מנוע הקפיצות V14

מסמך עומק מקצה־לקצה: הגישה האלגוריתמית, מכונת המצבים, חישוב הגובה והקשחת השטח

אפליקציית Kiters ל־Apple Watch • קבצים: `JumpEngineV14.swift` (המנוע הטהור), `JumpDetectorV14.swift` (האדפטר) • יולי 2026

תוכן העניינים

1. תקציר — מה V14 עושה ולמה
2. עקרונות התכנון
3. ארכיטקטורה: מנוע טהור + אדפטר
4. ערוצי החישה והפיזיקה שלהם
5. מכונת המצבים
6. שלב הרכיבה: קו הבסיס ומעקב העומס
7. זיהוי המראה — שרשרת השערים
8. חלון הגובה האבסולוטי לפי דרישה
9. שלב הטיסה וזיהוי הנגיעה במים
10. אישור הנחיתה
11. חישוב הגובה — הצלבת שלושה מקורות
12. מדדים נלווים וציון הביטחון
13. עמידות למים ולארטיפקטים
14. האדפטר: שעונים, דגימה וריבוי־תהליכונים
15. טבלת הקונפיגורציה המלאה
16. ולידציה, תקלות שטח וההקשחות
17. מגבלות ידועות

1. תקציר — מה V14 עושה ולמה

V14 הוא מנוע זיהוי קפיצות קייטסרפינג היבריד: **הזיהוי עצמו מבוסס אך ורק על IMU ולחץ ברומטרי**, ואילו **הגובה האבסולוטי משמש כהצלבת־אימות בלבד**, בחלון זמן קצר שנפתח לפי דרישה — מרגע זיהוי ההמראה ועד אישור הנחיתה. GPS אינו משתתף בזיהוי כלל; הוא מעשיר את התוצאה במהירות, מרחק וקואורדינטות, ומוסיף שער־עזר אחד בלבד כאשר קיים fix בפועל.

העיקרון המארגן: **כל ערוץ עושה את מה שהוא באמת טוב בו.** ה־IMU בתדר 200Hz הוא שעון־הזמן — הוא קובע מתי ההמראה, כמה ארך זמן האוויר ומתי הנגיעה. הברומטר היחסי, הרציף, מספק קו־בסיס יציב של גובה הרוכב מעל המים. מד־הגובה האבסולוטי, שמופעל רק בתוך הקפיצה, הוא הסמכות לגובה השיא. וחוק הפיזיקה הבליסטי $g \cdot T^2/8$ משמש כתקרה שאף מקור אינו רשאי לחרוג ממנה — כי עפיפון יכול רק *להאריך* זמן אוויר עבור גובה נתון, לעולם לא לקצר אותו.

> **שורה תחתונה:** קפיצה נספרת רק כשחתימת ה־IMU (חוסר־משקל מתמשך), חתימת הלחץ (עלייה מעל קו הבסיס) והפיזיקה (התקרה הבליסטית) מסכימות זו עם זו. חוסר הסכמה בין הערוצים מפיל את המועמד — לא מנפח אותו.

2. עקרונות התכנון

- **שקיפות מלאה של הנוסחה** — כל סף חי ב־`V14Config`, שום קבוע אינו חבוי בקוד, וכל פרמטר ניתן לכוונון שדה דרך `UserDefaults` (סעיף 15).
- **ה־IMU פותח, הלחץ מאשר** — תזמון מגיע מהתאוצה; גובה חייב גיבוי מערוץ לחץ. גובה בליסטי־בלבד מעל רצפת האמון נדחה (סעיף 11).
- **זמן אוויר = משך חוסר־המשקל שנמדד בפועל** — הטיסה נמשכת בדיוק כל עוד העומס נמוך. נפנוף יד קצר אינו יכול להתנפח לשניות של "טיסת רפאים".
- **מד־הגובה האבסולוטי הוא משאב לפי דרישה** — רץ רק בין המראה לאישור נחיתה. חוסך סוללה, ובעיקר מונע את מחלקת הבאגים של ערוץ אבסולוטי שרץ ברציפות (קפיאות, עיגונים־מחדש, watchdog).
- **אתחול־זרם אינו אתחול־מנוע** — הפעלה מחדש של שכבת הרכישה לעולם אינה מאפסת את מצב המנוע; בדיקת הבריאות של

הערוץ (ערכים מובחנים) מחליטה אם הוא שמיש.

- **גבולות פיזיקליים גלויים** — `maxFlightSec` , `minAirtimeSec` , התקרה הבליסטית ורצפת האמון הם גבולות פיזיקה מתועדים, לא "כפתורי כוונון" נסתרים.
- **המנוע טהור ונטול־פלטפורמה** — `JumpEngineV14` אינו מייבא CoreMotion; אותו קוד בדיוק רץ בשעון החי ובכלי ה־replay הלא־מקוון.

3. ארכיטקטורה: מנוע טהור + אדפטר

המערכת מפוצלת לשתי שכבות עם חוזה צר ביניהן:

שכבה	קובץ	אחריות
המנוע הטהור	`JumpEngineV14.swift`	כל הלוגיקה האלגוריתמית: מכונת המצבים, השערים, חישוב הגובה, הביטחון. מקבל רק מספרים (זמן, עומס בג׳, גובה במטרים) — אפס תלות ב־watchOS, ולכן רץ זהה ב־replay.
האדפטר	`JumpDetectorV14.swift`	גשר לעולם האמיתי: חילוץ העומס האנכי מ־CoreMotion, יישור שעונים, סינון כפילויות ברומטר, ניהול פיזי של זרם הגובה האבסולוטי, תרגום תוצאות לאובייקט `Jump` של האפליקציה, לוגים והפטיקה.

