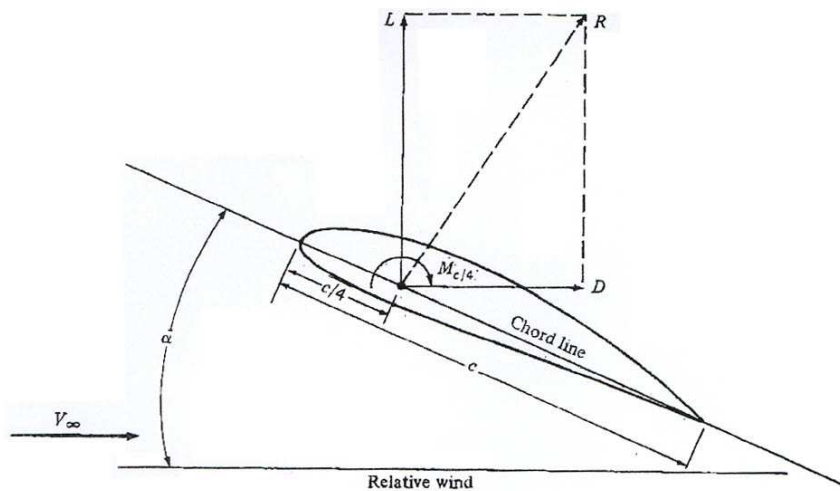


יסודות בעילוי וגרר

ינואר 2004

מאמר זה נכתב במקור עבור פורטל טיסנאות FLYHI
ע"י דניאל דקל, מהנדס אווירונאוטי וחובב טיסנאות רדיו

מאמר זה סוקר את שני הכוחות העיקריים הפועלים על המטוס, והם כוח העילוי (LIFT) וכוח הגרר (DRAG). חשוב להבהיר, שכאשר אנו מדברים על זרימת אוויר, אין זה משנה אם המטוס טס לתוך גוש האוויר או שגוש האוויר טס אליו. על מנת להקל בחישובים, נהוג להתייחס אל המטוס כנניח והאוויר כננייד. באיור הבא מופיע פרופיל טיפוסי של כנף, עם הגדרת הכוחות:



α = זווית התקפה
 V = מהירות הרוח
 D = כוח גרר (Drag)
 L = כוח עילוי (Lift)
 R = כוח שקול

כוח העילוי מוגדר ככוח הניצב לזרימה
כוח הגרר מוגדר ככוח המקביל לזרימה
 α זווית ההתקפה, מוגדרת כזווית בין מהירות הרוח לבין מיתר הפרופיל.
כאשר הכוחות מוגדרים לעומת הרוח, מערכת הצירים נקראת מערכת צירי רוח.

כאשר מדברים על מומנטים, בד"כ מודדים אותם במערכת צירים אחרת, הנקראת מערכת צירי גוף, ואז כל הזוויות והמומנטים נמדדים ביחס למיתר עצמו.

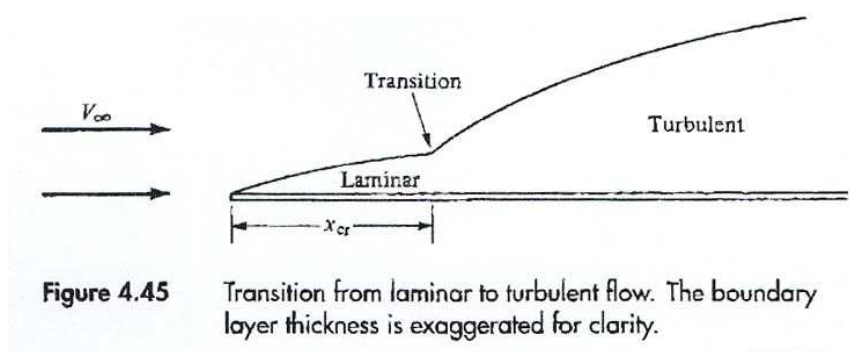
ע"י התמרה בין מערכות צירים תמיד ניתן לתרגם כוח שקיבלנו במערכת צירים אחת למערכת צירים שניה.

לפני שנגיע לכוחות העילוי והגרר, נסקור תחילה כמה תכונות עיקריות של האוויר:

האוויר הוא צמיג.

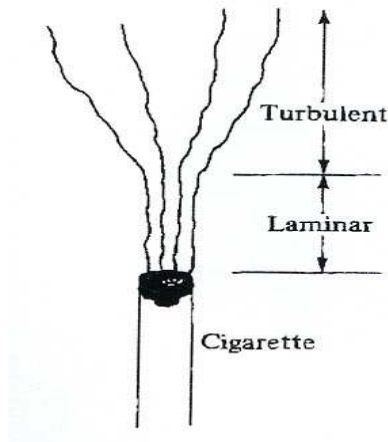
שמן לדוגמא, הוא חומר בעל צמיגות גבוהה, כאשר אוויר חומר בעל צמיגות נמוכה.

הצמיגות גורמת להיווצרות דבר הנקרא שכבת גבול על פני גוף בזרימה. שכבה זו אינה עבה במיוחד, אך קריטית כיוון שעלולה לגרום להינתקות הזרימה מעל הכנף למשל, ולהביא לתוספת גרר גדולה:



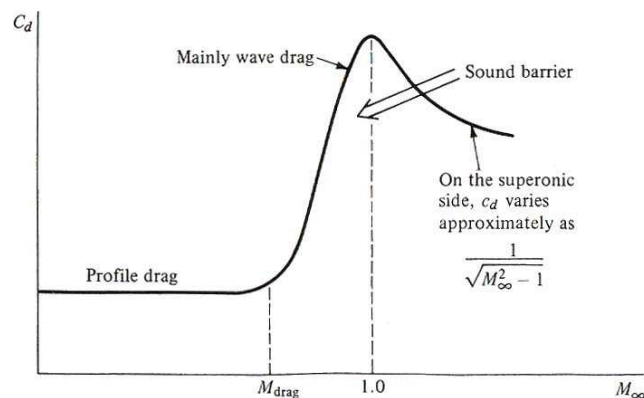
באיור זה אנו רואים לוח עליו זורם אוויר. בתחילה שכבת הגבול למינרית, ואח"כ הופכת לטורבולנטית. מחוץ לשכבת הגבול הזרימה חוזרת למהירות המקורית, כאשר ממש על פני המשטח מהירות הזורם היא אפס (נקרא תנאי אי ההחלקה)

בדוגמא הבאה תוכלו לראות זרימת עשן היוצאת מסיגריה, בתחילה הזרימה למינרית, ואח"כ הופכת לטורבולנטית (זרימה "כאוסית")

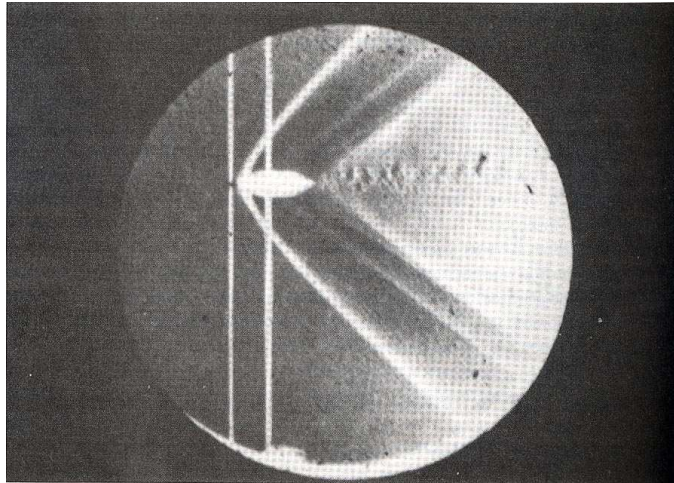


האוויר הוא דחיס.

