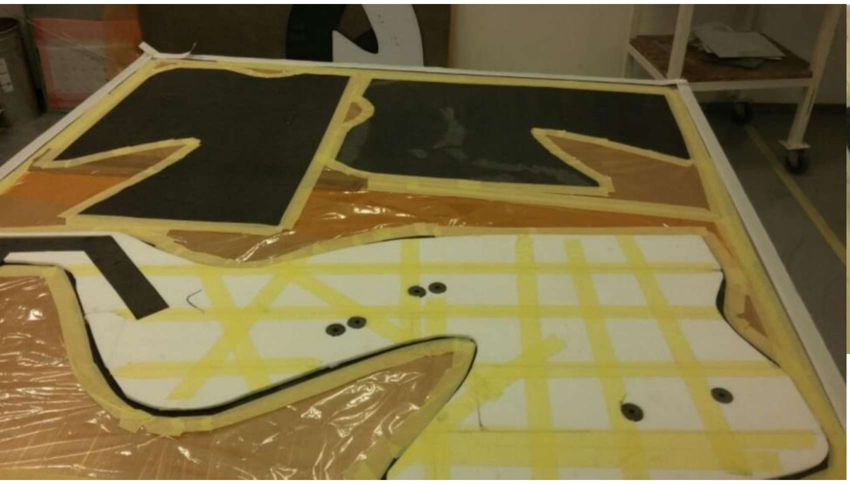
F [N]	d [mm]	הערות
0	0	
196.2	13	
294.3	20	
392.4	27	
490.5	36	התחלת קראנצ'ים
686.7	לא נמדד	המשקל של ג'וזף= כ-70 ק"ג
735.75	לא נמדד	המשקל של דיסקין = כ75 ק"ג
784.8	לא נמדד	המשקל של דני = כ 80 ק"ג

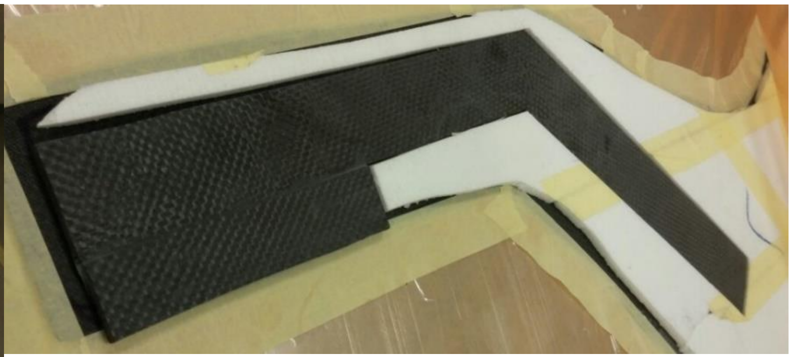


גובה ההתקנה של כנף זו הוא 65 מ"מ, דרישת השקיעה היא עד 10 מ"מ תחת עמיסה מפולגת של 200 ניוטון, נקודת העבודה האופטימית (ומחמירה) היא עד 500 ניוטון במהירות מקסימלית.

מתוך הבנה כי שני ארמדילופלייטס מסוג זה אמורים לשאת בעומסים ותחת הנחת ליניאריות גם כאשר מדובר בשני אנדפלייטס מסוג זה אשר מקטינים את השקיעה פי 2, הרי שבכך הוכח שהתכן ואופן הייצור עומדים בדרישות הכפיפה, וכעת ניתן היה לגשת לייצור הארמדילופלייטס הסופיים עבור הכנף הקדמית:

שתל קרבון בארמדילופלייט סופי





בפועל, ההבדלים בין גרסת הניסוי לגרסאות הסופיות על הרכב הם סידור השכבות בשתל (ללא סידור מיוחד בגרסת הניסוי, סידור ±90 , ±45 בגרסה הסופית), וחומר הגלם לסנדוויץ' – בארמדילופלייטס הסופיים קיים רוהסל ולא דוויניסל (לרוהסל תכונות מכאניות טובות יותר עבור אפליקציה זו).

חיבור ראשון לרכב

כנף קדמית בתהליכי הרכבה

Rear Wing Endplates

הכנף האחורית נדרשה כאמור להתחבר באמצעות האנדפלייטס אל השלדה בנקודות מוגדרות. הקשיים בחיבור באופן זה:

- לצורך חסכון במשקל מתבקש שהנ"ל ייוצר מחומרים מרוכבים
- עקב גיאומטריית החיבור (המוטות אליהם החיבור מתבצע אינם מקבילים אחד לשני או לציר האורך השל הרכב), נדרש אנדפלייט דו קימורי, אשר לא ניתן לייצרו ללא שימוש בתבנית (מוסיף רמת סיבוכיות בתכנון ובייצור)
- חיבור עיקרי לכנף אחורית נדרש בעמידה בעומסים גדולים הן עקב כוחות אווירודינמיים והן מכוחות אינרציאליים
- לצורך מתן מענה חסכוני במשקל אך חזק דיו נדרשת אנליזה לחומר המרוכב (קשה לביצוע ללא ידע בתחום)

עקב גודל התבנית הנדרשת, הוחלט כי התבנית תיוצר מקלקר:

תבנית אנדפלייט ימיני

הסבר תהליכי הכנת התבניות מפורטים בהמשך.

על מנת להגדיל את יציבות הכנף במהלך הנסיעה הוספנו מוטות מגנזיום המחברים בין האנדפלייטס ובין קשת הבטיחות. בשונה מהמוטות שחוברו בשנים קודמות, מוטות אלו אינם מפריעים לזרימה בחלקה התחתון של הכנף אלא רק לזרימה המופרעת גם כך מסביבת הנהג. מוטות אלו יחוברו בעזרת שתלי אלומיניום אל תוך חלקו העליון והאנכי של האנדפלייט. המוט מחובר אל השתל ואל השלדה ע"י M3 rod end (תכן המוטות בוצע ע"י הנדסת מערכת).

שתל אלומיניום לחיבור מוט עילי

שינויים שהתרחשו בתכן בעקבות תכנים אשר נלמדו במסגרת פרויקט ייצור ואחזקה בחומרים מרוכבים:

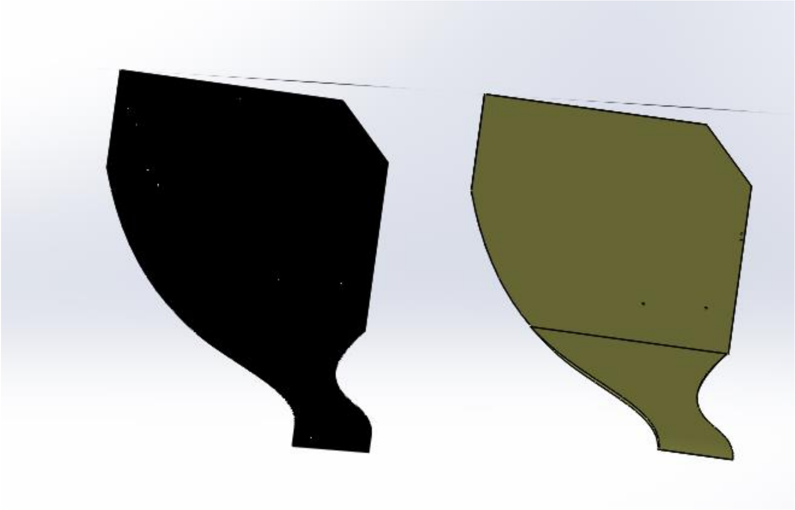
נוסף על הוספת שכבת פיברגלס לשתלי האלומיניום (נגד היווצרות קורוזיה גלוונית), התרחשו מספר שינויים נוספים בתכן לאור מה שלמדנו בקורס:

כאמור, את האנדפלייטס אנו מכינים במבנה כריך, כאשר בחלקו הפנימי יש דויניסל. התכן המקורי היה מילוי בדויניסל לאורך כל האנדפלייט, אך שני דברים תרמו לשינוי המצב:

ראשית, ליווח 0-90 לא מסוגל לקחת מאמצי גזירה. הבנו שבחיבור לשלדה יהיה עלינו להוסיף ליווחים של ±45 על מנת שייקחו מאמצים אלו.

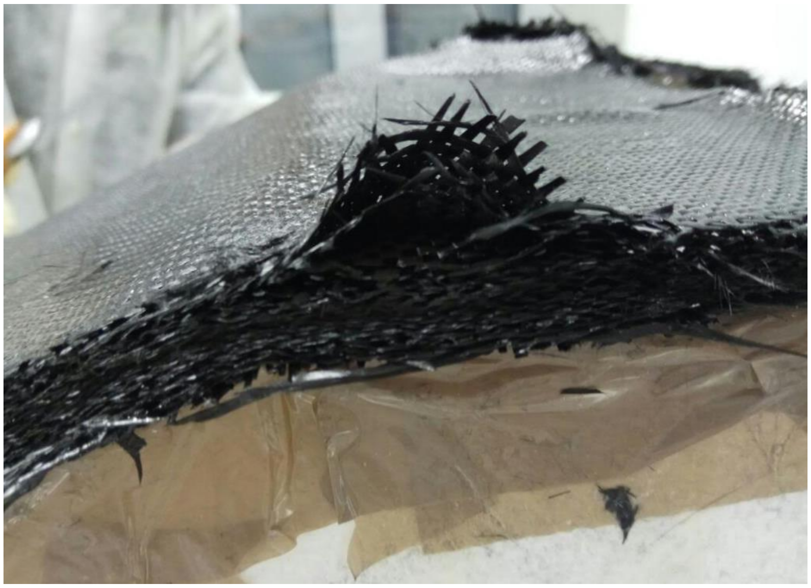
שנית, ייצרנו אנדפלייט אחד על פי התכן המקורי ועליו ערכנו ניסוי העמסה. קיבענו את חלקו התחתון באמצעות מלחציים[3] והעמסנו עליו משקולות. כאשר הגענו להעמסה של 50 ק"ג (פחות מדרישת הנדסת מערכת, שהיתה כאמור 700 ניוטון) נשמעו קולות פיצוח של הדויניסל בחלק התחתון, במיקום החיבור לשלדה. מבנה החלק שעליו נעשה הניסוי היה 4 שכבות קרבון מכל צד עם מילוי דויניסל לכל אורכו.

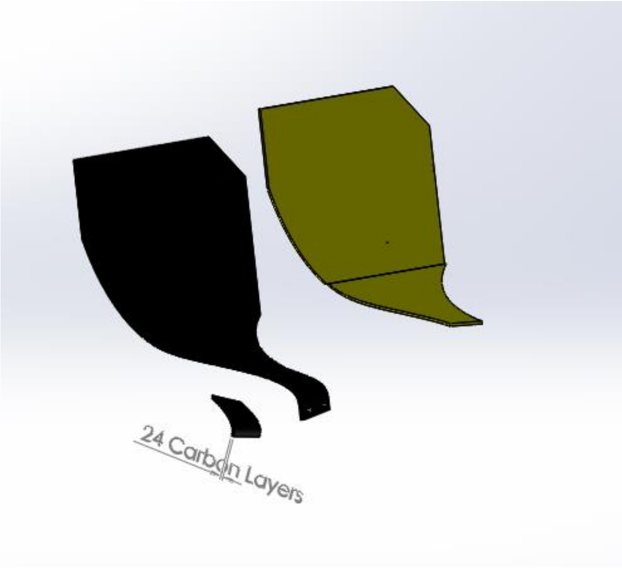
[3] Clamps



מבט פיצוץ של דגם הניסוי- מצד ימין דיווניסל, מצד שמאל קרבון

על כן, על מנת לשפר את התכן וליישם את שלמדנו הוחלט כי באזור החיבור לשלדה מילוי הדויניסל יוחלף בקרבון מלא, כלומר 24 שכבות כאשר בכל שכבה סיבים בכיוון 0-90 או ב ±45 באופן סימטרי. כאמור, ישנן 4 שכבות חיצוניות מכל צד של קרבון.





ריבוד קרבון מלא בבסיס החלק הסופי

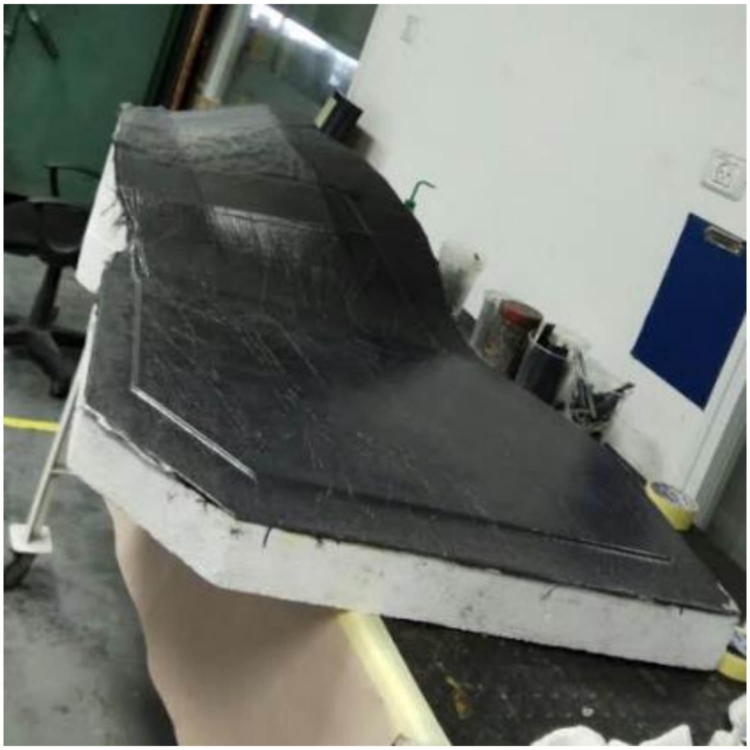
שרטוט פיצוץ של החלק הסופי

בדומה לשאר האנדפלייטס, חיבור הפרופילים יעשה על ידי ברגים הנקדחים לתוך שכבות הקרבון והדויניסל. על מנת שתהיה אפשרות לשאת במאמצי הגזירה אשר הברגים מפעילים על הקרבון, נוספו שתלי קרבון במקום דויניסל באיזור הבורג.

כיוון שהאנדפלייט דו-קימורי ואינו מישורי, לא ניתן להצמיד אליו שרטוט נייר, דבר אשר מקשה על מיקום מדויק של הקדחים עבור חיבורי הכנפיים. בפועל ניתן להצמיד שרטוט רק על החלק השטוח באנדפלייט ואכן כך נקבעו מיקומי הפרופילים עד כדי סטייה מסוימת.

שתלי הקרבון בהם השתמשנו לצורך הקדחים נקבעו לגודל גדול יותר לעומת שאר הכנפיים בכדי לפצות על חוסר הדיוק במיקומם בהעדר שרטוט במיקום מדויק על התבנית. להבא, יהיה נבון להקטין רבות את השתלים הללו על מנת לחסוך במשקל.

ריבוד האנדפלייט הימיני



לאחר הקשיית אפוקסי, לפני חליצה מהתבנית

באשר לשרטוטים עבור קדחים מדויקים, גם כאן הונחו שרטוטים על החלק השטוח שמעל הקימורים, אך להגיע בשיטה זו לתוצאה מדויקת זו משימה מאתגרת שכן המידות החיצונית של הבלוקים מהם הוכנו התבניות שונים מעט זה מזה, וכן בשולי כל אנדפלייט קיימים שוליים מעט שונים לפני החיתוך הסופי (עקב ריבוד עם ספיירים מעבר לקצה הסופי המתוכנן, אותו ניתן להשיג רק בעזרת חיתוך מדויק לאחר חליצה) הפתרון לבעיה הוא יצירת מספר מדידות לפי נק' יותר פנימיות בתבנית של שינויים גיאומטריים בולטים וחדים, בעזרת נק' אלו ניתן לוודא שמיקומי הקדחים תואמים בין שני האנדפלייטס ושהם מיוצרים כתמונת מראה אחד של השני.

שני האנדפלייטס הסופיים לאחר חליצה וחיתוך

הרכבה ראשונה של הכנף

תהליכי ייצור בחומרים מרוכבים

תבניות

חומרים מרוכבים ככלל נדרשים לתבנית (כלי) במהלך שלב הקשיה של השרף. ישנה חשיבות רבה לטיב פני השטח, הן מבחינת קלות החליצה של הרכיב מהכלי, והן עבור תפקוד אווירודינמי מיטבי.

תהליך בחירת חומרי הגלם עבור התבניות קשור ישירות בטכנולוגית הבד הזמינה, בין אם מדובר בהנחה רטובה "wet lay-up", או שימוש בבד מוספג מראש "pre-preg carbon fiber" אשר דורש לרב תבניות המסוגלות לעבור תהליכים בתנורי auto-clave.

לאור חומרי הגלם אשר היו זמינים עבורנו (לאחר בדיקת משמעויות בהחלפתם), הוחלט להשתמש עבור האלמנטים בתבניות מ-mdf בין השאר לאור ניסיון הפרויקט עם חומר גלם זה, ובחומר גלם קלקר עבור תבניות גדולות במיוחד – אנדפלייטס של כנף אחורית, אנדרטריי, וכן עבור רכיבים נוספים ברכב כגון הכיסא והחרטום.

סך התבניות מ-mdf:

MDF								
רוחב	**מיתר**	**מוטה**	**עליון\תחתון**	**כמות**	**עבור (מערך)**	**כמות פלטות (עובי)**		
200	120	1000	עליון	1	קדמית 2+3		1	
			תחתון	1			1	
230	150	1000	עליון	1	צד 2+3	אחורית 2 או 3	1	
			תחתון	1			1	
440	360	1500	עליון	1	קדמית 1		2	
			תחתון	1			2	
500	400	1000	עליון	1	צד 1		2	1
			תחתון	1			3	2
650	550	1000	עליון	1	אחורית 1		4	3
			תחתון	1			5	4

סך התבניות מקלקר ומידות הבלוקים (לפני הכרסום):

רכיב	חומר תבנית	x	y	z
אנדרטריי	קלקר	2910	1040	350
אנדפלייט כנף אחורית	קלקר	1100	920	390
חרטום רכב	קלקר	1400	600	600

פלטות mdf ניתן להשיג במס' מידות אופייניות, תחילה תוכנן לעבוד עם בית מלאכה שיכול היה לספק פלטות של 1.2x2.4 m בעובי 27mm. בפועל, 4 חצאי התבניות הקטנות נחתכו מפלטה אחת בממדים אלו, שאר התבניות נחתכו מחומר גלם עודף שנמסר לפרויקט, פלטות במידות 1x1.2m עובי 38mm.

שלבי העבודה על תבנית

- סגירת מודל CAD לתבנית בהתחשב בספיירים נדרשים בקצוות עקב נזקים בחליצה:
  - במוטה – לפחות 5 ס"מ בכל צד.
  - ברוחב – כ-3 עד 5 ס"מ מכל צד, תלוי בשיטת הייצור וכיוון החליצה המתוכנן.
  - בעובי – כתלות בעובי הכולל של התבנית, נדרש עובי מינימלי בחלקים הצרים לאורך המיתר לצורך חוזק מבני.
  - תבניות עם גיאומטריות סבוכות נדרשות למחשבה כיצד תתבצע החליצה, ולאפשר ספיירים במקומות יעודיים לצורך כך.
  - יצירת המודל עם התחשבות בעובי חומר הגלם הזמין (בעיקר עבור mdf).
  - עבור אלמנטים – הוספת קדחים אנכיים בפינות המודל (קוטר 8mm) עבור מיקום מדויק של שני חצאי כל תבנית האחד ביחס לשני בעזרת פינים.

- חיתוך ממדים חיצוניים לתבניות לצורך הדבקתם זה על זה בהמשך.
  - מומלץ לסמן כל דבר, לאן כל פלטה וכל שכבה חתוכה מיועדת.

- הדבקת תבניות כתלות בעובי הבניות הנדרשות.
  - שימוש בדבק נגרים וקלמרות לצורך הדבקה אחידה.
  - שלב זה חשוב בתוצאתו, שכן פגמים בהדבקה עלולים לבלוט על פני שטח הכלי ולפגום באיכות הרכיב הסופי.

- לאחר כרסום – הספגת התבניות באפוקסי לצורך ליטוש לאחר הקשייתו והשגת פני שטח חלקים ככל הניתן.
  - יש להשתמש באפוקסי ללא כל מסמיך לצורך השגת ספיגה באופן מיטבי.
  - במהלך הקשית האפוקסי יש להניח התבנית במקום ללא לחות, באם לא ניתן לאכסנה בחלל סגור, יש לכסות את התבנית בניילון בכדי למנוע הצטברות לחות (במיוחד לפנות בוקר אם תבנית הושארה מחוץ למבנה לצורך התקשות במהלך לילה), שכבת אפוקסי שתצבור לחות לא תתקשה לחלוטין ותקשה על תהליך הליטוש.
    - ניתן לייבש תבנית שעודנה דביקה בשמש חזקה ישירה, התהליך ייקח זמן רב יותר לאפוקסי שספג לחות, והקשיה סופית אינה מובטחת.
  - בפועל, מומלץ מאד לנקות את פני שטח התבנית לפני ההספגה בכדי להיפטר מסיבים עודפים אשר מקשים מאד על עבודת הליטוש לאחר הקשיית האפוקסי.
  - את הליטוש יש לבצע בהדרגתיות במס' נייר הליטוש (טיב פני השטח).
  - ניתן לעבוד עם מלטשת בלחץ אוויר, אך חשוב להיזהר רבות בשלב זה שכן המלטשת עלולה לעוות את פני שטח הכלי ובכך לייצר פרופיל כנף שונה ממה שתוכנן.

- עבור תבניות קלקר – יש גם כן צורך בהקשיית פני השטח לאחר הכרסום, הן בשביל השגת טיב פני השטח והן לצורך חוזק מבני של פני השטח במהלך התקשות של הרכיב בתבנית.
  - ככלל, מומלץ להשתמש בקלקר עם עדינות חלקיקים גדולה ככל הניתן ע"מ להשיג פני שטח טובים ככל הניתן.

- הקשיית פני שטח הקלקר מתבצעת גם כן באמצעות שכבות אפוקסי.
  - שכבה ראשונה – מטרתה למלא פגמים גדולים בפני השטח, ולכן יש להסמיכה מאד (משמשת כשפכטל).
  - שכבות שניה\שלישית – הוספת עובי נוסף לשכבת האפוקסי לצורך הקשיה סופית של פני השטח, וכן שליטה על טיב פני השטח.
  - בין כל שכבה, הזמן האידיאלי להנחת שכבה נוספת הוא כאשר השכבה הראשונה מתייצבת מעט אך עדיין לא קשה לחלוטין (בפועל לוקח מס' שעות בין שכבה לשכבה, כתלות בתנאי מז"א)
  - לאחר ייבוש מוחלט של שכבות האפוקסי, מומלץ להשתמש בשפכטל מהיר שימוש (לדוגמה onetime) לציפוי סופי והחלקה של פני השטח.
  - לאחר הקשיית כלל שכבות הציפוי, יש לשייף בהדרגתיות עד להשגת טיב פני השטח הרצוי.

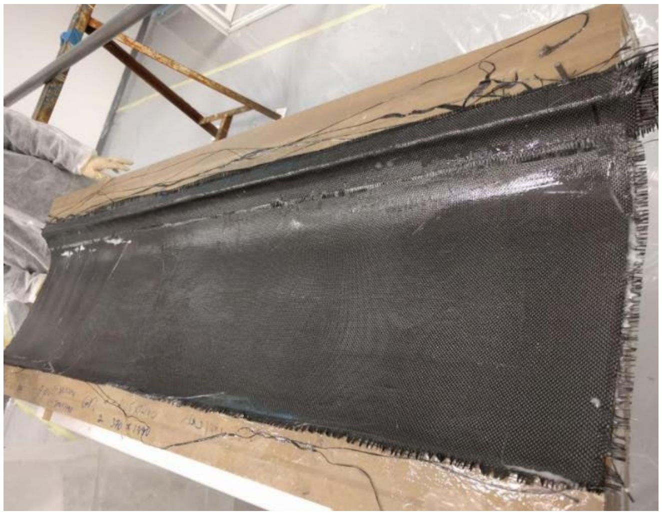
- את כלל עבודות השיוף יש לבצע בחלל פתוח עם אמצעי מיגון אישי – מסנני נשימה נגד אבק, אוזניות נגד רעש, חלוקים וכפפות.

ריבוד אלמנטים

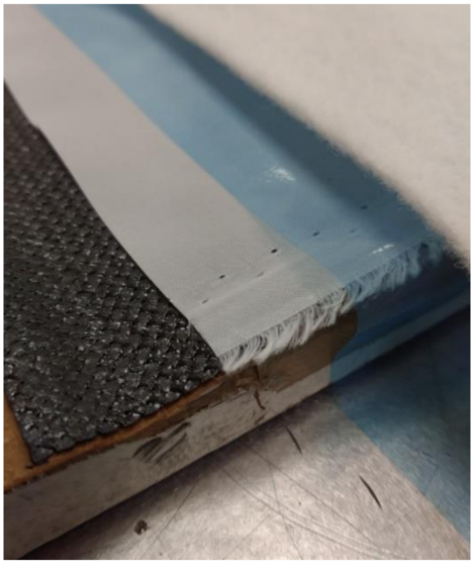
שלבי הכנת אלמנט כנף:

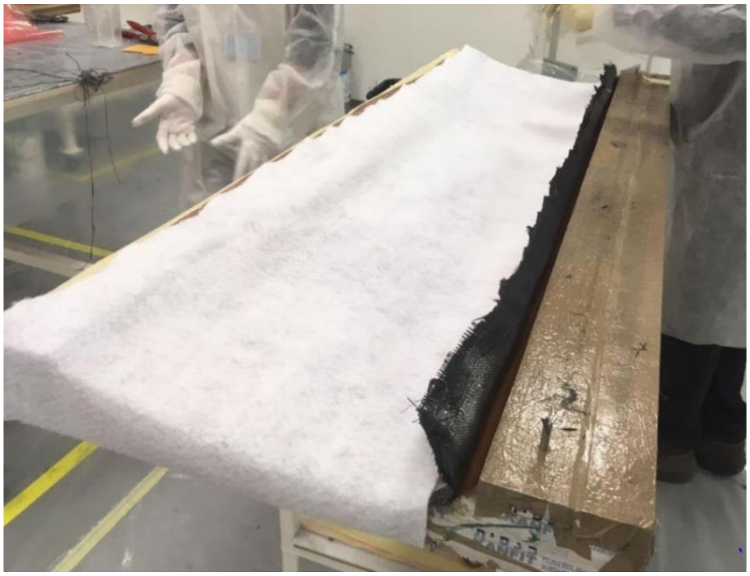
- הכנת התבנית לריבוד (לאחר כלל הליטושים הנדרשים)
- ציפוי ניילון ירוק להשגת פני שטח מבריקים
  - האדום מבריק אף יותר אך רגיש לשינוי טמפרטורה ומייצר עיוותים על פני השטח
  - שימוש בתרסיס דבק להדבקת הניילון

- מעל הניילון – שכבה ראשונה של אפוקסי עם מסמיך לצורך מילוי מרווחים על פני השטח
- הנחת הבדים
  - הנחת שכבת בד בכיווניות 0 90 ביחס למיתר ומוטה
  - הספגה ידנית ב EP520
  - הנחת שכבת בד שניה באותה כיווניות
  - הספגה ידנית בEP520



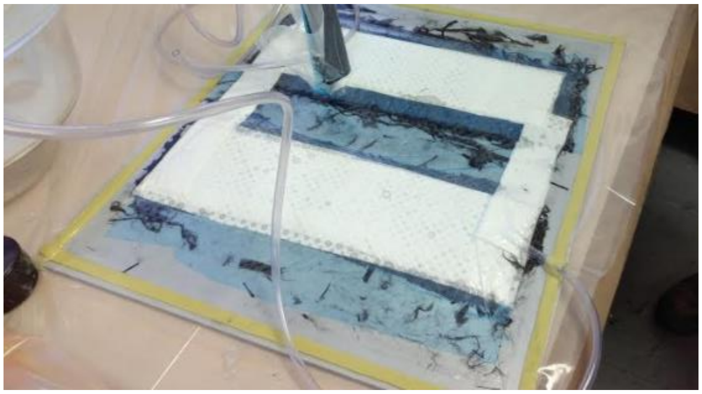
- את שני חצאי התבנית יש לרבד במרווח זמן קצר או במקביל (לצורך חיבורן לפני תחילת ההתפלמרות)
- מידות הבדים יהיו כך שקיים ספייר של כ-2 ס"מ בשפת ההתקפה של התבנית הקעורה יותר
  - ניתן להניח עוד כשני פסי בד כחיזוק לשפת ההתקפה
- הנחת פס בד קילוף, מעליו פס טפלון מחורר (כחול – ציפוף חורים גדול לצורך הוצאת שרף רב) ומעליו פס בד סופג לצורך ספיגת שאריות השרף עודף.
  - מטרת בד הקילוף לחספס את פני השטח שבא איתו במגע, הנ"ל שימושי להכנת משטחים להדבקה עתידית, במקרה של האלמנטים יהיה זה מילוי הפוליאורתן בתוך נפח האלמנט.
  - נדרשים ספיירים משני קצות התבנית לצורך קלות ההפרדה בחליצה.





