

כיצד מטוסים טסים: תאור פיזיקלי של העילוי תורגם מאנגלית על ידי איציק מה-יפית.

From *Sport Aviation*, Feb. 1999 **How Airplanes Fly: A Physical Description of Lift**

David Anderson & Scott Eberhardt Fermi National Accelerator Laboratory Batavia IL 60510

dfa@fnal.gov scott@aa.washington.edu

Dept. of Aeronautics and Astronautics University of Washington Seattle WA 91895-2400

מעט כל אחד, היום, טס אי פעם במטוס. רבים שואלים שאלה פשוטה "מה גורם למטוס לטוס"? התשובה שמקבלים הינה בדרך כלל מטעה ולעיתים פשוט לא נכונה. אנחנו מקווים שהתשובות המסופקות כאן יבהירו הרבה תפיסות לקויות לגבי העילוי, ושהקורא יאמץ את ההסבר שלנו כאשר יסביר את נושא העילוי לאחרים. אנחנו הולכים להראות שהעילוי קל יותר להבנה אם מתחילים עם ניוטון ולא עם ברנולי. כמו כן נראה שההסבר הפופולרי, שמרביתנו חשבנו עליו, הינו מטעה במקרה הטוב, ושהעילוי נוצר כתוצאה מזרימת האוויר מטה על הכנף.

הרשו לנו להתחיל על ידי הגדרת שלושה תיאורים של עילוי הנפוצים בספרות ובמערכי הדרכה. הראשון יהיה תאור אירודינמי מתמטי אשר משתמשים בו מהנדסים אווירונאוטים. תיאור זה משתמש בסימולציות מחשב ו/או מתמטיות מסובכות לחישוב עלוי הכנף. אלו הם כלי תכנון רבי עוצמה לחישוב עילוי אבל אינם מובילים להבנה אינטואטיבית של הטיסה.

התיאור השני יהיה ההסבר הפופולרי אשר מתבסס על עקרון ברנולי. היתרון העיקרי של תיאור זה הינו שהוא קל להבנה ונלמד במשך שנים רבות. עקב פשטותו משתמשים בו לתיאור העילוי במרבית ספרי ההדרכה. חסרונו העיקרי הינו שהוא נשען על "העקרון של זמני המעבר השווה" (principle of "equal transit times") השגוי. תיאור זה מתמקד בתצורת הכנף ומונע הבנת תופעות חשובות של טיסה הפוכה, כח, אפקט הקרקע ותלות העילוי בזווית ההתקפה של הכנף.

התיאור השלישי, אשר אנחנו נגן עליו כאן, יקרא התיאור הפיזי של העילוי. תיאור זה מתבסס בראש ובראשונה על חוקי ניוטון. התיאור הפיזי שימושי להבנת הטיסה והינו נגיש לכל בעלי הסקרנות. מעט מאד מתמטיקה נדרשת להבנת הרבה תופעות הקשורות עם הטיסה. תיאור זה נותן הבנה אינטואטיבית ברורה של תופעות כגון עקומת הכוח, אפקט הקרקע והזדקרויות במהירות גבוהה. מכל מקום, שלא כמו בתיאור אווירודינמיקה מתמטית, לתיאור הפיזי אין יכולות סימולציה או תכנון.

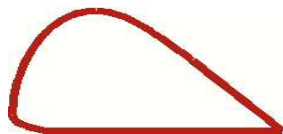
ההסבר הפופולרי של העילוי

למדים סטודנטים לפיזיקה ואווירודינמיקה שמטוסים טסים כתוצאה מעיקרון ברנולי, האומר שאם מהירות האוויר גדלה, הלחץ קטן. לפיכך הכנף יוצרת עילוי כיוון שהאוויר זורם מהר יותר על פני המשטח העליון של הכנף ויוצר איזור לחץ נמוך ומכאן עילוי. תיאור זה משיב בדרך כלל את הסקרנות ומעטים קוראים תיגר על המסקנות. אחרים תוהים מדוע האוויר זורם מהר יותר על פני הכנף, וכאן המקום שבו ההסבר הפופולרי של העילוי נכשל כשלון חרוץ.

על מנת להסביר מדוע האוויר זורם מהר יותר על פני הכנף, רבים מתייחסים לטיעון הגיאומטרי שהמרחק שהאוויר עובר הוא ביחס ישר למהירותו. הטיעון השגורתי הוא שכאשר האוויר מתפצל בשפת ההתקפה, החלק שפונה אל מעל הכנף חייב להפגש בשפת הזרימה עם החלק שעובר מתחת לכנף. זה מה שמכונה "העקרון של זמני המעבר השווה".

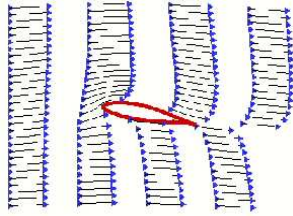
כפי שנדון על ידי Gail Craig (*Stop Abusing Bernoulli! How Airplanes Really Fly*, Regenerative Press, Anderson, Indiana, 1997), נניח שטיעון זה אכן נכון. המהירויות הממוצעות של האוויר מעל ומתחת לכנף מחושבות בקלות כיוון שניתן למדוד את המרחקים ולחשב את המהירויות. מתוך עיקרון ברנולי ניתן לחשב את כוחות הלחץ ומכאן את העילוי. אם נבצע חישוב פשוט, נמצא שעל מנת ליצור את העילוי הנדרש למטוס טיפוזי קטן, המרחק מעל הכנף חייב להיות כ 50% ארוך יותר מזה שבתחתית הכנף. ציור 1 מראה כיצד יראה פרופיל כנף שכזה. עכשיו, תאר לעצמך כיצד חייבת להראות כנף של בואינג 747!