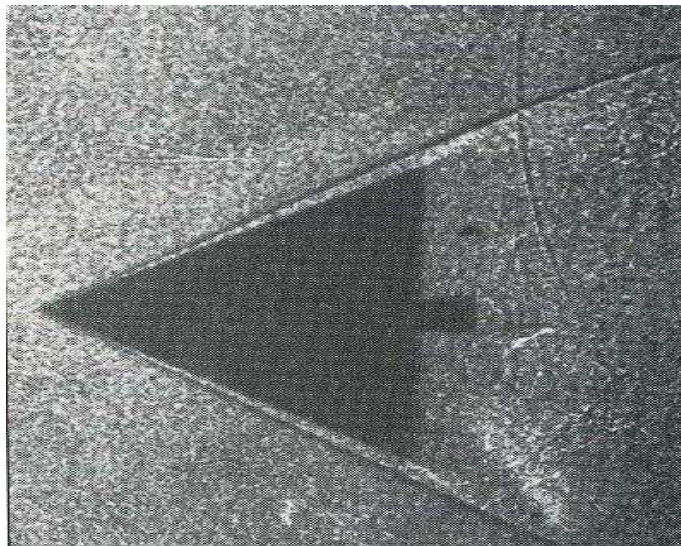
משמעות הדבר, שצפיפות האוויר אינה תמיד קבועה. כל עוד מדובר על מהירות הפחותה ממהירות הקול, "העניינים כרגיל". כאשר זרימת האוויר מתקרבת למהירות הקול, מתחילים להיווצר "גלי הלם". ארנסט מאך, על שמו המונח מספר מאך גילה לראשונה את משמעות הגלים הללו. כאשר מטוס עובר את מהירות הקול אתם שומעים "בום על קולי". זוהי למעשה התוצאה "הקולית" של היווצרות גל הלם על כנף המטוס. למעשה, גלי הלם קטנים מתחילים להיווצר על כנף המטוס עוד לפני מעבר מהירות הקול, כיוון שהאוויר מאיץ על פני החלק העליון של הכנף. גל הלם הוא למעשה ביטוי פיזיקלי לאי רציפות בצפיפות האוויר. צפיפות האוויר לאחר מעבר לגל ההלם עולה. דבר זה יוצר גרר משמעותי, הנקרא גם גרר גלים. אחד הבעיות של האמריקאים לעבור את מהירות הקול הייתה למזער את גרר הגלים כמה שניתן. באיור שלפניכם תוכלו לראות עד כמה הגרר עולה באזור מהירות הקול, עד כדי הצבת מעין מחסום בפני כלי הטייס. לאחר שהמטוס עובר את מהירות הקול, הגרר יורד משמעותית:



בתמונה הבאה תוכלו לראות כדור של רובה בזרימה, ואת גל ההלם המלווה אותו בראשו:



ואילו כאן תוכלו לראות גל הלם הנוצר על כנף דלתא:



מס' Mach ומס' Reynolds

מס' מאך מבטא את היחס בין מהירות הטיסה לבין מהירות הקול בגובה הטיסה.
מהירות הקול כידוע אינה קבועה. היא יורדת עם עליה בגובה, מדוע? ההסבר לכך הוא פשוט.
קול הוא בעצם גל לחץ. האוויר הוא זה שאחראי להעביר גל זה למרחקים. כיוון שצפיפות האוויר יורדת עם הגובה, גם יכולתו להעביר את גל הלחץ, דהיינו קול, נפגעת.

$$\text{Mach } V/V_{\text{sound}} \\ V \text{ מהירות הטיסה} \\ V_{\text{sound}} \text{ מהירות הקול בגובה נתון}$$

מס' Re הוא אחד הפרמטרים החשובים ביותר באווירודינמיקה, ולא תפגשו שום ניסוי או גרף של פרמטרים אווירודינמיים ללא ציון מס' Re . במילים פשוטות, **מס' Re מציין את היחס בין כוחות האינרציה לכוחות הצמיגות**. ככל מס' Re גבוה, כוחות הצמיגות זניחים, וככל שמספר Re נמוך, כוחות הצמיגות דומיננטיים. לדוגמא, לכדורית דם יש מספר Re נמוך מאוד, כיוון שדם הנו נוזל מאוד צמיג, הכדורית נעה במהירות איטית יחסית, ובעלת אורך אופייני קטן. לטיל בליסטי כדוגמת סקאד, מספר Re גבוה, כיוון שטס לפחות ב 10 מאך (פי 10 ממהירות הקול) ובחומר בעל צמיגות נמוכה-אוויר.

$$Re = (\rho * V * L) / \mu \quad \text{מס' ריינולדס}$$

ρ – צפיפות האוויר/נוזל
 V – מהירות האוויר/נוזל
 L – אורך אופייני. בד"כ מיתר ממוצע של הכנף.
 μ – צמיגות

המכפלה $\rho * V * L$ מסמלת את **כוחות האינרציה** בעוד μ מסמל את **כוחות הצמיגות**.

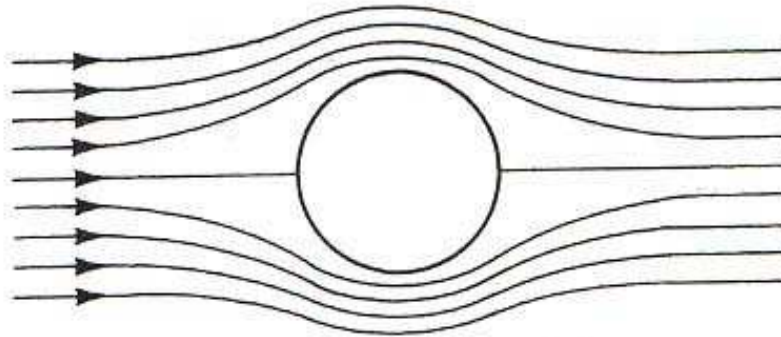
כאשר מקטינים מטוס לממדים של טיסון, מס' Re משתנה דרסטית, עקב הקטנת האורך האופייני ומהירות הטיסה. לכן בד"כ מבצעים שינויים אווירודינמיים קלים בכנף על מנת להתאימה למשטר הזרימה החדש. כאשר רוצים להשוות ניסויים אווירודינמיים עם תצורות שונות, יש לבצעם במספר Re ומספר מאך דומים, אחרת אין שום משמעות להשוואה כיוון שתנאי הזרימה שונים לחלוטין. אם הסתכלתם פעם על גרף עילוי או גרר של פרופיל, בודאי שמתם לב שקיימים תמיד 3-4 גרפים, כאשר כל אחד מהם מייצג ניסוי במספר Re אחר. לעיתים הנתונים קרובים, אך לפעמים יכולים להיות הבדלים די משמעותיים! לכן לפני שאתם ניגשים לגרף כזה, חשוב לבדוק קודם מה מספר ה- Re של התצורה שלכם. הדבר קריטי במיוחד בטיסנים חופשיים, שם מהירות הטיסה נמוכה במיוחד, ולכן מס' Re נמוך במיוחד. לכן, משטר הזרימה בטיסנים אילו הנו ברובו למינרי, ולכן מצריך פרופילים למינריים.