- חיבור שתי התבניות זו מעל זו עם פינים בחורים היעודיים, כאשר יש שארית של בד סופג בשפת הזרימה של האלמנט.
- נדרש בשלב זה להדק היטב את שארית הבד בשפת ההתקפה לשפת ההתקפה של חציה השני של התבנית.
- עטיפת שני החלקים המחוברים בשק ואקום כפול (מקיף התבנית מבחוץ אך גם משאיר חלל אוויר בתוך האלמנט).

- את שק הואקום אוטמים בעזרת taki-tape , עם פתח אטום מסביב בתוכו מוחדרת צינורית לשאיבת אוויר.



- הקשיית האפוקסי תמשך בהתאם לסוגו, לחוזק הנדרש וטמפרטורת העבודה הנדרשת.
    - הקשייה ראשונית בד"כ כיממה בתנאי חדר (ללא חימום\לחץ), ניתן לבצע הקשיה בחימום ו\או העלאת טמפטורת העבודה המקסימלית ע"י חימום לפי הוראות יצרן הדבק).
    - בפועל, אלמנטים בודדים בלבד עברו חימום לצורך הקשיה, לדוגמה אלמנט ראשי של כנף קדמית.

- חליצת האלמנט מהתבנית (ניתן לראות את הספייר בבד נושם וניילון בשפת הזרימה, וכן מעבר לקצות המוטה של האלמנט).

- הדבקת שפת הזרימה עם DP460 והקשיה בתוך התבנית עם חיזוקי קלמרות.
  - ניתן לקצר זמן ההקשיה בתנור (בהתאם לתכונות הדבק).
- השלב הבא הוא מילוי הכנף בפוליאורתן מוקצף.

פוליאורתן

פוליאורתן מוקצף שימש כחומר המילוי העיקרי של האלמנטים, מורכב משרשראות פולימר אשר עובר הליך התפלמרות בנוכחות זרז (בדומה למשפחת האפוקסי). קיים מגוון רחב מאד של אפליקציות לחומרים אלו כיוון שניתן באמצעות סוגי התרכובות ומינוניהן להגיע למגוון תכונות מכאניות.

מטרת המילוי היא למנוע דפורמציות אנכיות של הסקין החיצוני של האלמנט, כיוון שהסקין מתעוות בקלות בגלל עובי דופן של כ-0.5mm בלבד. חומר הגלם סופק לפרויקט בחסות פוליאורתן בע"מ (מפרץ חיפה), החומר שסופק מגיע לצפיפות סופית $40\frac{kg}{m^3}$, תכונה בולטת היא שינוי נפחו (יותר מפי 10) במהלך התגובה הכימית, באופן זה מתקבלת הצפיפות הנמוכה לאחר תום התגובה.

לאחר הקשיית הסקין החיצוני של האלמנט, והדבקת שפת הזרימה, בוצע תהליך של מילוי (ניפוח) האלמנטים בחומר הנ"ל.

עקב שינוי הנפח המשמעותי, נוצרים לחצים רבים באלמנט ועל כן יש לבצע את תהליך הניפוח כאשר האלמנט בתוך התבניות כאשר הן מחוזקות בקלמרות.

כמויות החומר A ו- B שנדרשו למילוי כל תבנית חושבו ע"י חישוב נפח כל אלמנט מלא לאורך כל התבנית, ובכך מציאת המשקל הנדרש בצפיפות $40\frac{kg}{m^3}$ למילוי:

מיתר	מוטה מ"מ	שטח פרופיל מ"מ^2	נפח	צפיפות	משקל סה"כ ק"ג	משקל A,B גרם
120	1000	892.63	0.00089263	40	0.0357052	17.8526
150	1000	1619.57	0.00161957	40	0.0647828	32.3914
360	1500	8897.62	0.01334643	40	0.5338572	266.9286
400	1000	11516.93	0.01151693	40	0.4606772	230.3386
550	1000	19552.84	0.01955284	40	0.7821136	391.0568

התרכובת בה השתמשנו דורשת משקל זהה של רכיבי A ו-B.

בפועל, הנ"ל מספק קירוב ראשוני בלבד, כיוון שנוכחות מחסומים גיאומטריים משפיעה רבות על אופן ההתנפחות, זאת עקב תגובה כימית מהירה (קצב התפיחה) ולאור דביקותו הרבה של התוצר בתהליך זה, ולמעשה בתוך האלמנטים הדפנות של הסקין מקשים מאד על ניפוח אחיד של התוצר.

בכדי לנסות ולמזער את כמות החומר הנדרש לניפוח (לצורך חסכון במשקל), הוחלט למלא כל אלמנט באופן איטרטיבי. שלבי העבודה:

- מעמידים התבנית עם חיזוקי הקלמרות עם כיסוי קשיח מוברג על חלקה התחתון (למניעת יציאת חומר מלמטה.
  - יש להיזהר ולוודא שהקדיחה בתבנית עבור חיבור המכסים תתרחש מספיק רחוק מפני השטח של התבנית.

- חלוקת כמות החומר הנדרשת למנות קטנות, ערבוב תוצרי כל מנה עד לקבלת תערובת הומוגנית ושפיכתה אל פתח התבנית.
  - מאפשרים לכל מנה להתנפח בתוך האלמנט לנפח המקסימלי האפשרי לה לפני מילוי המנה הבאה.
  - הנ"ל מאפשר פיזור אחיד יותר של משקל המילוי, וכן חסכון בכמות החומר הנדרש למילוי האלמנט.

- בבחינת האלמנטים הראשונים שעברו מילוי, עקב הורדת כמות שכבות הקרבון בסקין (מ-3 ל-2), נוצרו כתמי פוליאורתן שחדר מבעד לשכבות הקרבון ונראו מבחוץ, משמעותם בעיקר אסתטית. לכן, ע"מ להסוות את כתמי הפוליאורתן במילויים העתידיים, בוצע שימוש בפיגמנט שחור.
  - תופעת לוואי של הוספת הפיגמנט היא ניפוח קיצוני אף יותר של הפוליאורתן, למרות שהתוצר הסופי פריך יותר לעומת גרסה ללא תוספת זו.

.

כוסית עם שארי פוליאורתן (בתוספת פיגמנט) שעלתה על גדותיה במהלך המילוי,
תבנית עם עודף במהלך המילוי

פרופילי אלומיניום

כאמור, בקצות המוטה של כל אלמנט חיברנו פרופיל אלומיניום Al 5052 לצורך חיבור חיצוני לאנדפלייט \ שלדה.

סוגי וכמויות הפרופילים על הרכב הם כדלהלן:

quantity	thickness [mm]	CAD weight [g]	wing chord [mm]
8	2	6.25 g	120
14	2	9.25	150
6	3	50.52	360
4	3	66.3	400
2	3	109.6	550

פרופילי אלומיניום

- כמויות פרופילי האלומיניום אשר הוזמנו הם בפועל פי 2 לצורך ספיירים.
  - אלומיניום זה רך למדי, ולכן הרכיבים פגיעים ומתעוותים יחסית בקלות.
  - ריתוך האינסטרים אל תוך פרופילי האלומיניום יצר במס' מקרים מעוותים תרמיים.

- ע"מ להגדיל את שטח המגע עם הדבק, שפתו החיצונית של כל פרופיל מחורצת (בשונה מבעבר, בוצע כבר ברמת מודל ה-CAD עבור כל פרופיל ולכן נחתך עם החריצים כבר בבית העסק).

- אורך הפרופילים בפועל קצר יותר מאורך המיתר של כל פרופיל, ישנה פחות חשיבות לתאימות מדויקת של קצהו האחורי של הפרופיל בתוך האלמנט.
  - בנוסף, שפת הזרימה של כל פרופיל אלומיניום נקטמה לצורך התאמה נוחה יותר.

- אל כל פרופיל רותכו אינסרטים מאלומיניום Al5052, בעלי תבריג פנימי לצורך החיבור בפועל אל החוץ.

אינסרטים

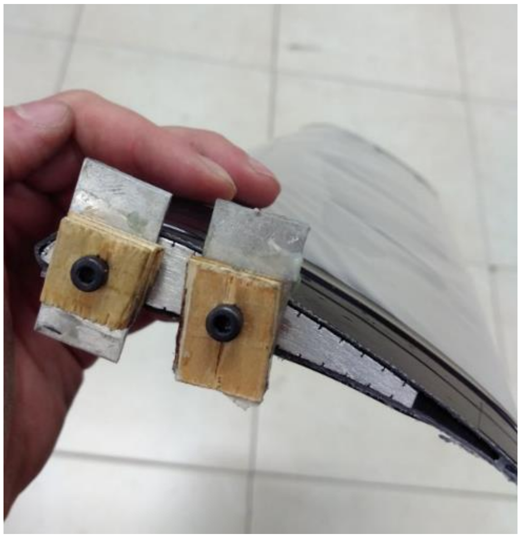
  - סך האינסרטים:

M4 insert	36
M6 insert	24

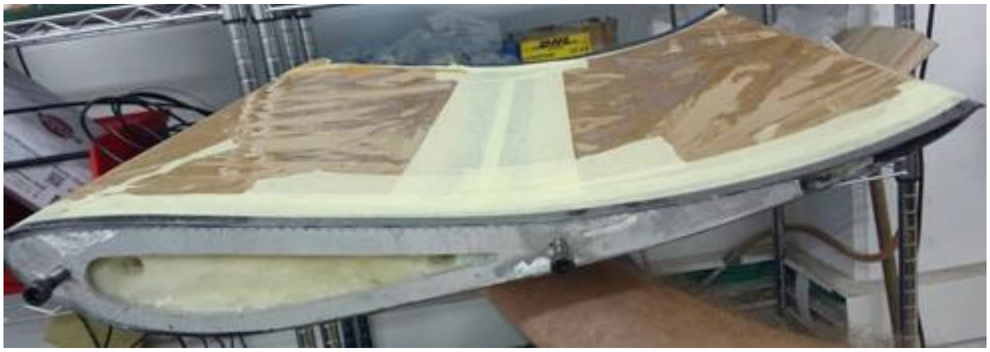
- חיבור הפרופילים בוצע באמצעות אפוקסי EP460, אשר הוסמך עם אירוסיל וחוזק עם אבקת זכוכית.

- יש צורך בהתאמה בזמן אמת בין כל פרופיל לקצה כנף ספציפית.
  - נבע בפועל מעיוותים בקצות חלק מהאלמנטים.
  - באלמנטים שעברו מילוי פוליאורתן יש לפנות חומר בקצה האלמנט בעובי שיתאים להדבקת הפרופיל אלומיניום.

- במהלך הדבקת הפרופיל, יש לוודא שיהיה אנך אל ממד המוטה של האלמנט.
  - אפשרי ע"י הברגת משטחונים אל הפרופיל, ווידוא מגע בינם לבין שפתו החיצונית של האלמנט (מיישר באופן זה את הפרופיל ביחס לאלמנט, בהנחה שהחיתוך החיצוני אכן מישורי וכן שהאינסרט מרותך באופן אנכי למישור הפרופיל).



לאחר כל אלו, אלמנט הכנף מוכן לחיבור חיצוני.



אלמנט ראשי כנף צד

Endplates

בחלק זה נרחיב על האנדפלייטס שלא נשאו עומסי הממשק לרכב.

סך האנדפלייטס ומידות הבדים שהוכנו (עם ספיירים במידות הבדים ובכמויות):

מכלול	שם רכיב	מידה x	מידה y	מס' שכבות	כמות EP	כמות לוחות לייצור
כנף קדמית	outer EP	250	750	2	4	4
	middle EP	550	750	3	2	3
	armadilloP	550	1150	4	4	4
כנף צד	outer EP	800	470	3	4	4
כנף אחורית	EP right	Set on mold	Set on mold	4	1	1
	EP left	Set on mold	Set on mold	4	2	1

אופן ביצוע:

- הכנת פלטות קרבון עם בדים בזוויות $0^o - 90^o$ בממדים הנדרשים ובעובי השכבות הנדרש
  - כמויות הבדים לפי חשיבות החוזק המבני
- הכנת שבלונה
  - הדפסת שני שרטוטים 1:1
  - הדבקת השרטוטים ללוחות דיקט, חיתוך אחד מדויק ואחד עם ספיירים מסביב

- חיתוך פלטות הקרבון וכן דוויניסל עם הספיירים מסביב

פלטות קרבון ודוויניסל עבור כנפי צד

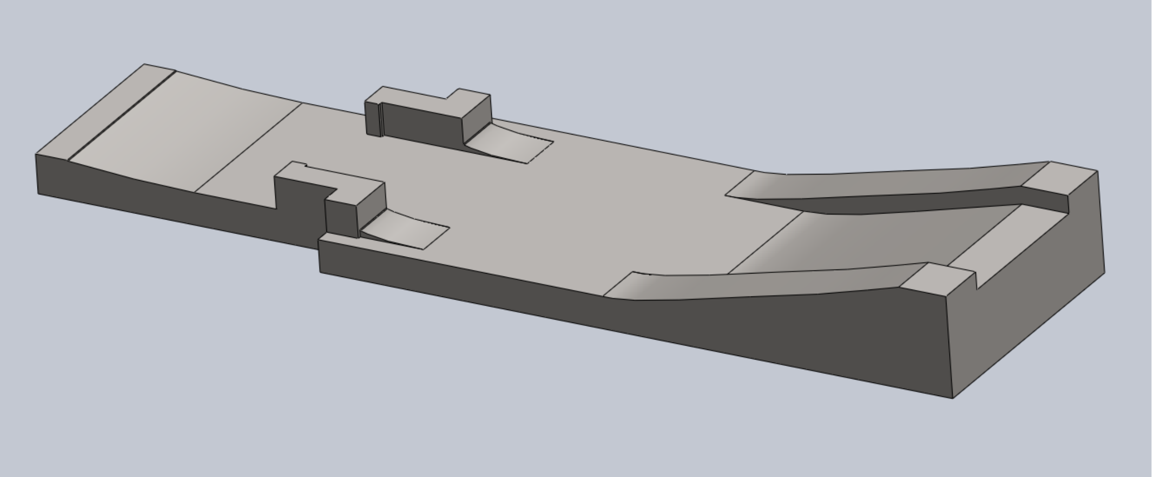
- קדיחת חורים למעבר ברגים בהתאם לשבלונה
- החדרת חיזוקי קרבון בדוויניסל
  - בעובי הדוויניסל – 5.6 mm (25 שכבות עם שיוף קל לאחר מכן)

אנדפלייטס חיצוניים לכנף קדמית

- הדבקת הסקין החיצוני והדוויניסל עם מרכוז בעזרת פינים
- חליצה וחיתוך לפי השבלונה המדויקת

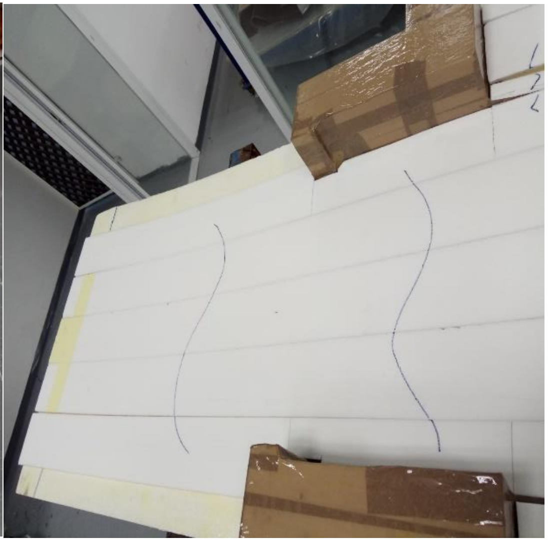
Undertray

את התבנית הכנו מקלקר בעזרת מחרטה (הקלקר חולק למספר בלוקים שנחרטו בנפרד). את כל החוצצים הסרנו מהדגם תיב"ם והדבקנו אחכ. לאחר שקיבלנו את התבנית קלקר מהמחרטה, חיברנו את שלושת הבלוקים בעזרת דבק נגרים ואפוקסי, ומרחנו עליה דבק אפוקסי ושייפנו קצת על מנת להחליק את פני השטח.



הכנו מראש הכל ליום הריבוד, 8 שכבות קארבון (4 מלמטה ו4 מלמעלה), שכבת הרוהאסל, בד קילוף, ניילון מחורר לספיגה וניילון לעטיפה לואקום.

את שכבת הרוהאסל הכינו מרצועות ברוחב 10 ס"מ ויצרו את צורת האנדרטריי, הדביקו את הכל בנייר דבק על מנת שלא יאבד מצורתו בזמן הנחת הבדים.



ריבוד לפי סדר הפעולה:

- קארבון תחתון: מציפים בדבק, מניחים שכבת קארבון אחת אחר השנייה ומציפים כל אחת בדבק נוסף.
- רוהאסל: מניחים את שכבת הרוהאסל על הקארבון הקיים ומוודאים שבכל מקום הוא צמוד לקארבון, איפה שהוא לא צמוד חותכים קצת עם סכין יפנית, מסיטים וממלאים את החורים שצריך למלא.
- אינסרטים:
    - אינסרט אחורי – חותכים ברוהאסל חור בדיוק במיקום הנכון ובדיוק בגודל של האינסרט. מאחר והאינסרט מעט דק יותר מהרוהאסל, ממלאים את תחתית החור שיצרנו ב9 שכבות קארבון על מנת להשלים את ההפרש כך שהאינסרט ישלים שכבה בצורה רציפה עם הרוהאסל.
    - אינסרט קדמי – מאחר ואינסרט קדמי הוא אנך אז לא הייתה התעסקות עם הרוהאסל. באוזניים הקדמיות של האנדרטריי צריך לעשות שני חורים בכל אוזן על מנת לחבר אותם לארמדילו (המחבר בין האנדרטריי, כנף קדמית והרוקרים של הגלגלים הקדמיים). לשם כך לוקחים קארבון מרובד עשוי מ20 שכבות, חותכים בגודל המתאים ומדביקים בחלקה הפנימי של כל אוזן.
- קארבון עליון: מציפים בדבק, מניחים שכבת קארבון אחת אחר השניה ומציפים כל אחת בדבק נוסף. חשוב היה לשים לב לאינסרט האחורי מאחר והוא מורכב מפלטה שנמצאת בתוך האנדרטריי עם הרוהאסל ואוזן שמבצבצת החוצה, לכן כל שכבת קארבון בשכבה העליונה אנחנו גוזרים חתך קטן בשביל כל אוזן מהאינסרטים האחוריים.

חליצה:

בעזרת פטישים כבדים שברנו את התבנית מהאנדרטריי.

חוצצים:

ייצרנו פלטות קרבון 2 שכבות, מהן חתכנו משולשים שחיברנו למבנה סנדוויץ' עם כוורת 2 מ"מ, את המשולשים הדבקנו בעזרת פס קרבון מקומי מסביב לחיבור, עם אפוקסי EP520 וכן נק' DP460 במגע בין המשולשים לאנדרטריי.

הפחת משקל:

מאחר והאנדרטריי צריך להיות טוב לזרימה מלמטה אך לא מלמעלה מצאנו דרך יעילה מאוד להפחתת משקל.

באיזורים שהחלטנו לפי חוזק מבני, הסרנו את שכבת הקרבון העליונה ואת שכבת הרוהאסל.

ממשקים להרכבת המכלולים

בשונה מרכבי שנים קודמות בפרויקט, ברכב 2017 אופיינו מראש קונספטים לחיבור אשר מעלים את רמת המורכבות של הממשק בין הכנף לרכב, המשמעות העיקרית של הקונספטים הנ"ל הם שבעבור שמירה על משקל נמוך עבור כלל המכלול יש צורך מוגבר בשימוש בחומרים מרוכבים גם באזורי הממשקים, משמעות הדבר היא תכן בחומרים מרוכבים שנושאים בעומסים גבוהים מבעבר.

כנף קדמית ואנדרטריי

על מנת לתמוך בקונספט החיבור למסה הבלתי משוככת "un-sprung mass", הוחלט כאמור על ידי הנדסת מערכת על 4 נקודות חיבור עיקריות אליהן יחוברו האנדרטריי והכנף הקדמית. נקודות אלו יושבות מתחת לרוקרים של מערך המתלים, ולמעשה דרשו תכן מיוחד של הרוקר על מנת שיוכלו להתממשק אליו.

רוקרים קדמיים משמאל, רוקרים אחוריים מימין

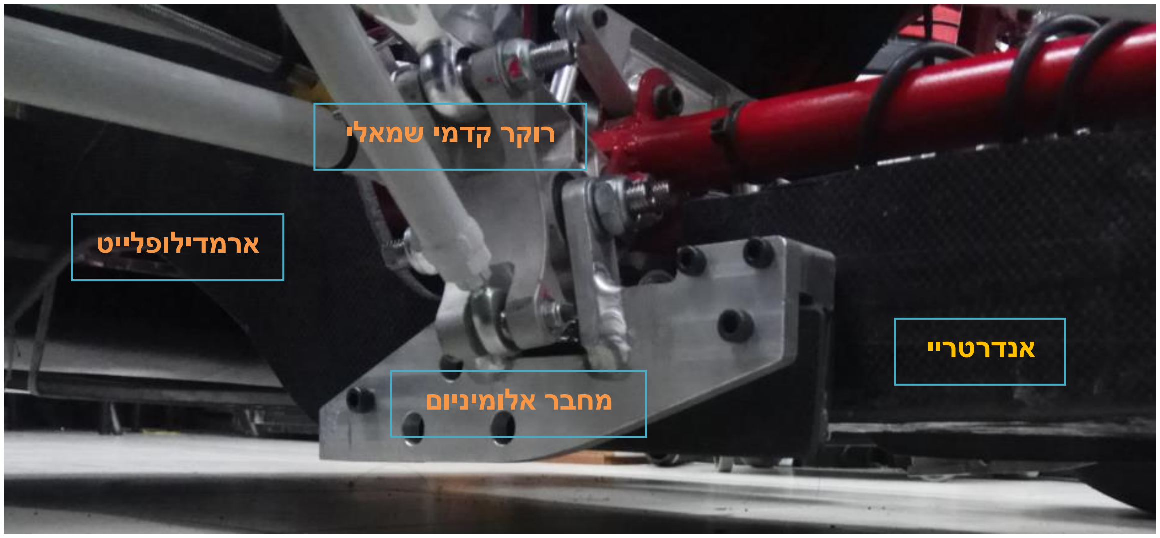
לרוקר הקדמי מתחבר מחבר אלומיניום ייעודי, אליו מתחברים חלקו הקדמי של האנדרטריי וכן הכנף הקדמית.

מטרתו של אופן החיבור הנ"ל לעמוד במומנט הרב אשר מיוצר על ידי הכנף הקדמית ולהעביר את הכוחות האוירודינמיים (וכן האינרציאליים) לרוקר.

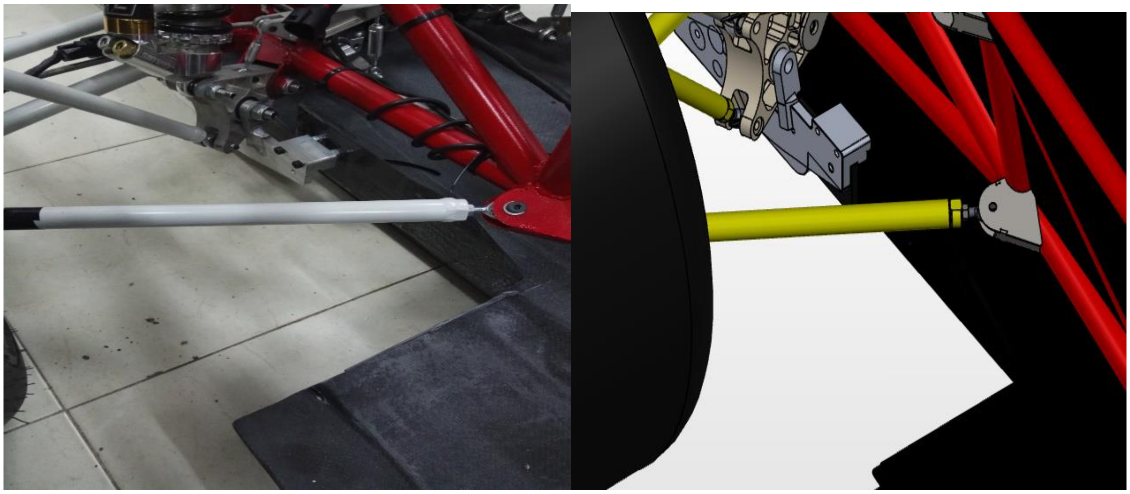
חלקו האחורי של ה-"ארמדילופלייט" כאמור הוארך על מנת להצליח להעביר הכוחות והמומנטים של הכנף הקדמית באופן מפוזר ככל שניתן (ע"מ למנוע ריכוזי מאמצים במחבר האלומיניום).

מחבר האלומיניום מתוכנן למעשה "לחבוק" את הכנף עם מסילה קדמית תחתונה וכן מסילה אחורית עליונה, כך שהכוחות עוברים ע"י מגע בין המשטחים הגיאומטריים במקום ע"י ברגים אשר מייצרים ריכוזי מאמצים סביב הקדחים, נושא אשר רגיש יותר ברכיבים מחומרים מרוכבים.

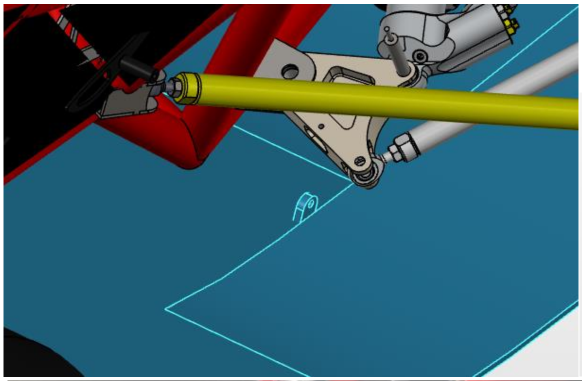
קיימים ברגים בשיטת החיבור הנ"ל, אך מטרתם היא הצמדת מישור הארמדילופלייט עם מישור מחבר האלומיניום. סוגי הברגים נבחרו כך שתובטח גזירה של החיבור במקרה של תאונה (חלילה), הנ"ל נדרש ע"י תקנון התחרות, הוכחת הגזירה מצורפת כנספח.

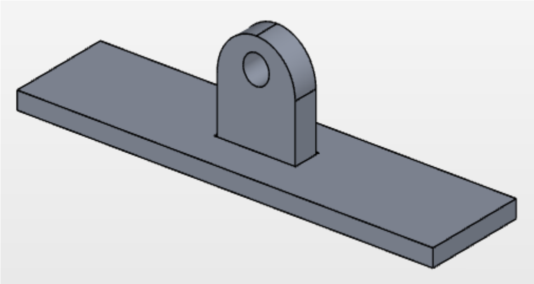


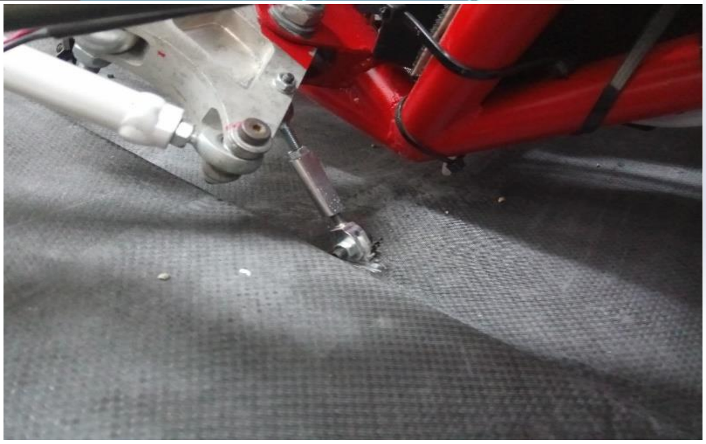
בפועל בגלל אי דיוקים מצטברים בכלל המערכת (החל מאי דיוקים בשלדה, מערכת המתלים, ריתוך אוזני מחבר האלומיניום ועוד), נוצרה סטייה קלה בין המיקום המתוכנן לחיבור הארמדילופלייטס ומיקום החיבור בפועל.
משמעות הדבר היא סטייה קלה ביותר במיקום הרוחבי של הכנף (כ-4 מ"מ), מצב כיפוף רוחבי קבוע של האנדפלייט השמאלי, וצורך בהתאמת ספייסרים בין זרוע הארמדילופלייט ובין מסילות מחבר האלומיניום.

