

פרופלור בעל זווית פסיעה משתנה:

פרופלור בעל פסיעה משתנה הוא פרופלור שהלהבים שלו מסוגלים לנוע בזוויות שונות, כלומר לחתוך את האוויר בזווית קטנה או גדולה לפי הצורך. זווית הלהבים מוגדרת בשפת העם כ"זווית פסיעה". להבים החותכים את האוויר בזווית קטנה, נמצאים בזווית פסיעה עדינה. להבים החותכים את האוויר בזווית גדולה, נמצאים בזווית פסיעה גסה. להבים החותכים את האוויר בזווית כל כך גדולה שגורמת לכך שיחתכו את האוויר כמו כנף של מטוס, נמצאים ב"הנצה" כלומר אם יזרום עליהם אוויר הם לא יסתובבו.

כך נראים הלהבים בפסיעה עדינה, אם יזרום על הפרופלור אוויר, הפרופלור יסתובב.



כך נראים הלהבים ב"הנצה", אם יזרום על הפרופלור אוויר, הפרופלור לא יסתובב.



מטרת השימוש בלהבים עם פסיעה היא לגרום לפרופלור לנצל ביעילות המרבית את כוחו של המנוע לכל אורך הטיסה. בדומה להילוכים ברכב, לכל מהירות טיסה יש את זווית הלהבים האופטימאלית עבורה, זווית שתאפשר:

- כוח גדול יותר לטיפוס
- מהירות שיוט גדולה יותר באותה תצרוכת של דלק
- טווח טיסה גדול יותר
- בלאי נמוך יותר של מנועים

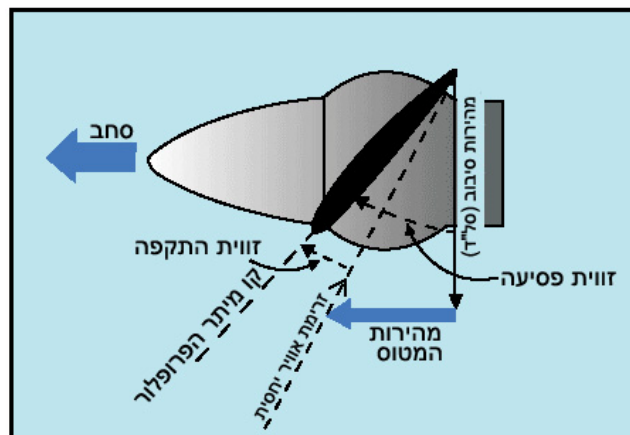
בכדי להבין את המשמעות של פסיעה משתנה נלמד תחילה על הכוחות הפועלים על פרופלור פסיעה קבועה.

פרופלור בעל זווית פסיעה קבועה:

למטוסים קלים כמו ססנה 172, פייפר צ'ירוקי וכו' קיים פרופלור בעל פסיעה קבועה. בפרופלור בעל פסיעה קבועה זווית הלהבים נקבעו על ידי יצרן המטוס. יצרן המטוס קבע את זווית הלהבים שיתאימו למצב של שיוט, הרי רוב הזמן המטוס טס במהירות וקונפיגורציה של שיוט. כתוצאה מכך בהמראה ובטיפוס יהיה למנוע פחות כוח ממה שבאמת ניתן להוציא ממנו (כמו להתחיל נסיעה בהילוך שלישי) רק כשהמטוס יתקרב למהירות שיוט, המנוע יתחיל לחיות ולהיות מנוצל היטב. לא יעיל אבל זול...

מושגים:

זווית ההתקפה של הפרופלור – פרופלור בנוי בדיוק כמו כנף, יש לו פרופיל, שפת התקפה ושפת זרימה. הפרופלור מסתובב בצורה כזו שתהיה זרימה של אוויר דרך שפת ההתקפה ועד שפת הזרימה. זווית ההתקפה של הפרופלור היא הזווית הנוצרת בין מיתר הפרופלור לזרימת האוויר היחסית.



בתמונה ניתן לראות פרופיל להב של פרופלור (בשחור) כיוון הסיבוב הוא מלמעלה כלפי מטה.

שימו לב למשולש שנוצר בין מהירות הסל"ד, מהירות המטוס וזרימת האוויר היחסית.

- ככל שמהירות המטוס גדלה, כך החץ הכחול מתארך וזווית ההתקפה קטנה
- ככל שזווית הפסיעה קטנה, כך זווית ההתקפה קטנה

התנגדות – הפרופלור מסתובב ונוצרת זרימת אוויר על הלהבים. זרימת האוויר היחסית גורמת להתנגדות. כשזווית ההתקפה גדולה, ההתנגדות גדולה ואילו כשזווית ההתקפה קטנה, ההתנגדות קטנה.