הממשק בין השכבות — חמש פונקציות קלט ושלושה callbacks:

```
// (אדפטר → מנוע) קלט
addIMU(t:verticalLoadG:gyroRadS:)          // 200 Hz
addRelativeAltitude(t:altitudeM:)          // בקצב הברומטר האמיתי (~1 Hz)
addAbsoluteAltitude(t:altitudeM:)          // רק כשהחלון פתוח
addGPS(t:lat:lng:speedMS:)                 // מדדים בלבד
addSubmersion(t:submerged:)                // דיווחי מגע־מים

// (מנוע → אדפטר) פלט
delegate.jumpDetected(V14Jump)             // תוצאה סופית
onAbsoluteWindowRequest(Bool, String)      // פתח/סגור את זרם הגובה האבסולוטי
onDebug(TimeInterval, String)              // אירועי CANDIDATE/TOUCHDOWN/JUMP/REJECT
```

כל עבודת המנוע מוגשת לתור טורי ייעודי (`com.kiters.jumpV14.engine` , איכות שירות `userInitiated`), כך שהמנוע עצמו לעולם אינו זקוק למנעולים. במצב (replay) `synchronousAnalysis` ההגשה הופכת סינכרונית — אותה לוגיקה, סדר דטרמיניסטי.

4. ערוצי החישה והפיזיקה שלהם

4.1 עומס אנכי (IMU, 200Hz) — אות הזיהוי הראשי

במקום עוצמת תאוצה גולמית, V14 עובד עם **העומס האנכי המוטל על כיוון הכובד** — האדפטר מחשב אותו כדי שהמנוע יישאר נטול־פלטפורמה:

$$\text{verticalLoadG} = (\text{userAcceleration} \cdot \hat{g}) + |g|$$

כאשר $\hat{g}$ הוא וקטור הכובד המנורמל מ־CoreMotion. התוצאה היא אות בעל משמעות פיזיקלית ישירה: **~1g במנוחה, ~0g בנפילה חופשית, מעל 1g בדחיפת ההמראה (pop) ובפגיעת הנחיתה**. ההטלה על כיוון הכובד מבטלת את רגישות האות לזווית פרק כף היד — נפנוף אופקי כמעט אינו משנה את הרכיב האנכי. דגימות ישנות ללא וקטור כובד מניחות שעון־שטוח `(0, 0, −1)` .

על האות רץ ממוצע־נע קצר של `loadSmoothingSec = 0.15s` (~30 דגימות) — מספיק כדי למחוק ספייקים בני דגימה בודדת, קצר מספיק כדי לא לטשטש חוסר־משקל של 0.35 שניות. לצד העומס המוחלק נשמר גם **שובל IMU גולמי** (`imuTrail`) — זוגות (עומס גולמי, עוצמת ג׳ירו) בחלון של כ־2.6 שניות — המשמש את שער הטורבולנציה של ההמראה (סעיף 7.4).

4.2 גובה יחסי (ברומטר) — הערוץ הרציף

הברומטר מדווח גובה יחסי רציף לאורך כל הסשן, בקצב האמיתי שלו (~1Hz). הוא מזין שני דברים: את **קו־הבסיס של הרוכב** (חציון נע, סעיף 6) ואת **שיא הגובה היחסי בטיסה**. נקודת התורפה הפיזיקלית שלו: מים מכניסים את החיישן ללחץ הידרוסטטי — **טבילת פרק־יד של סנטימטר אחד נקראת כצניחת "גובה" של כ־8 מטרים**. כל הגנות הערוץ הזה (חציון במקום ממוצע, מסנן קפיצות־מדרגה, חסימת טבילה) נגזרות מהעובדה הזו.

4.3 גובה אבסולוטי — הסמכות לגובה, לפי דרישה בלבד

`CMAltimeter.startAbsoluteAltitudeUpdates` מדויק לגובה שיא אך יקר בסוללה ומועד לקפיאות כשהוא רץ שעות. ב־V14 הוא **אינו רץ ברקע כלל**: המנוע מבקש את הזרם רק כשנפתח מועמד־קפיצה, ומשחרר אותו כשקו־הבסיס של הנחיתה מתייצב. פירוט מלא בסעיף 8.