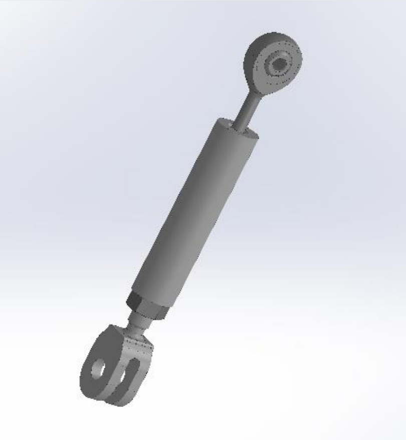


בחלקו האחורי של האנדרטריי הכנסנו שני אינסרטים. החלק התחתון נכנס בתוך האנדרטריי כמו הרוהאסל בין שכבות הקארבון והאוזן יוצאת החוצה. אל האוזן מחוברת אוזן 'נקבה' ובצדה השני בורג המתחבר ליחידת חיבור (גליל עם תבריג פנימי לכל אורכו), אשר מחבר בין האנדרטריי לרוד אנד המחובר בצדו של הרוקר.









כנף אחורית

חיבור הכנף בוצע באמצעות מספר נקודות ממשק באנדפלייטס, שני ברגי M6 בתחתית הכנף אל בראקטים מצד השלדה, הבראקטים למעשה חובקים עם שפת האנדפלייט התחתונה כך שמרבית העומס עובר דרך המגע בין המשטחים והברגים שם עבור לקבע את האנדפלייט ביחס לשלדה וכן לעמוד בכוחות הגרר.

החיתוך התחתון של האנדפלייטס בוצע באופן איטרטיבי תוך הקפדה על מגבלות הגובה והמרחק האחורי של הכנף, וכן תוך וידוא מתמיד של זווית התקפה, גלגול וסבסוב (בוצע בעזרת מכשיר פלס על שפתו העליונה של האנדפלייט).

חיבור אחורי בתחתית האנדפלייטס

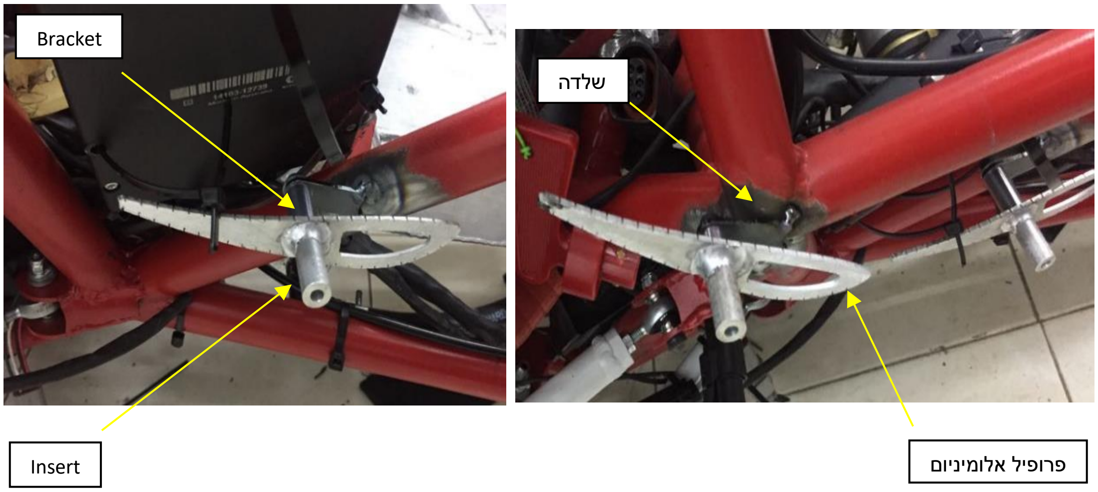
Zoom in על החיבור

כאמור, עקב מרכז הכובד הגבוה של הכנף, בחלק העליון של כל אנדפלייט נוסף חיבור לקשת ההתהפכות באמצעות מוטות מגנזיום אליהם מרותכים rod ends בקצוות.

את אופן החיבור למוטות ניתן לראות בתמונה הבאה:

כנפי צד

מערך הכנפיים מחובר לשלדה באמצעות ברגים ובראקטים ייעודיים אשר מרותכים לשלדה. חיבור הכנף מבוצע בעזרת חיבור ברגים בין האינסרטים (מרותכים כאמור לפרופיל אלומיניום אשר מודבק באלמנט) אל הבראקט בצדה של השלדה.



מיקום הכנף ביחס לרכב בוצע בעזרת ג'יג יעודי עליו מוקמה הכנף, הג'יג ייושר ביחס לציר האורך של הרכב, החיבור נעשה באופן איטרטיבי שכן יש צורך בחיתוך האלמנטים לפי גבולות השלדה תוך הקפדה על המרווחים הנדרשים מהגלגלים וכן שליטה על זווית העלרוד וגלגול של הכנף כולה (הג'יג מסייע בכך אך עדיין נדרשת תשומת לב במהלך ההתקנה).

RAFAEL
TECHNION
9

תיקונים והתאמות במהלך נסיעות ותחרויות

כל נסיעה ברכב לאורך העונה היא למעשה נסיעת ניסוי במובן מסוים, היות ומכלולים רבים ברכב עומדים בפני מבחן, שלא מן הנמנע שתוצאותיו לא יהיו חיוביות. רק בבחינת ההתנהגות הדינמית המלאה של הרכב והתנהגותו על הכביש ניתן לקבל תובנות על תפקוד המכלולים הרבים, כולל החבילה האווירודינמית. היות וברכב 2017 הוגדרו ממשקים קונספטואליים שונים מהותית מבעבר, הושם דגש רב במהלך הנסיעות על שלמות המבנה, יציבות במהלך הנסיעה, וסיכונים אופציונליים כתוצאה מהתנהגות הרכב.

נסיעת מבחן לכנף אחורית וכנפי צד

כנפי צד

במהלך הנסיעות הראשונות של הרכב אובחן כי כנפי הצד מתנדנדות מעט מעלה ומטה. הנ"ל נגרם בגלל גמישות יתר בחיבורים אל מול הכוחות האינרציאליים על הכנף. הפתרונות שיושמו:

- חיבור כבל בין האנדפלייט (מעל האלמנט הראשי) אל שלדת הרכב באופן אשר מקשיח את החיבור.
- עיבוי הספייסרים שחוברו על הבורג בין האלמנט הראשי לבראקט בצד השלדה.
- חיזוק הבראקטים של חיבור האלמנט הראשי עם משולש מבני.
- לאחר בדיקות שקיעה לכנפי הצד עם תוצאות גבוליות עד כדי לא עוברות, הוחלט לחבר כבל נוסף לתחתית האנדפלייט מתחת לאלמנטים הקטנים.

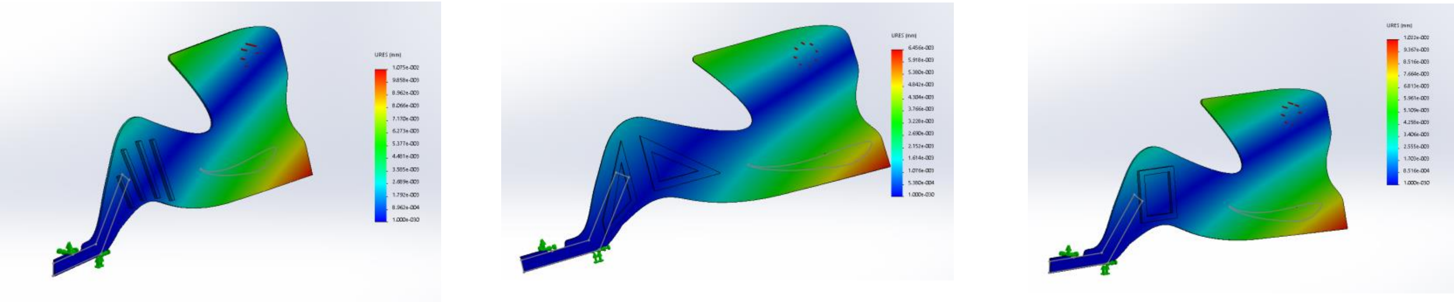
כבלים על כנף צד

כנף קדמית

במהלך הנסיעות הובחן כי קיים חופש רב מדי במבנה הכנף ושהיא "רוקדת" עקב יתר אלסטיות של הכנף\חיבורים. הנ"ל סיכן את הכנף כי כעת היא ביצעה תנודות במוד גלגול ופגעה בקרקע במהלך פניות.

הפתרון בוצע במס' שלבים:

- חיבור תחתית הארמדילופלייטס עם האנדרטריי באמצעות אוזני פלדה סטנדרטיות – 6 חיבורים סה"כ, 3 בכל צד.
- הוספת צלעות חיזוק לארמדילופלייטס (אל צד האף כדי למנוע הפרעה לזרימה) לצורך מניעת פיתול.
  - בוצעו אנליזות לכעשר גיאומטריות בכדי להבין איזה גיאומטריה תשפר את הקשיחות לפיתול, תוך לקיחת בחשבון כמות חומר הגלם הזמין (שארי פלטת קרבון מלא בעובי 5.6 mm)



אנליזות השוואתיות לצלעות החיזוק לארמדילופלייט, והתכן הסופי לאחר הדבקה

בשלב זה הובן כי מרבית התנועה של הכנף נבעה דווקא מאלסטיות של אוזני החיבור של מחבר האלומיניום שהתחבר לרוקר, בשלב זה לא ניתן היה להחליפו במחבר מפלדה.

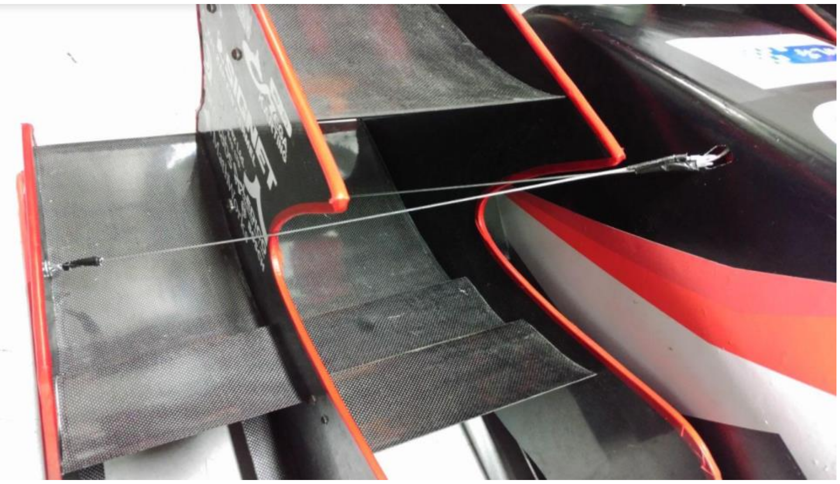
הנ"ל שיפרו את קשיחות הכנף אך כעת הבעיה הנותרת הייתה עמידה בתקנון, כאשר הכנף כולה צריכה לעמוד בשקיעות מותרות של 10 mm בעת עמיסה של 200 N.

- הפתרון לבעיה זו היה חיבור הכנף הקדמית באמצעות כבלים מחוזקים בחלק הקדמי תחתון של השלדה.
  - הכבלים חוברו באופן שניתן למתוח את החיבור ולהדקו באופן משתנה ע"י אזיקון:

חיבור פינה שמאלית
בשלדה אל הכנף הקדמית

במהלך התחרות באוסטריה החיבור הנ"ל הוכיח את עצמו, כולל בבדיקות התקנון.

במהלך התחרות בגרמניה, בדיקות התקנון בוצעו באופן מחמיר מהצפוי, כאשר בדיקת השקיעות התרחשה על כל קצה של כל כנף, כלומר גם על הפינה הרחוקה ביותר מהחיבור (קבוצות רבות נדרשו להוריד כנפיים שלמות כתוצאה מכך). בנחישות רבה שלא להוריד את הכנפיים עליהן עמלנו, חוברו כבלים לשתי נק' בכל קצה של הכנף ואל הפינות הקדמיות עליונות של האף (דרש יצירת חור באף והרחבה איטרטיבית שלו עד להתאמה).



כבלים לכנף הקדמית

בגלל הצורך במתיחת הכנפיים עם הכבלים, נוצרה כעת בעיה של מגבלת גובה מותר לכנף, לכן בסופו של דבר כל האנדפלייטס של הכנף הקדמית נוסרו בחלקם העליון (עד לגבול המגע עם האלמנטים).

אנדרטריי

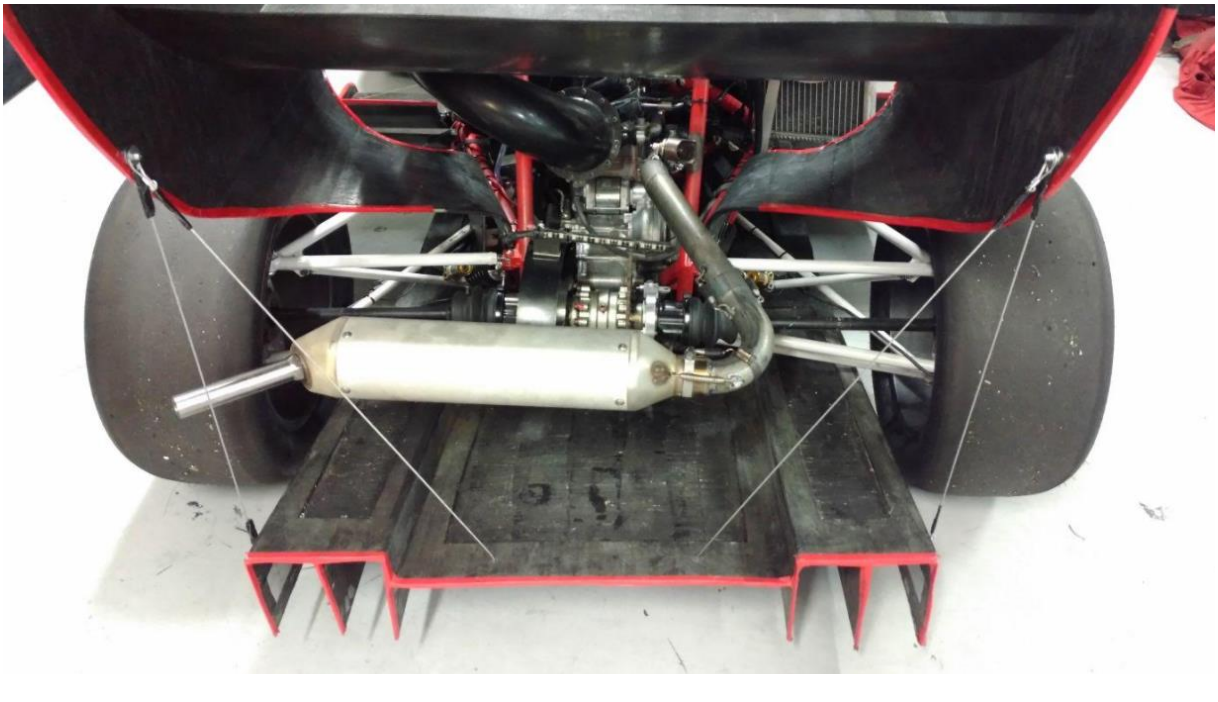
באיזור הקדמי באמצע בין האינלטים הצדדיים היה מגע בין השלדה לאנדרטריי, אז שמנו ריפוד עם מזרן ואיזולירבנד, דבר שגם מנע פגיעה באנדרטריי וגם הפחית רעש.

לאחר מספר נסיעות ניסוי בארץ, החלק הבורגי במחבר האלומיניום מצדו של האנדרטריי נשבר בצידו הימני. הנ"ל הוחלף לפלדה.

בהמשך הייתה זו האוזן באותו מיקום שנתלשה. הנ"ל דרש תיקון מורכב למדי, שכן בסיס האוזן מושתל בתוך הקרבון. יוצרו בסיס חדש ואוזן מפלדה, וכעת נותר לנסר בזהירות מתוך הקרבון את בסיס האוזן השבורה, ולאחר מכן להשתיל את הבסיס החדש עם ריבוד מחוזק מלמעלה.

ניסור בסיס החיבור האחורי מהאנדרטריי

בהמשך, ע"מ לעמוד בשקיעות המותרות בתקנון הוחלט לחבר בין אחורי האנדרטריי ובין האנדפלייטס של הכנף האחורית. בתחילה, חובר כבל יחיד מכל צד של הדיפיוזרים הצידיים. במהלך התחרות בגרמניה, עקב בדיקות התקנון המחמירות בנושא השקיעות, הוחלט לחבר כבל נוסף שיעבור במרכז החלק האחורי של האנדרטריי, וכן כבלים קדמיים יותר (מאחורי הגלגל האחורי) בין הכונסים הצידיים ובין השלדה.



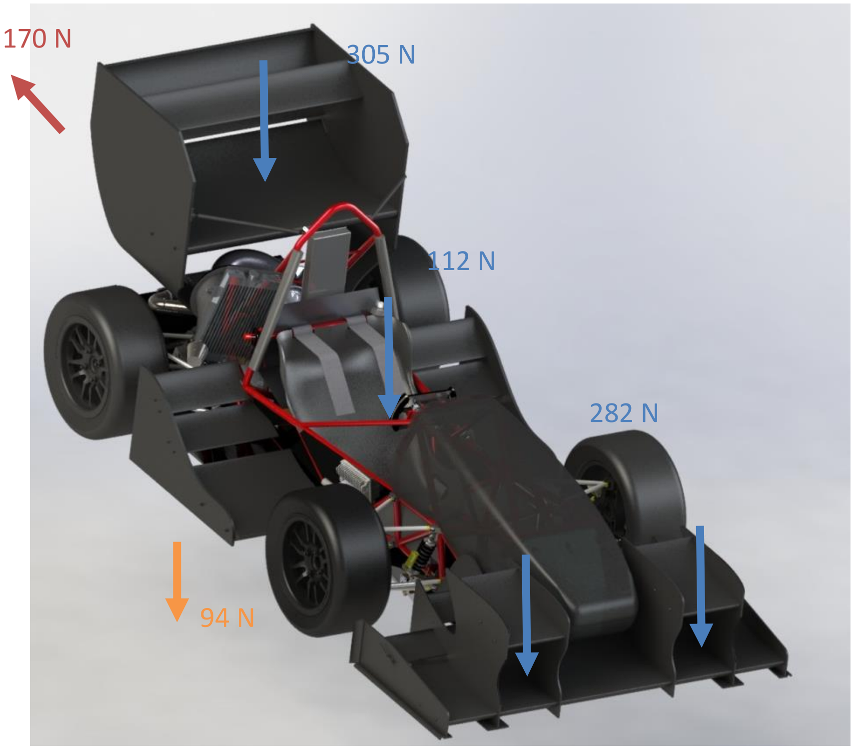
כבלים לאנדרטריי

עבודת המשך על רכב 2017

כיוון שהתכן האוירודינמי בוצע ע"ב אנליזות CFD, קיים צורך בואלידציה לאנליזה, קרי בחינת גודל הDownforce אשר מתקבל בפועל במהלך נסיעה. לצורך העניין נדרש ניסוי ייעודי, אשר כבר תוכנן אך עקב תקלות ונושאים לא פתורים ברכב בעלי חשיבות רבה יותר לתקינותו במהלך התחרויות הנ"ל נדחה וצפוי להתקיים במהלך הסמסטר הראשון לעונה הבאה.

שלבי הניסוי:

1. העמסת הרכב באופן סטטי (כאשר מורם מהקרקע), ע"י כוחות (משקולות) בהתאם לכוח שקול אשר פועל על כל משטח אווירודינמי, ניתן יהיה להעמיסו בקירוב במרכז הלחץ המקומי של כל מכלול המתקבל מניתוח ריצות ה-CFD הקיימות, באופן זה המומנטים שמייצרת העמיסה האוירודינמית על כל מכלול תהיה בקרוב זהה למציאות. בנוסף לדימוי ה-Downforce, ניתן וצריך לדמות גם את כוח הגרר על הכנף האחורית עקב מרכז הכובד הגבוה והמומנט מרים האף המתקבל.
   כעת יש למדוד את השקיעות המתקבלות ממדדי מהלך המתלים (נדרש נהג בתוך הרכב). הנ"ל יתן רפרנס סטטי למהלך המתלים הצפוי במהלך הנסיעה.
2. העמסה דינאמית – יש לנסוע עם הרכב בישורת במהירות קבועה של 80 קמ"ש (מהירות הזרימה המציפה באנליזה) ולמדוד בזמן אמת את מהלך המתלים המתקבל.
3. השוואת הממצאים הסטטיים והדינאמיים, לא מן הנמנע שיהיו הבדלים בין השניים, על כן יתכן ויהיה צורך בבידוד השפעת הכנף הקדמית על המתלים הקדמיים (הנ"ל ניתן לביצוע ע"י חישוב יחס הכוחות המועברים למתלה על בסיס יחס המנופים הגיאומטרים).



סיכום

פרויקט הפורמולה מספק פלטפורמה מלמדת מאין כמוהה, אינטנסיבית בדרישותיה המקצועיות, ומספקת הן אישית והן קבוצתית, למען האמת קשה לסכם פעילות בסדר גודל שכזה.

הפרויקט הוא מים עמוקים מאד עבור סטודנטים, שכן הוא דורש הבנה עמוקה ומעשית בכיצד לתכנן רכיב, מכלול ומערכת, החל מהבנת תפקוד התיאורטי, שימוש בכלי אנליזה הנדסית לצרכי תכן מתקדם, תוך הבנה מעשית כיצד ניתן לממש בפועל את כל הנ"ל, ובסוף גם לממש זאת בכפות ידינו. הנ"ל מאתגר אף יותר מעצם קיומו של לוח זמנים צפוף ודרישות תכן תובעניות.

ישנה חשיבות מכרעת להמשכיות סטודנטים בפרויקט מעבר לשנה אחת. קבוצת הפרויקט בטכניון היא יחסית צעירה, ומצליחה להתקדם משנה לשנה בצעדי ענק בזכות המשכיות זו, מעצם כך שהיא מאפשר אבולוציה סדורה והתכווננות רב שנתית למימוש קונספטים חדשניים המשפיעים על כלל מערכות הרכב, דבר אשר לרב בלתי אפשרי במסגרת שני סמסטרים בלבד.

תודות

מר אלון דהן:

נרצה להודות באופן רשמי לאלון, על מילוי תפקידו כמנחה הקבוצה במהלך השנה האחרונה. אלון סייע רבות בשלבי התכן האווירודינמי, החל בנכונותו ללמד את חברי הקבוצה את רזי תוכנת ה-STAR CCM+ CFD, וכלה בעזרה בניתוח התוצאות והסקת מסקנות מושכלת לצורך התכן האיטרטיבי. כמו כן ליווה את הקבוצה בתהליכי קבלת ההחלטות, השאיר יד חופשית לתהליכים הפנימיים בקבוצה תוך הכוונה, ייעוץ ותרומה מניסיון אישי.

פרופסור גיל יודילביץ':

נרצה להודות לפרופסור גיל יודילביץ', על תמיכתו בפרויקט ובקבוצה בפרט, ובתמיכתו ביוזמות אשר ליוו את העבודה השנתית, החל ממימוש ותמיכה בפרויקט הפיילוט לייצור ואחזקה בחומרים מרוכבים, ובאופן מציאת נק' העבודה הנדרשת עבור הסקרים המקצועיים תוך התחשבות הן בצרכים הפקולטיים והן בצרכי הפרויקט. זוהי השנה הראשונה בה קבוצת אווירודינמיקה מקבלת חסות מלאה מצד הפקולטה, אנו מודים על ההזדמנות הנ"ל ולגיל באופן אישי על הממשקים לאורך השנה.

מר דוד דיסקין:

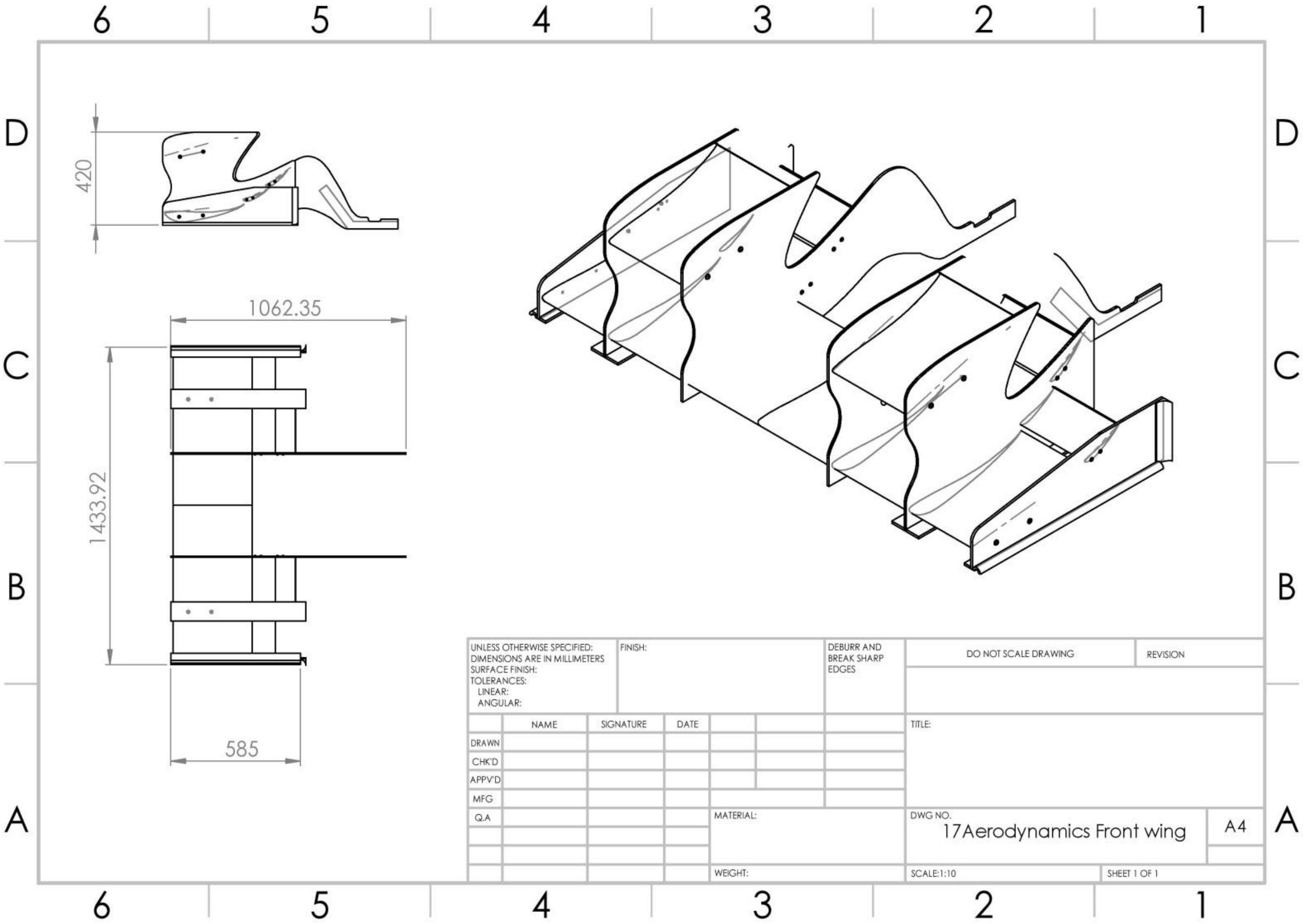
נרצה להודות לדוד על תמיכתו בקבוצה במסגרת תפקידו כראש הפרויקט. דוד ידע במהלך השנה להכווין וללוות את התהליכים השונים הנדרשים בתכן הכה סבוך, הוביל את הדינמיקה הפנים פרויקטאלית ודחף את יכולות הקבוצה תוך סיוע מתמיד, חיבור לתמונה הכוללת, ושימוש דוגמה אישית.

מר יוני פיין:

נרצה להודות ליוני על התמיכה במהלך העונה, על העצות בשלב התכן בראיית תהליכי הייצור הנדרשים, ובמיוחד על הליווי הצמוד במהלך הייצור עצמו. יוני לימד אותנו באופן אישי כיצד לעבוד, פיקח על העבודה עצמה ואף טרח על חשבונו האישי בסיוע בתהליכים מורכבים אשר דרשו מיומנויות גבוהות, כל זאת תוך כדי איכפתיות ומסירות לקבוצה ולחבריה.