אם נתבונן בכנף של מטוס טיפוזי קטן בעל משטח עליון הגדול ב - 1.5% עד 2.5% מהתחתון, אנחנו נגלה שצססנה 172 צריכה לטוס במהירות של מעל 400 מייל לשעה ליצירת מספיק עילוי. בוודאות, משהו בתיאור זה של העילוי פגום.



אולם, מי אמר שהאוויר המפוצל חייב להפגש בשפת הזרימה באותו הזמן? ציור 2 מראה את זרימת האוויר מעל כנף במנהרת רוח מדומה. בסימולציה, עשן צבעוני מופק מדי פעם. ניתן לראות שהאוויר הזורם מעל הכנף מגיע לשפת הזרימה בצורה ברורה לפני האוויר שזורם מתחת לכנף. למעשה, בדיקה מקרוב

מראה שהאוויר הזורם מתחת לכנף מתעכב ביחס למהירות הזרימה החופשית של האוויר. עד כאן באשר לעקרון זמן המעבר השווה.



ההסבר הפופולרי רומז כמו כן, שטיסה הפוכה היא בלתי אפשרית. ההסבר בודאי אינו מתייחס למטוסים אירובטיים בעלי כנפים סימטריות (פני המשטח העליון והתחתון זהים), או כיצד הכנף מכוונת עצמה לשינויים גדולים בעומס כגון בעת יציאה מצלילה או בפניה חדה.

לפיכך, מדוע ההסבר הפופולרי שרד עד כה? תשובה אחת היא שחוק ברנולי הינו קל להבנה. אין כל שגיאה בחוק ברנולי או בהצהרה שהאוויר זורם מהר יותר מעל הכנף. אולם, כפי שהדיון למעלה מציע, הבנתנו אינה שלמה עם הסבר זה. הבעיה היא שאנחנו חסרים משהו חשוב כאשר אנחנו מסתמכים על חוק ברנולי. אנחנו יכולים לחשב את הלחץ סביב הכנף אם אנחנו יודעים את מהירות האוויר מעל ומתחת לכנף, אבל כיצד אנחנו מחליטים מהי המהירות?

חסרון יסודי אחר של ההסבר הפופולרי הינו שהוא מתעלם מהעבודה המתבצעת. עליו דורש כוח (שהינו עבודה ליחידת זמן). כפי שנראה מאוחר יותר, הבנת הכוח היא המפתח להבנה של הרבה תופעות עילוי מעניינות.

חוקי ניוטון והעילוי

בכן, כיצד כנף מייצרת עילוי? על מנת להתחיל להבין מהו עילוי עלינו לחזור לפיזיקה של בית הספר התיכון ולעיין בחוק הראשון והשלישי של ניוטון (את החוק השני נציג מאוחר יותר). החוק הראשון של ניוטון גורס **שגוף במנוחה ישאר במנוחה, וגוף בתנועה ימשיך בתנועה בקו ישר אלא**

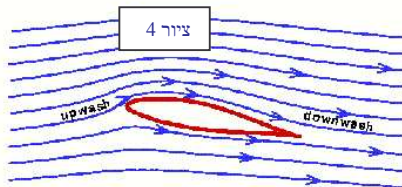


אם כן יופעל עליו כח חיצוני. זאת אומרת שאם רואים הטיה בזרימת האוויר, או אם אוויר שהיה במצב מנוחה מואץ לתנועה, יש איזה שהוא כוח הפועל עליו. החוק השלישי של ניוטון גורס **שכל פעולה יש תגובה הפוכה ושווה.** לדוגמה, גוף המונח על שולחן מפעיל כוח על השולחן (משקלו) והשולחן מפעיל כוח שווה ומנוגד על הגוף בכדי להחזיקו. על מנת לייצר עילוי, הכנף חייבת לעשות משהו לאוויר. מה שהכנף גורמת לאוויר זו הפעולה בעוד שהעילוי הינו התגובה.

בואו ונשווה שתי תמונות המראות זרמי אוויר (קווי זרימה) סביב הכנף. בצויר 3 האוויר מגיע ישירות לכנף, מתכופף סביבה ועוזב ישירות מאחורי הכנף. כולנו ראינו תמונות דומות, אפילו בספרי הטיסה. אולם, האוויר עוזב את הכנף בדיוק כפי שהופיע לפני הכנף. אין כאן שום פעולה על הכנף לפיכך לא יתכן שיש עילוי! צויר 4 מראה את קווי הזרימה, כפי שאמורים היו להיות משורטטים. האוויר חולף מעל הכנף ונוטה למטה. נטיית האוויר הינה הפעולה. התגובה הינה העילוי על הכנף.

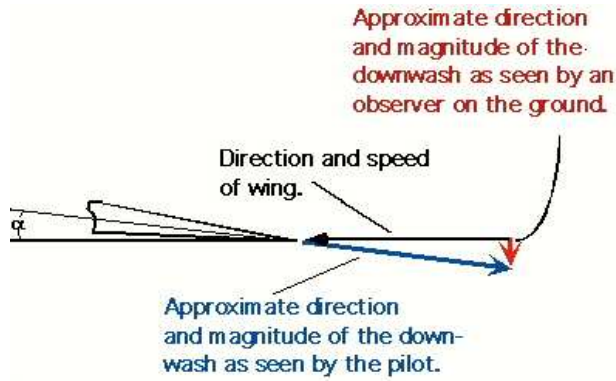
בואו ונשווה שתי תמונות המראות זרמי אוויר (קווי זרימה) סביב הכנף. בצויר 3 האוויר מגיע ישירות לכנף, מתכופף סביבה ועוזב ישירות מאחורי הכנף. כולנו ראינו תמונות דומות, אפילו בספרי הטיסה. אולם, האוויר עוזב את הכנף בדיוק כפי שהופיע לפני הכנף. אין כאן שום פעולה על הכנף לפיכך לא יתכן שיש עילוי! צויר 4 מראה את קווי הזרימה, כפי שאמורים היו להיות משורטטים. האוויר חולף מעל הכנף ונוטה למטה. נטיית האוויר הינה הפעולה. התגובה הינה העילוי על הכנף.