זווית פסיעה – הדחף שהפרופלור יוצר נוצר על ידי זווית פסיעה, הפרופלור מתברג בתוך האוויר והכל תלוי בזווית הלהבים של הפרופלור. כשהפרופלור חותך את האוויר בזווית קטנה זה מצב של זווית פסיעה עדינה וכשהפרופלור חותך את האוויר בזווית פסיעה גדולה זה מצב של זווית פסיעה גסה.

כוח מנוע – ככל שמוסיפים כוח מנוע על ידי המצערת יש יותר תערובת של דלק ואוויר במנוע, דבר שגורם לסל"ד לגדול. פרופלור שמסתובב מהר יותר גורר אחרי זווית התקפה גדולה יותר והתנגדות גדולה יותר.

מהירות אוויר – ככל שמהירות האוויר של המטוס גדלה (באותו כוח מנוע) זווית ההתקפה על הפרופלור תקטן וגם ההתנגדות תקטן דבר שיגרום לסל"ד לגדול. ככל שמהירות האוויר של המטוס קטנה, זווית ההתקפה על הפרופלור תגדל וגם ההתנגדות תגדל דבר שיגרום לסל"ד לקטון.

נחבר את כל המושגים יחד

בפרופלור בעל זווית פסיעה קבועה, מה שקובע את הסל"ד הוא השילוב בין המצערת שמספקת דלק ואוויר למנוע לבין מהירות האוויר של המטוס.

בסונה 172 ובשאר המטוסים בהם זווית הפסיעה היא קבועה, הזווית מותאמת למהירות שיוט.

לכל מהירות טיסה יש זווית פסיעה מתאימה אחרת. ככל שמהירות המטוס גדולה, ניתן ואף רצוי לחתוך את האוויר בזווית פסיעה גסה יותר.

ממש כמו הילוכים במכונית: בתחילת ריצת ההמראה המטוס צריך כוח לכן זווית הפסיעה העדיפה היא זווית עדינה, בטיפוס מהירות המטוס יותר גדולה לכן זווית הפסיעה העדיפה גסה יותר ובשיט, עדיף להשתמש בזווית פסיעה גסה יותר משהייתה בטיפוס, זו הסיבה שבאו חכמים והמציאו פרופלור בעל זווית פסיעה משתנה.

פרופלור בעל זווית פסיעה משתנה:



מד סל"ד: תפקידה של מערכת ה CSU הוא לשמור על סל"ד קבוע.

מטוסים גדולים יותר ומהירים יותר, עדיף שיותקן בהם פרופלור בעל פסיעה משתנה, פרופלור בעל פסיעה משתנה יגביר את נצילות המנוע למקסימום ויאפשר מהירות גדולה וטווח טיסה גדול בתצרוכת דלק נמוכה (עלות נמוכה). ככל שהמטוס גדול יותר כך מרכיב הפסיעה המשתנה שווה לחלק קטן יותר מהעלות הכוללת של המטוס. כל תפעול המנוע של מטוסים בעלי פסיעה משתנה שונה לחלוטין ממטוסים בעלי פסיעה קבועה כמעט בכל מצבי המצעות, הסל"ד תמיד נשמר על ידי מערכת ה (Constant Speed Unit) CSU. הטייס יכול "לבקש" ממערכת ה CSU לשמור סל"ד ספציפי לפי מצב הטיסה.

מערכת ה CSU:

כאמור תפקידה של מערכת ה CSU הוא לשמור על סל"ד קבוע. הטייס "מבקש" ממערכת ה CSU לשמור על סלד ספציפי על ידי שימוש בידית הכחולה בשם **ידית פסיעה**. הידית הכחולה בדרך כלל נמצאת מימין לידית המצעות. כשידית הפסיעה נמצאת עד הסוף פנימה, זה מצב של פסיעה עדינה, במצב זה **ידית הפסיעה** "מבקשת" ממערכת ה CSU להביא את המנוע לסל"ד מרבי (קו אדום). ככל שנמשוך את **ידית הפסיעה** אחורה, במצב שזה נבקש ממערכת ה CSU לשמור על סל"ד נמוך יותר וכתוצאה מכך נהנה במצב של פסיעה גסה. במטוסים דו מנועיים בעיקר, אם נמשוך את הידית הכחולה עד הסוף אחורה, הלהבים יתיישרו מול זרימת האוויר ויגיעו למצב של "הנצה".

אופן הפעולה של מערכת ה CSU:

מערכת ה CSU מקבלת נתונים מ**ידית הפסיעה** ש"מבקשת" ממנה לשמור על סל"ד ספציפי.