4.4 GPS — מדדים בלבד

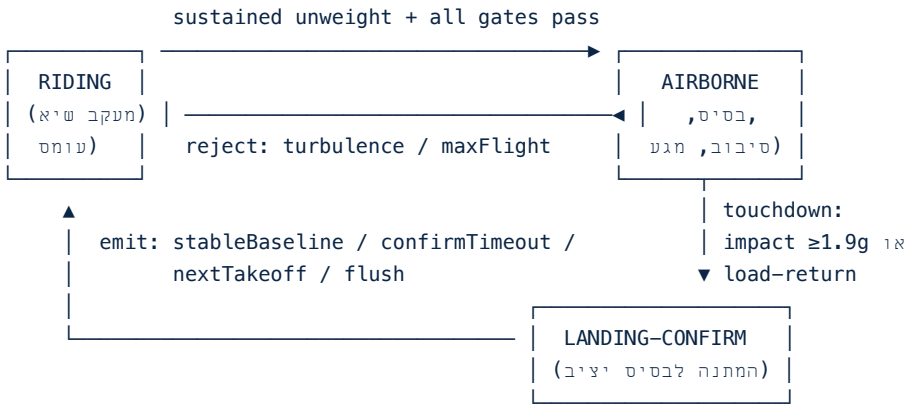
אף שער זיהוי אינו קורא GPS, והמנוע פונקציונלי לחלוטין עם אפס קלט GPS. נקודות GPS נשמרות בהיסטוריה של 60 שניות, ובזמן הסיום מותאמות להמראה ולנחיתה בסבילות של `gpsMatchToleranceSec = 2.5s`. חריג יחיד ומכוון: אם קיים fix בפועל סמוך להמראה ומהירותו מתחת ל־`minTakeoffGpsSpeedMS = 3 m/s` — המועמד נדחה, כי אדם עומד על החוף יכול להקנות לפרק היד שנייה של נפילה חופשית, אבל הבורד לא (סעיף 7.5). אין fix — אין שער.

4.5 מגע מים (Submersion)

דיווחי טבילה מהשעון נשמרים כדגל מצב. טבילה פעילה **חוסמת פתיחת המראה** (`blockTakeoffWhileSubmerged = true`): טבילה לעולם לא תזייף עלייה ברומטרית, אבל היא כן מסוגלת לזייף "חוסר־משקל" רגעי בהתנגדות המים.

5. מכונת המצבים

המנוע חי באחד משלושה מצבים, כשאובייקט `Flight` נושא את כל נתוני הקפיצה הפעילה:



מצב	מה קורה בו	יציאות
RIDING	תחזוקת קו־בסיס (חציון נע), החלקת עומס, מעקב אימפולסי pop, מעקב חוסר־משקל.	חוסר־משקל מתמשך + כל השערים → `AIRBORNE` (+ פתיחת חלון אבסולוטי).
AIRBORNE	מעקב שיא יחסי/אבסולוטי, אינטגרל סיבוב, שיא ג'י וג'ירו; בדיקת טורבולנציה קדמית ב־0.6s הראשונות; זיהוי מגע.	מגע → `LANDING-CONFIRM` ; טורבולנציה/חריגת `maxFlightSec` → דחייה וחזרה ל־RIDING (+ סגירת חלון).
LANDING-CONFIRM	המתנה שקו־הבסיס היחסי יתייצב אחרי המגע; דגימות אבסולוטיות ממשיכות להיאסף כעוגן הנחיתה.	בסיס יציב → פליטה מאושרת; timeout של 6s → פליטה בביטחון מופחת; חוסר־משקל חדש → פליטת הקודמת ופתיחת הבאה; flush בסוף סשן.

> **רצף קפיצות:** אם חוסר־משקל חדש מתחיל בזמן שהנחיתה הקודמת עוד ממתינה לאישור, הקפיצה הקודמת נפלטת מיידית (`via=nextTakeoff` , לא־מאושרת) והמועמד החדש נפתח באותה דגימה — קפיצות עוקבות צפופות אינן בולעות זו את זו.

6. שלב הרכיבה: קו הבסיס ומעקב העומס

6.1 קו־הבסיס — חציון נע, לא ממוצע

קו־הבסיס של הרוכב הוא **חציון נע של הגובה היחסי על פני `baselineWindowSec = 4s`** (טווח מותר 3–5s), הנדגם ברגע ההמראה מהחלון שקדם לה. הבחירה בחציון היא החלטה אלגוריתמית מרכזית: טבילת פרק־יד נקראת כספייק שלילי עצום (~8 מ' לס"מ מים) — ממוצע היה נגרר עשרות מטרים מטה, וכל קפיצה שאחרי טבילה הייתה מקבלת גובה מנופח. **החציון פשוט מתעלם מהחריגים** כל עוד רוב דגימות החלון תקינות. נדרשות לפחות `minBaselineSamples = 2` דגימות; אם אין — ההמראה עדיין נפתחת (התזמון של ה־IMU אינו תלוי בלחץ) והגובה יגיע מהצלבת הערוץ האבסולוטי.

6.2 מעקב אימפולס ה־pop

כל דגימת IMU שבה `|load| ≥ popG (1.6g)` מעדכנת את זמן ה־pop האחרון ואת שיאו. ה־pop — דחיפת הרגליים והעפיפון רגע לפני העזיבה — משמש כברירת מחדל **להעלאת ביטחון בלבד**: אם התרחש בתוך `popLeadSec = 0.8s` לפני תחילת חוסר־המשקל, הוא נרשם בתוצאה ומוסיף לביטחון. רק כאשר `requirePop = true` הוא הופך לשער קשיח.

7. זיהוי המראה — שרשרת השערים

מועמד־קפיצה נפתח רק כשהוא עובר את **כל** השרשרת, בסדר הזה:

7.1 השער הראשי: חוסר־משקל מתמשך

`unweightSec (0.35s)` ברציפות למשך `smoothedLoad ≤ unweightG (0.75g)`

זו חתימת הפיזיקה של עזיבת המים: ברגע שהגוף בליסטי, פרק היד מודד קרוב ל־0g. הדרישה לרציפות של 0.35 שניות מסננת את הרעש הקצר של חבטות צ'ופ ותנועות יד — כמעט שום תנועה לא־בליסטית אינה מחזיקה עומס נמוך לאורך זמן כזה. **זמן ההמראה**

נקבע לתחילת חלון חוסר־המשקל — דיוק ברמת ה־IMU, לא ברמת הברומטר.