זרימה פוטנציאלית

זרימה זו הנה זרימה אידיאלית, כזו שיכולנו רק לחלום עליה: לא דחיסה ולא צמיגה.

אם זרימה כזו הייתה קיימת במציאות, יתכן מאוד והאווירודינמיקאים היו נשארים מחוסרי עבודה...

באיור הבא תוכלו לראות כדור בזרימה פוטנציאלית:

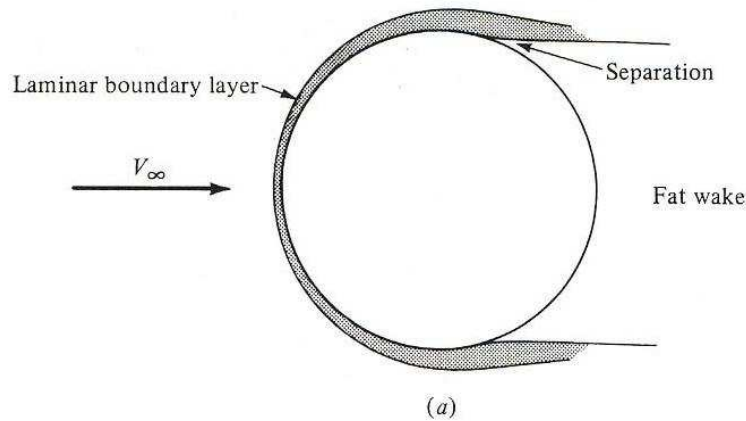


Frictionless flow: no drag

קווי הזרם סימטריים לחלוטין, אין אפקט צמיגות ולכן אין כל סיבה להיווצרות גרר.

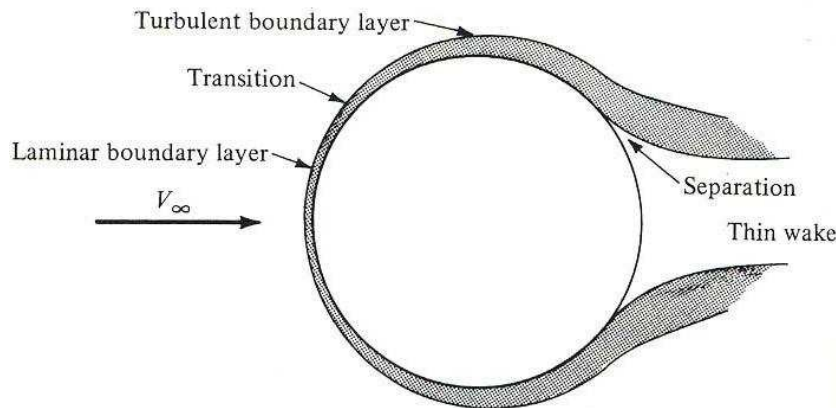
לצערנו, המציאות שונה. כדור בזרימה יוצר גרר עצום. בגלל היות הזרימה צמיגה, נוצרת שכבת גבול הגורמת להינתקות הזרימה מהגליל ולהיווצרות מערבולות היוצרות גרר גדול.

באיור הבא תוכלו לראות כדור בזרימה צמיגה:



מס' RE במקרה זה נמוך, לכן שכבת הגבול עדיין למינרית. שכבת גבול למינרית גורמת להינתקות מוקדמת של הזרימה, מאשר זרימה טורבולנטית.

אם אותו כדור היה נמצא בזרימה בעלת מס' RE גבוה יותר (למשל מהירות זרימה גבוהה יותר) הזרימה הייתה נראית כך:



הזרימה במקרה זה, הופכת מלמינרית לטורבולנטית, ולכן הזרימה מתנתקת בשלב מאוחר יותר. מקדם הגרר הכולל של הכדור נמוך יותר כעת בגלל שיש פחות מערבולות.

זו בדיוק הסיבה שכדורי גולף מחוספסים. החספוס מאלץ את הזרימה להפוך לטורבולנטית, למרות שבמהירות שבהן טס כדור הגולף הזרימה עדיין למינרית (כ 100 קמ"ש) לעיתים שמים טורבולטורים על כנף המטוס (מעין גלילים צרים) על מנת להפוך את הזרימה לטורבולנטית ולהגדיל את עמידות המטוס בזוויות התקפה גבוהות. כעת, אחרי שלמדנו מספר מושגים נוכל לעבור לנושאים העיקריים והם, עילוי וגרר.

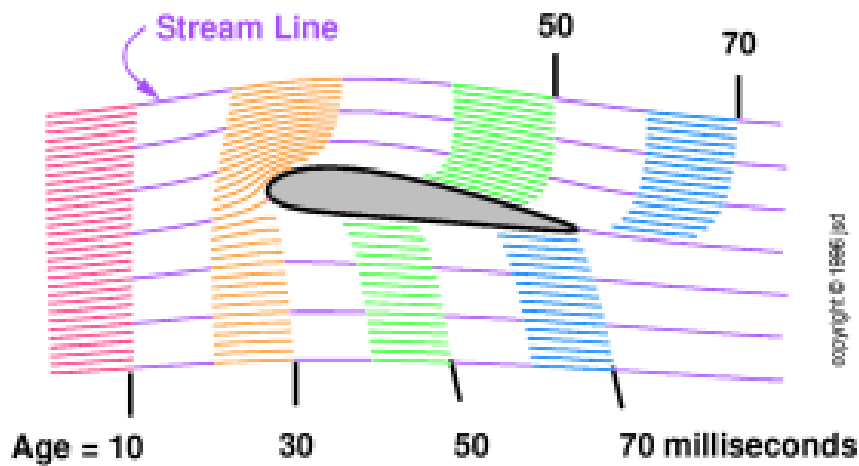
עילוי

כיצד נוצר עילוי?

ובכן, ראשית עלינו להבין מדוע ההסבר הפופולרי שרבים מאתנו התחנכנו עליו אינו מדויק.