הכנף כמשאבה



פי שחוקי ניוטון מציעים, הכנף חייבת לשנות משהו באוויר בכדי להשיג עילוי. שינויים בתנע (momentum) של האוויר יגרמו לכח על הכנף. בכדי ליצור עילוי הכנף חייבת להטות את האוויר למטה, הרבה אוויר.

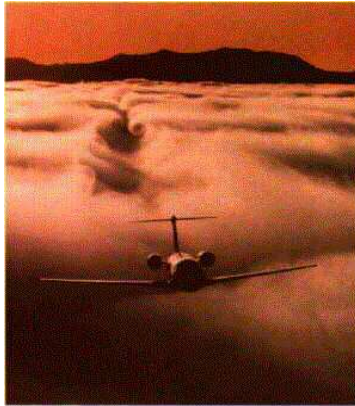
העילוי של הכנף שווה לשינוי תנופת האוויר הסוטה למטה. התנופה הינה התוצר של מסה ומהירות. העילוי של כנף הינו פרופורציונאלי לכמות האוויר המוסטת למטה כפול מהירות האוויר מטה. זה כל כך פשוט (כאן השתמשנו בתחליף לחוק השני של ניוטון המייחס את התאוצה של גוף למסה שלו ולכוח המופעל עליו, $F=ma$). להשגת יותר עילוי הכנף צריכה להסיט יותר אוויר (מסה) או להגביר את מהירות זרימתו מטה. מהירות הזרימה מטה מאחורי הכנף נקראת "הסטה למטה" (downwash). צויר 5 מראה כיצד ההסטה למטה נראית לטייס (או במנהרת רוח). הציור מראה, כמו כן, כיצד ההסטה למטה נראית לצופה על הקרקע המתבונן כיצד הכנף חולפת. לטייס, האוויר עוזב את הכנף בזווית ההתקפה בקירוב. לצופה על הקרקע, אם הוא או היא היו יכולים לראות את האוויר, האוויר היה עוזב את הכנף כמעט אנכית. ככל שזווית ההתקפה גדולה יותר כן גדולה מהירות האוויר האנכית. בדומה לכך, לאותה זווית התקפה, ככל שגדלה מהירות הכנף כך תגדל המהירות האנכית. שתיהן, הגדלת המהירות והגדלת זווית ההתקפה, יגדילו את אורך החץ האנכי. מהירות אנכית זו היא היוצרת עילוי לכנף.



כפי שנאמר, צופה על הקרקע היה רואה את האוויר יורד כמעט למטה מאחורי המטוס. ניתן להדגים זאת על ידי צפייה בעמוד האוויר מאחורי המדחף, מאורר או מתחת ללהבי הליקופטר, אלה הם כנפיים סובבות. אם האוויר היה עוזב את הלהבים בזווית, האוויר היה יוצר קונוס זרימה ולא עמוד זרימה. אם מטוס יכול היה לטוס מעל מאזניים גדולות מאד, המאזניים היו מציינות את משקל המטוס.

אם אנחנו מעריכים את הרכיב האנכי הממוצע של ההסטה למטה של צסנה 172 המשייטת במהירות 110 קשרים ב - 9 קשרים, אזי בכדי ליצר 2300 ליבראות עילוי נדרשות, הכנף שואבת 2.5 טון/שניה של אוויר! למעשה, כפי שידון מאוחר יותר, הערכה זו הינה נמוכה פי שניים. כמות האוויר הנשאבת למטה בבואינג 747 בכדי ליצר עילוי למשקל ההמראה של 800,000 ליבראות הוא אכן בלתי יאומן.

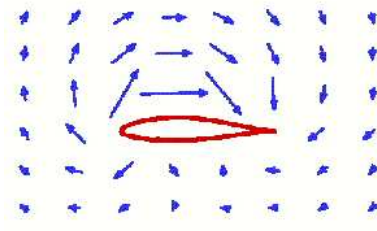
שאיבה או הטית מטה של כל כך הרבה אוויר הם טיעון חזק כנגד זה שעילוי הינו בסך הכל תופעה של משטח, כפי שנרמז על ידי ההסבר הפופולרי. למעשה, על מנת לשאוב 2.5 טון/שניה, הכנף של צסנה 172 חייבת להאיץ את כל האוויר שבתחום 9 רגל מעל הכנף. ציור 6 מתאר את תופעת האוויר המוטה מהכנף למטה. חור ענק נפער בערפל על ידי הסטת מטה של אוויר מהמטוס שטס מעליו.



אם כך, כיצד כנף דקה יכולה להטות כל כך הרבה אוויר? כאשר האוויר מוטה סביב צידה העליון של הכנף, הוא מושך את האוויר מעליו ומאיץ אותו מטה, אחרת היה נשאר חלל באוויר השורר מעל הכנף. משיכה זו גורמת להקטנת הלחץ מעל הכנף. ההאצה של האוויר מעל הכנף, לכיוון מטה, היא הגורמת לעילוי (מדוע הכנף מטה את האוויר עם מספיק כח ליצירת עילוי יידון בקטע הבא).

כפי שמתואר בציור 4, סיבוכ בתמונת הכנף הינו תופעת "הסטת מעלה" בשפת ההתקפה של הכנף. עם תנועת הכנף, האוויר אינו מוסט רק למטה בצידה האחורי של הכנף, אלא נמשך מעלה בשפת ההתקפה. הסטת מעלה זו תורמת למעשה לעילוי שלילי, ויותר אוויר חייב להיות מוטה למטה לפצות על עילוי שלילי זה. נושא זה ידון מאוחר יותר במסגרת הדיון בתופעת הקרקע.