ידיות מנוע של פיפר סנקה



ידיות של מטוס סונה 172RG

מערכת ה CSU מורכבת בדרך כלל מקפיץ ולחץ שמן. הקפיץ מנסה לדחוף את הלהבים לפסיעה הכי עדינה שיש ומנגד לחץ השמן ככל שמתגבר מזיז את הלהבים לפסיעה גסה יותר. למערכת ה CSU שתי משקולות צנטריפוגליות. אם הפרופלור מסתובב בסל"ד גבוה מהסל"ד שהטייס קבע על ידי **ידית הפסיעה**. המשקולות זזות החוצה מציר הסיבוב ומאפשרות ללחץ השמן במערכת ה CSU לגדול. כשלחץ השמן גדל, זווית הפסיעה הופכת גסה יותר, דבר שמקטין חזרה את הסל"ד לערכו הרצוי.

דוגמא:

מטוס משייט במהירות אויר של 120 קשר. **ידית הפסיעה** מכוונת ל 2200 סל"ד שנשמר על ידי מערכת ה CSU.

הטייס הרים אף (בלי לגעת בכלום) והמהירות קטנה:

תגובת המטוס: המהירות קטנה ← זווית ההתקפה של הפרופלור גדלה ← ההתנגדות גדלה ← הסל"ד קטן.

תגובת מערכת ה CSU: מערכת ה CSU גורמת לזווית הפסיעה להיות עדינה יותר ← זווית ההתקפה של הפרופלור קטנה (חוזרת להיות כפי שהייתה לפני השינוי) ← ההתנגדות קטנה (חוזרת להיות כפי שהייתה לפני השינוי) ← והסל"ד גדל (חוזר חזרה ל 2200 כפי שהיה לפני השינוי).

דוגמא נוספת:

מטוס משייט במהירות אוויר של 120 קשר. **ידידת הפסיעה** מכוונת ל 2200 סל"ד שנשמר על ידי מערכת ה CSU. הטייס דחף **מצערת** עד הסוף:

תגובת המטוס: יש יותר דלק ואוויר במנוע, הסל"ד גדל.

תגובת מערכת ה CSU: מערכת ה CSU גורמת לזווית הפסיעה להיות גסה יותר ← זווית ההתקפה של הפרופלור גדלה (חוזרת להיות כפי שהייתה לפני השינוי) ← ההתנגדות גדלה (חוזרת להיות כפי שהייתה לפני השינוי) ← והסל"ד קטן (חוזר חזרה ל 2200 כפי שהיה לפני השינוי).

הערה:

מערכת ה CSU היא מערכת מאוד מהירה, לכן, השינויים בסל"ד לא נראים לעין, לכן לעניינינו הסל"ד נשמר תמיד בדיוק כפי שביקשנו על ידי **ידידת הפסיעה** וכל זה בלי קשר למהירות המטוס ולמצב האף של המטוס.

כוח המנוע:

כאמור, למנוע המצויד בפרופלור בעל פסיעה משתנה, קיימות שתי ידידות, ידידת שחורה, מצערת: אחראית על כמות הדלק והאוויר הנכנסת למנוע וידידת כחולה, **ידידת פסיעה:** אחראית על רמת הסל"ד אותו מערכת ה CSU תשמור כמעט תמיד.

יש לזכור כי במטוסים בעלי פסיעה משתנה, בדיוק כמו שאר המטוסים, מי שקובע את ההספק של המנוע זו ידידת **המצערת**, תפקידה של **ידידת הפסיעה** היא רק לייעל את כל המערכת.

לדוגמא:

מטוס משייט במהירות אוויר של 120 קשר. **ידידת הפסיעה** מכוונת ל 2200 סל"ד שנשמר על ידי מערכת ה CSU.

הטייס סגר **מצערת:**

תגובת המטוס: הסל"ד רוצה לקטון

תגובת מערכת ה CSU: מערכת ה CSU מיד תכניס את הלהבים למצב של פסיעה עדינה ביותר, הסל"ד ישמר כפי שהיה אבל מהירות המטוס תקטן (כי אין למטוס כוח) והסל"ד ירצה לקטון שוב.

הפעם, הסל"ד אכן יצליח לקטון כי מערכת ה CSU כבר נמצאת במצב של פסיעה הכי עדינה אפשרית ואין במנוע מספיק דלק ואוויר כדי לאפשר שמירת הסל"ד

מערכת ה CSU היא מערכת מוגבלת. על הקרקע ובמצב סר"ק נקבל 600 סל"ד כמו בכל מטוס אל אף **שידידת הפסיעה** מכוונת ל 2700 סל"ד.

בערכים הנמוכים של **המצערת**, **המצערת** היא זו ששולטת על הסל"ד ובערכים הגבוהים של **המצערת**, יש מספיק כוח לכך שמערכת ה CSU תתחיל לעבוד בעצמה ורק אז **ידידת הפסיעה** הופכת לאפקטיבית.

אם הסל"ד נשמר, איך נדע מה הכוח האמיתי של המטוס?