7.2 שומר חזרה (retrigger guard)

`retriggerGuardSec = 0.8s` מהנחיתה הקודמת: הקפצת הבורד על המים מיד אחרי נחיתה אינה נפתחת כקפיצה חדשה.

7.3 חסימת טבילה

אם מדווח מגע־מים פעיל — דחייה (`reason=submerged`). מי שנמצא בתוך המים אינו ממריא.

7.4 שער הטורבולנציה — פילטר תנועות היד

> **הרציונל, שנמדד מנתוני שטח:** קפיצה אמיתית עוזבת את המים כחוסר־משקל *חלק* — בלוג הייחוס במים כל ההמראות האמיתיות נשארו מתחת ל־6 rad/s סיבוב פרק ו־2.5g עומס גולמי בחלון ההמראה, ואילו כל הפנטומים (ניעורים, זריקות, נפילות שעון) חצו 9.5 rad/s או 4.3g. ההפרדה כמעט מושלמת, והספים נקבעו באמצע: `takeoffMaxGyroRadS = 8.0` , `takeoffMaxLoadG = 4.0` .

השער פועל בשני חצאים סביב רגע ההמראה:

- **סריקה לאחור** — בפתיחת המועמד נסרק שובל ה־IMU הגולמי בחלון `[takeoff − 0.3s, now]` ; חריגת ג'ירו או עומס → דחייה לפני שנפתח דבר (וגם החלון האבסולוטי לא נפתח — כך פנטום־רעש אבסולוטי נחסם בשורש).
- **בדיקה קדימה** — ב־ `takeoffScanForwardSec = 0.6s` הראשונות של הטיסה, כל דגימה אלימה מפילה את הטיסה מיידית (`reason=takeoffTurbulence, inFlight=true`) וסוגרת את החלון. פתיחה של טיסה אמיתית היא בליסטית ושקטה; תנועת יד אלימה כל־כך מוקדם פירושה שחוסר־המשקל היה ניעור או זריקה.

7.5 שער־העזר GPS (רק כשיש fix)

אם קיימת נקודת GPS בתוך 2.5 שניות מרגע ההמראה ומהירותה מתחת ל־3 m/s — דחייה (`gpsSpeedBelowRiding`). זה "הורג נפנופי־החוף": מהירות רכיבה אמיתית תמיד גבוהה מזה. בהיעדר fix השער פשוט אינו קיים — המנוע לעולם אינו תלוי בזמינות GPS.

7.6 פתיחת המועמד

בעבור כל השערים נבנה אובייקט `Flight` עם: זמן ההמראה, קו־הבסיס (חציון), עוצמת ה־pop (אם היה בחלון), ונקודת ה־GPS של השיגור. המצב עובר ל־AIRBORNE, ונורית האירוע `CANDIDATE` נרשמת — ובאותה נשימה נשלחת בקשת פתיחת החלון האבסולוטי.

8. חלון הגובה האבסולוטי לפי דרישה

מחזור החיים של הערוץ האבסולוטי צמוד במדויק למחזור חיי הקפיצה:

1. **פתיחה** — עם פתיחת מועמד: `onAbsoluteWindowRequest(true, "takeoff t=…")` . האדפטר חושף זאת לשכבת הסשן דרך `onAbsoluteAltitudeWindowChange` , ו־MotionManager מפעיל פיזית את `startAbsoluteAltitudeUpdates` .
2. **זרימה** — דגימות אבסולוטיות מוזנות רק כשהחלון פתוח, ונאספות ב־ `flight.absSamples` . עד המגע נעקב גם השיא; אחרי המגע הדגימות ממשיכות להיאסף כעוגן הנחיתה.
3. **סגירה** — בכל סיום: אישור נחיתה, timeout, קפיצה־עוקבת, דחיית טורבולנציה, חריגת flush , `maxFlightSec` או reset. כל מעבר נורה פעם אחת בדיוק.

> **למה זה קריטי ולא רק חיסכון בסוללה:** ערוץ אבסולוטי שרץ ברציפות נוטה לקפוא (חוזר על ערך אחד ביט־אחר־ביט) ולעבור עיגונים־מחדש שרירותיים. חלון קצר לפי דרישה מקבל את ה־callback הראשון המיידי של CMAltimeter (חיוני לקפיצות קצרות מ־1.5s בקצב 1Hz), ובדיקת הבריאות — **לפחות שני ערכים מובחנים + דגימות גם בטיסה וגם אחרי הנחיתה** — מחליטה בזמן הסיום אם הערוץ בכלל שמיש. ערוץ קפוא נכשל בבדיקה ופשוט אינו משתתף, בלי להפיל את הקפיצה.

בנוסף מסונן **זקיף העיגון־מחדש של Core Motion**: דגימה עם `accuracy ≥ 100m` מגיעה עם גובה־זבל מתועד ונזרקת עוד באדפטר.

9. שלב הטיסה וזיהוי הנגיעה במים

9.1 מה נעקב בטיסה

- **שיא יחסי** — הגובה היחסי המרבי וזמנו (אחרי מסנן קפיצות־המדרגה של סעיף 13).
- **שיא אבסולוטי** — הגובה האבסולוטי המרבי וזמנו, רק עד המגע.