ההסבר הנפוץ והשגוי, מסתמך על "זמן מעבר שווה" וחוק ברנולי:
"האוויר המגיע מהעקימון העליון מנסה להדביק את הזרימה הבאה מהעקימון התחתון בשפת הזרימה, וכתוצאה מחוק ברנולי נוצר לחץ נמוך יותר מעל העקימון העליון ולכן נוצר עילוי"

מי ש"אשם" הסבר אינו חוק ברנולי שכבודו במקומו מונח, אלא עיקרון "זמן המעבר השווה" המניח שזמני המעבר משפת ההתקפה לשפת הזרימה של הזרימה העליונה והתחתונה, שווים. הנחה זו **שגויה ביסודה**, ובאור הבא תוכלו להבין מדוע:



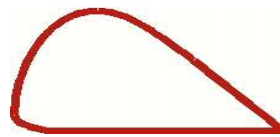
הפרופיל מוצב בזווית התקפה. כל מאית שניה (10ms) הזריקו צבע לזרימה. ניתן לראות כי אחרי 70ms הזרימה העליונה עקפה בהרבה את התחתונה. החלקיקים כלל לא "נפגשים" בשפת הזרימה כפי שעיקרון "זמן המעבר השווה" מנבא. רק לאחר התרחקות מסוימת משפת הזרימה תתבצע לבסוף השוואת מהירויות ולחצים.

דוגמא נוספת:

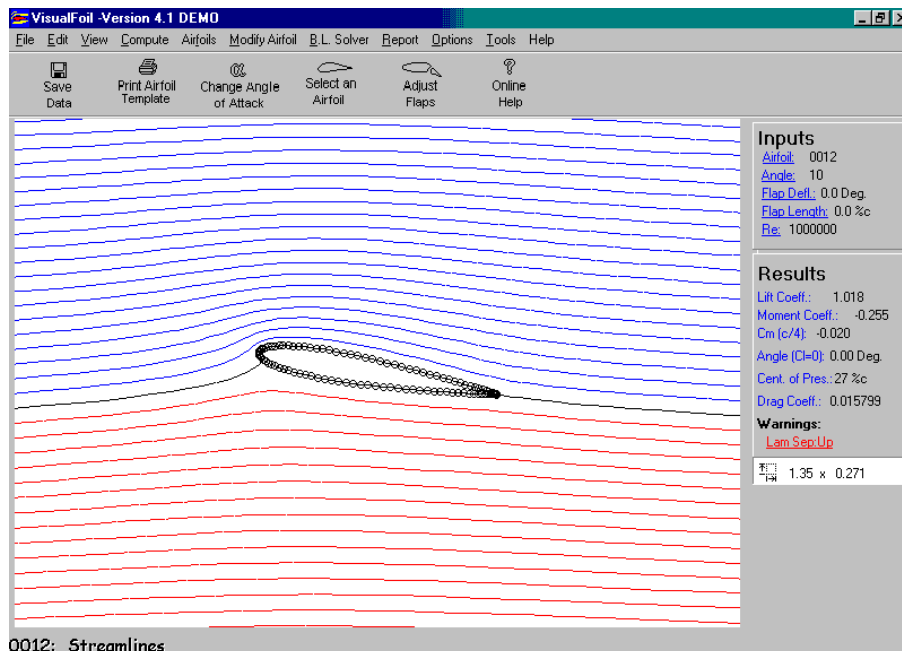


צינור הוכנס לתוך זרימה. הזרימה בצינור אינה "יודעת" על הזרימה הראשית ולכן כאשר הזרימה מהצינור תחזור לזרימה הראשית, תתבצע השוואת לחצים ומהירויות רק לאחר כמה חלקיקי זמן.

למזלנו העילוי אינו פועל בהתאם להסבר השגוי, שאלמלא כך פרופיל אמור היה להראות כך:



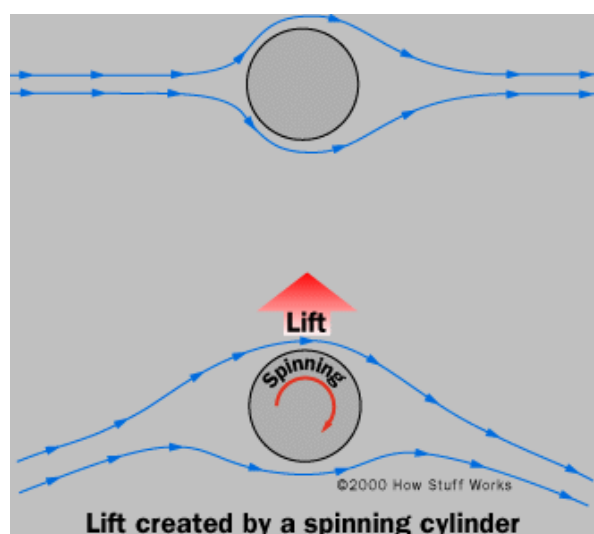
הדרך הנכונה להבין את ההסבר הפיזיקלי של העילוי היא לחשוב על הכנף כעל משאבה. כאשר כנף פוגשת זרימת אוויר, היא מסיטה את הזרימה **מטה** (במקרה של עילוי חיובי), וכתוצאה מהחוק ה III של ניוטון (חוק הפעולה והתגובה), נוצר על הכנף כוח נגדי כלפי **מעלה**, הוא כוח העילוי. כוח העילוי פרופורציונלי לכמות האוויר ביחידת זמן שהאוויר מסיט. ככל ששטח הכנף גדול יותר, וככל שמהירות האוויר גדולה יותר, יוסט יותר אוויר כלפי מטה, וכוח העילוי יהיה רב יותר. **העילוי הנוצר על כנף הנו פרופורציונלי לכמות האוויר המוסט על ידה.**



באיור זה הלקוח מתוכנת VisualFoil לניתוח פרופילים, ניתן לראות כיצד פרופיל מסוג NACA0012 (12% עובי) בזווית התקפה של 10 מעלות מעקם את קווי הזרימה מטה בשפת הזרימה, ויוצר מקדם עילוי דו ממדי של 1. מכיוון שהזרימה הנה תת-קולית, האינפורמציה על הימצאות הפרופיל עוברת קדימה, ולכן קווי הזרם הנמצאים לפני הפרופיל מתחילים להתעקם כלפי מעלה.

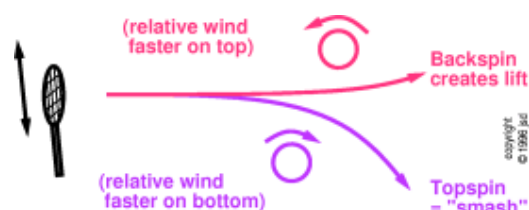
עילוי ניתן לקבל בדרכים שונות, וגם דרך אלמנט שאולי לא חשבתם עליו, והוא **כדור**.

אם ניקח כדור ונסובב אותו בזרימה נקבל עילוי. הכדור גורם להאצה של האוויר על פניו העליונים:



כעת נעבור מעט ל"כדורגל". האם שמתם לב כי כאשר אתם בועטים בתחתית הכדור הוא מתרומם גבוה וכאשר אתם בועטים בחלקו העליון הוא נוחת לתוך השער?

במקרה הראשון נוצר עילוי חיובי ובמקרה השני עילוי שלילי... ההסבר מודגם באיור הבא, בעזרת כדור טניס:



העילוי תלוי במספר גורמים: הלחץ הדינמי של האוויר, שטח הכנף, ומקדם העילוי.