כאמור **המצערת** היא הקובעת העיקרית של הספק המנוע, בערכים הנמוכים נראה גדילה של הסל"ד ככל שנכניס יותר דלק ואוויר למנוע אך בערכים הגבוהים (כולל את הערכים הנורמאליים לשיוט) הסל"ד יישמר על ידי מערכת ה CSU ויקבע על ידי **ידידת הפסיעה**.

לכן בלתי אפשרי לדעת מהו ההספק של המנוע בהסתכלות על מד הסל"ד בלבד. מה נעשה? נקפץ מהמטוס? בהחלט לא! לכן המציאו את המכשיר הבא:

לחץ סעפת יניקה (Manifold Pressure):

לחץ סעפת יניקה הוא הלחץ באינטש כספית היוצא מכיוון הקרבוראטור או מערכת הזרקת דלק (תלוי בסוג המנוע) לכיוון הצילינדרים.



במטוסים מסוימים מד לחץ סעפת יניקה ישולב יחד עם מד תצרוכת דלק



מד לחץ סעפת יניקה: הוא המכשיר לפיו נדע מה הכוח של המנוע.

כאשר המטוס נמצא על הקרקע עם מנוע כבוי, לחץ הסעפת שיתקבל יהיה הלחץ הברומטרי השורר מחוץ למטוס (QFE).

כאשר נפעיל את המנוע, נקבל ירידה בלחץ הסעפת בגלל היניקה וירידת הלחץ ומעתה המצערת היא שתיקבע את לחץ סעפת יניקה. ככל שהמצערת תהיה פתוחה יותר לחץ סעפת יגדל ובמילים אחרות, לחץ סעפת גדול משמעותו כוח גדול של המנוע.

עם העלייה בגובה, הלחץ האטמוספרי מחוץ למטוס הולך וקטן ולכן לחץ סעפת היניקה הולך וקטן גם הוא. כדי לשמור על כוח מנוע קבוע בזמן הטיפוס עלינו לשמור על לחץ סעפת קבוע על ידי ותיחת מצערת יותר ויותר במהלך הטיפוס.

מעל גובה מסוים (תלוי בלחץ של אותו היום) ייתכן מצב בו לא נוכל לשמור על לחץ סעפת יניקה בגלל ירידה משמעותית בלחץ האטמוספרי, במצב זה נהיה עם מצערת פתוחה באופן מלא ויהיה הלחץ אשר יהיה.

שינוי כוח:

תפעול ידית המצערת וידית הפסיעה במהלך שינוי כוח, יהיה בצורה כזו שתבטיח שלא נעבור לחץ סעפת גבוהה מידי לעומת סל"ד נמוך מידי (זה מצב מסוכן של Over Boost בו עלול לעוף פלאג מהמנוע)

בהגברת כוח: נגדיל תחילה את הסל"ד ולאחר מכן נגדיל את לחץ הסעפת (מימין לשמאל) בהפחתת כוח: נוריד תחילה את לחץ הסעפת ולאחר מכן נוריד את הסל"ד (משמאל לימין)

כל שינוי בסל"ד יגרור אחריו שנוי קטן מאוד בלחץ סעפת יניקה, בהורדת סל"ד לחץ הסעפת יגדל ובהגדלת סל"ד לחץ הסעפת יקטן.

כמה כוח:

השילוב המומלץ בין לחץ סעפת לבין סל"ד שונה ממצב טיסה אחד לשני. בספר מטוס (POH) של כל מטוס ניתן לקבל מידע אודות ה Setting המומלץ. בכלליות, לרוב המטוסים הקלים יש Setting דומה:

המראה:

הכל קדימה, **ידיית פסיעה ומצערות** עד הסוף קדימה.

טיפוס:

לחץ סעפת 25 אינטש, **ידיית פסיעה** 2500 סל"ד

שיוט:

לחץ סעפת 22 אינטש, **ידיית פסיעה** 2200 סל"ד

הנמכה

מקטינים לחץ סעפת לפי הצורך, סל"ד נשאר 2200

נחיתה

ידיית פסיעה עד הסוף קדימה (מקסימום סל"ד), לחץ סעפת לפי הצורך, רוב הסיכויים שהסל"ד יהיה נמוך בגלל כמות **מצערות** מטעה ופסיעה עדינה ביותר, **ידיית הפסיעה** מוכנסת קדימה למקרה ונרצה ללכת סביב.

הערה:

במטוסים בעלי פסיעה משתנה, בתחילת ריצת ההמראה, מערכת ה CSU תגדיל את הסל"ד למקסימום הניתן (קו אדום) לדוגמא בססנה 172RG המצוידת בפסיעה משתנה נקבל 2700 סל"ד ואילו בססנה 172 שלא מצוידת בפסיעה משתנה נקבל בסביבות 2350 סל"ד למרות שהסל"ד המירבי הוא 2700 בשני המטוסים.