- **שיא ג'י ושיא ג'ירו** — לדיאגנוסטיקה ולמדדי התוצאה.
- **אינטגרל הסיבוב** — `Σ gyro·Δt` על פני הטיסה; בסיום מחולק ב־`2π` לקבלת מספר סיבובים.

9.2 שני מסלולי מגע (touchdown)

מסלול	תנאי	הגיון
פגיעת נחיתה	עומס גולמי `landingImpactG` ≥ `(1.9g)`	נחיתה טיפוסית: חבטה חדה. זמן המגע = זמן הפגיעה, ועוצמתה נשמרת בתוצאה.
חזרת עומס	עומס מוחלק ≥ `flightLoadCeilingG` `(0.85g)` מוחזק `flightEndHoldSec` `(0.25s)`	נחיתה רכה ללא ספייק: המשקל פשוט חזר. זמן המגע = תחילת החצייה (לא סופה), כך שה־airtime אינו מתנפח ב־0.25s. דרישת ההחזקה מונעת מג'יטר מתיחת־עפיפון באמצע טיסה לסיים אותה; חצייה שלא החזיקה מתאפסת.

מכיוון שהטיסה נמשכת **בדיוק כל עוד חוסר־המשקל נמשך**, זמן האוויר הוא מדידה ישירה ולא הערכה — וזה מה שהורג את מחלקת "זמן האוויר הפנטומי" שבה צניחת־עומס רגעית של נפנוף יד הפכה לשניות של טיסה.

9.3 תקרת משך

`maxFlightSec = 20s` — גבול פיזיקלי גלוי (הקפיצות הארוכות בעולם ~8–10s). חריגה = הערוץ תקוע, המועמד נדחה והחלון נסגר.

10. אישור הנחיתה

המגע מסיים את הטיסה אך לא את הקפיצה. הקפיצה נסגרת רק כש**קו־בסיס יציב שב ומופיע**: דגימות הגובה היחסי שאחרי המגע חייבות להשתרע על `landingStableSec = 2s` לפחות ולהישאר בתוך רצועה של `landingStableBandM = 0.6m` (מקסימום־מינימום). רק אז התוצאה נפלטת, החלון האבסולוטי נסגר, וזמן הנחיתה הקובע הוא זמן המגע.

אם המים סוערים והבסיס אינו מתייצב תוך `landingConfirmTimeoutSec = 6s` — הקפיצה נפלטת בכל זאת, מסומנת `landingConfirmed=false` עם קנס ביטחון (−0.15). מתועד, לא מוסתר. בסוף סשן, `flush` מסיים קפיצה שממתינה לאישור באותו אופן; מועמד באוויר ללא מגע נזרק (`sessionEndedMidFlight`).

11. חישוב הגובה — הצלבת שלושה מקורות

זהו הלב האלגוריתמי של V14. שלושה מקורות מחושבים במקביל, ואז נבחרים בסדר סמכות עם בדיקות פיזיקה בין השלבים.

11.1 שלושת המקורות

מקור	נוסחה	תנאי קיום
אבסולוטי (סמכותי לשיא)	`maxAbs − median(postLandingAbs)`	הערוץ "בריא": ≥2 ערכים מובחנים, יש דגימות גם בטיסה וגם אחרי הנחיתה, והשיא מעל העוגן. עוגן הנחיתה הוא **חציון** הדגימות שאחרי המגע — עמיד לספריי ולצ'וף.
יחסי	`maxRel − baselineMedian`	קיים קו־בסיס (חציון לפני ההמראה) ושיא יחסי מעליו.
בליסטי	`h = g·T²/8  (g=9.80665)`	נגזר מזמן האוויר בלבד — גובה של מסלול בליסטי סימטרי. זמין רק אם `allowBallisticHeightFallback` פעיל, ובכפוף לשער הגיבוי (11.4).

11.2 התקרה הבליסטית — פיזיקה כבדיקת שפיות

$$\text{ballisticCeiling} = (g \cdot T^2/8) \times \text{maxHeightBallisticFactor}\ (1.3)$$

עפיפון מסוגל רק *להאריך* זמן אוויר עבור גובה נתון (הוא מוסיף עילוי, לא מקצר את הנפילה), ולכן שום קפיצה אמיתית אינה גבוהה משמעותית מהגובה הבליסטי של זמן־האוויר שלה. מקור לחץ שמדווח מעל התקרה הוא רעש חיישן — הוא נזרק והבחירה נופלת למקור הבא. מקדם ה־1.3 מותיר מרווח לרעש מדידה לגיטימי.

11.3 רצפת האמון של הערוץ האבסולוטי

$$\text{absoluteCeiling} = \max(\text{ballisticCeiling}, \text{absoluteTrustFloorM} = 2.5\text{m})$$

תגובת־המדרגה של מד־הגובה האבסולוטי גורמת לקשתות שלו לחרוג בקפיצות קצרצרות בכ־2 מ' מעבר לבליסטי — וזו התנהגות אמת של החיישן, לא רעש (קפיצות "2 מ'" בלוג היבשה הן בדיוק החריגה הזו, ומשמשות כ־ground truth). לכן עד 2.5 מ' הערוץ האבסולוטי מתקבל **על סמכות עצמו**; מעל לכך — זמן האוויר חייב לתמוך בו דרך התקרה הבליסטית.