וכעת הגענו סוף-סוף לנוסחת העילוי. חשוב רק להבין שזו אינה ממש נוסחה אלא קשר פיזיקלי האומר כי כמות העילוי שנוצר תלוי בשטח הכנף, לחץ דינמי, ו"טיב הכנף" (שהוא למעשה מקדם העילוי).

$$L = q \cdot S \cdot C_L \text{ עילוי}$$

כאשר:

$$q = \frac{\rho}{2} V^2 \text{ (נקרא לחץ דינמי)}$$

$$S = \text{שטח הכנף}$$

$$C_L = \text{מקדם העילוי של הכנף (מספר חסר ממדים)}$$

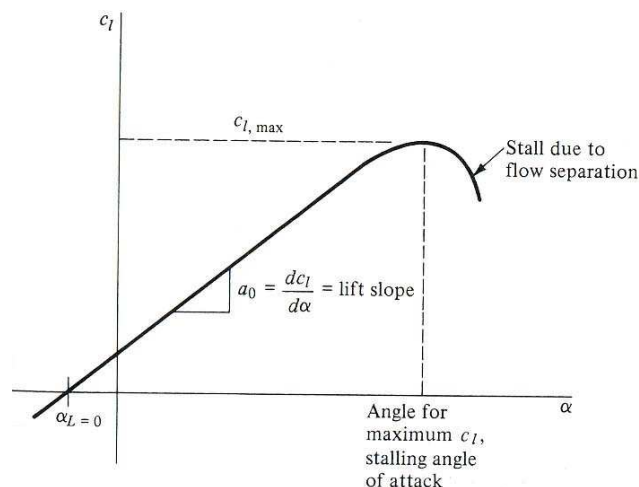
בעלי הבחנה מהירה בודאי שמו לב שאם המהירות עולה פי 2, העילוי יעלה פי 4 !!!

(זאת כיוון שהמהירות היא בחזקה ריבועית)

מקדם העילוי תלוי בעיקר בגיאומטריית הכנף ובזווית ההתקפה בה הכנף נמצאת.

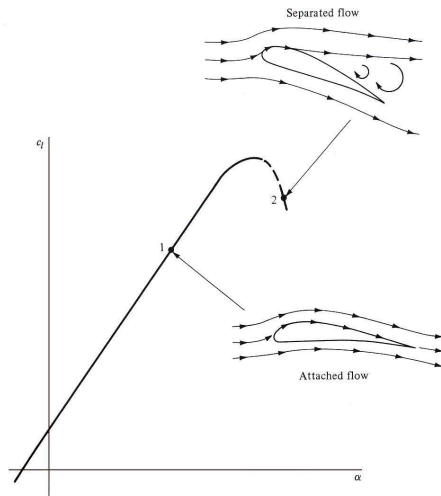
מכיוון שמדובר כאן על מקדם ולא כוח, אם ניקח אותה כנף ונעשה לה SCALE UP מקדם העילוי אמור להשתנות (למעט במקרה של שינוי מהותי במספר Re) שימו לב כי גרפי העילוי וגרר הניתנים עבור פרופילים שונים, מייצגים מקדם עילוי מקומי וגרר מקומי בחתך הכנף שהוא דו-ממדי (Cd, Cl), ולא מקדם עילוי כללי וגרר כללי של הכנף, שהוא תלת ממדי (CL, CD)

להלן גרף אופייני של מקדם העילוי כנגד זווית ההתקפה:



מקדם העילוי עולה ככל שזווית ההתקפה אלפא עולה, עד לערך מקסימלי הנקרא $C_l \max$. מעבר לזווית התקפה זו הפרופיל מזדקר !!!

הזדקרות היא תופעה בה הזרימה מתקשה ל"עקוב" אחרי פני הפרופיל ומתחילה להתנתק ממנו. כתוצאה מכך חלה ירידה פתאומית במקדם העילוי (המקדם לא מתאפס כפי שנהוג לחשוב!)



בנקודה 1, כאשר זווית ההתקפה עוד נמוכה, הזרימה צמודה לפרופיל. בנקודה 2 (לאחר $C_l \max$) הזרימה מתקשה לעקוב אחרי המשטח העליון של הפרופיל ומתנתקת.

זווית הזדקרות אופיינית היא באזור ה 15 מעלות, כאשר ע"י תכנון אווירודינמי נכון ניתן לדחות את ההזדקרות גם ל 20 ו 30 מעלות !!!
טיסני FUN-FLY לדוגמא, ניחנים בפרופיל עבה במיוחד הדוחה הזדקרות לאזור ה 20 מעלות ויותר...

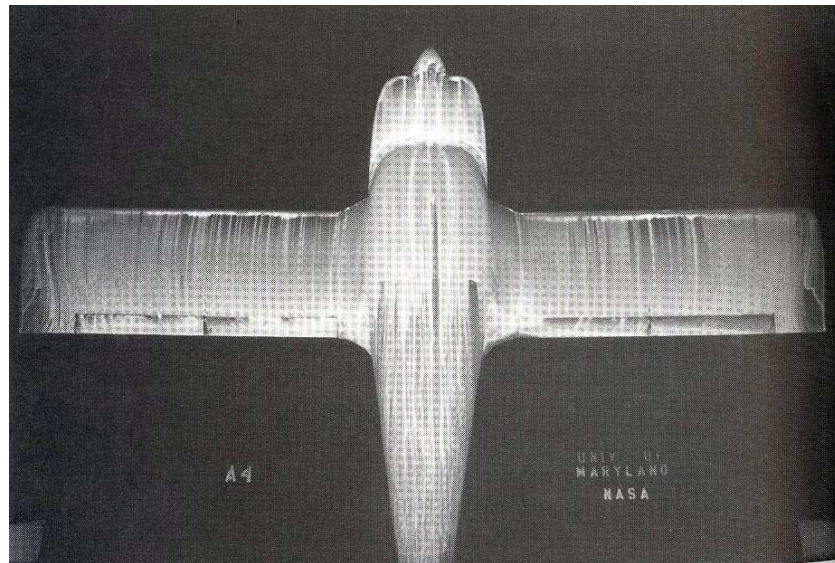
במטוסי קרב משיגים זוויות התקפה גבוהות עוד יותר ע"י קנרד, שהם כנפי דלתא קטנים הממוקמים לפני הכנף. הזרימה שמגיע מהם גורמת להצמדת הזרימה על הכנף.

הזדקרות רצויה היא כזו שבד"כ מתחילה בשורש הכנף ולא בקצותיה.
תשאלו כל טייס או מטיס טיסנים והוא יענה לכם שהוא אוהב שלאחר ההזדקרות המטוס/טיסן אינו מפיל כנף...