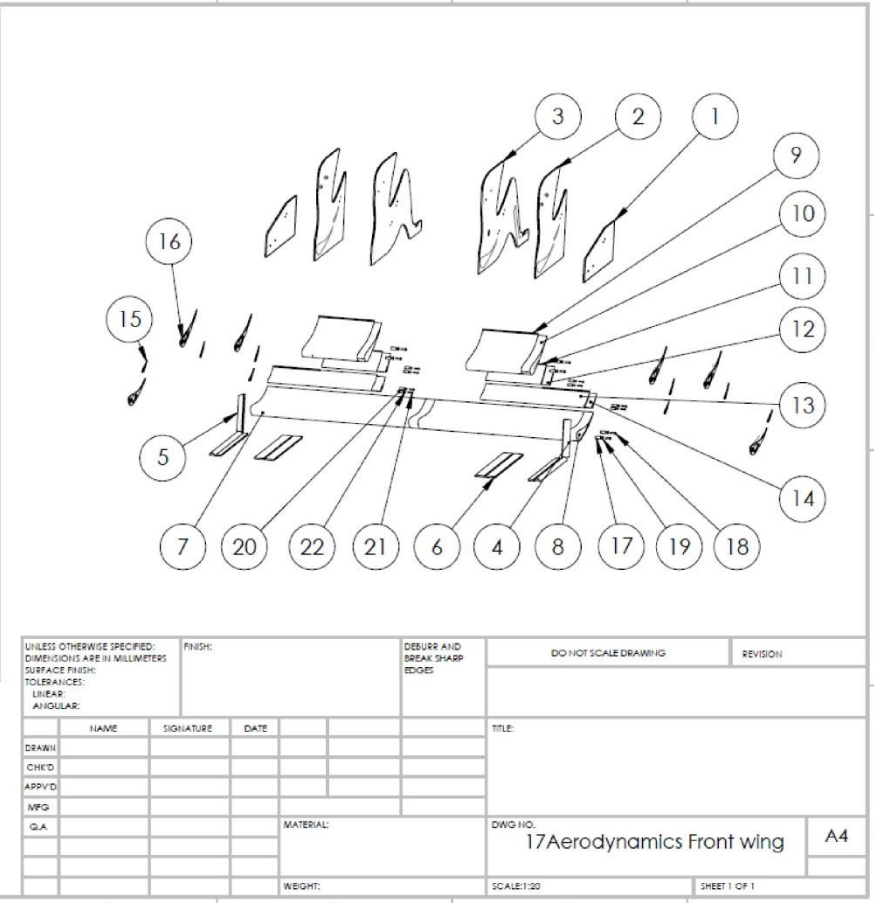
נספח א' – שרטוטים

כנף קדמית

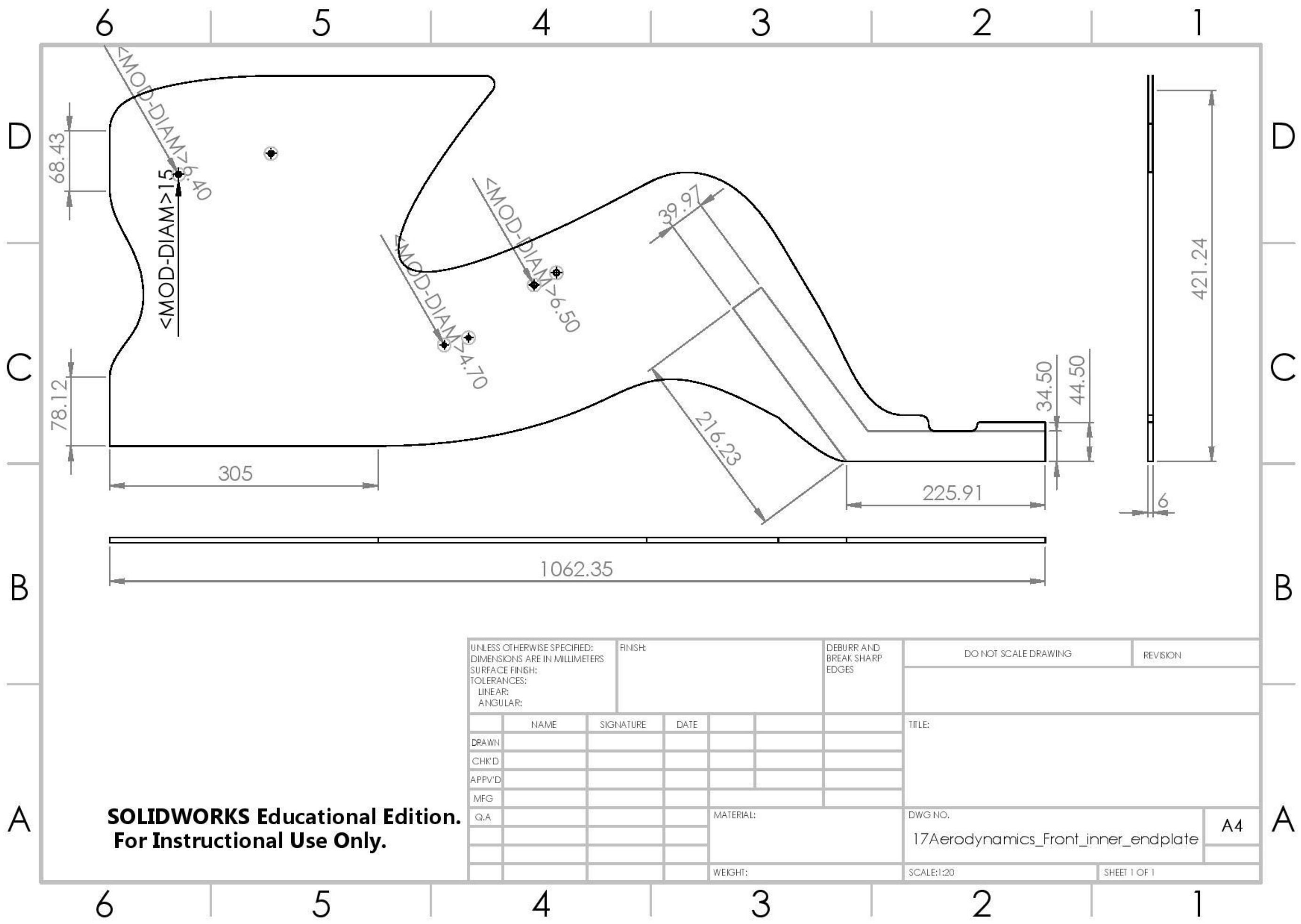


שרטוט 1: מכלול קדמי, מבט כללי

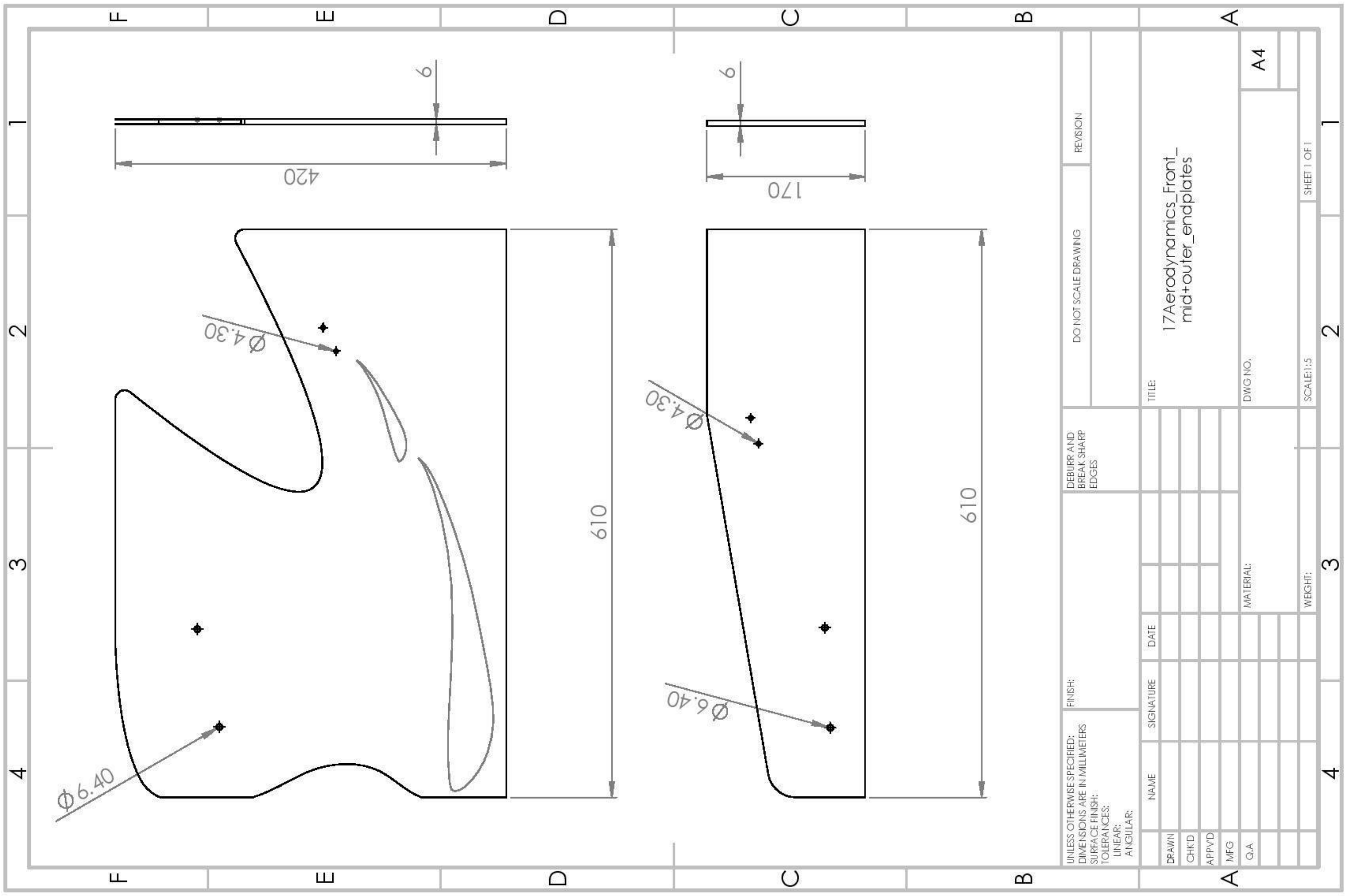
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	17Aerodynamics_Front_outer_endplate	2
2	17Aerodynamics_Front_mid_endplate	2
3	17Aerodynamics_Front_inner_endplate	2
4	17Aerodynamics_Front_outer_slat_L	1
5	17Aerodynamics_Front_outer_slat_R	1
6	17Aerodynamics_Front_ground_slat	4
7	17Aerodynamic_asm_Big_wing	1
8	17Aerodynamic_asm_Big_wing_fill	1
9	17Aerodynamics_asm_Big_mid_wing	2
10	17Aerodynamics_asm_Big_mid_wing_fill	2
11	17Aerodynamics_asm_mid_short_wing	2
12	17Aerodynamics_asm_mid_short_wing_fill	2
13	17Aerodynamics_mid_wing_long	2
14	17Aerodynamics_mid_wing_long_fill	2
15	17Aerodynamics_Small_wing_Al	8
16	17Aerodynamics_Big_wing_Al	6
17	AE-Wing-Screw-Insert-M6	12
18	M6x1_ButtonHead_Socket_L20	12
19	M6_FlatWasher	12
20	AE-Wing-Hinge-Insert-M4	16
21	M4x0.7_ButtonHead_Socket_L20	16
22	M4_FlatWasher	16