בדרך כלל מסתכלים באוויר הזורם מעל הכנף במסגרת ההתייחסות לכנף. במלים אחרות, לגבי הטייס האוויר בתנועה והכנף במצב סטטי. כבר אמרנו שהצופה על הקרקע יראה את האוויר יורד מאחורי הכנף בצורה כמעט אנכית. אולם מה עושה האוויר מעל ומתחת לכנף? ציור 7 מראה מצב רגעי של מולקולות האוויר הזזות כאשר הכנף חולפת דרכן. יש לזכור שבציור זה בתחילה האוויר במנוחה והכנף זזה. לפני שפת הזרימה האוויר נע כלפי מעלה (הסטת מעלה). בשפת הזרימה האוויר מוטה מטה (הסטת מטה). מעל הכנף האוויר מואץ כלפי שפת הזרימה. מתחת לכנף האוויר מואץ קדימה בקלות, אם בכלל.



בתיאור האווירודינמיקה המתמטית של העילוי, תנועה סיבובית זו של האוויר סביב הכנף מעלה את המודל של "שכבת הגבול" או "תנועה מעגלית". היתרון של מודל זה, ושל המניפולציות המתמטיות הקשורות לכך, מוביל להבנה הישירה של כוחות על כנף. אולם, המתמטיקה הנדרשת דורשת מהסטודנטים לאווירודינמיקה זמן מה בכדי לשלוט בה.

הערה אחת הנובעת מציור 7 היא שפני השטח העליונים של הכנף תורמים הרבה יותר לתנועת האוויר סביבם מאשר המשטח התחתון של הכנף. לפיכך המשטח העליון הינו הרבה יותר קריטי. מכאן, מטוסים יכולים לשאת מטענים חיצוניים, כגון מיכלים נתיקים, מתחת לכנפיים אולם לא עליהם, שם הם יפריעו לעילוי. זו גם הסיבה מדוע מתלכד כנף מתחת לכנף הם שכחים אולם מעל הכנף הם נדירים מאד. מתלה, או כל מכשול אחר, על הכנף, יפריע לעילוי.



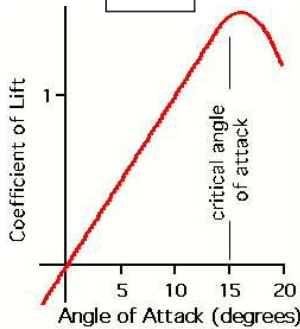
לאוויר יש צמיגות

השאלה הטבעית היא "כיצד מטה הכנף את האוויר כלפי מטה?" כאשר נוזל זורם, כגון אוויר או מים, בא במגע עם משטח מקומר, הוא ינסה לעקוב אחרי פני השטח. בכדי להדגים תופעה זו, נחזיק כוס מים בצורה אופקית תחת ברז בצורה כזו שזרימה קטנה של מים רק נוגעת בצדי הכוס. במקום לזרום ישירות למטה, נוכחות הכוס גורמת למים לעטוף את הכוס סביב הזכוכית כמתואר בציור 8. נטיה זו של נוזל לעקוב אחרי פני משטח קמור ידועה כ- "Coanda Effect". מתוך החוק הראשון של ניוטון אנחנו יודעים שעל מנת שנוזל יוטה חייב להיות כוח שיפעל עליו. מתוך החוק השלישי של ניוטון אנחנו למדים שהנוזל חייב להפעיל כוח שווה ומנוגד על האובייקט שגורם לנוזל סטיה.

מדוע חייב נוזל לעקוב אחרי משטח קמור? התשובה היא צמיגות: ההתנגדות לזרימה אשר נותנת לאוויר סוג של "דביקות". הצמיגות באוויר הינה קטנה מאד אבל מספיקה למולקולות האוויר לרצות להדבק לפני השטח. המהירות היחסית בין פני השטח ומולקולות האוויר הקרובות אליו ביותר היא בדיוק אפס (זו גם הסיבה מדוע אי אפשר להסיר אבק מרכב בעזרת צינור ומדוע יש אבק בצד האחורי של להבי מנהרת רוח). מעל המשטח לנוזל יש מהירות נמוכה. ככל שמתרחקים מהמשטח כך גדלה מהירות הנוזל עד אשר הוא מגיע למהירות החיצונית (יש לשים לב שזה מתרחש במרחק של פחות מאינטש). מכיוון שלנוזל הקרוב למשטח יש שינוי במהירות, זרימת הנוזל סוטה לכיוון המשטח. אלא אם כן הסטיה הדוקה מדי, הנוזל יעקוב אחרי פני השטח. נפח אוויר זה של אוויר סביב הכנף שנראה כאילו הוא דבוק לכנף, נקרא "שכבת הגבול".

עילוי כפונקציה של זווית ההתקפה

השנם סוגי כנפיים רבים: כנף קונבנציונלית, כנף סימטרית, קונבציונלית בטיסה הפוכה, הכנף של המטוס הדו-כנפי הראשון שנראה כמו לוחות עץ עטופים. בכל המקרים הכנף מאלצת את האוויר כלפי מטה, או ליתר דיוק מושכת את האוויר מלמעלה למטה. המשותף לכל הכנפיים הוא זווית ההתקפה ביחס לזרימת האוויר. זווית ההתקפה זו היא הפרמטר העיקרי ביחס לעילוי. ניתן להסביר את העילוי של הכנף על ידי זווית ההתקפה שלה, למרות הסתירה של ההסבר הפופולרי העוסק בעיקרון ברנולי. הטייס מתאם את זווית ההתקפה בכדי לתאם את העילוי ביחס למהירות. **ציור 9**. ההסבר הפופולרי של העילוי אשר מתמקד בתצורת הכנף מאפשר לטייס את תיאום המהירות בלבד.