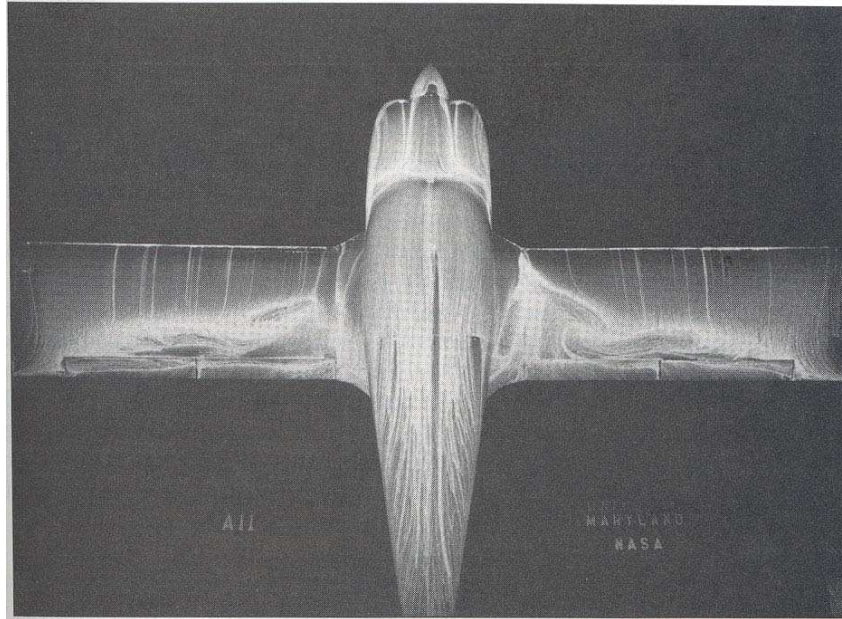
דרך פשוטה להשגת מטרה זו היא WASHOUT. זווית ההכוונה של הפרופיל יורדת כלפי קצה הכנף, כך שפרופילים בשורש הכנף יזדקרו ראשונים (יש להם זווית התקפה גבוהה משאר הפרופילים בכנף)
כמו-כן משחק בגיאומטריה הכנף משפר התנהגות זו.

בתמונות הבאות תוכלו לראות דגם של מטוס במנהרת רוח, שהוצב בזווית התקפה שונות.

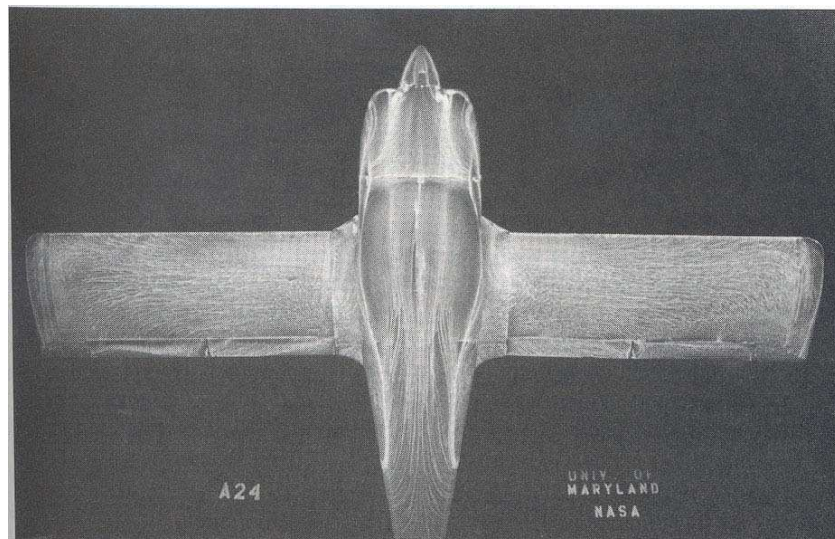
בתמונה הבאה, המטוס בזווית התקפה עדיין נמוכה (4 מעלות) והזרימה צמודה היטב לכנף:



בתמונה הזו המטוס בזווית התקפה של 11 מעלות, קצת לפני הזדקרות. ניתן לראות התחלת ניתוק זרימה בשורש הכנף:



ובתמונה האחרונה המטוס בזווית התקפה של 24 מעלות. הכנף במצב של הזדקרות מלאה. כמעט ולא ניתן להבחין בקווי הזרימה עליה. הזרימה מתחילה להתנתק אפילו מאף המטוס, וניתן לראות מספר מערבולות שנמשכות על הגוף מאחורי הכנף:



באיור הבא תוכלו לראות סוגים עיקריים של פרופילים, כאשר לכל אחד מהם תכונה המאפיינת אותו:

CONVENTIONAL AIRFOILS

The following illustrations depict a selection of designs of airfoil sections. These are known as conventional airfoils.



Low camber — low drag — high speed — thin wing section
Suitable for race planes, fighters, interceptors, etc.



Deep camber — high lift — low speed — thick wing section
Suitable for transports, freighters, bombers, etc.



Deep camber — high lift — low speed — thin wing section
Suitable as above.



Low lift — high drag — reflex trailing edge wing section.
Very little movement of centre of pressure. Good stability.



Symmetrical (cambered top and bottom) wing sections.
Similar to above.



GA(W)-1 airfoil — thicker for better structure and lower weight
— good stall characteristics — camber is maintained farther rearward which increases lifting capability over more of the airfoil and decreases drag.

בודאי שמעתם לא אחת את המושג "להציף בנחיתה". כאשר מטוס נמצא במרחק של 2 מוטות כנף מהקרקע, הוא נמצא ב"אפקט הקרקע" או Ground Affect באנגלית.

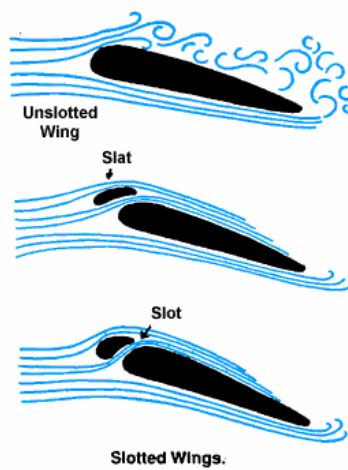
תופעה זו נובעת מגידול של כ 10% ויותר בעילוי, עקב היווצרות כרית אוויר בעלת לחץ גבוה, עליה "רוכב המטוס". רחפות משתמשות באפקט זה, ובשנות ה 60 הרוסים עבדו על מספר דגמים של מטוסים אפילו בגודל של ג'מבו שיהיו מסוגלים לשייט על פני המים, ולהסיע נוסעים ממקום למקום. מטוסים אלו נקראו "AcroPlane". בסיום המלחמה הקרה ופירוק בריה"מ רוב הפרויקטים בנושא נסגרו והטכנולוגיה נקנתה ע"י חברות אמריקאיות קטנות שמפתחות ודוחפות כעת את הרעיון.

בודאי שאלתם את עצמכם כיצד מטוס הבא לנחיתה ומאט בצורה משמעותית מסוגל לשמור על כוח העילוי של הכנף. הפתרון: **הגדלת מקדם העילוי**. במרבית המטוסים ממוקמים מדפים (FLAPS), בשפת הזרימה בחלק הפנימי של הכנף (בחלק החיצוני יושבות המאזנות). במטוסים יותר מתקדמים קיימים גם דשים (SLATS/SLOTS) הבאים להשלים את תרומת המדפים למקדם העילוי.