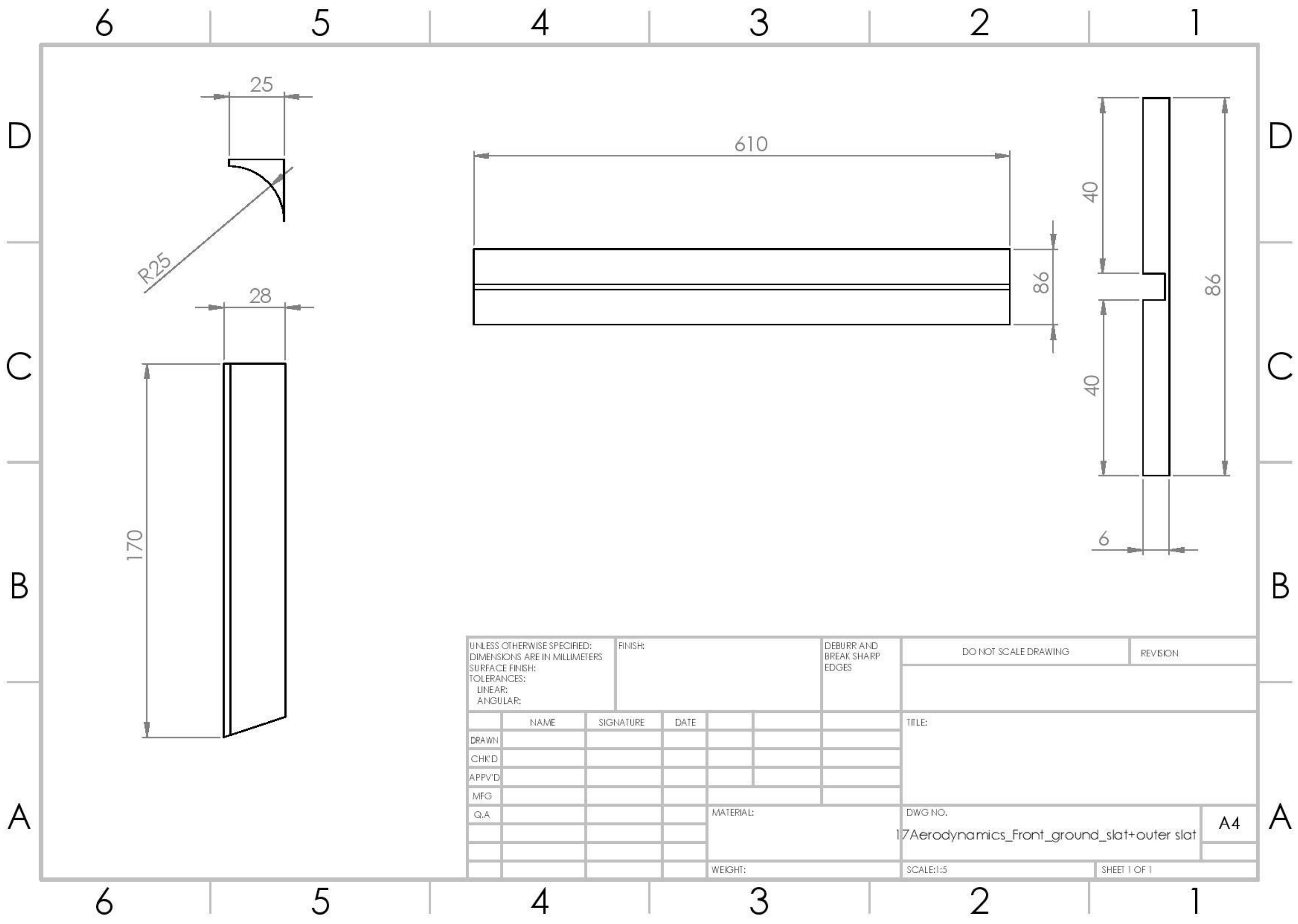
שרטוט 2: מכלול קדמי, מבט פיצוץ



שרטוט 3: ארמדילופלייט

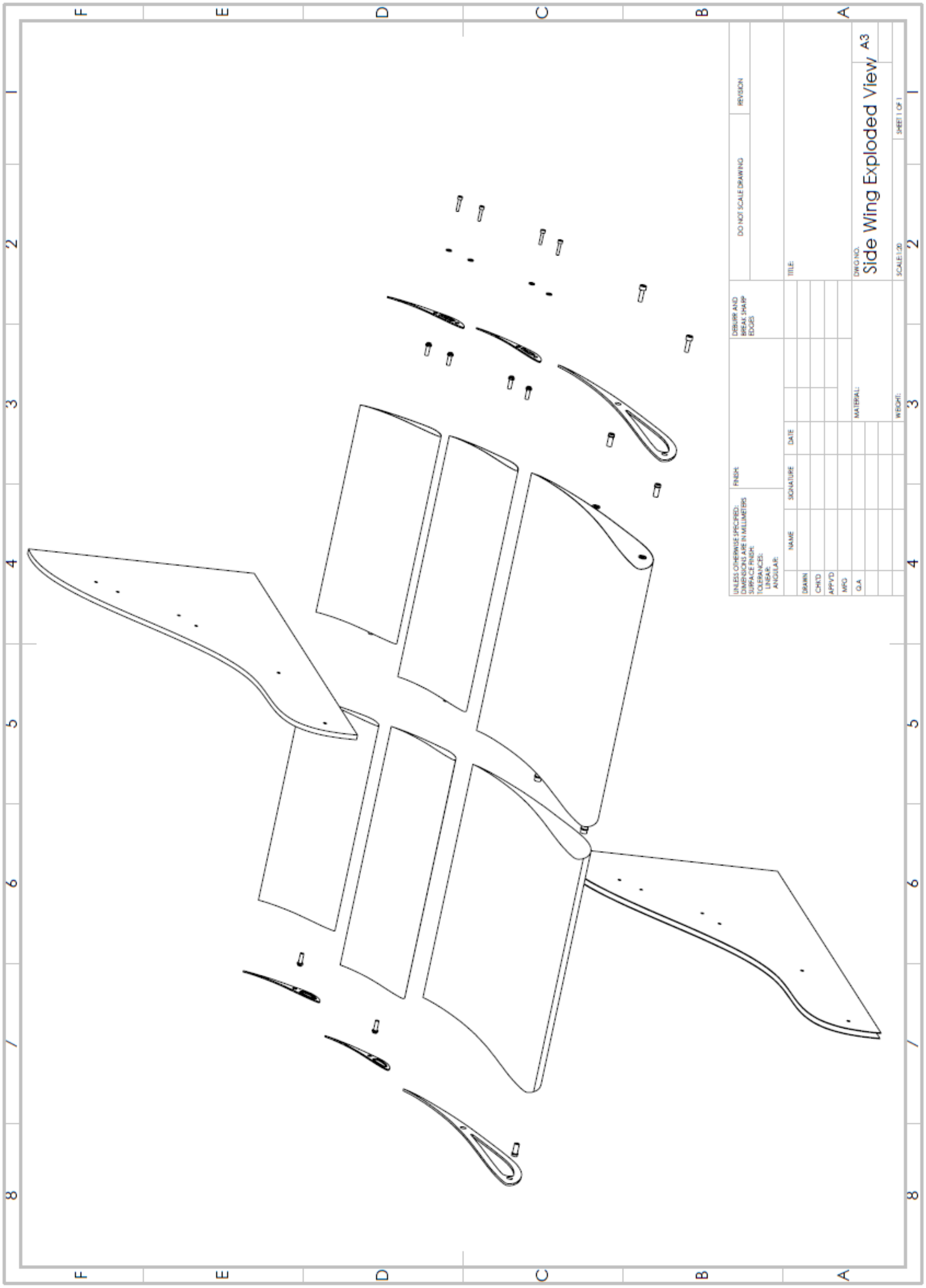


שרטוט 4: אנדפלייט אמצעי וחיצוני



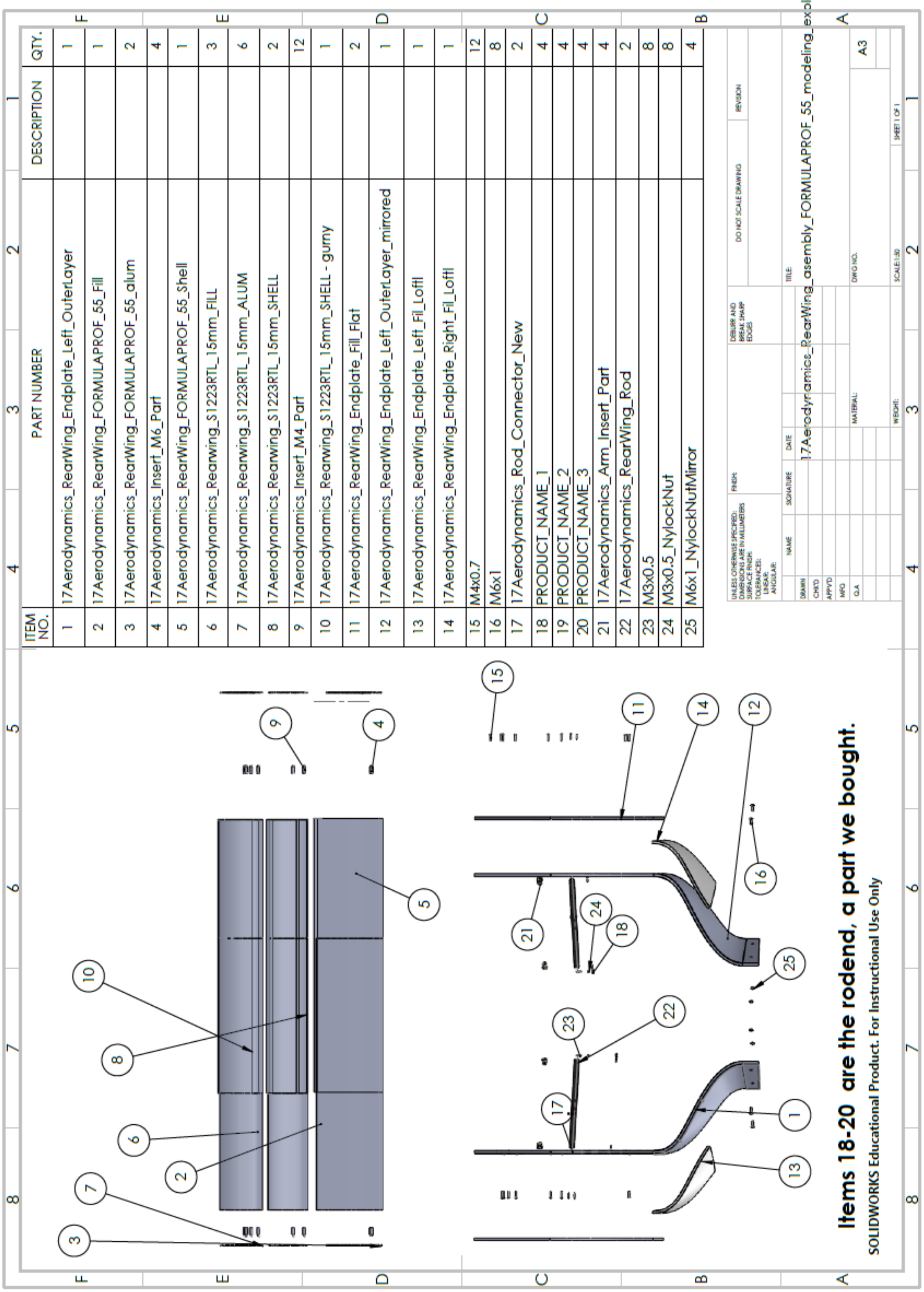
שרטוט 5: מסיטי זרימה חיצוניים ותחתון

כנפי צד

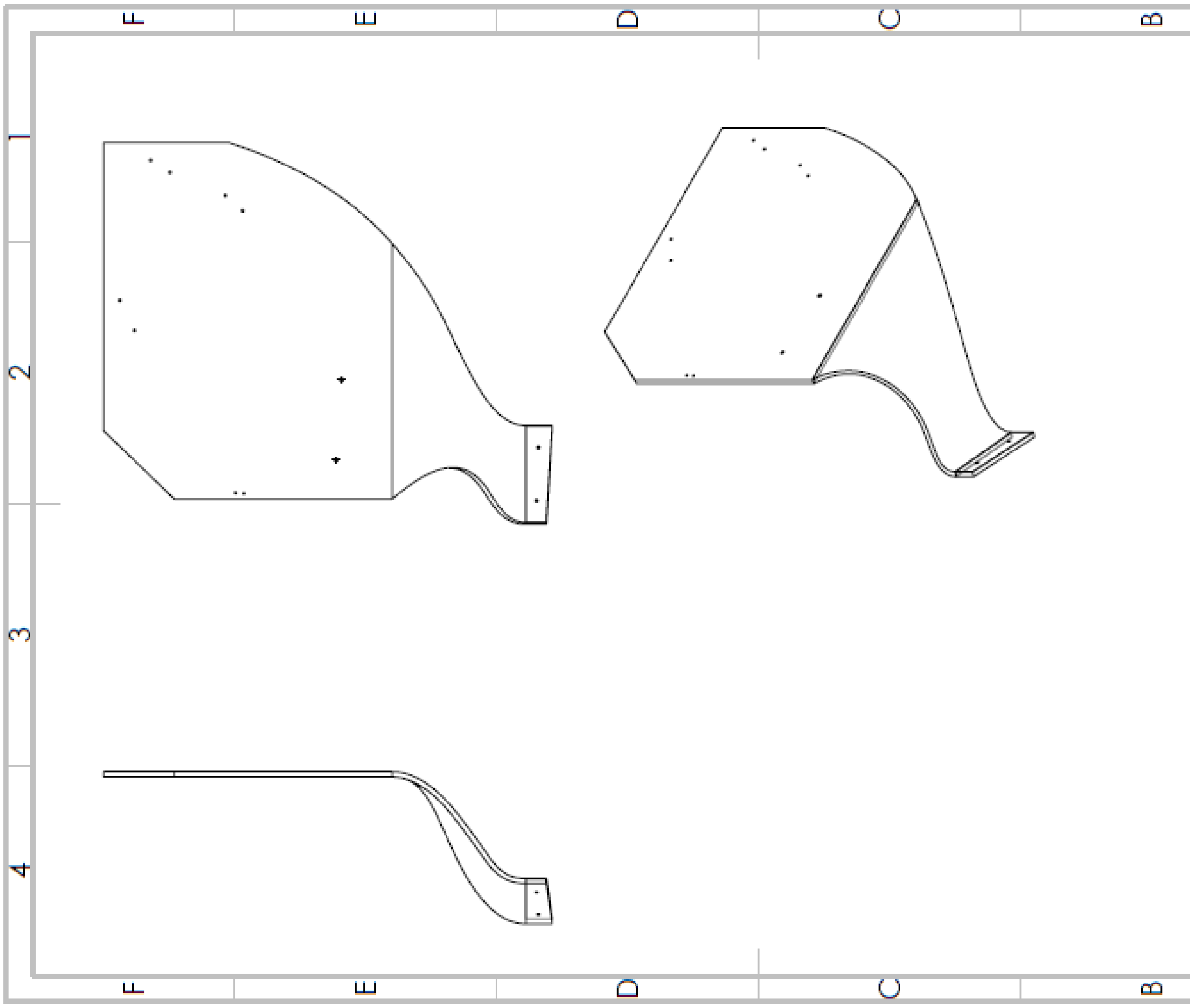


שרטוט 6: כנפי צד

כנף אחורית

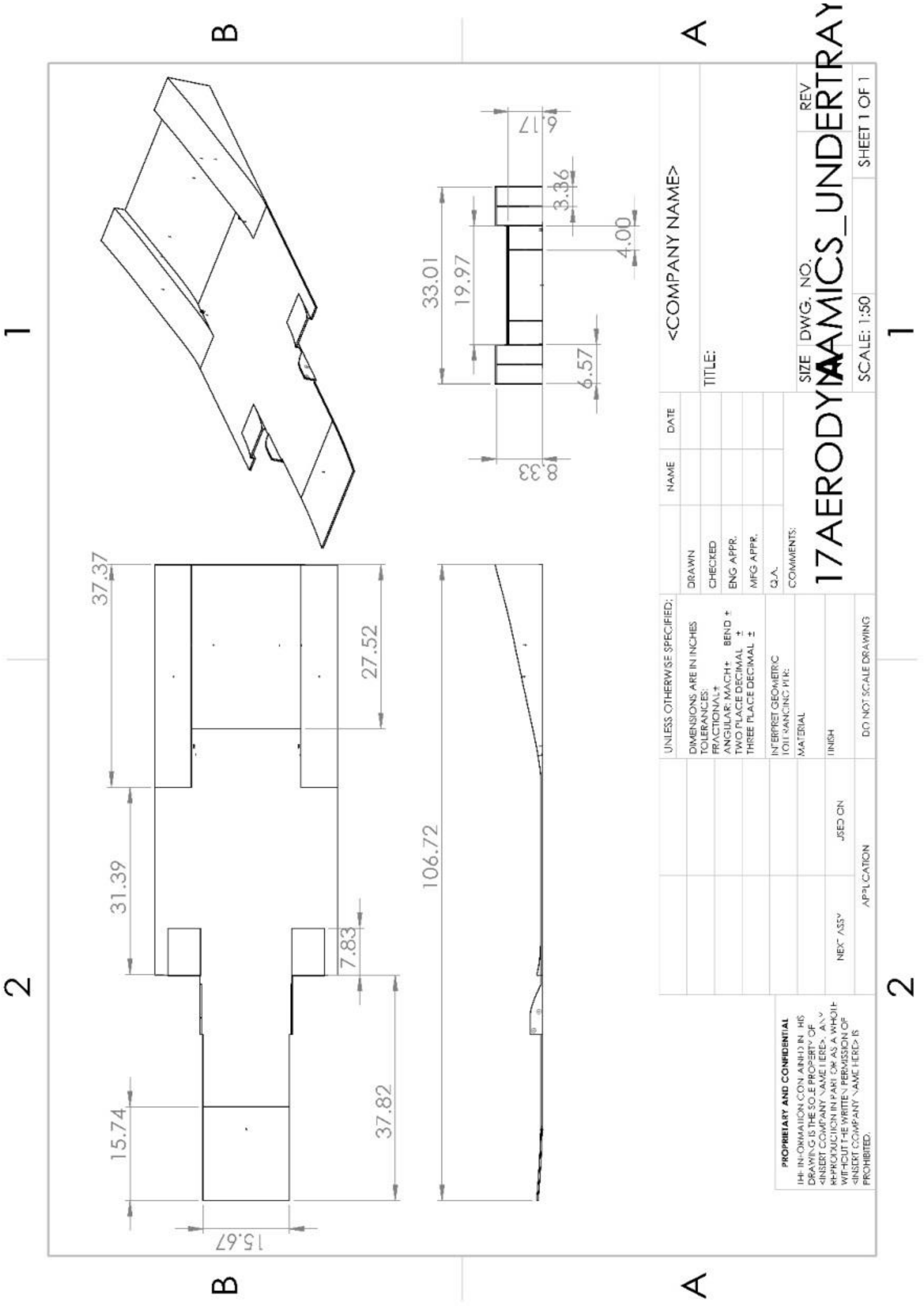


שרטוט 7: כנף אחורית

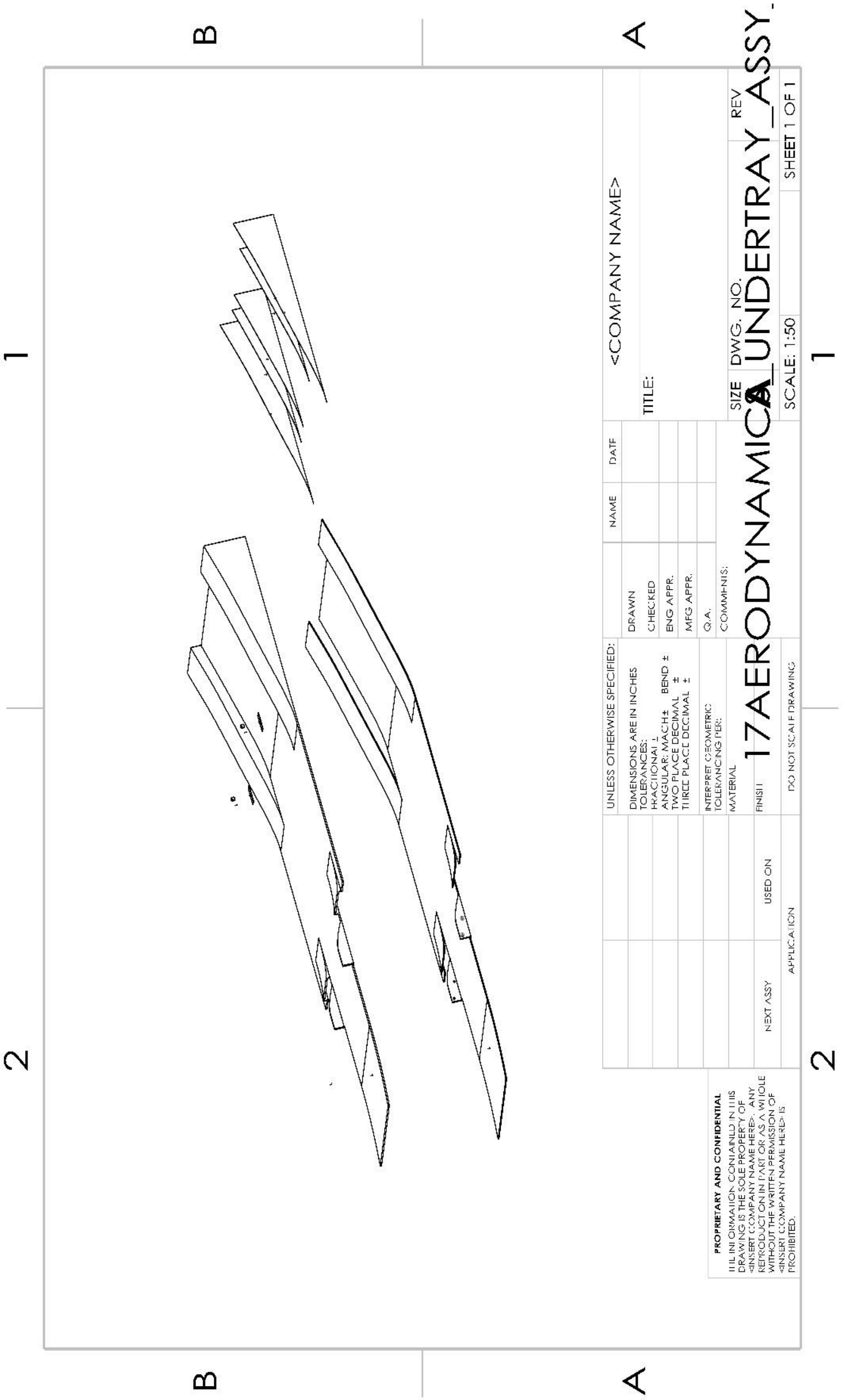


שרטוט 8: אנדפלייט כנף אחורית

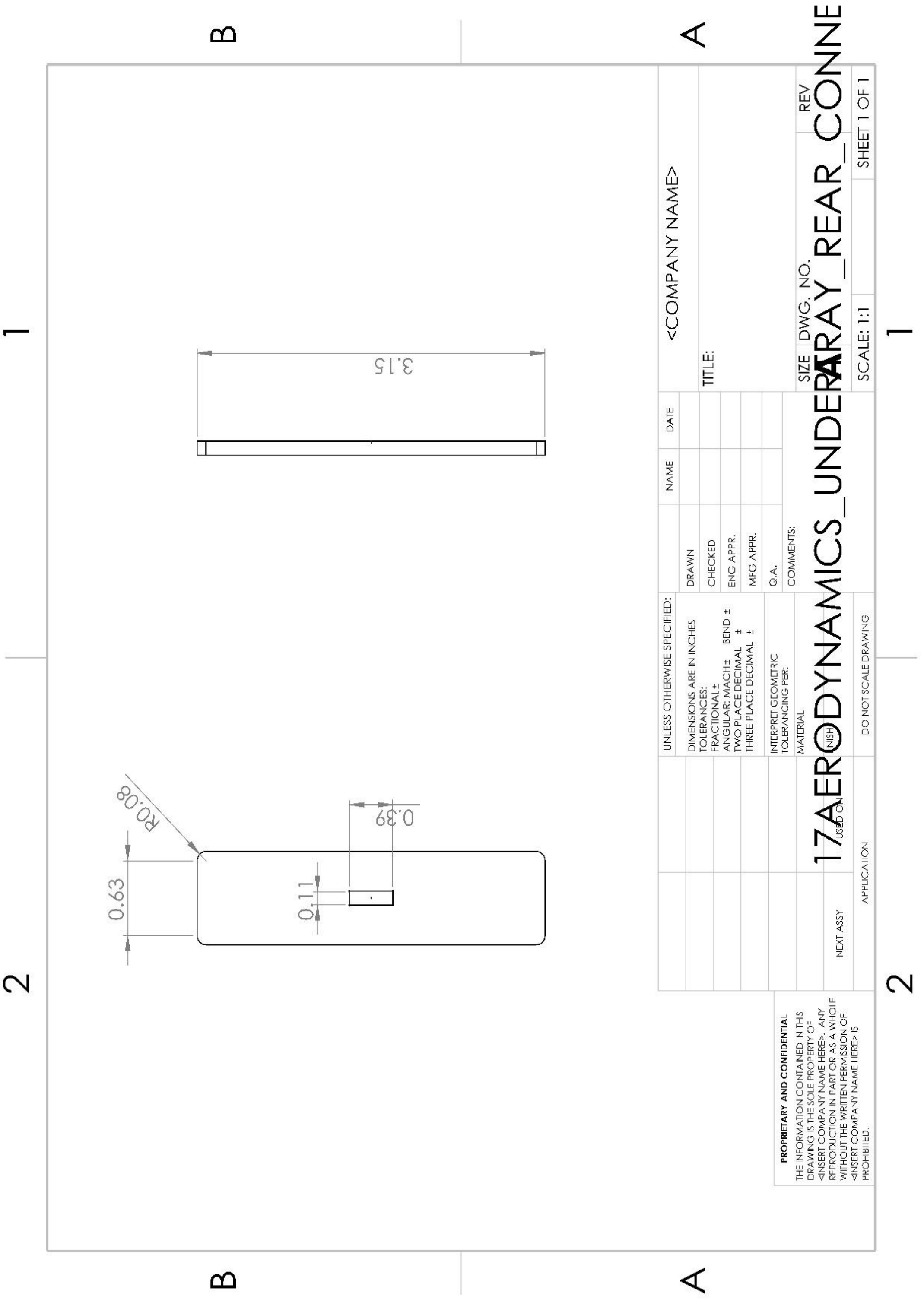
אנדרטריי



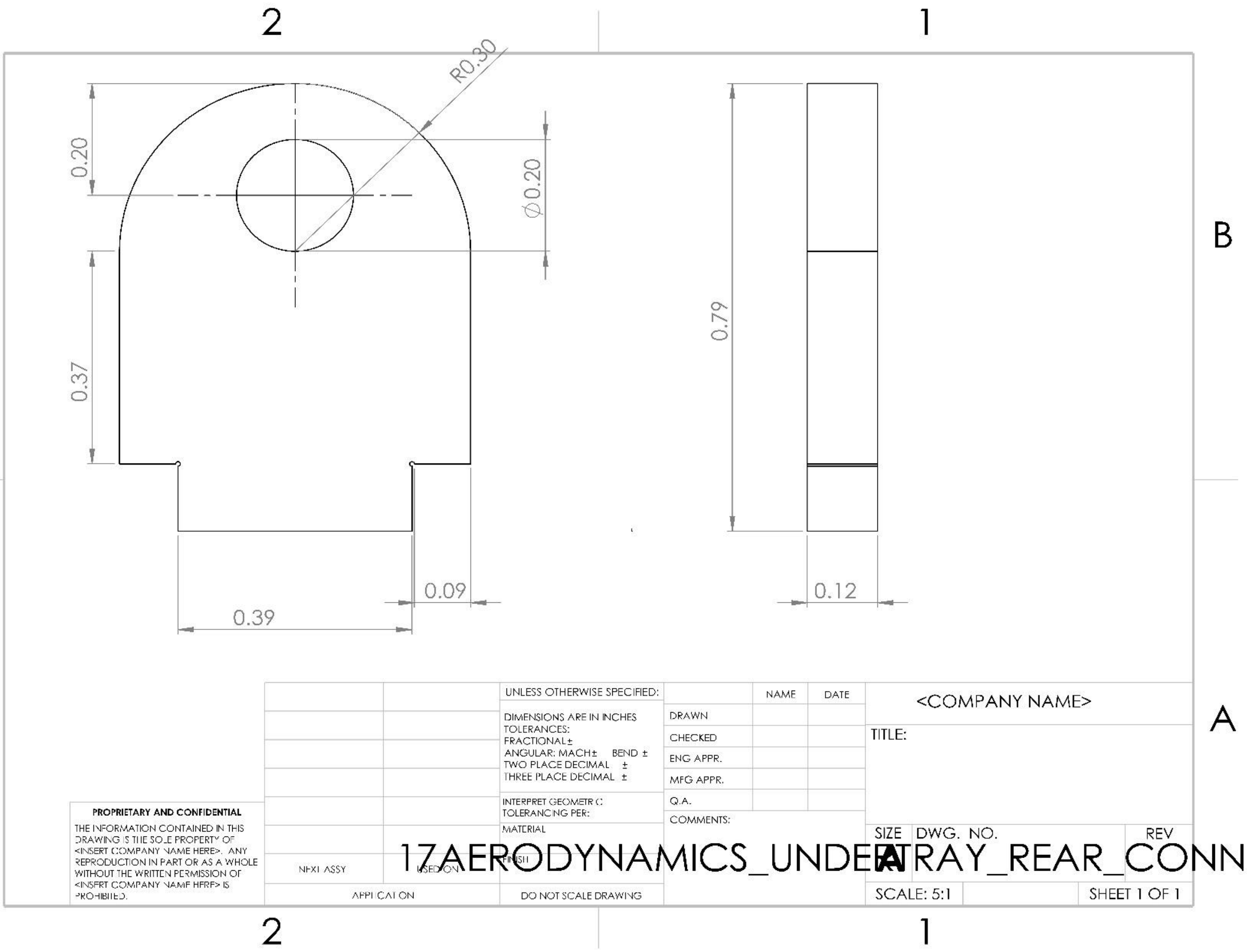
שרטוט 9: אנדרטריי



שרטוט 10: אנדרטריי

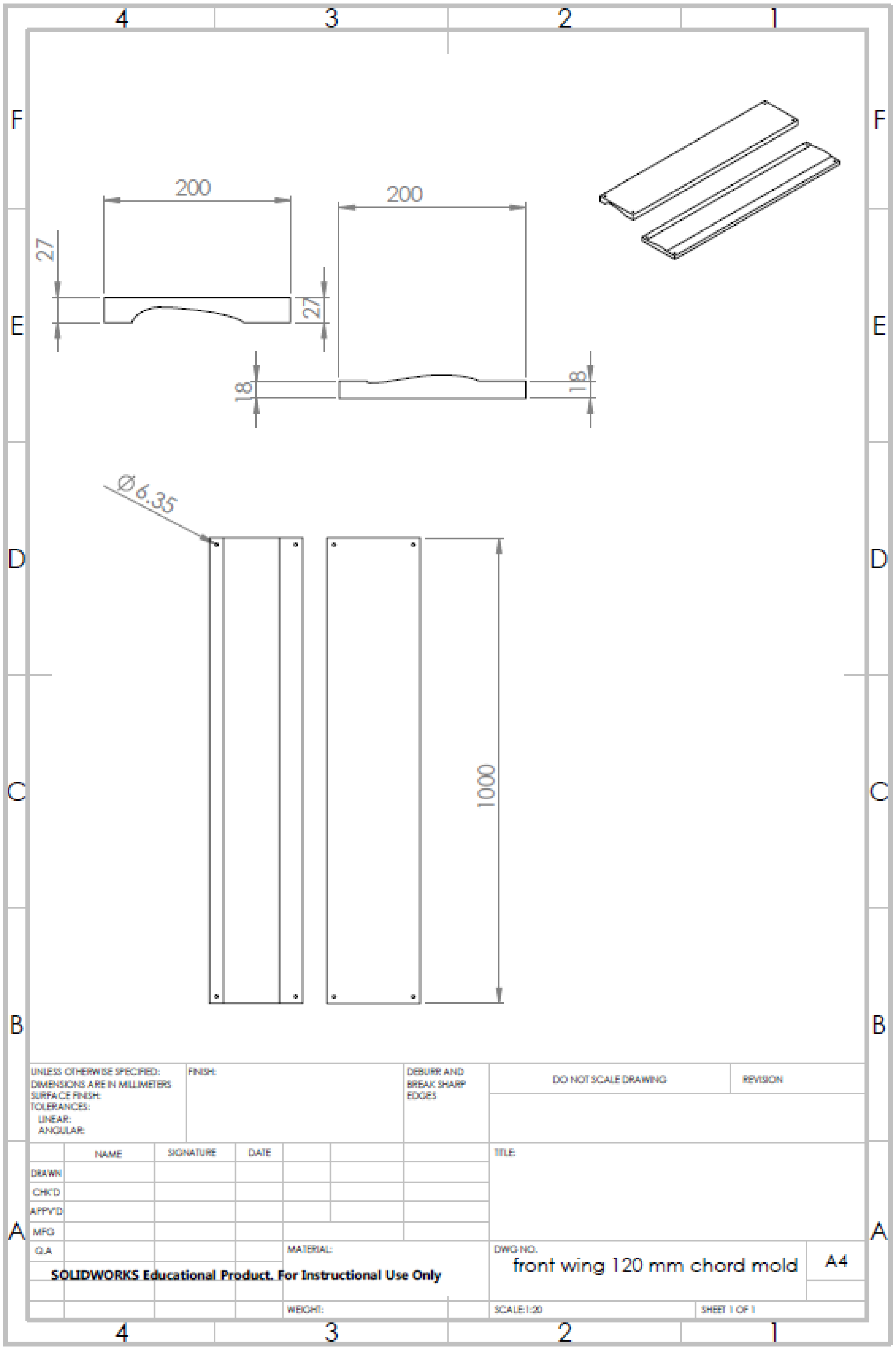


שרטוט 11: שתל אחורי אנדרטריי

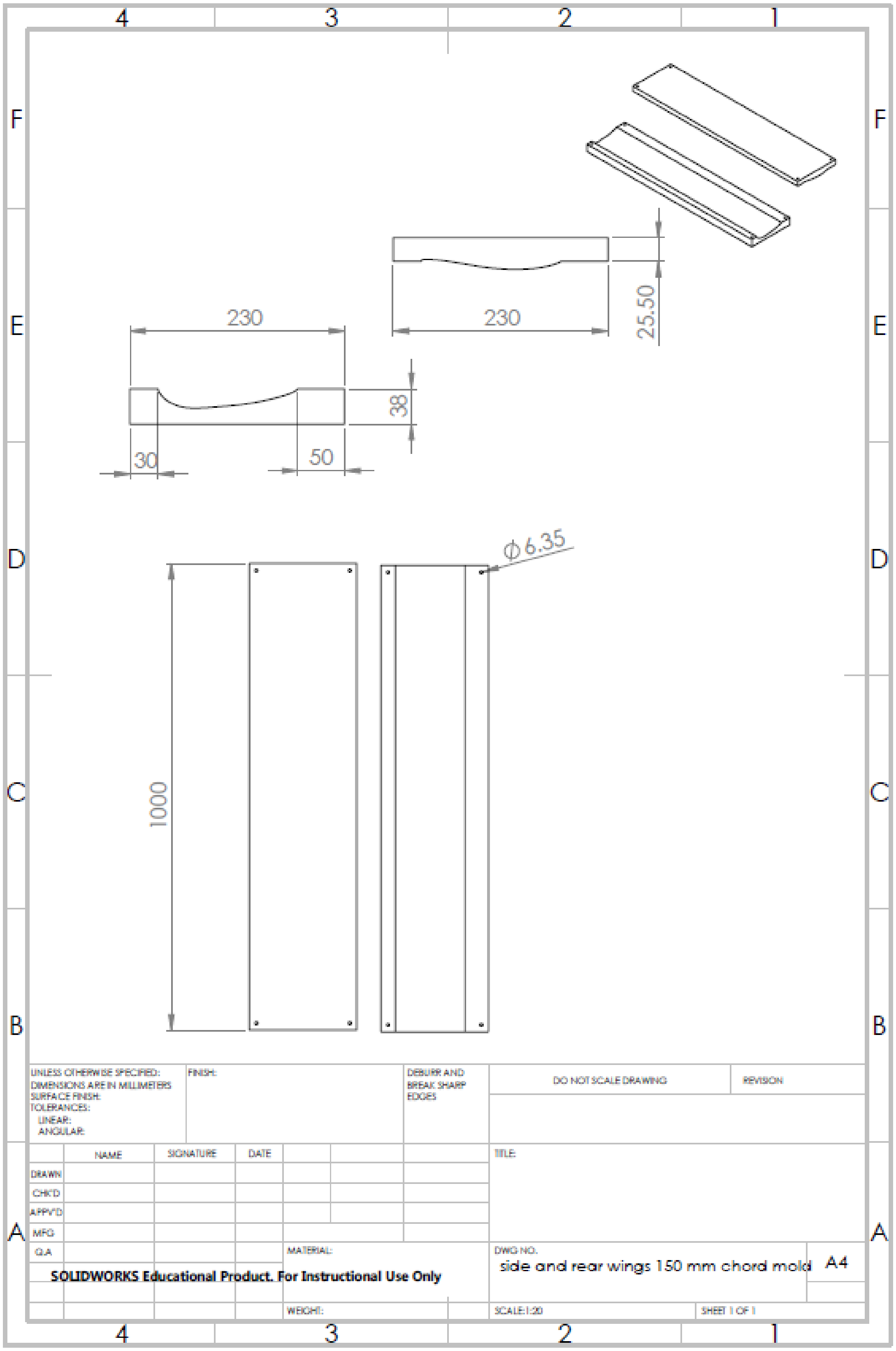


שרטוט 12: אוזן חיבור אחורית

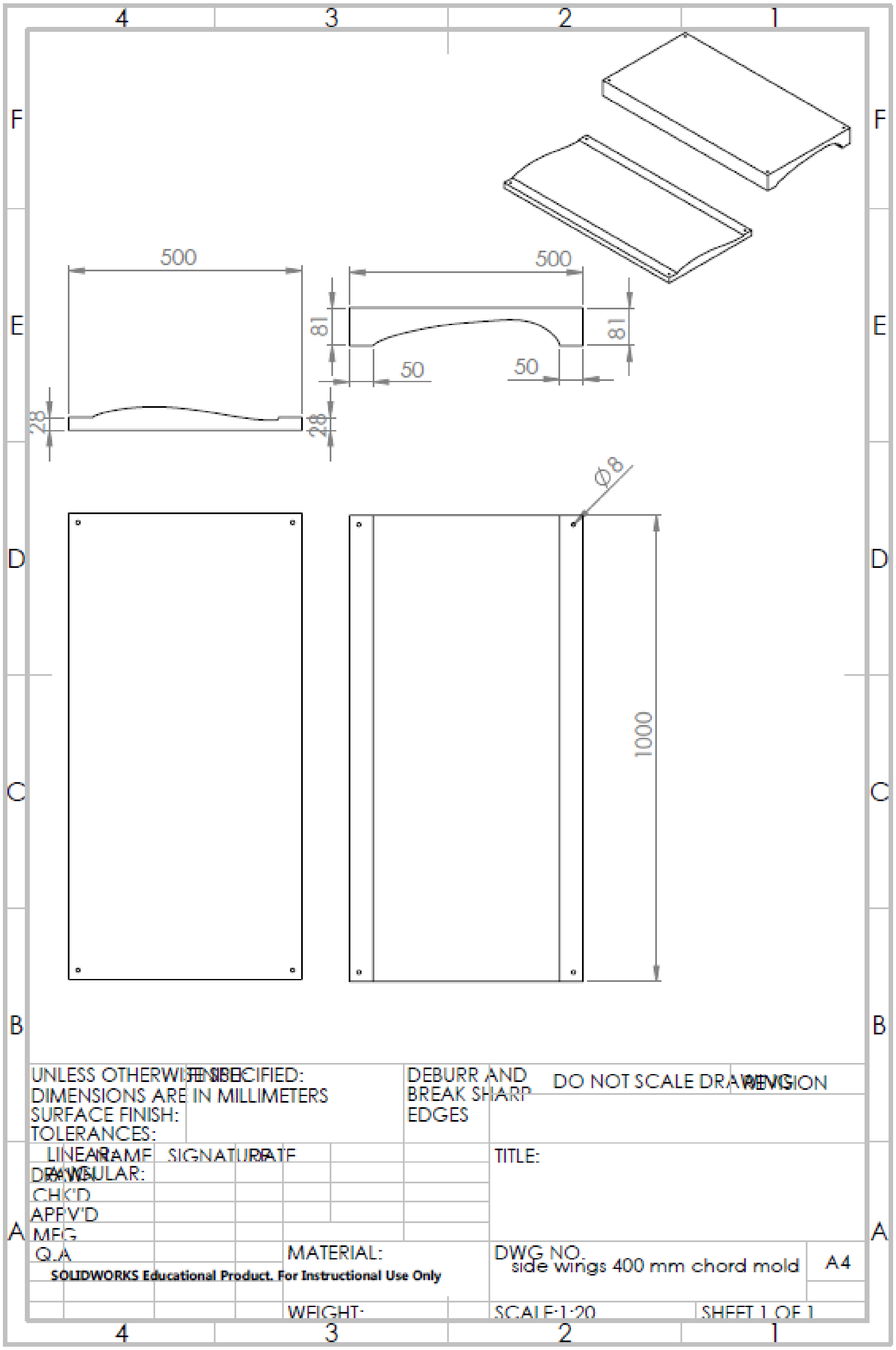
תבניות



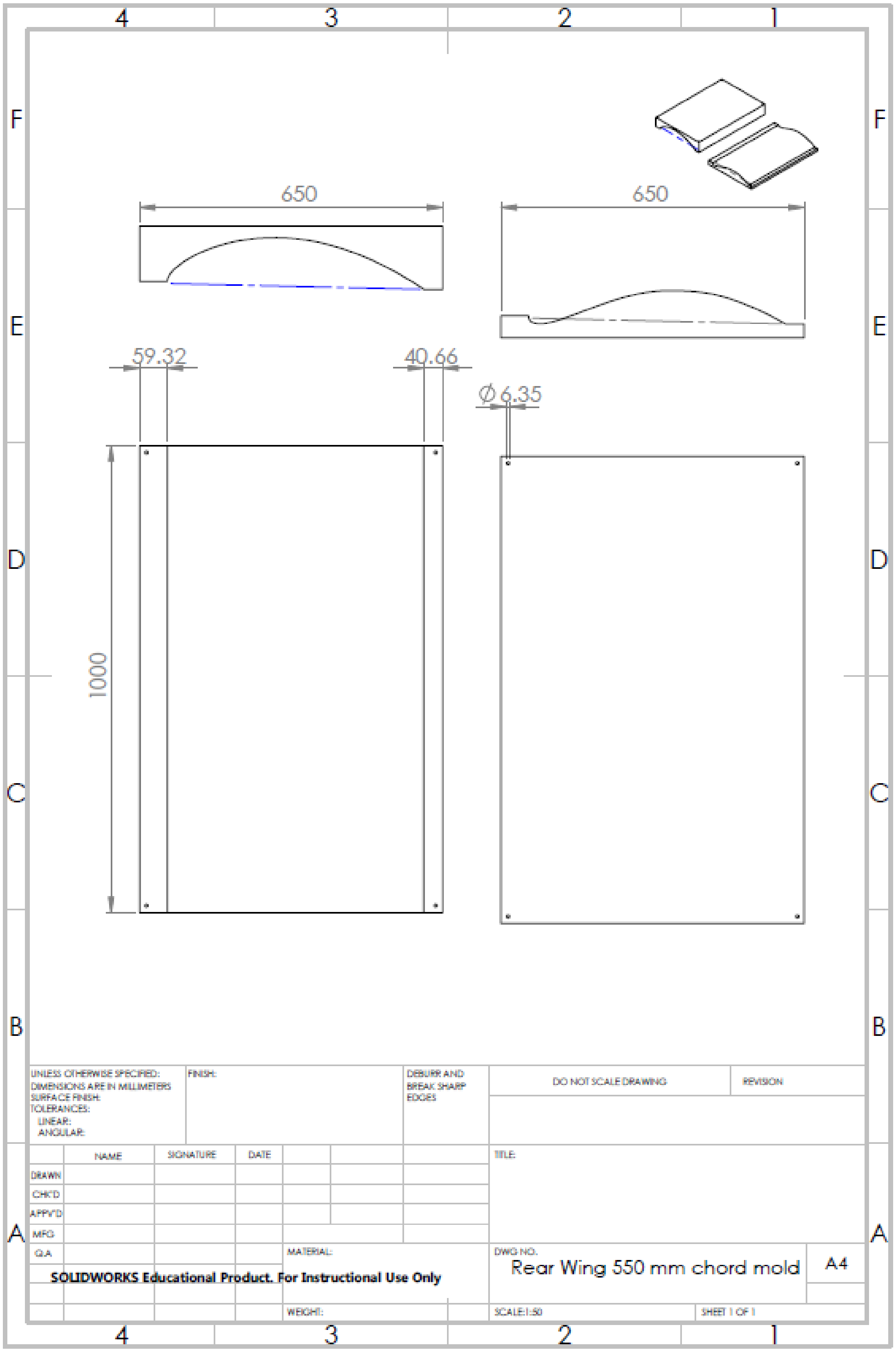
שרטוט 12: תבנית אלמנט 120 מ"מ



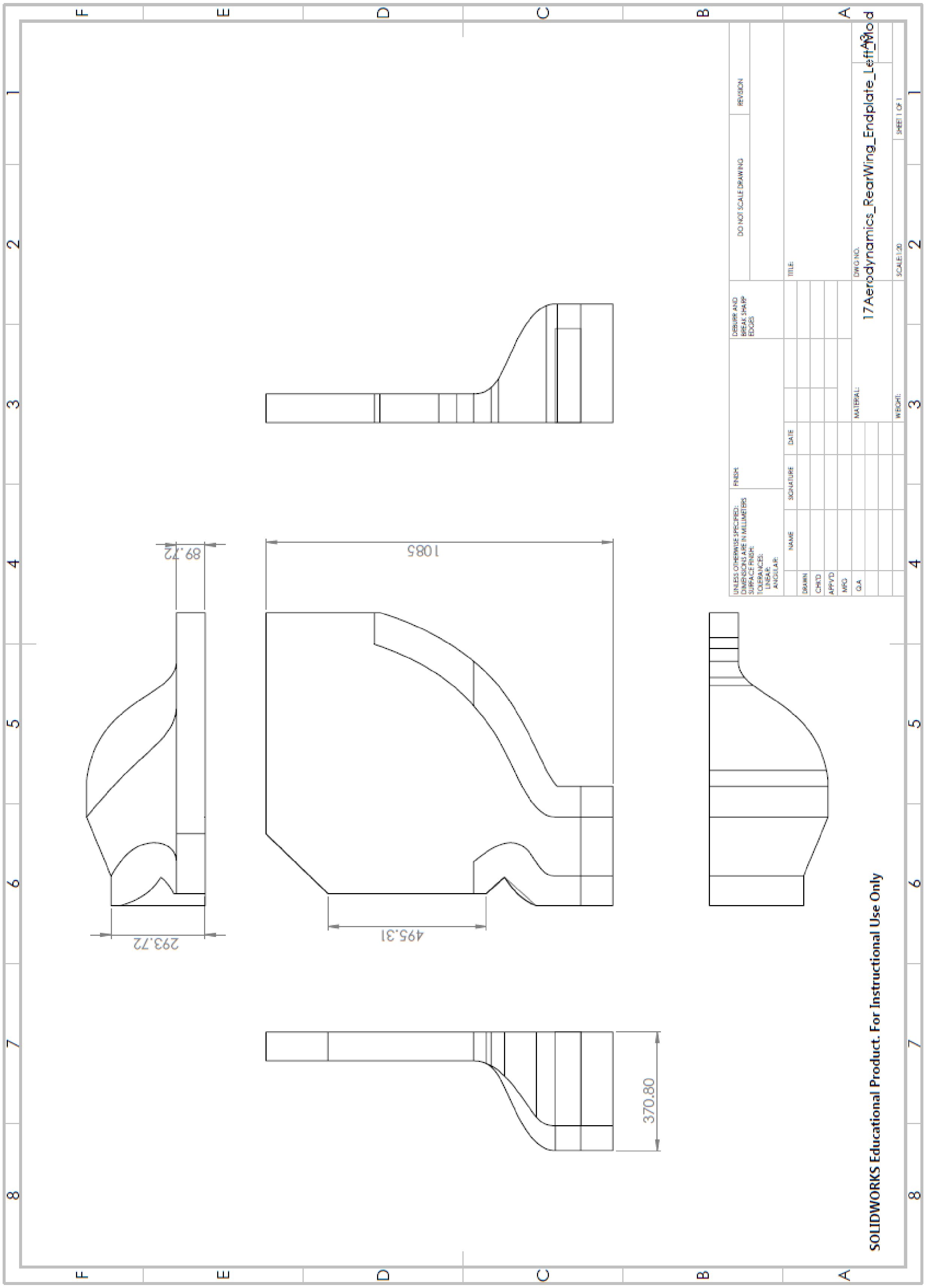
שרטוט 13: תבנית אלמנט 150 מ"מ



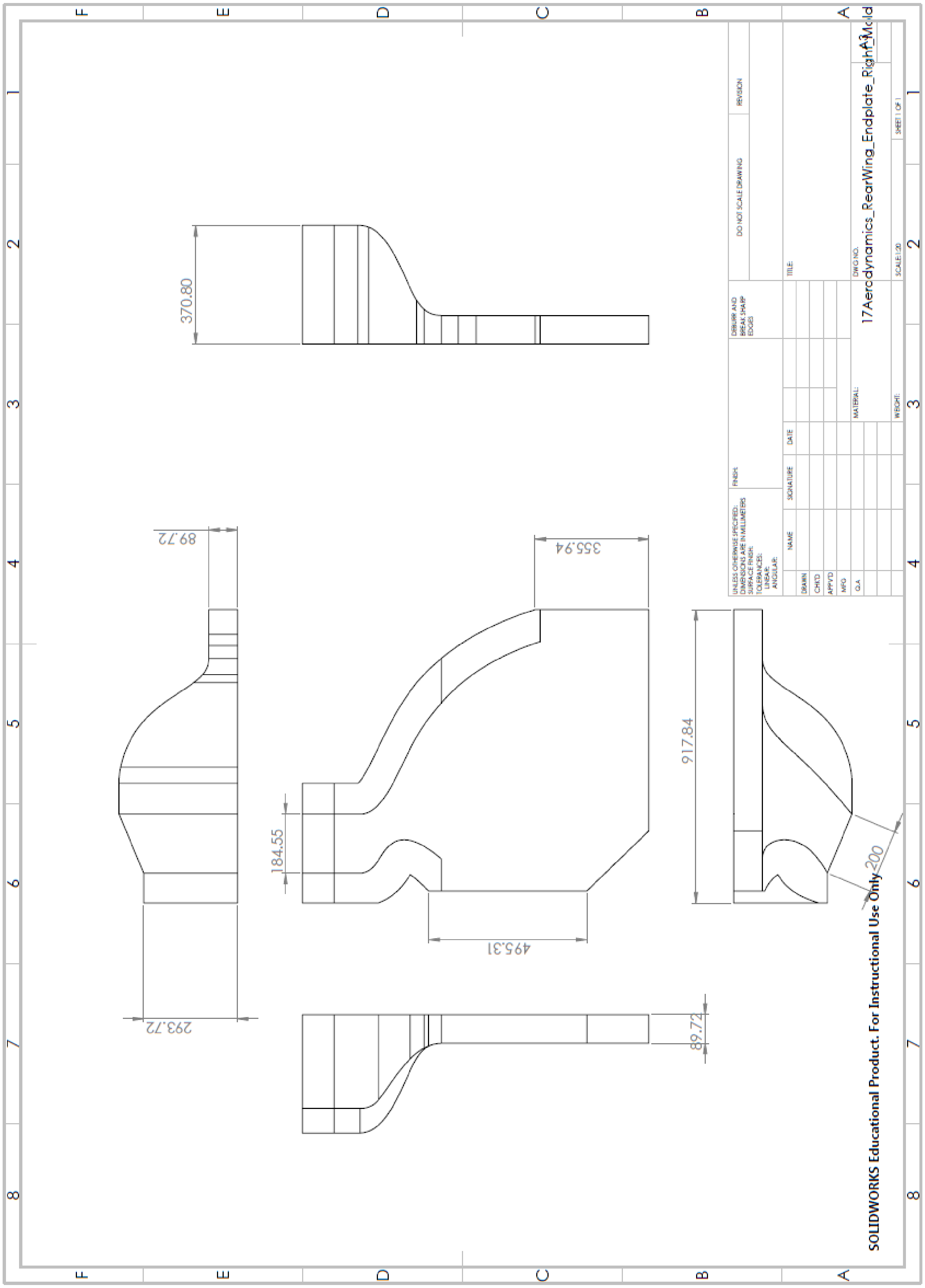
שרטוט 14: תבנית אלמנט 400 מ"מ



שרטוט 15: תבנית אלמנט 550 מ"מ

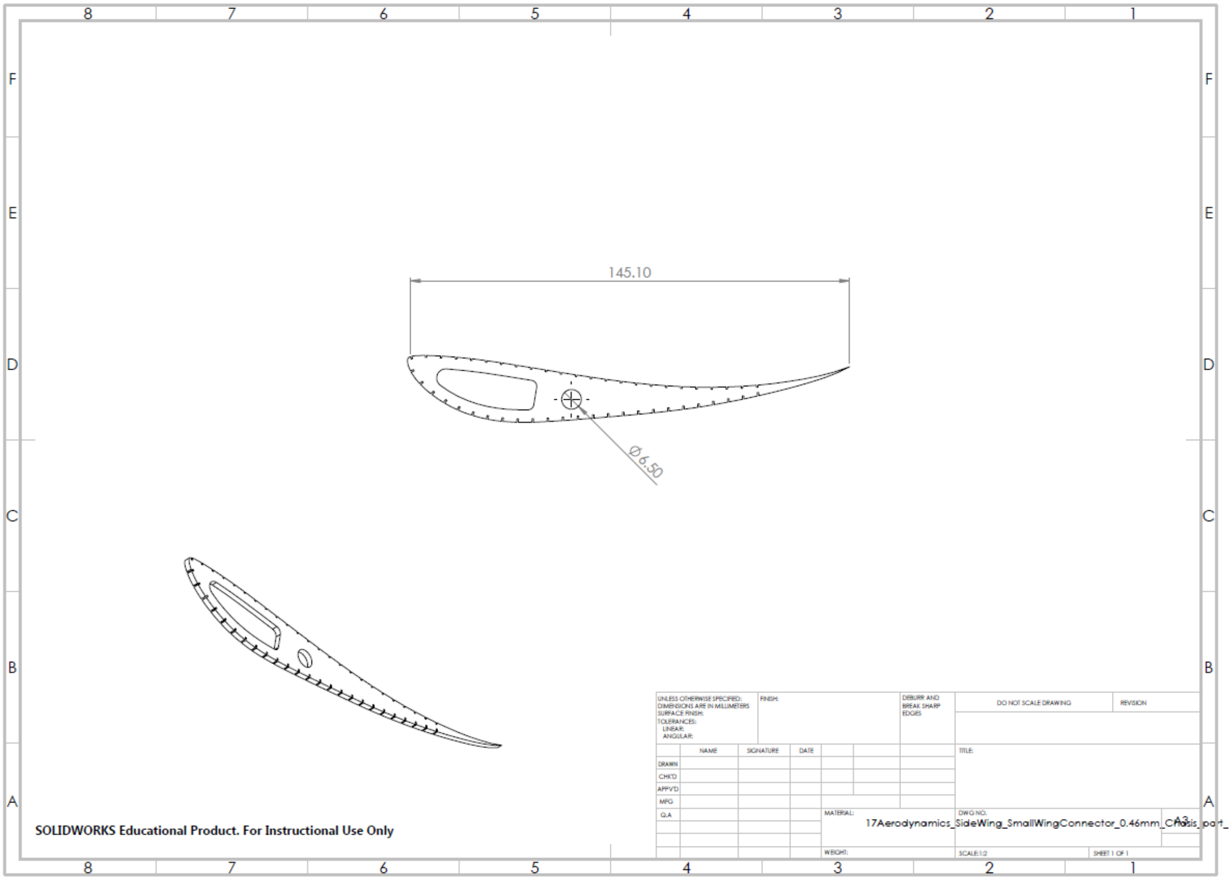


שרטוט 16: תבנית אנדפלייט שמאלי כנף אחורית

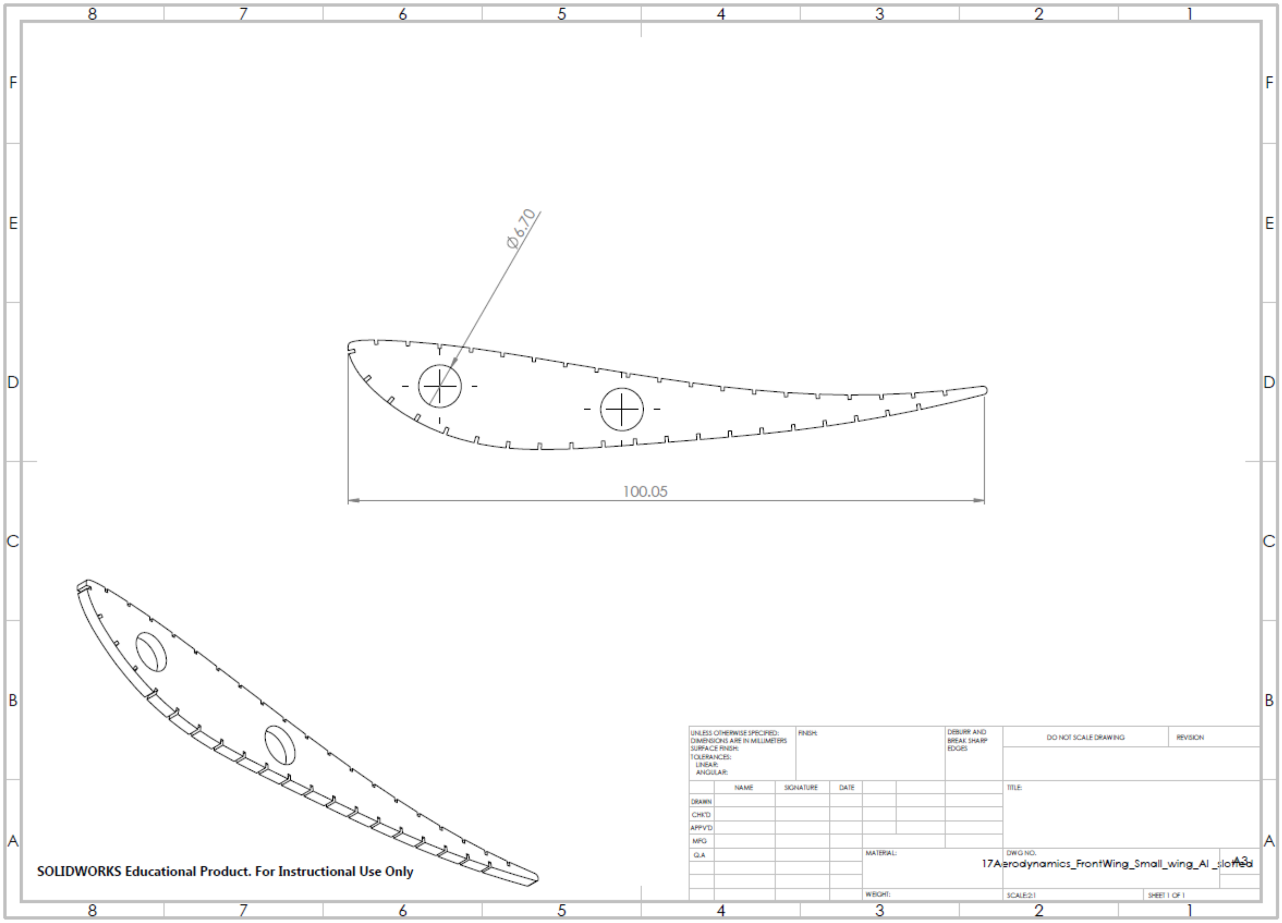


שרטוט 17: תבנית אנדפלייט שמאלי כנף אחורית

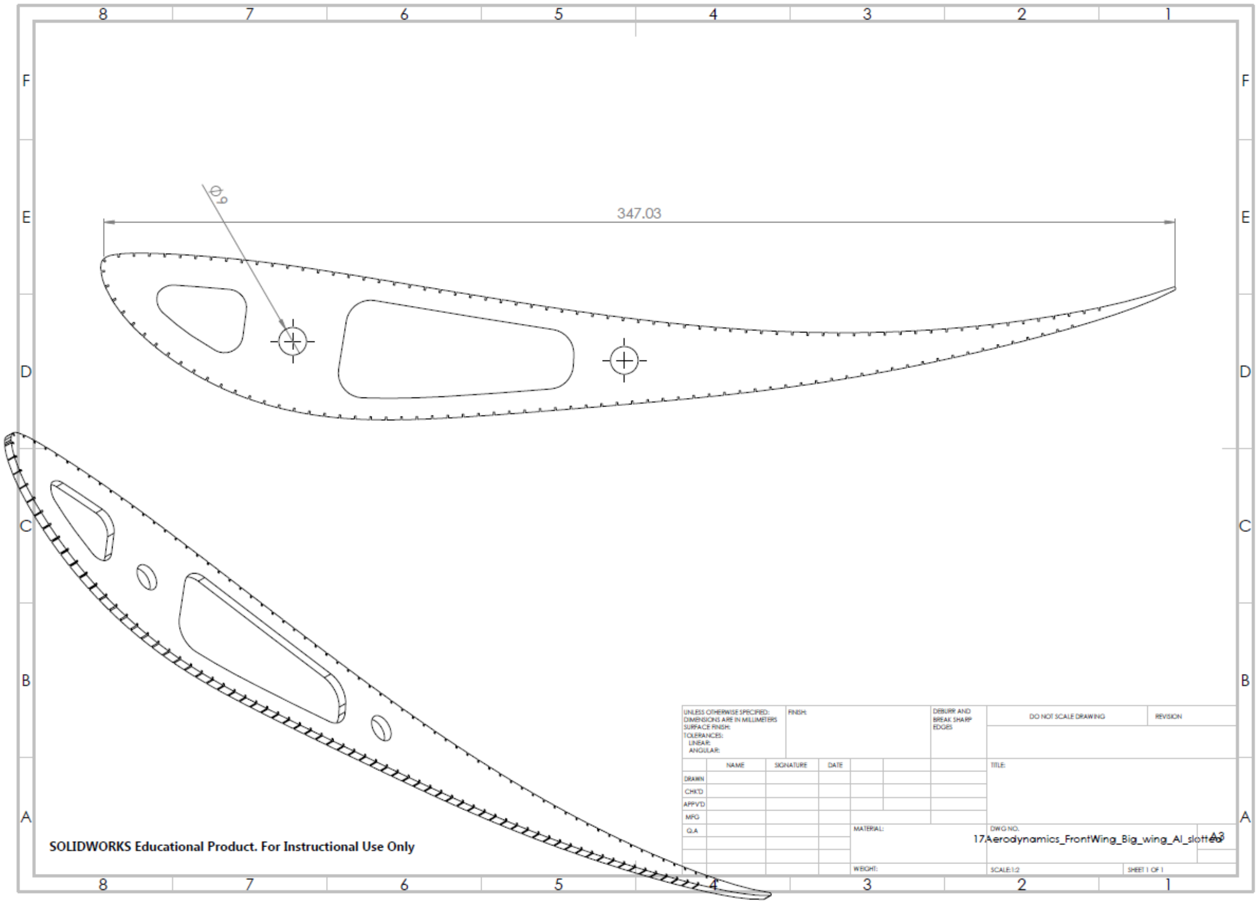
פרופילים



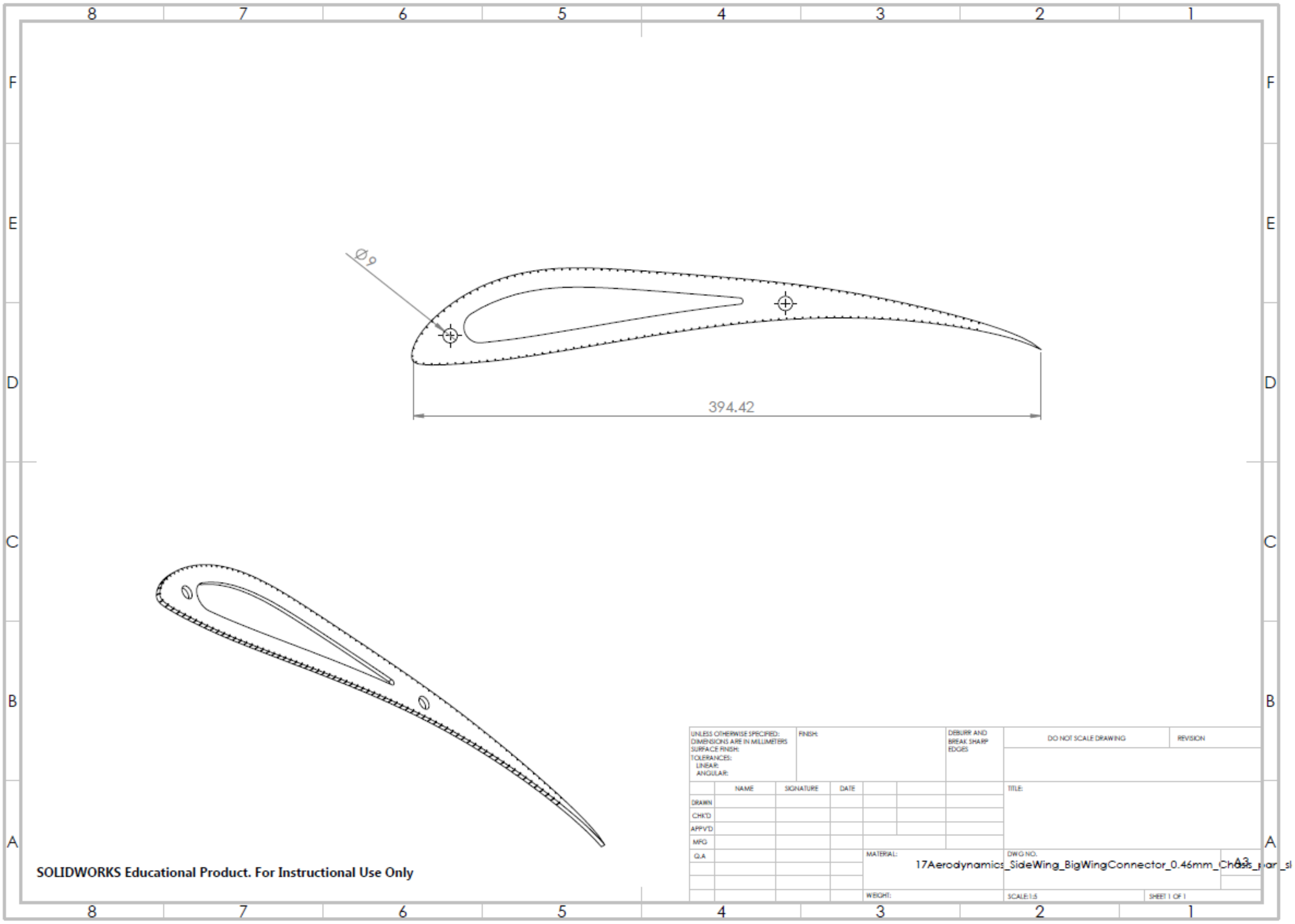
שרטוט 18: פרופיל אלמנט 120 מ"מ



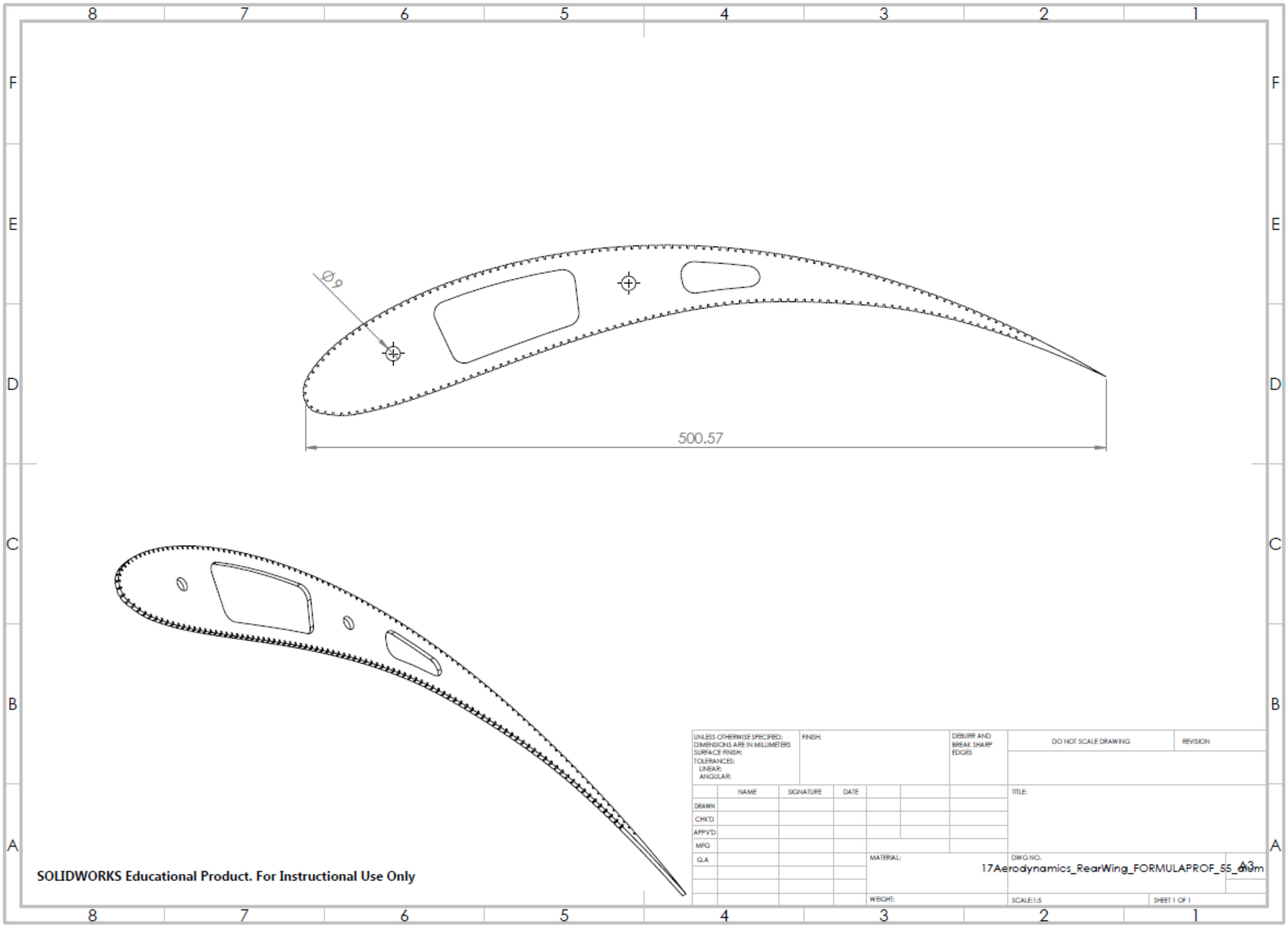
שרטוט 19: פרופיל אלמנט 150 מ"מ