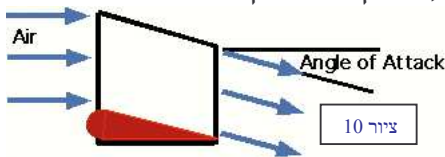


להבנה טובה יותר של תפקיד זווית ההתקפה רצוי להציג זווית התקפה "יעילה". זווית זו, המוגדרת כזווית הכנף ביחס לזרימת האוויר, הנותנת עילוי אפס היא זווית התקפה אפס. אם משנים זווית זו, הן למעלה והן למטה, מגלים שהעילוי משתנה יחסית לזווית ההתקפה. ציור 9 מציג את יעילות העילוי (עילוי מנורמל למידות הכנף) לכנף טיפוסית כפונקציה של זווית ההתקפה האפקטיבית. יחס דומה של עילוי לעומת זווית התקפה קיים בכל הכנפים, ללא תלות בתכנון שלהם. דבר זה נכון לכנף של בואינג 747 או דלת אסם תבואה. תפקיד זווית ההתקפה יותר חשוב מפרטי צורת הפרופיל בהבנת העילוי.

בצורה אופיינית, העילוי מתחיל לקטון בזווית התקפה של 15 מעלות בערך. הכוחות הנדרשים לכופף את האוויר בזווית חדה כזו הם גדולים יותר מאשר צמיגות האוויר יכולה לתמוך, והאוויר מתחיל להפרד מהכנף. היפרדות זו של זרימת האוויר מעל פני הכנף היא ההזדקרות.

הכנף הינה "כונס אוויר"

היינו רוצים עכשיו להציג דימוי חדש לכנף. נהוג לחשוב על הכנף כלהב דקה המפלחת את האוויר ומפתחת עילוי כמעשה קסמים. הדימוי החדש שהיינו רוצים שתאמצו הינו הכנף ככונס המטה כמות מסוימת של אוויר ממצב אופקי לזווית ההתקפה בערך, כמתואר בציור 10. הכונס יכול להיות מצויר כמבנה בלתי נראה המונח על הכנף במפעל היצור. אורך הכונס שווה לאורך הכנף וגובהו קשור לאורך המיתר (המרחק בין שפת ההתקפה של הכנף לשפת הזרימה). כמות האוויר המיורטת על ידי כונס זה היא יחסית למהירות המטוס וצפיפות האוויר, ולא יותר.



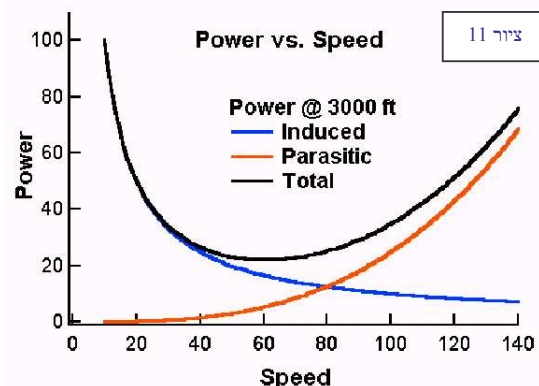
כפי שנאמר קודם, העילוי של הכנף הינו יחסי לכמות האוויר המוטה למטה כפול המהירות האנכית של האוויר. ככל שהמטוס מגביר מהירותו, הכונס מטה יותר אוויר. כיוון שהעומס על הכנף, שהוא משקל המטוס, אינו מגדיל את המהירות האנכית של האוויר המוטה, הטיית האוויר חייבת לקטון בצורה יחסית. לפיכך, זווית ההתקפה מוקטנת בכדי לשמור על עילוי קבוע. כאשר המטוס מגביה, האוויר נעשה פחות צפוף כך שהכונס מטה פחות אוויר לאותה המהירות. מכאן, זווית ההתקפה צריכה לגדול כפיצוי. נשתמש בעיקרון של קטע זה בכדי להבין את העילוי בדרך שאינה אפשרית בתיאור הפופולרי.

עילוי מצריך כוח

כאשר המטוס חולף למעלה, האוויר הנייח מסיים דרכו במהירות אנכית כלפי מטה. מכאן, האוויר נשאר בתנועה לאחר שהמטוס עובר. לאוויר הוענקה אנרגיה. כוח הוא אנרגיה או עבודה ליחידת זמן. לפיכך, העילוי דורש כוח. כוח זה מוענק על ידי מנוע המטוס.

כמה כוח ידרש בכדי לטוס? הכוח הנדרש לעילוי הוא העבודה (אנרגיה) ליחידת זמן ולפיכך הוא יחסי לכמות האוויר המוטה מטה כפול מהירות בריבוע של אוויר מוטה זה. הצהרנו כבר שעילוי הכנף הוא יחסי לכמות האוויר המוטה מטה כפול מהירות האוויר האנכית. מכאן, הכוח הנדרש לעילוי המטוס הוא יחסי לעומס (או המשקל) כפול מהירות האוויר האנכית. אם מהירות המטוס מוכפלת גם כמות האוויר המוטה מטה מוכפלת. לכן זווית ההתקפה חייבת לקטון בכדי לתת מהירות אנכית שהיא חצי מהנדרש במקור ליצירת אותו העילוי. הכוח הנדרש לעילוי הוקטן בחצי. דבר זה מראה שהכוח הנדרש לעילוי קטן ככל שמהירות המטוס עולה. למעשה, הראנו שכוח ליצירת העילוי הוא יחסי למהירות המטוס.