באיור שלפניכם סוגים שונים של מדפים, חלקם אף מגדיל את שטח הכנף:

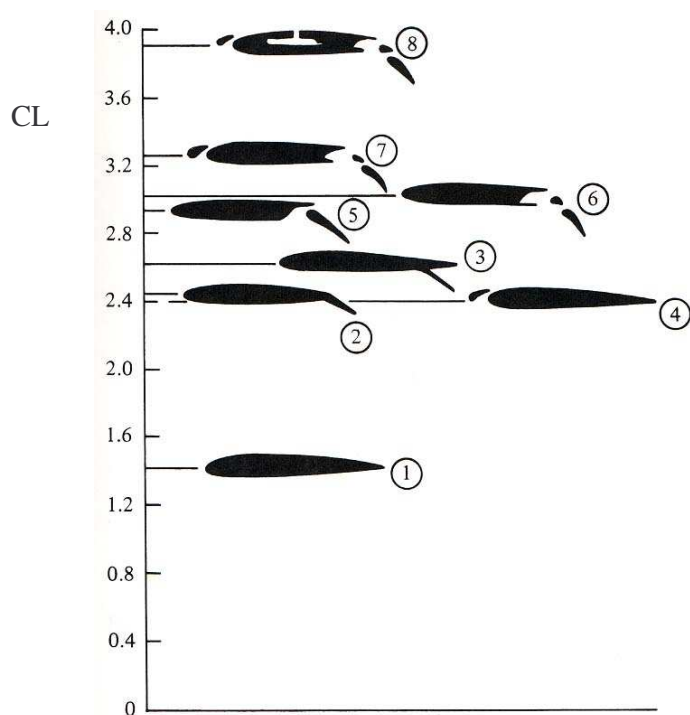


דשים כאמור ממוקמים בשפת ההתקפה של הכנף:



באיור הבא תוכלו לראות כיצד שילובים שונים של מדפים ודשים

גורמים להעלאת **מקדם העילוי** עד פי 3 !!! יש לזכור כי תרומה זו באה על חשבון גרר עצום המתפתח בכנף, שהוא למעשה רצוי במקרה זה כיוון שתורם להאטת המטוס לקראת הנחיתה:



גרר מוגדר בדיוק כפי שכוח העילוי מוגדר, רק שבמקום מקדם העילוי מופיע בנוסחה מקדם הגרר. גרר הנו כוח המתנגד לתנועת המטוס, ובד"כ אינו רצוי.

$$D=q \cdot S \cdot C_D$$

הגרר בנוי ממספר גורמים:

- גרר חיכוך (עקב אפקט הצמיגות)
- גרר צורה (" פילוג לחצים)
- גרר גלים (" הדחיסות)
- גרר מושרה (" היוצרות עילוי)

לאלה מכם שחלוקה זו שונה ממה שהם מכירים, מצורף איור ובו חלוקת גרר לפי 2 אסכולות שונות. הרכב הגרר המפורט למעלה מתבסס על אסכולה מס' 1.

אסכולה 1:

המלבן הכחול מייצג גרר חיכוך (Friction)
המלבן הסגול " גרר צורה (Form)
המלבן האדום " גרר מושרה (Induced)



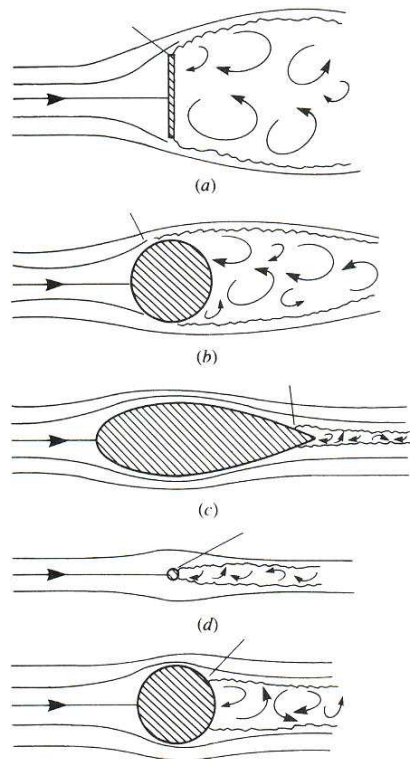
אסכולה 2:

הגרר מחולק לגרר פרזיטי (Parasite), וגרר לחץ (Pressure)

וכעת נדבר מעט בהרחבה על כל אחד מהם.
גרר חיכוך הוא תוצאה ישירה של עובדת היות האוויר צמיג. האוויר מתחכך בגוף בזרימה וכתוצאה מכך נוצר גרר. אחת הסיבות שלמכונית שלנו יש "אחיזת כביש" היא הודות למקדם החיכוך הקיים בין הצמיג לכביש. כאשר נשפך שמן על הכביש מקדם החיכוך יורד ואז המכונית מחליקה...

גרר צורה נוצר עקב פילוג לחצים שונה על גוף בזרימה, וזאת בעיקר עקב התנתקויות הזרימה מהגוף, הנובעות שוב מתופעת הצמיגות.

באיור הבא תוכלו לראות את גרר הצורה הנוצר עקב גופים שונים בזרימה:



באיור (a) אתם יכולים לראות לוח שטוח בזרימה, היוצר גרר גדול כיוון שלמעשה "מתנגד לזרימה" ויוצר מערבולות חזקות אחריו.

באיור (b) ניתן לראות כדור בזרימה למינרית, ולכן נוצר יחסית הרבה גרר בגלל התנתקות הזרימה מהגוף בשלב מוקדם יחסית.

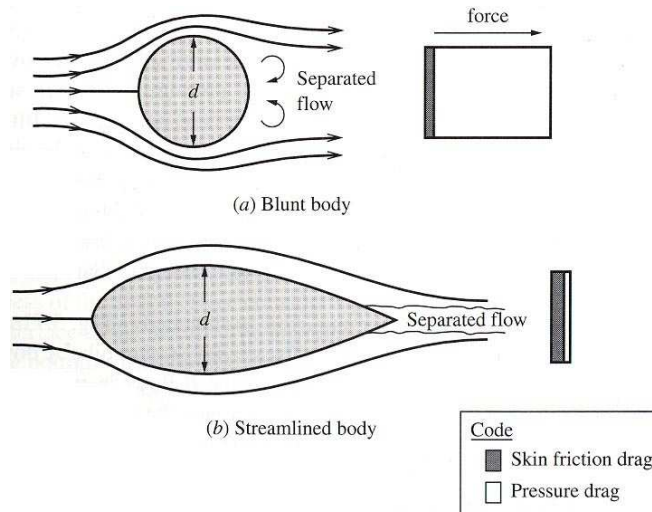
באיור (c) ניתן לראות פרופיל בזרימה, והוא כמעט ואינו יוצר בה הפרעות. מרבית הגרר הוא גרר עקב חיכוך.

באיור (d) ניתן לראות חלקיק קטנטן בזרימה. יחסית לגודלו הקטן הוא מייצר הרבה גרר

בגלל מספר ה-Re הנמוך של הזרימה (הצמיגות דומיננטית יחסית לאינרציה) באיור (e) ניתן לראות כדור בזרימה טורבולנטית. גרר החיכוך של זרימה טורבולנטית גבוה מגרר החיכוך של זרימה למינרית, אך בשל היות הזרימה טורבולנטית היא מסוגלת ל"עטוף" טוב יותר את הכדור (להתנתק בשלב מאוחר יותר), ולכן סה"כ הגרר נמוך יותר מאשר מקרה (b) של זרימה למינרית.