שרטוט 20: פרופיל אלמנט 360 מ"מ



שרטוט 21: פרופיל אלמנט 400 מ"מ



שרטוט 22: פרופיל אלמנט 550 מ"מ

נספח ב' – אנליזת מאמצים לאלמנט

אנליזה זו בוצעה במסגרת פרויקט פיילוט בייצור ואחזקה בחומרים מרוכבים, אשר נערך בשיתוף פעולה עם פרויקט פורמולה 2017 בחסות הפקולטה לאווירונאוטיקה. מבצעי האנליזה גיל רולניק ושריה אלבז.

במהלך תכן כנף הצד ביצענו אנליזת חוזק תחת ההנחה שהחומר מתנהג בצורה איזוטרופית.

התבקשנו להציג אנליזה זו, לבצע אנליזה תחת ההנחה שהחומר הינו אורתוטרופי, ולהשוות בין האנליזות.

השתמשנו בכלי הייעודי לאנליזת חומרים מרוכבים של ANSYS: Ansys Composite PrepPost (ACP).

<u>אנליזה איזוטרופית</u>

ביצענו את האנליזה תחת ההנחות הבאות:

- החומר הינו איזוטרופי.
- המאמצים כתוצאה מהגרר זניחים.
- הEndplates לא תורמים לחוזק ולכן ניתן להתעלם מהם באנליזה.
- הכוח מהdownforce מתפלג אחיד על כל אלמנט.

תכונות החומרים:

תכונות הבד בהן השתמשנו באנליזה האיזוטרופית:

Properties of Outline Row 4: carbon isotropic

	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1600	kg m^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young...	
6	Young's Modulus	70000	MPa
7	Poisson's Ratio	0.1	
8	Bulk Modulus	2.9167E+10	Pa
9	Shear Modulus	3.1818E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	400	MPa
11	Compressive Yield Strength	390	MPa
12	Tensile Ultimate Strength	600	MPa
13	Compressive Ultimate Strength	570	MPa

תכונות הפוליאוריטן (עבור שני סוגי האנליזות): הנחנו איזוטרופיות, למרות שלמעשה קרוב לשפות הכנף יש צפיפות גדולה יותר וכתוצאה מכך תכונות מעט שונות.