11.4 שער הגיבוי הבליסטי — "ה־IMU פותח, הלחץ מאשר"

גובה בליסטי הוא תזמון־IMU בלבד — אף ערוץ לחץ לא מדד עלייה. לכן שני תנאי־נגד, עם `ballisticCorroborationFraction = 0.4`:

- **סתירה יחסית** — אם הערוץ היחסי *כן* מדד (יש בסיס ויש שיא) והעלייה שראה קטנה מ־40% מהגובה הבליסטי → דחייה **בכל גובה** (`relativeContradictsBallistic`). פרק היד איבד משקל אבל השעון לא עלה — אלה ניעורים ונפנופים.
- **חוסר גיבוי** — גובה בליסטי מעל 2.5 מ' ללא אף ערוץ לחץ שראה ≥40% ממנו → דחייה (`ballisticUncorroborated`). קפיצה אמיתית בגובה כזה מחזיקה את החלון האבסולוטי פתוח באוויר ומופיעה בברומטר — היעדר מוחלט של עדות לחץ הוא הוכחת פנטום.

11.5 סף הספירה של המשתמש

הגדרת "מאיזה גובה לספור" (1 / 1.5 / 2 מ', `minRiseM`) היא **חלק מנוסחת הזיהוי, לא מסנן תצוגה**: קשת שהסתיימה מתחת לסף נדחית (`belowMinRise`) ואינה קיימת בתוצאות. המפתח `v13MinRiseM` משותף כך שבחירת המשתמש הקיימת עוברת כמות שהיא.

11.6 סיכום זרימת הבחירה

```
airtime = touchdown − takeoff
guard airtime ≥ 0.4s

if healthy(absolute) && hAbs ≤ max(ballistic×1.3, 2.5m)   → height = hAbs  (src=absoluteAltitude)
else if hRel ≤ ballistic×1.3                              → height = hRel  (src=relativeAltitude)
else if fallbackEnabled
        && !(relMeasured && relRise < 0.4×ballistic)      // סתירה — דחייה בכל גובה
        && (ballistic ≤ 2.5m || anyPressure ≥ 0.4×ballistic)
                                                          → height = g·T²/8 (src=ballistic)
else → REJECT (noHeightSource)

guard height ≥ minRiseM                                   // סף המשתמש = חלק מהנוסחה
```

12. מדדים נלווים וציון הביטחון

12.1 מדדי התוצאה (V14Jump)

- **זמן שיא (apex)** — זמן השיא האבסולוטי אם קיים, אחרת היחסי, אחרת אמצע הטיסה; תמיד נקטם לתחומי [takeoff, touchdown] (הדגימה האבסולוטית "המוחזקת" שנמסרת בפתיחת החלון עלולה לשאת חותמת מעט לפני ההמראה).
- **סיבובים** — rotationIntegral / 2π , מעוגל לשלם בשכבת התצוגה.
- **מרחק** — Haversine בין נקודת השיגור לנקודת הנחיתה כשיש שתי קואורדינטות; אחרת speed×airtime כשיש רק מהירות שיגור; אחרת אין.
- **מהירויות** — מהירות ה־fix הקרוב להמראה ולנחיתה (±2.5s).
- **דיאגנוסטיקה מלאה** — pop, עוצמת פגיעה, שיא ג'י, שיא ג'ירו, בסיס יחסי, שיא ועוגן אבסולוטיים, שני מועמדי הגובה (hRel/hAbs), מקור הגובה, זמן ההשהיה מפליטה לנחיתה.

12.2 נוסחת הביטחון

```
confidence = 0.60                          // בסיס: כל השערים עברו
           + 0.05  אם נרשם pop impulse
           + 0.15  אם קיים גובה אבסולוטי בריא
           + 0.10  אם היחסי ראה ≥ minRise/2
           + 0.05  אם יש GPS בשיגור
           − 0.15  אם הנחיתה לא אושרה (timeout / nextTakeoff / flush)
clamp → [0.05, 0.95]                       // מדווח למשתמש כ־100×
```

ההיגיון: הביטחון מודד **כמה ערוצים בלתי־תלויים הסכימו**. קפיצה עם pop, אבסולוטי בריא, גיבוי יחסי ו־GPS מגיעה ל־0.95; קפיצה מינימלית שעברה את השערים אך נשענה על ערוץ יחיד נשארת סביב 0.6.

13. עמידות למים ולארטיפקטים

ארבע שכבות הגנה בלתי־תלויות על ציר המים:

1. **מסנן קפיצות־מדרגה על הערוץ היחסי** — צעד של יותר מ־ relStepRejectM = 10m מהדגימה האחרונה שהתקבלה הוא ספייק לחץ של טבילה (טבילה אמיתית = 20–400 מ' בטיק אחד; שום קפיצה אמיתית לא). הדגימה נזרקת לפני שתרעיל את החציון או את השיא. relStepReacceptCount = 3 דגימות עוקבות מחוץ לתחום מתקבלות כרמה החדשה — שינוי datum אמיתי מתייצב, טבילה קופצת חזרה.
2. **חציון במקום ממוצע** — גם ספייק שחמק דרך המסנן אינו מזיז את קו־הבסיס ואת עוגן הנחיתה.
3. **חסימת טבילה בהמראה** — דיווח מגע־מים פעיל חוסם פתיחת מועמד.
4. **רצועת יציבות הנחיתה** — ספריי וצ'וף אחרי נחיתה דוחים את האישור עד להתייצבות (או עד ה־timeout המתועד).