באיור הבא תוכלו לראות כי מרבית הגרר של הפרופיל נובע מגרר חיכוך,

כאשר לעומתו הכדור, רוב רובו של הגרר הוא גרר צורה:



כעת ניתן להבין מדוע המאמץ לכיסוי גלגלים של טיסנים אווירובטיים, ומדוע לעיתים אף מקפלים אותם לתוך הכנף...
גלגלים מייצרים גרר צורה עצום בזרימה !!!

על גרר גלים למעשה כבר דיברנו. זהו אותו גרר הנוצר כתוצאה מהיווצרות גלי הלם כאשר מתקרבים ועוברים את מהירות הקול. כיוון שמאמר זה נועד לטיסנאים, בואו נהיה קצת מציאותיים ונרד מנושא כבד זה...

גרר מושרה, כשמו כן הוא, נוצר עקב השראה של משהו. במקרה שלנו זהו כוח העילוי.

עד עתה ראינו גופים בזרימה שאינם יוצרים כוח עילוי. כמו כל דבר בחיים, אין מתנות בחינם. כאשר נוצר עילוי, נוצר גם גרר. מדוע? עילוי גורם להיווצרות לחץ גבוה יותר בתחתית הכנף, ומכיוון שהאוויר תמיד שואף להשוות לחצים, בקצה הכנף נוצרות מערבולות של אוויר "שרצה" לעלות על פני הכנף, אל אזור הלחץ הנמוך יותר. כלל ברזל הוא, שככל שהכנף תהיה בעלת מנת ממדים גדולה יותר (ארוכה וצרה יותר) כך גרר זה יקטן. לכן מרבית הדאונים בעלי מנת ממדים גדולה (7 ומעלה)

$CD_i = k \cdot CL^2$ מקדם גרר מושרה

$$k = 1/(\pi \cdot e \cdot AR)$$

AR = מנת ממדים

e = מקדם תיקון

ערך אופייני של e בסביבות 0.7, את הערך האמיתי מודדים בניסוי.

השורה התחתונה בכל הנוסחיאדה כאן היא שככל ש **AR יהיה גדול יותר**, כך **k יהיה קטן יותר <<< פחות גרר מושרה !!!**

את הגרר המושרה ניתן לראות היטב בצורה של מערבולות קצות כנף בשמיים. מטוס קל שימריא מיד לאחר בואינג 747, יושפע בכזו עוצמה ממערבולות קצות הכנף של הבואינג עד שהוא עלול להתפרק באוויר. לכן למטוסים קלים קיימת הנחיה ברורה להמתין מספר דקות עד שינתן להן אישור המראה. בתמונה הבאה תוכלו להתרשם ממערבולות קצות כנף של מטוס קרב:



בסופו של דבר, מקדם הגרר נרשם בצורה הבאה: $CD=CD_0+CD_i$

CD הוא מקדם הגרר

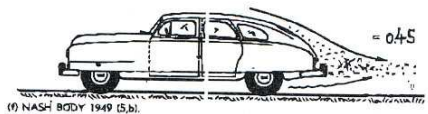
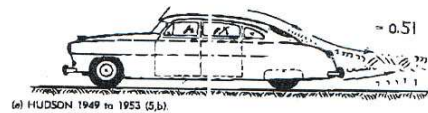
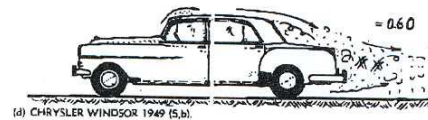
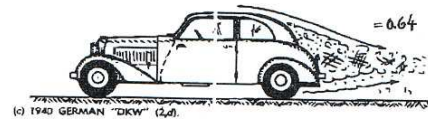
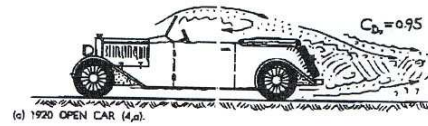
CD_0 מכיל את כל אלמנטי הגרר שלא קשורים בעילוי

CD_i מכיל את כל אלמנטי הגרר שהתפתחו עקב היווצרות עילוי.

מקדם גרר אופייני של מטוס באפס עילוי הוא כ 0.025.

בשלב השיוט ערך זה יכול גם להגיע ל 0.04, שזו עליה של יותר מ 50% בגרר!!!

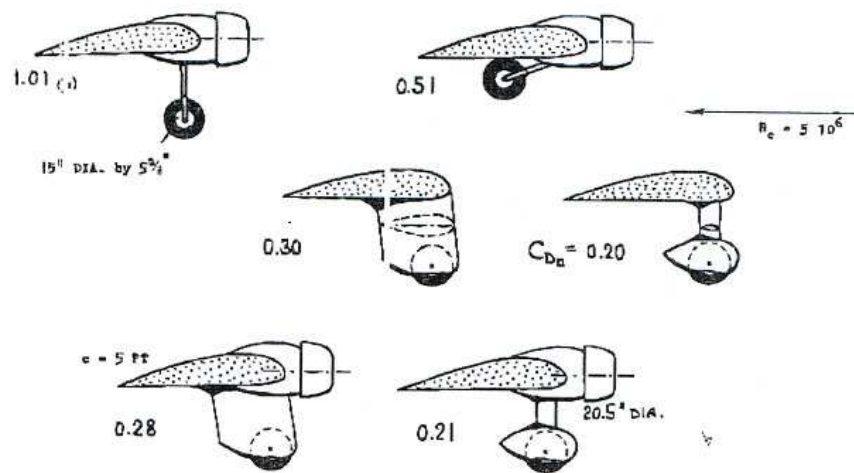
באיור הבא תוכלו להתרשם מההתקדמות שנעשתה בתעשיית הרכב בתחילת דרכה. עם הזמן הבינו המתכננים שעל מנת לחסוך בגרר, יש להקטין כמה שיותר את החתך של החלק האחורי של הרכב, כדי להקטין את הגרר:



לעיתים במכוניות מרוץ שמים "Spoiler". במקרה זה מעונינים להצמיד את החלק האחורי של הרכב לכביש, על מנת לשפר אחיזת כביש, במחיר של תוספת גרר. ה Spoiler כשמו כן הוא, "מקלקל" את הזרימה וגורם להיווצרות גרר עליו. רכיב הגרר הזה יוצר מומנט שלילי על הרכב, וגורם להצמדת החלק האחורי שלו לכביש.

באיור הבא תוכלו לראות את חשיבות חיפויי הגלגלים בטיסנים אווירובטיים.

המספרים המופיעים ליד כל איור מציינים את מקדם הגרר של הגלגל, במקרה זה בנוכחות כנף וכונס. שימו לב שמקדם הגרר של גלגל ללא חיפוי עשוי להגיע ל 1 !!!, בעוד גלגל עם חיפוי אווירודינמי מתאים יכול להורידו ל 20% מערכו !!! ($C_d=0.21$)



מאמר זה נכתב במקור בשנת 2001 עבור אתר טיסאות FLYHI ומאז עבר מספר עדכונים.
הערות/תיקונים יתקבלו בברכה: ddekel@yahoo.com

דניאל דקל

עדכון מס' 3 ינואר 2004