Properties of Outline Row 7: polyurethane

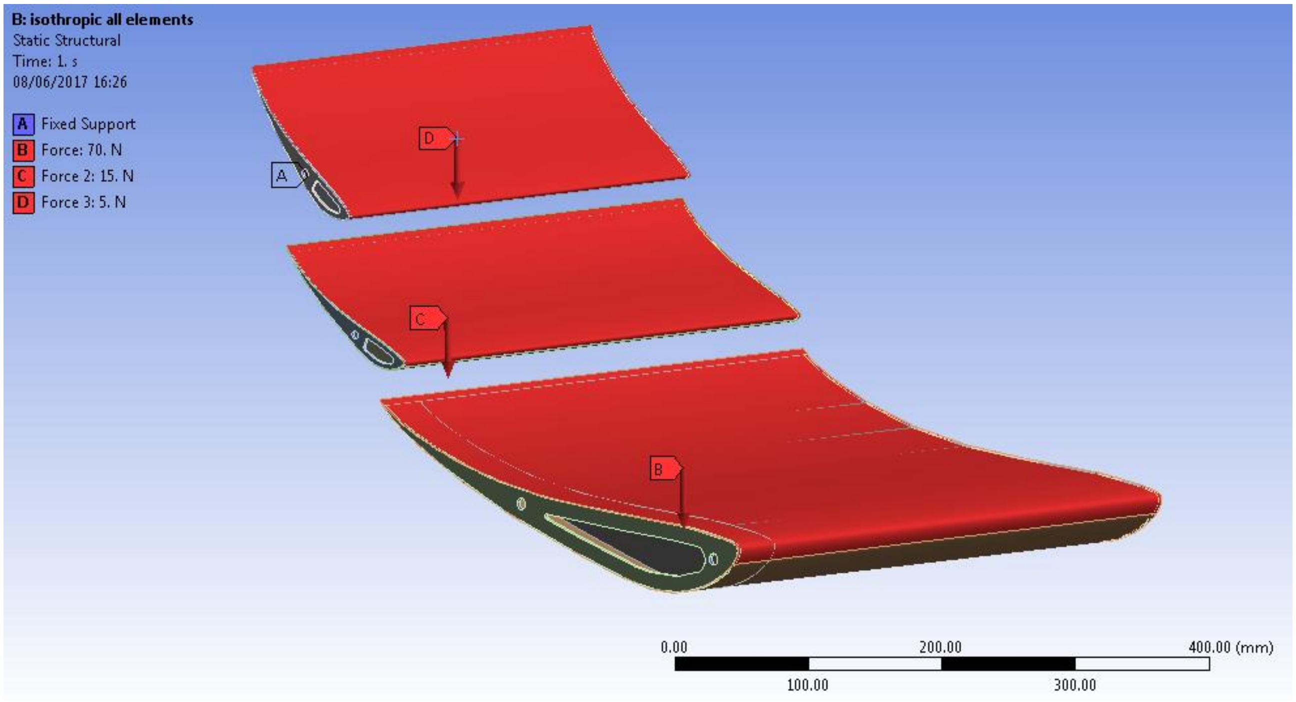
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	60	kg m^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young...	
6	Young's Modulus	1000	MPa
7	Poisson's Ratio	0.3	
8	Bulk Modulus	8.3333E+08	Pa
9	Shear Modulus	3.8462E+08	Pa
10	Tensile Yield Strength	30	MPa
11	Compressive Yield Strength	30	MPa
12	Tensile Ultimate Strength	50	MPa
13	Compressive Ultimate Strength	50	MPa

תכונות פרופילי האלומיניום Aluminum 5052-H32 (עבור שני סוגי האנליזות):

	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2680	kg m^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young...	
6	Young's Modulus	70000	MPa
7	Poisson's Ratio	0.33	
8	Bulk Modulus	6.8627E+10	Pa
9	Shear Modulus	2.6316E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	193	MPa
11	Compressive Yield Strength	193	MPa
12	Tensile Ultimate Strength	228	MPa
13	Compressive Ultimate Strength	228	MPa

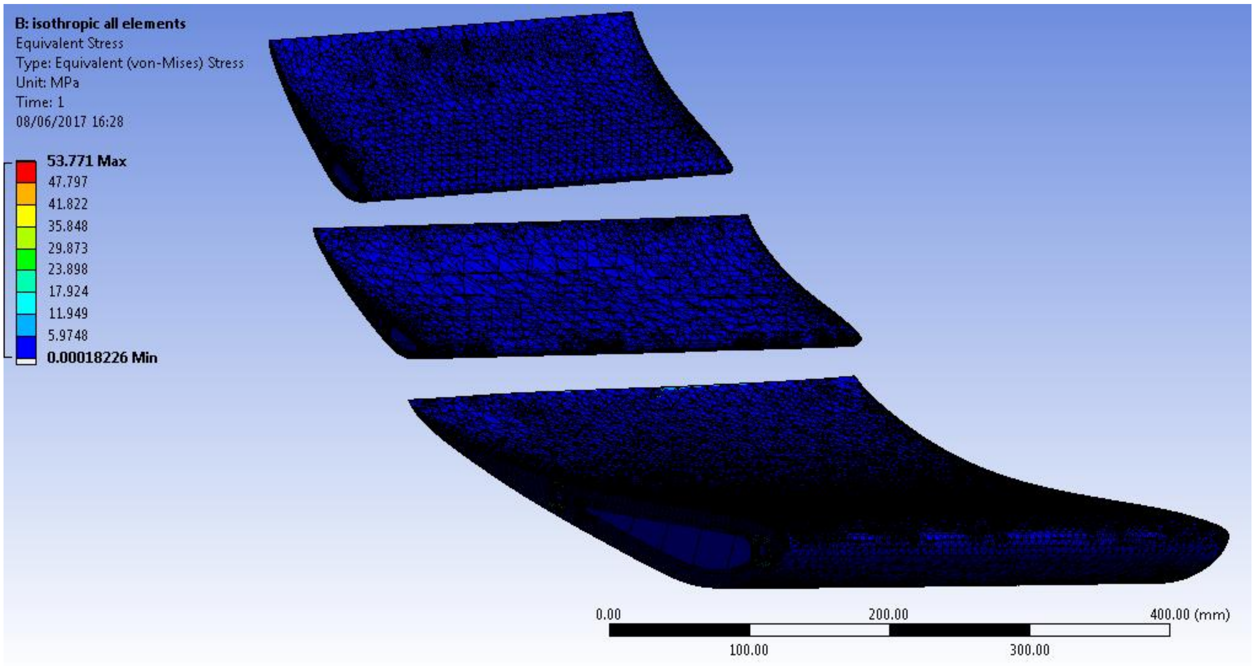
הגדרת האנליזה

על כל אלמנט הוגדר כוח מפורש אחיד לכיוון האדמה. גודל הכוחות על כל אלמנט הינו 70, 15 ו5 ניוטון עבור האלמנטים מהגדול לקטן. הוגדר ריתום בתבריגים של פרופיל האלומיניום המחובר לbracket.

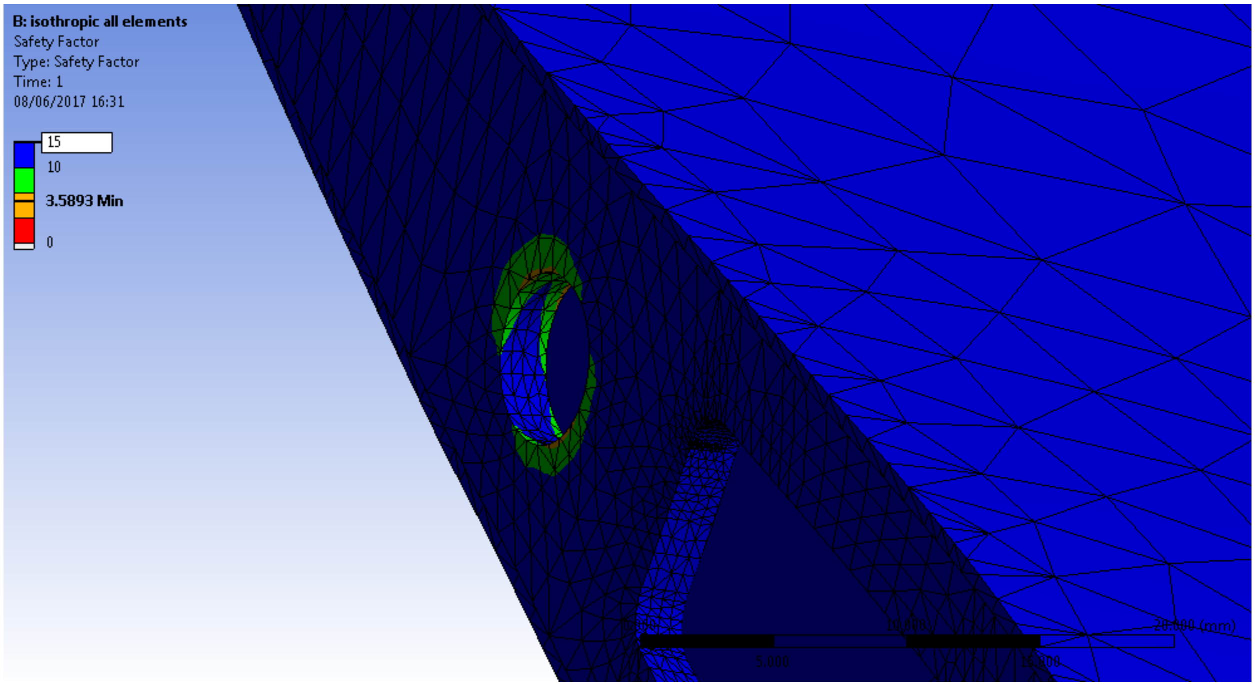


<u># תוצאות האנליזה לחומר איזוטרופי</u>

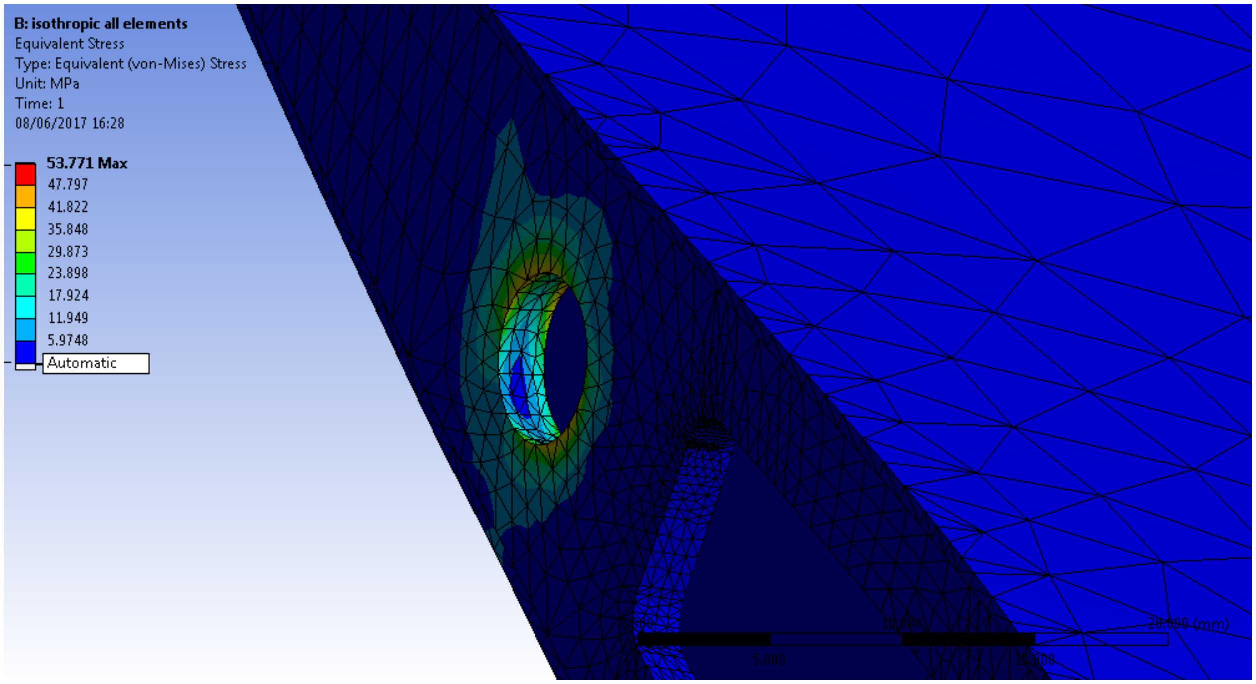
פילוג המאמצים על הכנף:



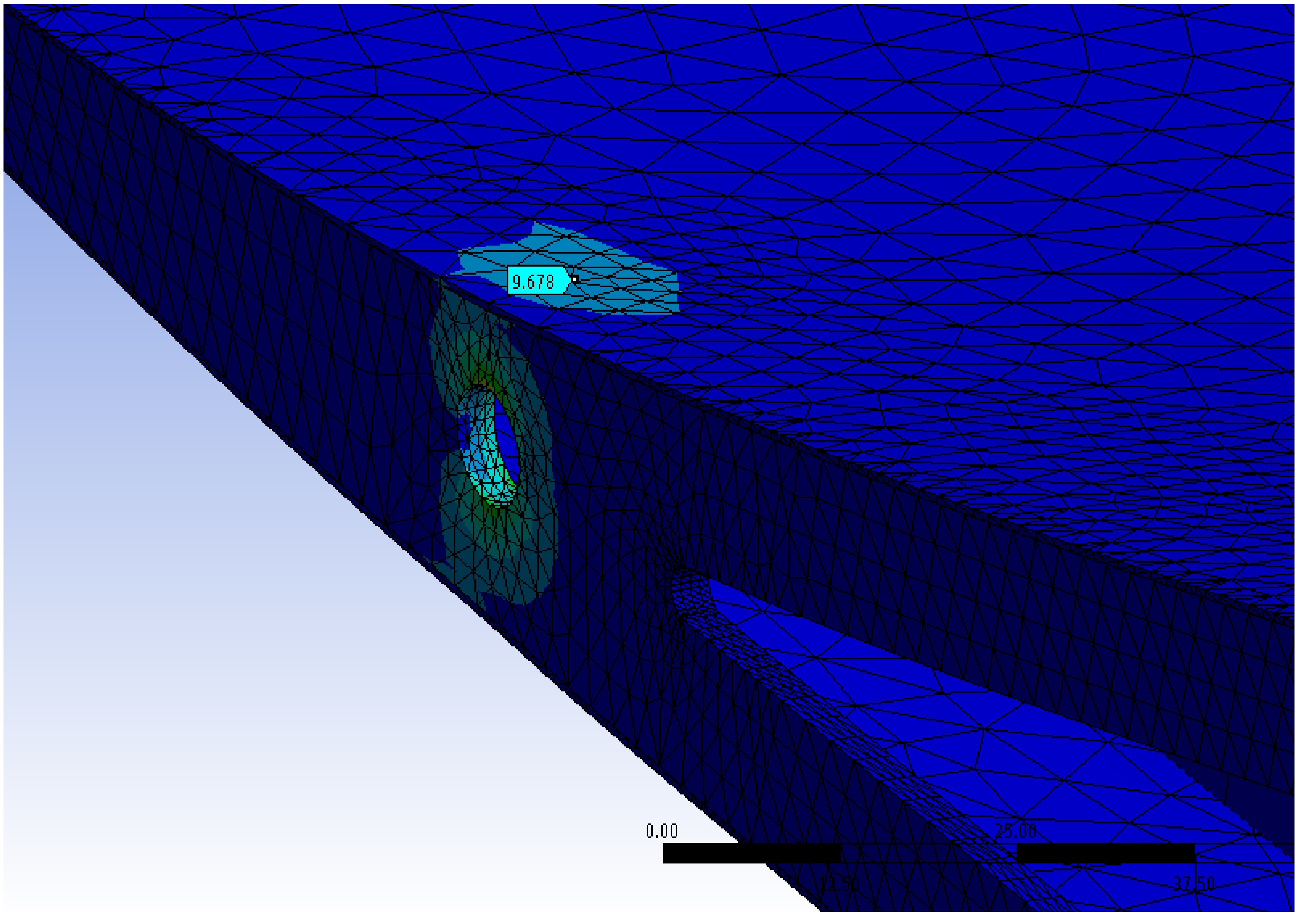
המאמץ המקסימלי התפתח בתבריג של האלמנט הבינוני, וערכו כ**53.5[MPa]**



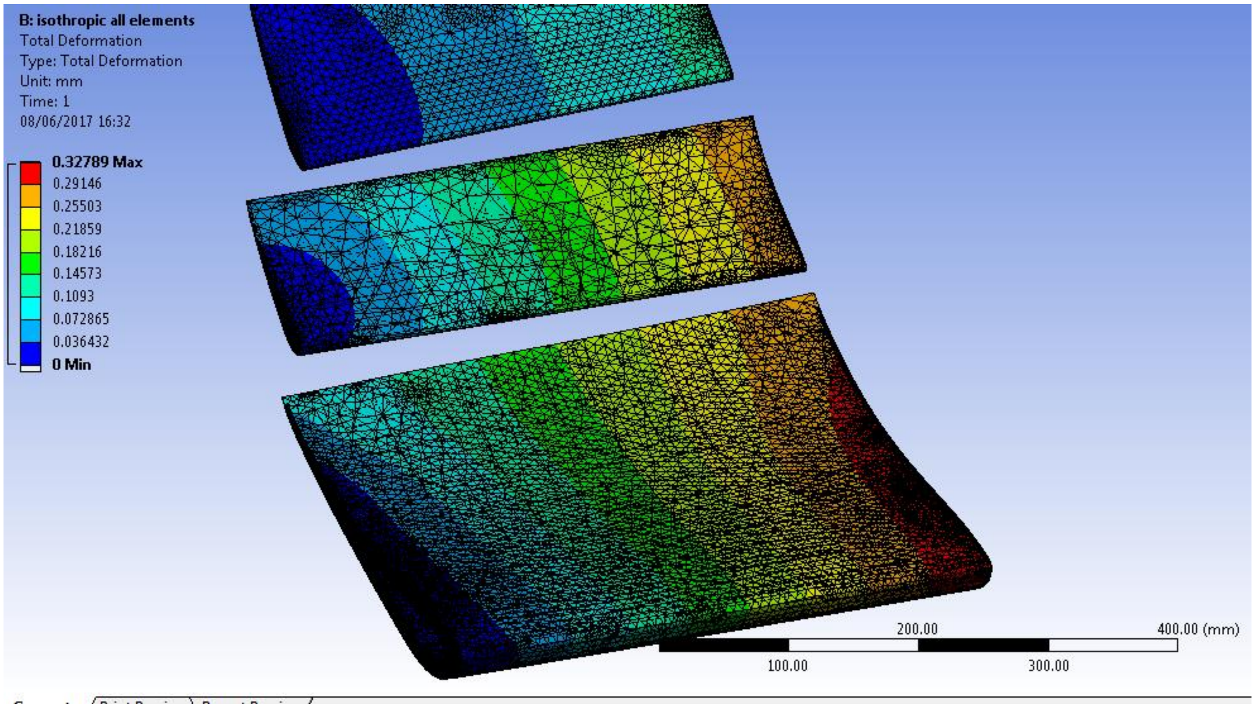
מקדם הביטחון המינימלי לכשל סטטי מתקבל בתבריג זה וערכו 3.6:



אם נבחן את המאמץ המקסימלי שהתפתח במעטפת החומר המרוכב נקבל:



התקבל מאמץ מקסימלי של 9.7[N] בחומר המרוכב.



הדפורמציה המקסימלית מתקבלת <u>בקצה האלמנט הגדול</u>, וערכה כ**0.3[mm]**:

אנליזה אורתוטרופית

הגדרת האנליזה

- ההנחות תחתן עבדנו לא השתנו, מלבד כמובן ההנחה שהחומר הינו אורתוטרופי ולא איזוטרופי.
- מיקום הכוחות והריתום לא השתנו לעומת האנליזה הקודמת.
- האלמנטים העשויים מהחומר המרוכב הוגדרו בAnsys כsurfaces.

לאחר מכן, בעזרת הכלי ייעודי של Ansys לאנליזות חומרים מרוכבים הגדרנו שתי שכבות של בד+אפוקסי בעובי 0.29[mm] כל אחת.

עקב השימוש בצורת הגדרה זו ובכלי הייעודי, האנליזה יודעת להתייחס לחלק כplate ולא כsolid, ולהביא לידי ביטוי את הנחות ההתנהגות האורתוטרופית.

- תכונות החומר המרוכב נלקחו מהמסמך T300-5052 design allowables ובהתייעצות עם ד"ר תמר גוטסמן:

Properties of Outline Row 5: carbon orthotropic

	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1340	kg m^-3
4	Orthotropic Elasticity		
5	Young's Modulus X direction	42000	MPa
6	Young's Modulus Y direction	42000	MPa
7	Young's Modulus Z direction	3600	MPa
8	Poisson's Ratio XY	0.04	
9	Poisson's Ratio YZ	0.3	
10	Poisson's Ratio XZ	0.3	
11	Shear Modulus XY	2700	MPa
12	Shear Modulus YZ	1400	MPa
13	Shear Modulus XZ	1400	MPa
14	Orthotropic Stress Limits		
15	Tensile X direction	270	MPa
16	Tensile Y direction	270	MPa
17	Tensile Z direction	27	MPa
18	Compressive X direction	-150	MPa
19	Compressive Y direction	-150	MPa
20	Compressive Z direction	-50	MPa
21	Shear XY	50	MPa
22	Shear YZ	16	MPa
23	Shear XZ	16	MPa
24	Ply Type		
25	Type	Woven	

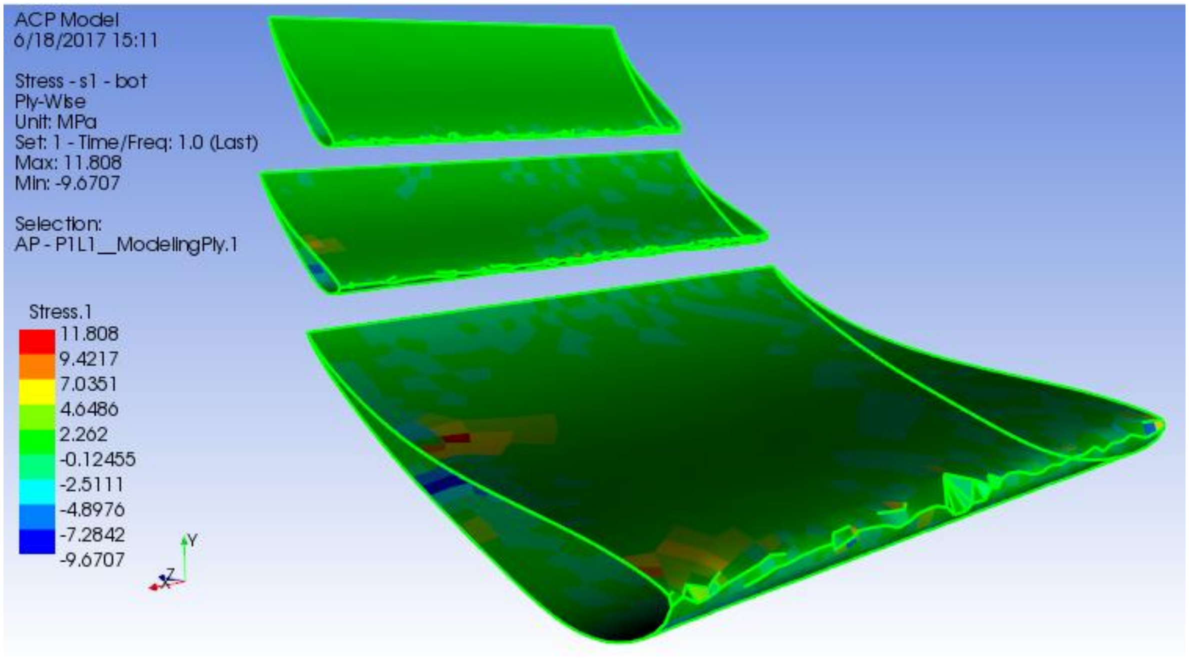
תוצאות האנליזה לחומר אורתוטרופי

בחנו את פילוג המאמצים שהתקבל בחלקים השונים ובשכבות השונות.

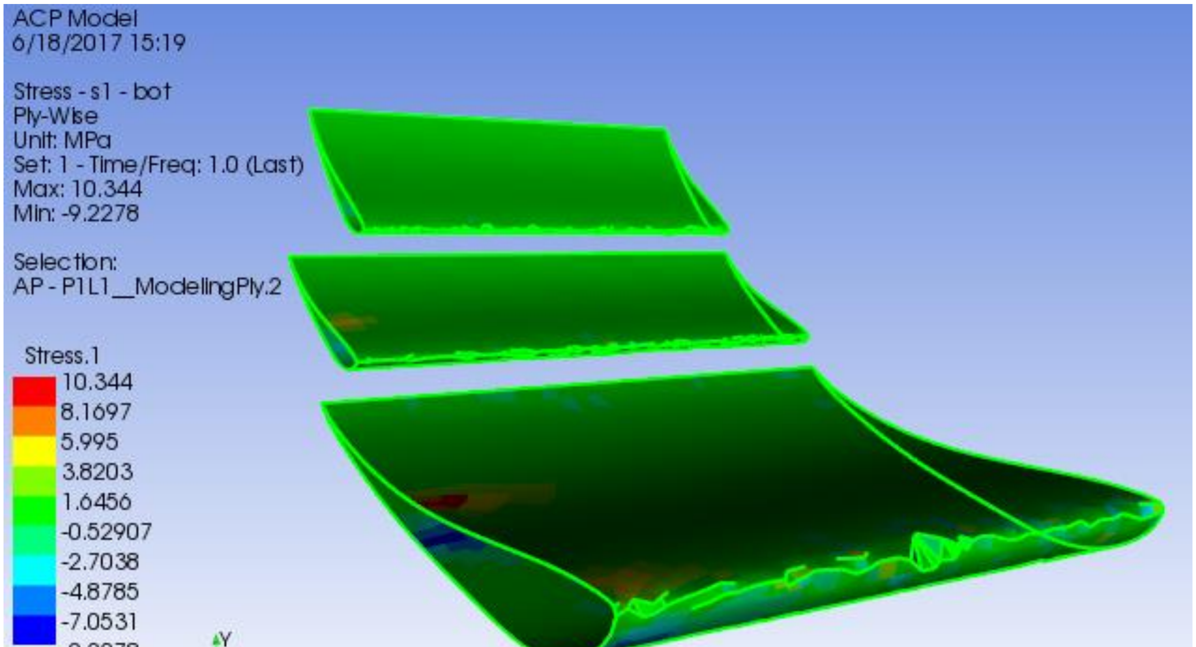
המאמצים על פרופילי האלומיניום לא השתנו.

הצגנו את המאמצים שהתפתחו במעטפת החומר המרוכב לפי הפילוג שהתקבל בשכבות השונות.

<u>השכבה החיצונית:</u>



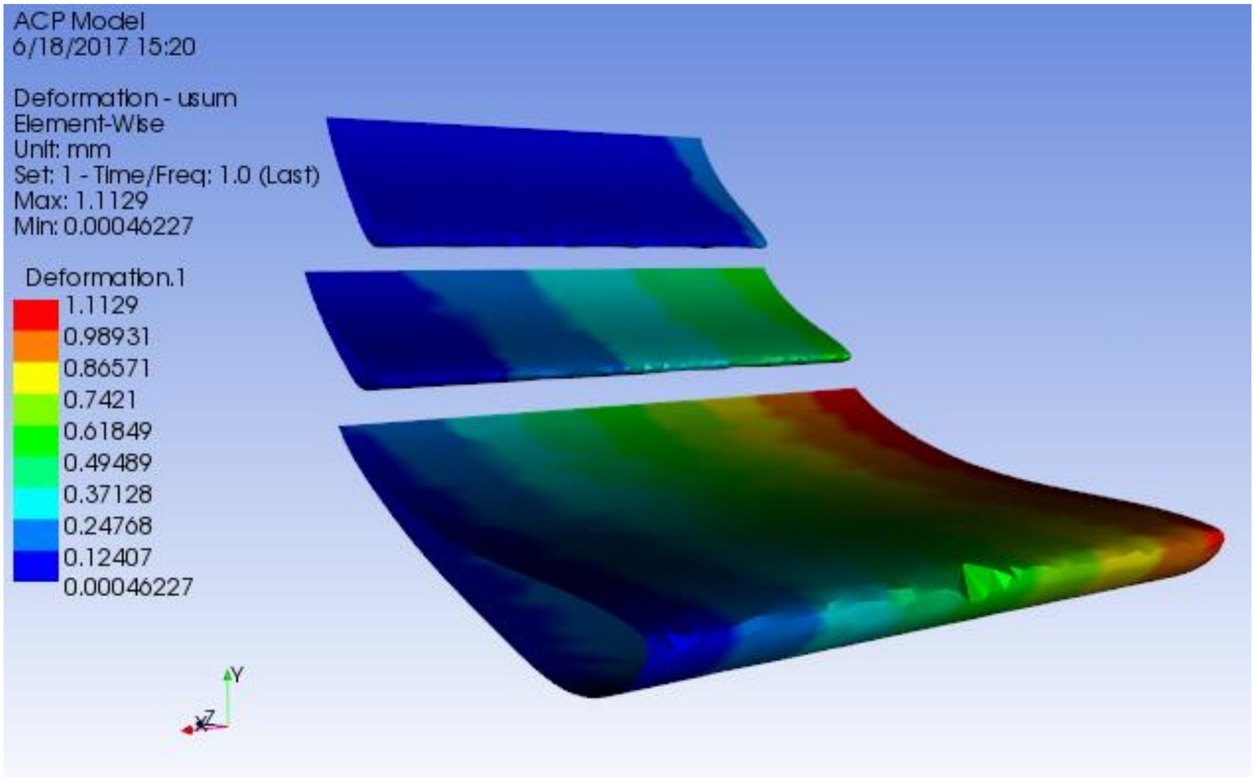
<u>השכבה הפנימית:</u>



ניתן לראות שהמאמץ המקסימלי התפתח בשכבה החיצונית, וגודלו **11.8[N]**.

נשים לב שבהשוואה בין האנליזות קיבלנו **מאמץ גדול יותר בכ20%** באנליזה האורתוטרופית בהשוואה לאנליזה האיזוטרופית, כצפוי.

הדפורמציה המקסימלית שהתקבלה היא כ**1.1[mm]**:



נשים לב **שהדפורמציה המקסימלית שהתקבלה גדולה פי 3.5** מהערך שהתקבל באנליזה האיזוטרופית.

השוואת האנליזות

כצפוי, באנליזה האיזוטרופית קיבלנו ביצועים פחות טובים של הכנף. המאמץ המקסימלי גדל בכ20% והדפורמציה המקסימלית גדלה פי 3.5. ההבדל המשמעותי יותר בין תוצאות האנליזות הינו בדפורמציה.