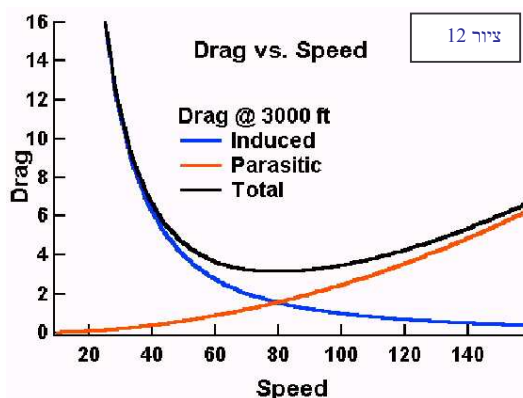
אולם, כולנו יודעים שעל מנת להתקדם מהר יותר (בשיוט) אנחנו חייבים לספק יותר כוח. לכן נדרש יותר כוח מאשר הכוח הנדרש לעילוי. הכוח המקושר לעילוי, המתואר למעלה, נקרא לעיתים כוח "מושרה". כוח נדרש גם על מנת להתגבר על מה שנקרא התנגדות "טפילה", שזוהי ההתנגדות המתקשרת עם הזזת הגלגלים, תומכות, אנטנות וכו' דרך האוויר. האנרגיה שהמטוס מעניק למולקולות האוויר בפגיעה היא יחסית לריבוע המהירות. מספר המולקולות הנפגעות ליחידת זמן הוא יחסי למהירות. לפיכך, הכוח הטפיל הנדרש להתגבר על התנגדות טפילה גדל בחזקה שלישית של המהירות.



ציור 11 מראה את עקומות הכוח לכוו המושרה, כוח טפיל וסה"כ הכוח שהינו הסכום של הכוח המושרה והכוח הטפיל. במהירות נמוכה הכוח הנדרש לטיסה נשלט על ידי הכוח המושרה. ככל שהטיסה איטית יותר פחות אוויר מוטה ולכן זווית ההתקפה חייבת לגדול בכדי לשמור עילוי. טייסים מתאמנים בטיסה על "ציודה האחורי של עקומת הכוח" על מנת שיזוהו

שזווית ההתקפה והכוח הנדרש להשאר באוויר במהירות נמוכה מאד הם משמעותיים ביותר. בשיוט, דרישות הכוח נשלטות על ידי הכוח הטפיל. כיוון שזה עולה בחזקה שלישית של המהירות, הגדלת מידות המנוע נותנת שיעור נסיקה גדול יותר אולם משפר מעט מאד את מהירות השיוט של המטוס.

כיוון שאנחנו יודעים כבר כיצד דרישות הכוח משתנות עם המהירות, אנחנו יכולים להבין גם את ההתנגדות, שהיא כוח. ההתנגדות היא פשוט כוח מחולק במהירות. ציור 12 מראה את ההתנגדות המושרית, טפילה וסה"כ ההתנגדות כפונקציה של המהירות. כאן ההתנגדות המושרית וההתנגדות הטפילה משתנות ביחס לריבוע המהירות. בהבטינו בעקומות אלו ניתן להסיק מספר דברים ביחס לתכנון מטוסים. מטוסים בעלי מהירות נמוכה, כגון דאונים, מתוכננים להתנגדות מושרית מינימלית (או כוח מושרה), השולטים במהירויות נמוכות. במטוסים בעלי מהירות גבוהה אנחנו מודאגים יותר מההתנגדות הטפילה (או כוח טפיל).



יעילות הכנף

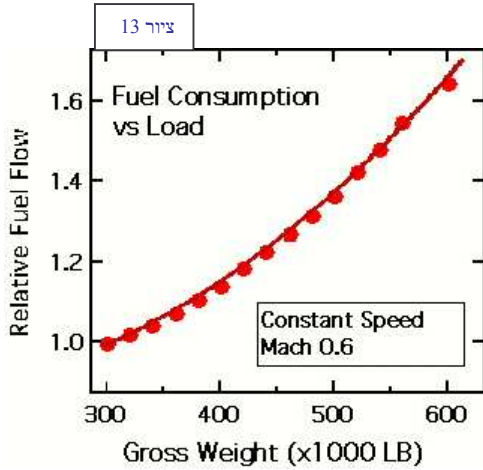
שיוט, חלק לא מבוטל של ההתנגדות בכנף מודרנית הוא ההתנגדות המושרית. התנגדות טפילה, השולטת בשיוט, של כנף בואינג 747 שוות ערך לכבל בקוטר חצי אינטש באותו האורך של הכנף. ניתן לשאול מה משפיע על יעילות הכנף. ראינו שהכוח המושרה של הכנף הוא יחסי למהירות האנכית של האוויר. אם היינו מכפילים אל אורך הכנף, מידות "הכונס" היו גם הן מוכפלות, מסיטות כמות כפולה של אוויר. לכן, לאותו העילוי המהירות האנכית (ומכאן זווית ההתקפה) היו

אמורים לקטון בחצי. כיוון שהכוח המושרה הוא יחסי למהירות האוויר האנכית, גם הוא קטן בחצי. לכן יעילות העילוי של הכנף היא יחסית לאורך הכנף. ככל שהכנף ארוכה יותר כך פחות כוח מושרה נדרש להפקת אותו העילוי, דבר זה מושג ביחד עם הגדלת ההתנגדות הטפילה. מטוסים בעלי מהירות

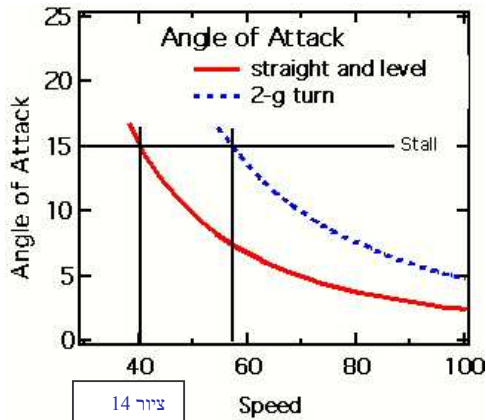
נמוכה מושפעים יותר מההתנגדות המושרת מאשר מטוסים בעלי מהירות גבוהה לכן יש להם כנפים ארוכות יותר. מטוסי קרב מהירים חשים את תופעת ההתנגדות הטפילה יותר מאשר מטוסי אימון איטיים יותר. לפיכך, מטוסים מהירים הינם בעלי כנפים קצרות יותר להקטנת ההתנגדות המושרית.