14. האדפטר: שעונים, דגימה וריבוי־תהליכונים

14.1 יישור שעונים — התנאי לכך שהכול יעבוד

כל ההשוואות במנוע הן על ציר זמן אחד (שעון המוטיון). לוגים ישנים חותמים ברומטר/אבסולוטי על שעון אחר (epoch) — בלי יישור,

יציבות־הנחיתה וחלון־הבסיס פשוט לעולם אינם מתלכדים, בשקט. הכלל: חותמת חיישן בטווח ±60s מהשעון המוטיוני נאמנת כפי שהיא; רחוקה מכך — נופלת לזמן המוטיוני, ובזרם האבסולוטי הישיר נבנה בסיס־היסט (סנכרון נקודת־ייחוס ראשונה) שממנו מחושבים כל הזמנים הבאים.

14.2 הברומטר בקצב האמיתי שלו

ערך הברומטר "מוחזק" (ZOH) על כל שורת IMU ב־200Hz. האדפטר מעביר אותו למנוע **רק כשחותמת הברומטר עצמו מתקדמת** — אחרת חלון החציון היה מתמלא ב־200 עותקים בשנייה של אותה דגימה ומאבד את משמעותו הסטטיסטית.

14.3 מסירת הדגימה המוחזקת בפתיחת חלון

בנתיב ה־fallback (ללא זרם אבסולוטי ישיר — replay ולוגים ישנים), ברגע פתיחת החלון נמסרת מיידית הדגימה האבסולוטית המוחזקת האחרונה — חיקוי מדויק של ה־callback הראשון המיידי של CMAltimeter בזרם החי. בלי זה, קפיצה קצרה מ־1.5s בקצב 1Hz עלולה להסתיים בלי אף דגימה אבסולוטית.

14.4 אתחול זרם ≠ אתחול מנוע

`absoluteAltitudeStreamDidRestart` נרשם ללוג **ואינו נוגע במנוע**. גרסה קודמת איבדה סשנים שלמים לאתחולי watchdog; ב־V14 הערוץ פשוט ממשיך להזין כשהחלון פתוח, ובדיקת הערכים־המובחנים שופטת את שמישותו בזמן הסיום.

14.5 מודל התהליכונים

- תור טורי אחד לכל עבודת המנוע — למנוע עצמו אין מנעולים בכלל.
- שלושה מנעולים דקים באדפטר: מצב תצוגה (`idle/riding/airborne`), מהירות אחרונה, ודגל החלון האבסולוטי (הנקרא מ־callback של החיישן מחוץ לתור).
- המרות זמן: זמן קיר ⇔ מונוטוני דרך עוגן זמן־אתחול קבוע (`bootWallClock`), כך שחותמות התוצאה למשתמש הן זמן־קיר אמיתי.

15. טבלת הקונפיגורציה המלאה

כל ערך ניתן לדריסת־שדה דרך UserDefaults (מפתחות `v14*` ; סף הגובה משתמש במפתח המשותף `v13MinRiseM`), עם קיטום לטווח המותר.

פרמטר	ברירת מחדל	טווח	תפקיד
minRiseM	1.0	1 / 1.5 / 2	סף הספירה של המשתמש — חלק מנוסחת הזיהוי
baselineWindowSec	4.0	3–5	חלון החציון הנע של קו־הבסיס
minBaselineSamples	2	—	מינימום דגימות לבסיס תקף
popG	1.6	1–4	סף אימפולס ה־pop (ביטחון)
popLeadSec	0.8	—	חלון ה־pop לפני חוסר־המשקל
requirePop	false	—	הפיכת ה־pop לשער קשיח
unweightG	0.75	0.3–0.95	תקרת העומס המוחלק בהמראה
unweightSec	0.35	0.15–1.0	משך חוסר־המשקל הנדרש
loadSmoothingSec	0.15	—	חלון ממוצע־נע של העומס
blockTakeoffWhileSubmerged	true	—	טבילה חוסמת המראה
landingImpactG	1.9	1.2–5	סף פגיעת הנחיתה (גולמי)
flightLoadCeilingG	0.85	0.6–1.2	חזרת־עומס המסיימת טיסה
flightEndHoldSec	0.25	0.1–1.0	משך ההחזקה של חזרת העומס
landingStableSec	2.0	1–4	משך הבסיס היציב לאישור נחיתה
landingStableBandM	0.6	0.2–2	רצועת היציבות (max−min)
landingConfirmTimeoutSec	6.0	—	פליטה בכל־זאת במים סוערים
minAirtimeSec	0.4	0.2–3	גבול פיזיקלי תחתון לזמן אוויר
maxFlightSec	20.0	4–40	תקרת משך טיסה
retriggerGuardSec	0.8	—	שומר בין נחיתה לקפיצה הבאה
relStepRejectM	10.0	—	סף דחיית מדרגת־טבילה בערוץ היחסי
relStepReacceptCount	3	—	דגימות עוקבות לקבלת datum חדש
allowBallisticHeightFallback	true	—	הפעלת מקור הגובה הבליסטי
maxHeightBallisticFactor	1.3	—	מקדם התקרה הבליסטית
absoluteTrustFloorM	2.5	—	רצפת האמון של הערוץ האבסולוטי
ballisticCorroborationFraction	0.4	—	שיעור הגיבוי הנדרש מערוץ לחץ
takeoffMaxGyroRadS	8.0	—	שער טורבולנציה — סיבוב פרק מרבי
takeoffMaxLoadG	4.0	—	שער טורבולנציה — עומס גולמי מרבי
takeoffScanBackSec	0.3	—	חלון הסריקה לאחור מההמראה
takeoffScanForwardSec	0.6	—	חלון הבדיקה הקדמית בטיסה
minTakeoffGpsSpeedMS	3.0	—	שער־העזר GPS (רק כשיש fix)
historySec	60.0	—	אופק היסטוריית לחץ/GPS
gpsMatchToleranceSec	2.5	—	סבילות התאמת fix להמראה/נחיתה