הסיבות להבדלים אלו הינן:

1) באנליזה האורתוטרופית הסתמכנו על מקור לא רלוונטי באינטרנט, והגדרנו מודול יאנג של70[GPa] לכל הכיוונים, ואילו באנליזה האורתוטרופית לקחנו נתונים מאומתים והגדרנו מודול יאנג נמוך הרבה יותר: 42[GPa] בתוך המישור ורק 3.6[GPa] בכיוון הניצב למישור. כתוצאה מכך התפתחו מאמצים ודפורמציות גדולים יותר בכנף.
2) מודול הגזירה המאומת שהגדרנו באנליזה האורתוטרופית קטן **במעט יותר מסדר גודל** מהערך שהוגדר לאנליזה האיזוטרופית. כתוצאה מכך החלק נכנע הרבה יותר לגזירה וקיבלנו דפורמציה גדולה משמעותית יותר בכיוון הניצב למישור.

עם זאת, ערכים אלו עדיין נותנים מקדם בטחון גבוה מאוד לכשל, כך שלא גילינו תקלה מהותית בתכן עקב האנליזה המשופרת.

מהבדלים אלו ניתן להסיק על החשיבות שבהבנת התנהגות החומר המרוכב, כתנאי לאנליזה ריאליסטית שאכן תבדוק את ביצועי התכן שלנו בצורה מדויקת יותר.

נספח ג' – אנליזת חוזק אנדפלייט כנף אחורית

אנליזה זו בוצעה במסגרת פרויקט פיילוט בייצור ואחזקה בחומרים מרוכבים, אשר נערך בשיתוף פעולה עם פרויקט פורמולה 2017 בחסות הפקולטה לאווירונאוטיקה. מבצעות האנליזה יעל חסלבסקי ונופר גלמידי.

את אנליזת המאמצים עשינו בתוכנת SolidWorks, גרסת 2016.

במהלך האנליזה הגדרנו את מגבלת החוזק לכניעה על פי נתוני התכן (ראה נספח מספר 1) ל–300Mpa. הכנסנו את נתון זה לאנליזה כמדד לכשל החלק.

האנליזה נעשתה על מודל מפושט של האנדפלייט על מנת לקבל חסם תחתון לעומסים. מאחר והתוכנה לא איפשרה אנליזה מסובכת יותר, האנליזה נעשתה על אנדפלייט דק (ללא מבנה כריך) בעל עובי אחיד של 8 שכבות קרבון ב0-90 מעלות.

העומסים הופעלו על קורה שדימתה את הכנף וערכם היה ערך העומס המירבי שהתקבל בסימולצית זרימה (CFD) : 300 ניוטון downforce ו150 ניוטון גרר.

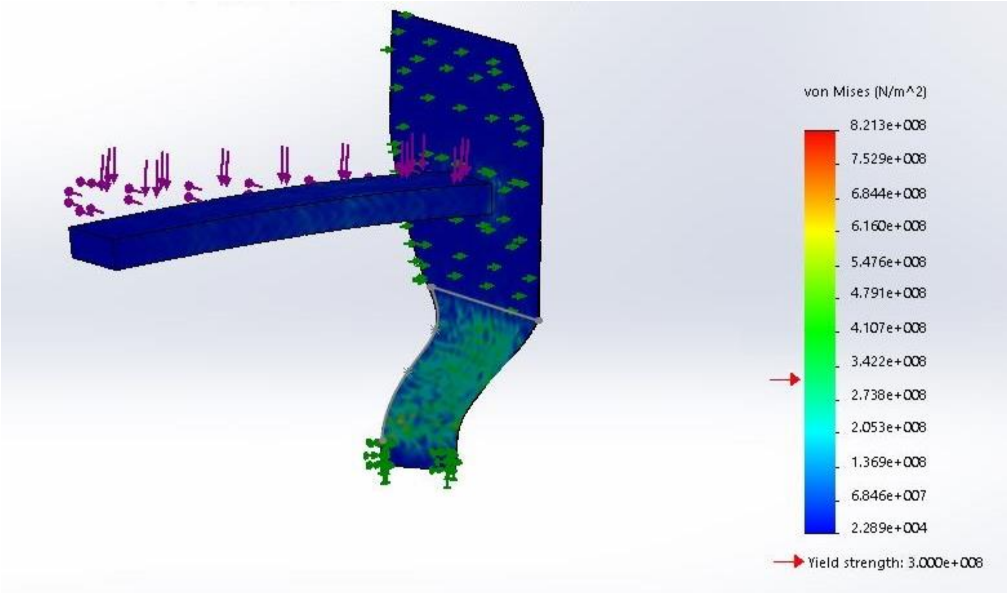
להלן הערכים שהוכנסו לאנליזה עבור קרבון-אפוקסי אורתוטרופי :

תכונה מכנית	ערך
E_x	$48.45\ [Mpa]$
E_y	$48.45\ [Mpa]$
ν_{xy}	0.04
G_{xy}	$6\ [Gpa]$
ρ	$1380\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$
σ_y	$300\ [Mpa]$
Compressive strenth	$150\ [Mpa]$
Tensile strength	$300\ [Mpa]$

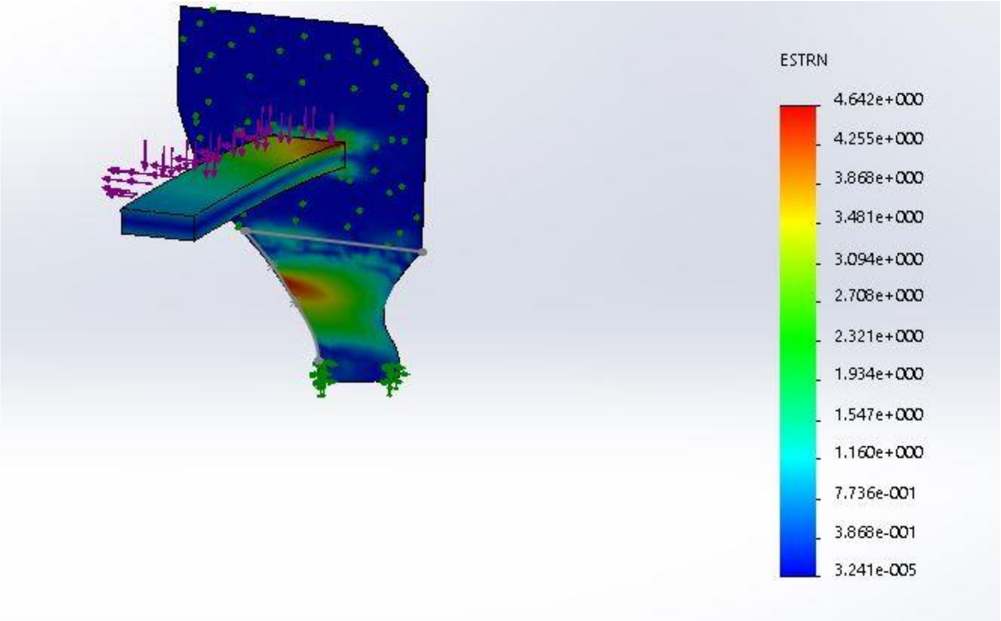
טבלה 3: הערכים שהוכנסו לאנליזת המאמצים

איור 17: שרטוט חלק האנליזה

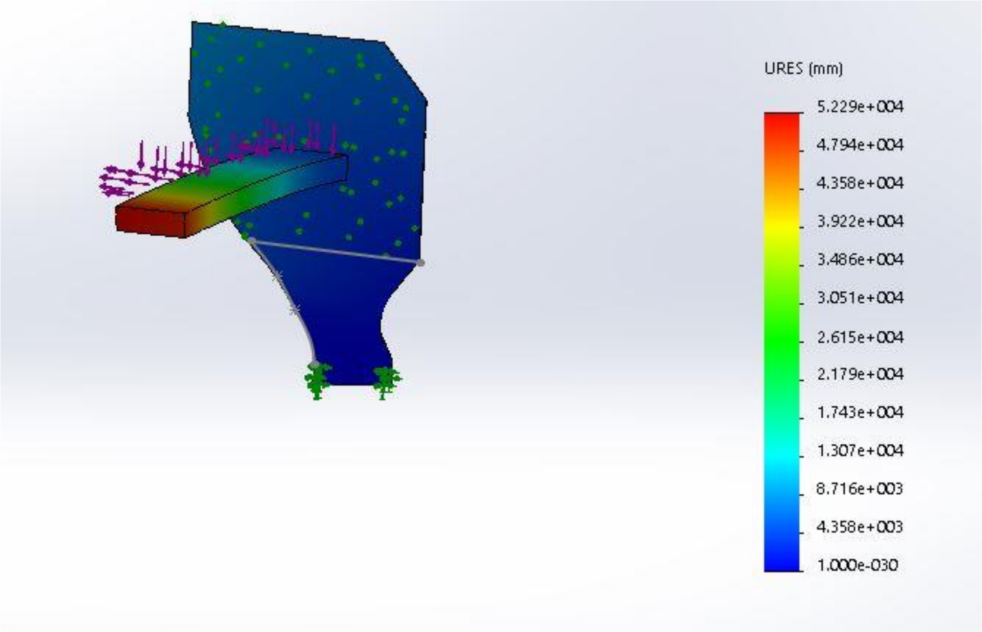
באיורים 13-15 ניתן לראות את תוצאות האנליזה. ניתן לראות בסגול את הכוחות המופעלים על הכנף ובירוק, בדופן השטוחה ובחלק התחתון, את תנאי השפה שהוגדרו והם סימטריה בדופן השטוחה ורתום בחלק התחתון, משיקולי החיבור.



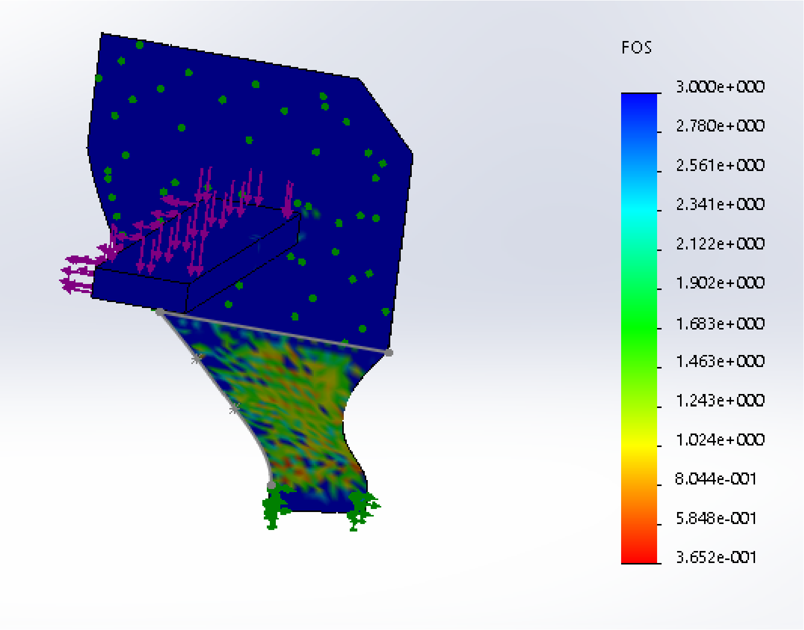
איור 18: מאמץ



איור 19: עיבור



איור 20: תזוזה



איור 21: מקדם ביטחון

ניתן לראות כי החלק העליון של האנדפלייט עומד בעומסים. מאחר ומדובר בחסם תחתון, ניתן להגיד כי חלק זה לא יכשל.

עבור החלק המעוקל, המאמצים גדולים באופן משמעותי וקרובים לכניעה, אך מאחר וזהו חסם תחתון בלבד הדבר אינו מעיד כי המבנה יכנע. כאמור, בחלק המעוקל ישנן 24 שכבות נוספות של קרבון מלא כאשר חלקן ב0-90 מעלות וחלקן ב±45 מעלות ועל כן החוזק המבני גדול בהרבה מזה שנקבע לאנליזה.

הדרישה שהתקבלה מהנדסת מערכת עבור מקדם הביטחון במכלול היא 1.5, עבור חיבורים הדרישה היא 3. מתוך האנליזה ניתן לראות כי בחלק התחתון של האנדפלייט מקדם הביטחון עומד על 3 כפי שנדרש עבור חיבורים. בנוסף, עבור שאר החלק ניתן לראות שברוב המקומות מקדם הביטחון נע בין 1.5 ל-3. ישנן מספר נקודות בהן מקדם הביטחון נמוך יותר ועל ההצדקה לעמידת המבנה במאמצים נדון בהמשך.

לאנליזה זו כמה סייגים. ראשית, הגיאומטריה עבורה היא בוצעה שונה מהגיאומטריה של המבנה עבורו רצינו לבצע את האנליזה. זה קרה מכיוון שהתוכנה לא עמדה בגיאומטריה המורכבת והיה עלינו לפשט אותה כדי לקבל תוצאות. לכן, לא הוכנס הדיוויניסל, הקצף ו241 השכבות עבור החלק המלא. בנוסף, זוהי לא היתה סימולציה עבור ליווח דק כפי שהיינו רוצים לבצע בתוכנה מתקדמת יותר. לא התאפשר לנו לעבוד בתוכנה מותאמת יותר לחומרים מרוכבים עקב חוסר בידע וזמן. לקראת הפרויקט של שנה הבאה נקדם סימולציות מתקדמות יותר לקבלת תוצאות מדוייקות יותר.

בעקבות הסייגים הנ״ל נדגיש שוב כי אנליזה זו מהווה חסם תחתון ליכולות המכניות מבחינת מאמץ מקסימלי ומומנט אינרציה של המבנה. כאמור, ערכנו ניסוי עמיסה עבור אנדפלייט ראשוני אשר ייצרנו למטרה זו. בניסוי הגענו לעמיסה של 50 ק״ג כאשר החלק המעוקל החל להיכנע. מאחר ומאז חיזקנו את החלק המעוקל בעוד 24 שכבות של קרבון מלא, אנו מאמינים כי הכנף הסופית אותה ייצרנו תעמוד בעומסים. נוסיף ונאמר כי אמנם דרישות הנדסת מערכת היו 700 ניוטון, אך בפועל, לאחר הרצת סימולציה עם השפעות הרכב על הזרימה, התברר כי הכנף מספקת 033 ניוטן של כוח הצמדה ו-188 ניטון עבור הגרר. כלומר, המאמצים המתפתחים במבנה נמוכים אף יותר מאלו שעבורם נעשו הניסוי והאנליזה.

תהליכי עבודה

במהלך הייצור הקפדנו לעבוד עם אפוקסי מעורבב ביחס של 30 :100 והקפדנו שזמן העבודה איתו יהיה קטן מזמן העבודה שהוגדר לו – כ-60 דקות (ראה נספח מספר 4).

האפוקסי הוחזק במיכלים המקוריים ובחדר עם טמפרטורה ולחות נשלטים, זאת כפי שמומלץ ב-POLIMER G Technical data ep-520.

מאחר ועבדנו בלוז ייצור צפוף לא עשינו טיפול חום בתנור לכנף כפי שמומלץ לעשות. בנוסף, הקפדנו לא למתוח את הבד ולהניח אותו ישר על מנת לא לעוות את מנח הסיבים. פירוטים נוספים על תהליכי העבודה והייצור בכנפית יינתנו במסמך PS.

מקורות

- מצגות הקורס של ד״ר תמר גוטסמן
- CMH-17 Composite Materials Handbook
- POLIMER-G Technical data ep-520
- נתוני התכן על פי אהרון זקס
- https://mipt90.wordpress.com/2012/12/25/tai-sao-phan-duoi-canh-may-bay-thuong-duoc-lam-cong-len
- https://www.sportskeeda.com/f1/wingtip-vortices-in-formula-one-why-are-they-formed
- https://www.quora.com/What-do-the-gills-in-the-rear-wing-do-in-a-race-car-design-What-is-the-physics-behind-the-gills-in-wings-in-race-cars
- http://www.zenithair.com/stolch701/7-design-wing.html
- https://paddockclubformula1.com/category/tecnica

נספחים

נספח מספר 1 – נתוני התכן עבור סיבים ב-90 מעלות

KANFIT LTD
METALLIC AND COMPOSITE AIRFRAME PARTS AND TOOLS

Tensile Test □0°

1. Data

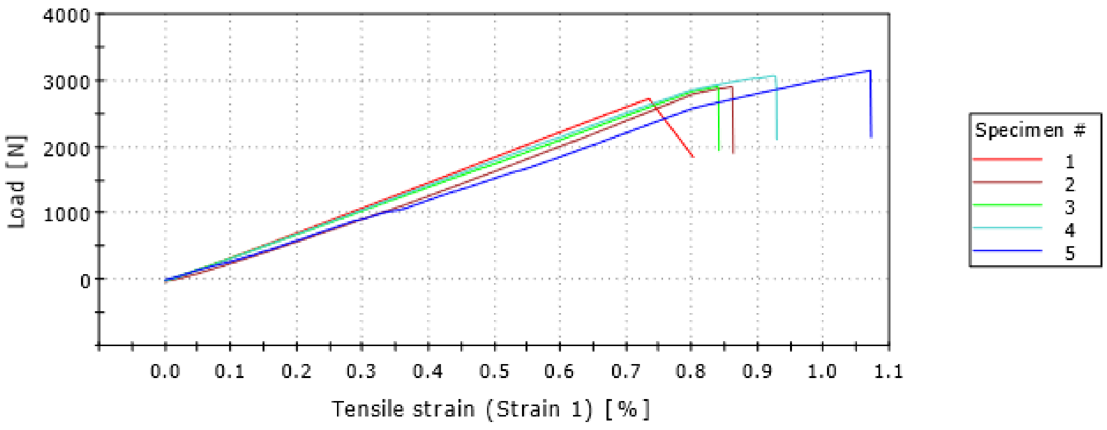
Date and Time	09/04/2017 13:40
Humidity	42.3 %
Temperature	23.9 °C

2. Test Results

	Length [mm]	Thickness [mm]	Width [mm]	Tensile strength [MPa]	Modulus (Chord 0.2 % - 0.7 %) [GPa]	Extension at Break [mm]
1	200.00	1.17	6.29	369.9	51.34	1.94
2	200.00	1.17	6.27	395.7	49.47	2.15
3	200.00	1.17	6.23	398.4	48.94	2.15
4	200.00	1.18	6.29	413.2	49.00	2.34
5	200.00	1.18	6.30	423.0	43.52	2.33
Mean	200.00	1.17	6.28	400.1	48.45	2.18

3. Graph results

Specimen 1 to 5



נספח מספר 2 – נתוני התכן עבור סיבים ב-0 מעלות

כנפית KANFIT

K A N F I T L T D
METALLIC AND COMPOSITE AIRFRAME PARTS AND TOOLS

Tensile Test 0°

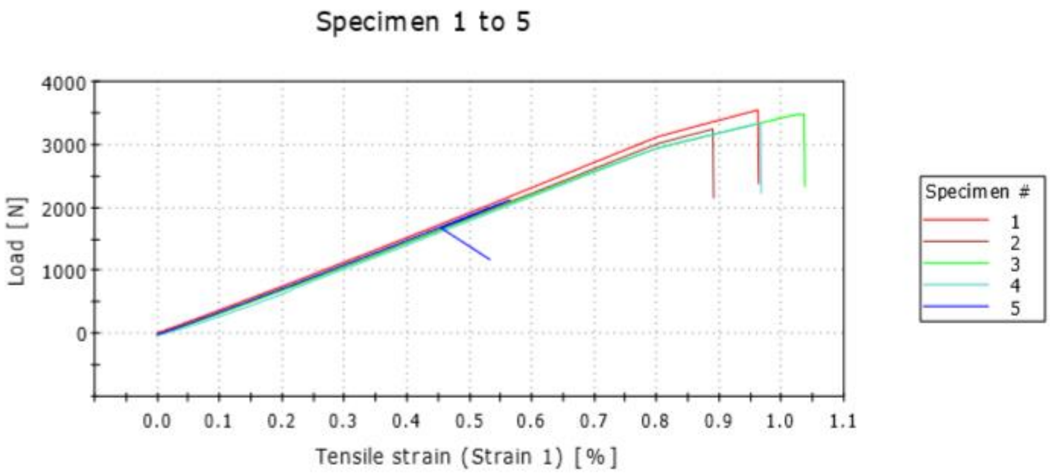
1. Data

Date and Time	09/04/2017 13:40
Humidity	42.3 %
Temperature	23.8 °C

2. Test Results

	Length [mm]	Thickness [mm]	Width [mm]	Tensile strength [MPa]	Modulus (Chord 0.2 % - 0.7 %) [GPa]	Extension at Break [mm]
1	200.00	1.19	6.17	482.8	53.33	2.26
2	200.00	1.19	6.27	435.9	51.53	2.10
3	200.00	1.17	6.18	483.0	52.31	2.57
4	200.00	1.20	6.27	443.6	51.11	2.40
5	200.00	1.20	6.15	288.0	-----	2.51
Mean	200.00	1.19	6.21	426.7	52.07	2.37

3. Graph results



נספח מספר 3 : נתוני תכן עבור קרבון עם אפוקסי 520

Carbon/Epoxy woven fabric – B.D. 120 gr/m^2 (plain 1K 0/90) , wet lay-up epoxy 0with 52					
Mechanical Property	**Units**	**Input for FE Analysis-**	**B allowabl C**		
Environment		**RTD**	**RTD**	**70°C**	**-55**
Tensile Modulus- warp	GPa	52.07	52.07		
Compressive Modulus-warp	GPa	52.07	52.07		
Tensile Modulus-fill	GPa	48.45	48.45		
Compressive Modulus-fill	GPa	48.45	48.45		
Tensile Strength- warp	MPa	300	357.5		
Compressive Strength-warp	MPa	150			
Tensile Strength-fill	MPa	300	317.2		
Compressive Strength -fill	MPa	150			
In plane shear modulus	GPa	6	7		
In plane shear strength	MPa	78	89		
Poisson Ratio		0.04			
Interlaminar shear strength	MPa	35	48		
Physical Property's					
Laminate density(41%vf)	g/cm3	(1.44-81.3 1.54)			
Fiber Volume content	%	57.8 (45-59)			
Ply thickness	mm	0.233 (0.24-0.23)			
Void Content	%	9.9 (4-6)			
DRY Tg	(ºC)	119			

נספח מספר 4 – תכונות אפוקסי 520

Typical Uncured Properties

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Base Resins	Base (A) Hardener (B)	Epoxy Resins Amines
Appearance/Color	Base (A) Hardener (B)	Clear Clear
Viscosity @25°C, mPa*s ASTM-D-2393	Base (A) Hardener (B)	1400-1800 40-50
Density @ 25°C, g/cm^3	Base (A) Hardener (B)	1.17 ± 0.03 0.94 ± 0.02
Mix Ratio A:B, (w/w)		100:30
Mix Viscosity @25°C, mPa*s ASTM-D-2393		500-700
Work life, @ 25°C, min		60-90
Gel-time, 100g @ 25°C, min		120-150

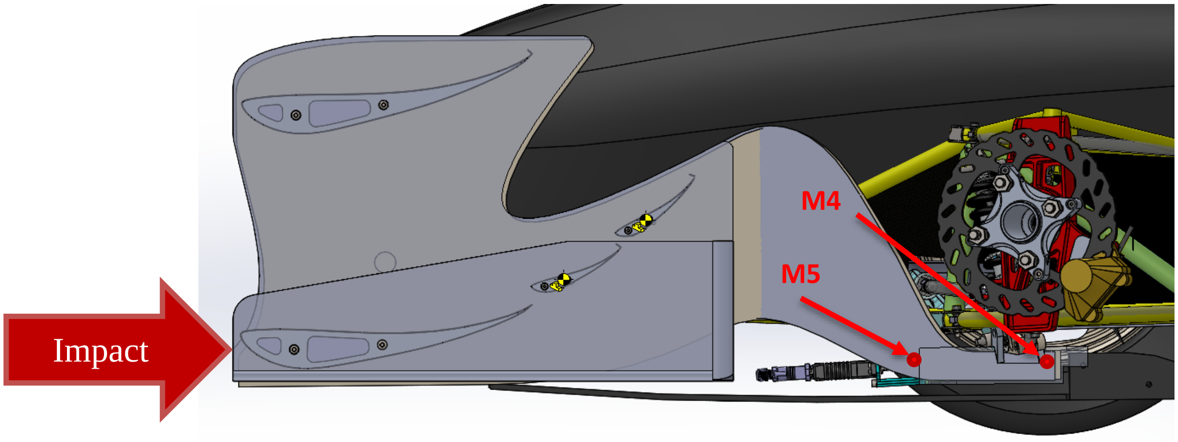
נספח ד' – דו"ח גזירת כנף קדמית בהתנגשות

במסגרת דו"ח DSS עבור אוסטריה וגרמניה יש להוכיח גזירת כנף קדמית במקרה של פגיעה חזיתית, ע"פ הגדרות פגיעה של 120 kN (מהתקנון).

Calculation requested by T2.20.3:

The vehicle's front wings are connected to the "front rocker's connecting unit" by two bolts, *Class 8.8 M5 and M4 on each side at the specified locations.*

Figure 1 - View of the wings connected to the"front rocker's connecting unit". The relevant bolts are marked in red



Class 8.8 bolts have the specified characteristics:

HEX BOLTS - RECOMMENDED TIGHTENING TORQUE
CLASS 8.8

Size	Pitch	Stress Area	Core Area	Tensile Strength	Proof Strength	Shear Strength	Recommended Tightening Torque		
	(mm)	(mm²)	(mm²)	(kN)	(kN)	(kN)	Plain (Nm)	Zinc (Nm)	HDG (Nm)
M6	1.00	20.1	17.9	16.1	11.7	8.6	9.1	6.4	19.1
M8	1.25	36.6	32.8	29.3	21.2	15.7	22.1	15.5	46.4
M10	1.50	58.0	52.3	46.4	33.6	25.1	43.7	30.6	91.8
M12	1.75	84.3	76.2	67.4	48.9	36.6	76.3	53.4	160.2
M14	2.00	115.0	104.7	92.0	66.7	50.3	121.4	85.0	254.9
M16	2.00	157.0	144.0	125.6	91.1	69.1	189.4	132.6	397.8
M18	2.50	192.0	175.0	159.4	115.2	84.0	269.6	188.7	566.1
M20	2.50	245.0	225.0	203.3	147.0	108.0	382.0	268.0	803.0

From http://www.blacksfasteners.co.nz

As apposed to previous years design, because of the imbedded geometric alignment, such an impact will result in negligible moment on the bolts.

Using standard IA, net bolt shear force must not exceed:

$$F_{shear} = F_{impact_{\text{standard}}} - F_{crash_{max}} = 120\ kN - 95\ kN = 25\ kN$$

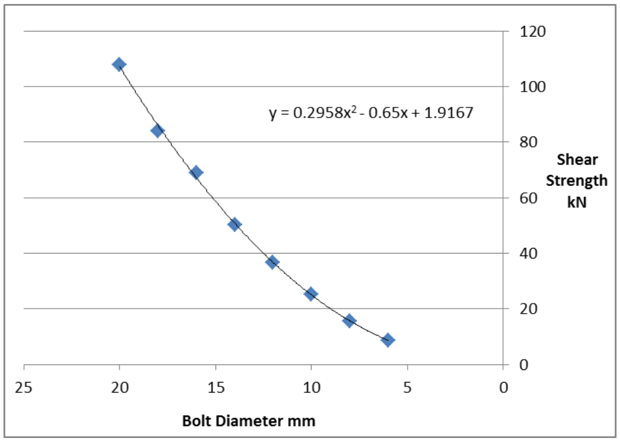
Specifications on bolts shear stresses are widely available for M6 and above. For obtaining class 8.8 M5 & M4 shear strength we used both analytical approach and extrapolation, both methods are based on known data for larger diameter bolts.

Analytical:

$$\tau = \frac{F}{\pi r^2}$$

$$\rightarrow \quad F_{shear_{M5}} = F_{shear_{M6}} \cdot \left(\frac{d_5}{d_6}\right)^2 = 5.972\ kN \quad , \quad F_{shear_{M4}} = F_{shear_{M6}} \cdot \left(\frac{d_4}{d_6}\right)^2 = 3.822\ kN$$

Extrapolation:



Diameter mm	shear strength kN
4	3.3995
5	6.0617
6	8.6
8	15.7
10	25.1
12	36.6
14	50.3
16	69.1
18	84
20	108

Assuming worsening assumption – impact load distributes equally between all 4 bolts, obtaining:

$$F_{bolts_{analytical}} = 2 \cdot (F_{shear_{M5}} + F_{shear_{M4}}) = 19.59\ kN$$

Extrapolation approach yields:

$$F_{bolts_{extrap}} = 18.92\ kN$$

- ✓ Both approaches result in total impact force smaller than 25 kN.
- ✓ Assuming different impact load distribution will result in certain shear of the two bolts that are subjected to greater load, resulting in shear of the remaining two bolts.
- ✓ As the combined load from the peak force representing standard IA and the shear force handled by the bolts is smaller than 120 kN, the combined IA structure and wings is compatible with the FS rules.