ישנם כאלה החושבים בטעות שעילוי אינו מצריך כוח. מקורה של חשיבה זו בתיאוריות האידיאליות של פרופילי הכנף. כאשר עוסקים בפרופיל, התמונה היא אכן של כנף בעלת מוטה אין סופית. כיוון שראינו כבר שהכוח הנדרש לעילוי הוא יחסי לאורך הכנף, כנף בעלת מוטה אין סופית אינה דורשת כוח עבור העילוי. אם עילוי אינו דורש כוח, מטוסים היו בעלי אותו הטווח כאשר הם טעונים כאילו היו ריקים, ומסוקים היו מרחפים בכל גבה ומטען. והטוב מכל, מדחפים (שהם כנפים סובבות) לא היו דורשים כוח ליצירת הסחב. למזלנו הרע, אנחנו חיים בעולם מציאותי שבו הן העילוי והן ההנעה דורשים כוח.

כוח ועומס הכנף



ציר 13



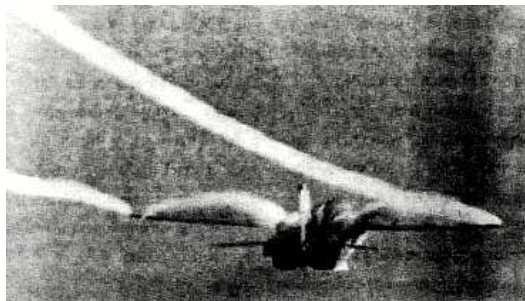
ציר 14

וואו עכשיו נתחשב ביחס בין עומס הכנף והכוח. האם נדרש יותר כוח להטסת יותר נוסעים ומטען? והאם עומס משפיע על מהירות ההזדקרות? במהירות קבועה, אם עומס הכנף גדל המהירות האנכית חייבת לגדול בכדי לפצות. דבר זה נעשה על ידי הגדלת זווית ההתקפה. אם המשקל הכולל של המטוס היה מוכפל (למשל בפניה של 2g), המהירות האנכית מוכפלת כפיצוי על עומס הכנף המוגדל. הכוח המושרה הינו יחסי לעומס כפול המהירות האנכית של האוויר המוטה, שהוכפלו שניהם. לכן, דרישות הכוח המושרה גדלו פי ארבע! אותו הדבר היה נכון באם משקל המטוס היה מוכפל על ידי תוספת דלק וכו'.

דרך אחת למדוד את הכוח הכולל הינה להציץ בשיעור תצרוכת הדלק. ציר 13 מראה את תצרוכת הדלק מול המשקל הכולל עבור מטוס מטען גדול המשייט במהירות קבועה (נתונים אמיתיים). כיוון שהמהירות קבועה, השינוי בתצרוכת הדלק הינו עקב השינוי בכוח המושרה. הנתונים מותאמים על ידי קבוע (הכוח הטפיל) וביטוי העולה בריבוע העומס. הביטוי השני הינו זה שנחזה בדיון הניוטוני שלנו על השפעת העומס על הכוח המושרה.

להגדלת זווית ההתקפה עם הגדלת העומס יש צד נוסף מעבר לצורך לתוספת כוח. כמתואר בציר 9, כאשר האוויר לא יכול לעקוב יותר אחרי העקימון העליון של הכנף היא תזדקר לבסוף, כלומר, כאשר מגיעים לזווית הקריטית. ציר 14 מראה את זווית ההתקפה כפונקציה של המהירות לעומס קבוע בפניה של 2g. זווית ההתקפה בה המטוס מזדקר הינה קבועה ואינה פונקציה של עומס הכנף. מהירות ההזדקרות גדלה בשורש ריבועי של העומס. לכן, הגדלת העומס בפניה של 2g תגדיל את המהירות בה הכנף תזדקר ב- 40%. טיפוס לגובה יגדיל גם הוא את זווית ההתקפה בפניה של 2g. זו הסיבה מדוע טייסים מתאמנים ב"הזדקרויות מואצות" דבר המסביר שמטוס יכול להזדקר בכל מהירות. לכל מהירות יש את העומס שיגרום להזדקרות.

מערבולות כנף



שאלת השאלה כיצד נראית "הסטת מטה" מהכנף. הזרימה נמשכת מהכנף כיריעה והינה יחסית לחלוקת העומס על הכנף. ציר 15 מראה, דרך ההתעבות, את חלוקת העילוי על המטוס במהלך תמרון G חריף. מתוך התמונה ניתן לראות את שנויי חלוקת העומס משורש הכנף לקצה הכנף. לפיכך, כמות האוויר בהסטת מטה חייבת גם היא להשתנות לאורך הכנף. הכנף ליד השורש מעבירה יותר אוויר מאשר בקצה הכנף. מכיוון ששורש הכנף מסיטה כל כך הרבה אוויר התופעה השכיחה היא שהסטת מטה תתחיל להתערבל בכיוון החוצה סביב עצמה, ממש כפי שהאוויר מתעקל סביב העקימון העליון של הכנף עקב שינוי המהירות של האוויר. זוהי מערבולת האוויר. צפיפות הערבול של מערבולת הכנף הינה יחסית לשיעור השינוי של העילוי לאורך הכנף. בקצה הכנף העילוי חייב להגיע במהירות לאפס ובכך לגרום לערבול המירבי של המערבולות. זוהי מערבולת קצה כנף והיא רק חלק קטן (למרות שנראית יותר)