16. ולידציה, תקלות שטח וההקשחות

16.1 לוגי הייחוס (replay לא־מקוון, `--engine v14`)

לוג	תוצאה
מים 14.7.2026, 47.8 דק'	לאחר כל ההקשחות: 7 קפיצות, כולן בשלב רכיבה, כולל שתי הקפיצות המאומתות־IMU; אפס פנטומים מהחוף
יבשה, 2 קפיצות ידועות ~2 מ'	2/2 בגובה ~2.1 מ', מקור `absoluteAltitude` (חריגת תגובת־המדרגה המשמשת כ־ground truth לרצפת האמון)
מים 8.7.2026, 48 דק'	5 קפיצות (המנוע הקודם ייצר 36 פנטומי חימום על אותו לוג)
לוג אפס־קפיצות	0 — ללא שינוי לאורך כל ההקשחות
3 סשני רעש (ניעורים, נפילת שעון, זריקות)	0 קפיצות אחרי שער הטורבולנציה (קודם: פנטום אחד בכל סשן)

16.2 שתי ההקשחות שנולדו מסשן חי

סשן־רעש חי ראשון (16.7.2026) חשף שני מצבי כשל: **(א)** ניעור אלים (27g, 45 rad/s) פתח מועמד שהחמיץ את המגע ונסגר ב־load-return אחרי 2.9s ← גובה בליסטי 10.4 מ' התקבל, כי התקרה הבליסטית יחסית לבליסטי ואינה מגבילה מגבילה עצמו; **(ב)** נפילת שעון (0.5s נפילה חופשית אמיתית, פגיעת 16.6g) נמדדה כ־1.85 מ' מהערוץ האבסולוטי — שמדד באמת את הנפילה. המענה:

- **שער הגיבוי הבליסטי** (סעיף 11.4) — סוגר את (א): בליסטי ללא עדות לחץ נדחה, וסתירה יחסית דוחה בכל גובה.
- **שער הטורבולנציה** (סעיף 7.4) — סוגר את (א) ואת (ב) בשורש: גם ניעור וגם תנועת־זריקה של שעון הם אלימים בחלון ההמראה, כך שהמועמד כלל אינו נפתח — ולכן גם החלון האבסולוטי לא, מה שמחסל בדרך גם פנטומים מרעש הערוץ האבסולוטי.

לאחר שתי ההקשחות: שלושת סשני הרעש נקיים לחלוטין, ולוגי המים והיבשה ללא שינוי בקפיצות האמיתיות.

16.3 בדיקות אוטומטיות

- `EngineE2ESelfTest` — 5 תרחישי V14 ייעודיים (מתוך 20): קפיצה נקייה, טבילה, נחיתה רכה, ערוץ קפוא, קפיצות עוקבות.
- `WatchLiveSessionCoreChecks` — 4 בדיקות V14 על נתיב הסשן החי, כולל אמולציית החלון לפי־דרישה דרך `isAbsoluteWindowOpen`.

17. מגבלות ידועות

- **ספי הטורבולנציה לא כוילו על טריקים אגרסיביים** — קייטלופים ו־handle-passes עשויים לחצות 8 rad/s בפרק היד. אם סשן אמיתי מאבד קפיצות עם `reason=takeoffTurbulence`, ההוראה המתועדת היא להעלות את `takeoffMaxGyroRadS` תחילה.
- **פער חי־מול־replay** — נצפתה אי־התאמה בין אותו לוג בזמן־אמת ובהרצה לא־מקוונת שסיבתה טרם אותרה במלואה; ה־replay בודק את הלוגיקה אך אינו תופס באגים ייחודיים לצנרת החיה.
- **כיסוי GPS מקוטע מחליש את שער־העזר** — במקומות סגורים fix מגיע כל ~6s מול סבילות של 2.5s, כך שהשער פועל "בהטלת מטבע". הוחלט במודע לא להרחיב את הסבילות — GPS נשאר מדדים־בלבד ברוחו.
- **רעיון שער יציבות־עוגן נבחן ונדחה בנתונים** — פיזור העוגן האבסולוטי אחרי נחיתת־מים אמיתית (12.3 מ', צ'וף וספריי) גדול בהרבה מזה של נפילת־רצפה (0.27 מ') — השער היה פועל הפוך מהמצופה.

סיכום: V14 מחליף "סף יחיד על ערוץ יחיד" בהצלבה שיטתית: ה־IMU קובע את הזמן, הלחץ מאשר את הגובה, הפיזיקה תוחמת את שניהם, וכל ערוץ נבדק לבריאות לפני שמאמינים לו. כל סף גלוי, כל דחייה מנומקת בלוג, וכל החלטת תכנון נטועה בכשל שטח מדוד.