נשאלת השאלה כיצד נראית "הסטת מטה" מהכנף. הזרימה נמשכת מהכנף כיריעה והינה יחסית לחלוקת העומס על הכנף. ציר 15 מראה, דרך ההתעבות, את חלוקת העילוי על המטוס במהלך תמרון G חריף. מתוך התמונה ניתן לראות את שנויי חלוקת העומס משורש הכנף לקצה הכנף. לפיכך, כמות האוויר בהסטת מטה חייבת גם היא להשתנות לאורך הכנף. הכנף ליד השורש מעבירה יותר אוויר מאשר בקצה הכנף. מכיוון ששורש הכנף מסיטה כל כך הרבה אוויר התופעה השכיחה היא שהסטת מטה תתחיל להתערבל בכיוון החוצה סביב עצמה, ממש כפי שהאוויר מתעקל סביב העקימון העליון של הכנף עקב שינוי המהירות של האוויר. זוהי מערבולת האוויר. צפיפות הערבול של מערבולת הכנף הינה יחסית לשיעור השינוי של העילוי לאורך הכנף. בקצה הכנף העילוי חייב להגיע במהירות לאפס ובכך לגרום לערבול המירבי של המערבולות. זוהי מערבולת קצה כנף והיא רק חלק קטן (למרות שנראית יותר)

ממערבולת הכנף. אם נחזור לציור 6, ניתן יהיה לראות בבהירות את התפתחות מערבולת הכנף בהטיית מטה כמו גם את מערבולת קצה הכנף.

קצוות הכנף (winglets - אותן הארכות כנף אנכיות קטנות בחלק מקצוות הכנפיים) משמשות לשיפור יעילות הכנף על ידי הגדלת האורך האפקטיבי של הכנף. העילוי של כנף נורמלית חייב לקטון לאפס בקצה הכנף כיוון שתחתית הכנף וחלקה העליון מתחברים בקצה הכנף. קצוות הכנף חוסמות קשר זה, כך שהעילוי יכול להתארך מחוץ לכנף. כיוון שיעילות הכנף גדלה עם האורך של הכנף, זה מגביר את היעילות. יש להזהר בנושא כיוון שתכנון הכנף הינו ערמומי מעט, כיוון שקצוות הכנף יכולים להזיק אם לא מתוכננים כראוי.

תופעת קרקע (Ground Effect)

תופעה אחרת שאינה מובנת כיאות היא תופעת הקרקע. זוהי הגדלת יעילות הכנף כאשר טסים עם מלא מוטת הכנף קרוב לקרקע. מטוס בעל כנף תחתית יתנסה בהקטנה של 50% בהתנגדות לקראת הנגיעה בקרקע. יש בלבול רב בתופעת הקרקע. טייסים רבים חושבים שתופעת הקרקע הינה תוצאה של דחיסת אוויר בין הכנף לקרקע.

בכדי להבין את תופעת הקרקע יש להבין את תופעת "הסטת מעלה". לגבי הלחץ הקיים בטיסות במהירות נמוכה, האוויר נחשב כבלתי דחיס. כאשר האוויר מואץ מעל הכנף ואז מטה, הוא חייב להיות מוחלף. חלק מהאוויר חייב להיות מוסט סביב הכנף (מטה וקדימה, ואז למעלה) כפיצוי, בדומה לזרימת מים סביב משוט סירה בעת החתירה. זוהי הסיבה להסטת מעלה.

כפי שנאמר קודם, הסטת מעלה הינה האצת אוויר בכיוון הלא נכון עבור העילוי. לפיכך, הסטת מטה מוגברת הינה חיונית לפיצוי על הסטת מעלה כמו הצורך לספק את העילוי הנדרש. מכאן, יותר עבודה מתבצעת ויותר כוח נדרש. ליד הקרקע הסטת מעלה מוקטנת כיוון שהקרקע עוצרת את הצירקולציה של האוויר מתחת לכנף. לכן פחות הסטת מטה נדרשת ליצירת העילוי. זוויית ההתקפה מוקטנת וכך גם הכוח המושרה, דבר הגורם ליעילות טובה יותר של הכנף.

קודם לכן הערכנו שצסנה 172 הטסה במהירות של 110 קשרים חייבת להסיט כ - 2.5 טון לשניה ליצירת עילוי. בחישובנו הזנחנו את הסטת מעלה. מתוך עוצמת תופעת הקרקע נראה שכמות האוויר המוסטת היא כ - 5 טון לשניה.

מסקנות

בואו נסכם מה למדנו עד כה ונקבל מושג כיצד תיאור פיזיקלי נתן לנו יכולת טובה יותר להבנת הטיסה. ראשית, מה למדנו עד כה:

- כמות האוויר המוסטת על ידי הכנף הינה יחסית למהירות הכנף ולצפיפות האוויר.
- המהירות האנכית של האוויר המוסט הינה יחסית למהירות הכנף ולזווית ההתקפה.
- העילוי הינו יחסי לכמות האוויר המוסטת כפול המהירות האנכית של האוויר.
- הכוח הנדרש לעילוי הינו יחסי לעילוי כפול המהירות האנכית של האוויר.

כעת בואו נביט במצבים מסויימים מנקודת המבט הפיזי ומהפרספקטיבה של ההסבר הפופולרי.

- מהירות המטוס נמוכה. ההסבר הפיזי אומר שכמות האוויר המוסטת הינה מופחתת כך שזווית ההתקפה גדלה כפיצוי. הכוח הנדרש לעילוי גם הוא גדל. ההסבר הפופולרי אינו מתיחס לכך.
- עומס המטוס גדל. ההסבר הפיזי אומר שכמות האוויר המוסטת הינה זהה אולם זווית ההתקפה חייבת לגדול בכדי להוסיף עילוי. הכוח הנדרש לעילוי גדל גם הוא. שוב, ההסבר הפופולרי אינו מתיחס לכך.
- מטוס בטיסה הפוכה. להסבר הפיזי אין כל בעיה בכך. המטוס מווסת את זווית ההתקפה של הכנף ההפוכה בכדי לספק את העילוי הנדרש. ההסבר הפופולרי רומז שטיסה הפוכה הינה בלתי אפשרית.

כפי שניתן לראות, ההסבר הפופולרי, המקובע על צורת הכנף, יכול לספק הרבה הסברים אולם אינו מספק את הכלים המאפשרים להבין את הטיסה באמת. ההסבר הפיזי של העילוי הינו פשוט להבנה ומשכנע יותר.