



שימוש בסימולציות במערכות מורכבות

מהבטחות טכנולוגיות ועד ל"נס על ההדסון"

הנדסת מערכות, ניהול פרויקטים, והגורם האנושי

הסימולטור העתיק בעולם



כלל הברזל בהנדסת סימולציות זהה: מדל אך ורק את מה שרלוונטי לשאלה ההנדסית שעליה נדרש מענה. כל תוספת ריאליזם מעבר לכך היא בזבוז משאבים.

דחליל אינו זקוק לפעימות לב. הוא זקוק רק למספיק צורה כדי להשיג את המטרה מבלי לשלם את העלות או לקחת את הסיכון של הצבת אדם אמיתי בשדה.

מהי סימולציה?

דימוי של מערכת או תהליך בעזרת **מודלים מתמטיים**, תרחישים דיסקרטיים או כלים המדמים את התנהגות המערכת האמיתית.



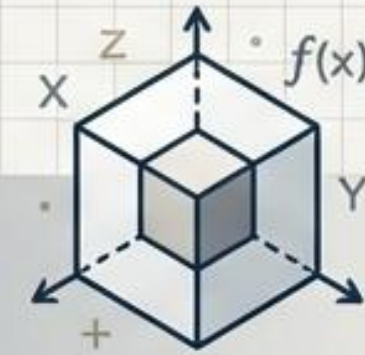
High Fidelity

סימולציה היברידית - שילוב מרכיבים אמיתיים של המערכת, ציוד בדיקה ייעודי (SIL / HIL).



Medium Fidelity

דימוי דינמי חלקי - סימולציית תוכנה לחלק ממרכיבי המערכת.



Low Fidelity

מודל מופשט - דימוי המדמה התנהגות סטטית בלבד.

ערך לארגון: שורת הרווח



חיסכון במשאבים

מניעת ניסויים יקרים ומורכבים
(כגון טילים או מנהרות רוח)
וחיסכון בשעות הפעלה של ציוד
פיזי.



הורדת סיכונים

בחינה בטוחה של נקודות קיצון,
התנהגות במצבי תקלה, ופרמטרים
בטיחותיים מסוכנים, הרבה
לפני ניסויי השטח.



קיצור זמנים

מאפשר עבודה מקבילה והקדמת
אינטגרציות עוד בטרם החומרה
הסופית זמינה (הורדת סיכונים
בשלב מוקדם).

שתי מטרות העל לשימוש בסימולציה



2. אימון משתמשים

- הכשרת מפעילי המוצר או המערכת בסביבה מבוקרת.
- חיסכון במשאבים יקרים ומניעת סיכונים למפעיל ולמערכת.



1. תמיכה בפיתוח ובדיקות

- חלק בלתי נפרד מתהליך הנדסת הבדיקות של המערכת.
- משמש לאישור תכן, שחזור תקלות, בחינת התנהגות דינמית ואופטימיזציה.

שימושים טכניים במחזור הפיתוח

אימות ותיקוף (V&V)

- בדיקות תוכנה/חומרה בחוג (SIL / HIL)
- אימות דרישות בתנאי קצה
- השוואה לעולם האמיתי

תמיכה בתכנ (Design)

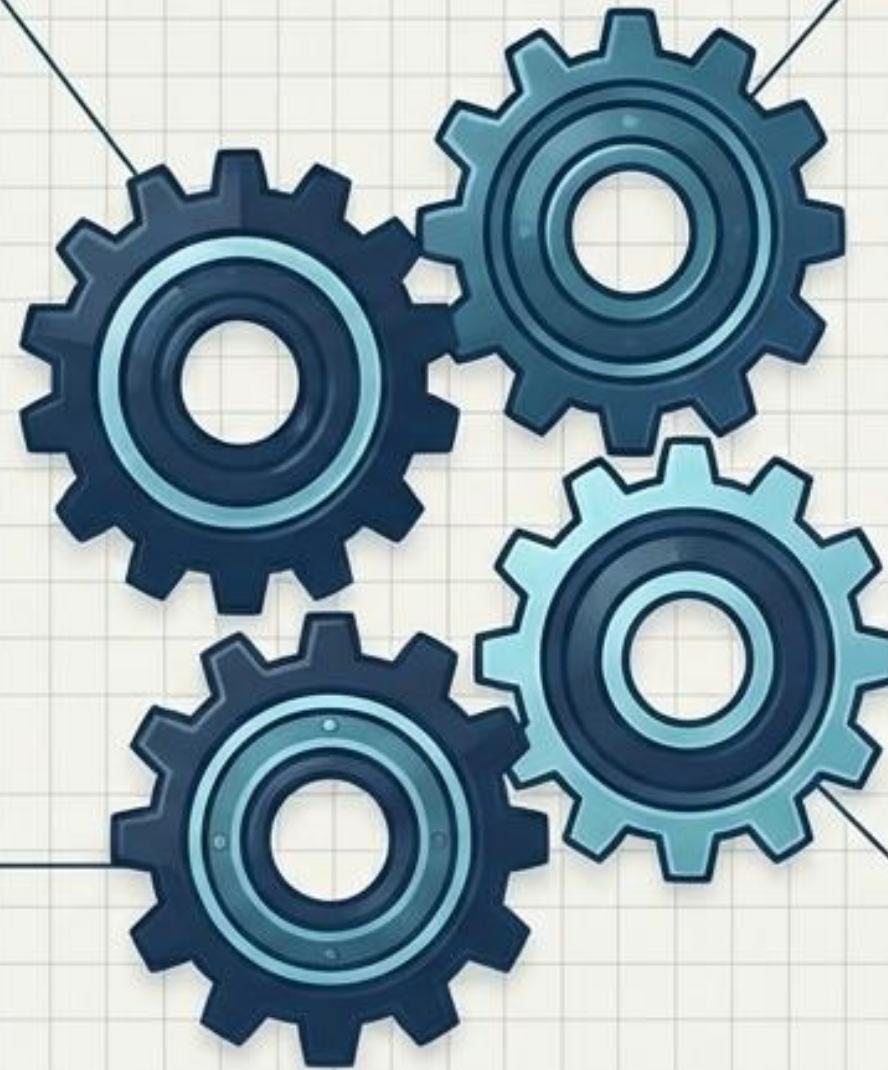
- הערכת ארכיטקטורה
- ביצוע Trade-offs
- זיהוי סיכונים מוקדם (Early risk detection)

אופטימיזציה (Optimization)

- חיפוש פרמטרים אופטימליים
- ניתוחי מונטה-קרלו (Monte Carlo analysis)
- איזון בין ביצועים לעלות

כיוול פרמטרים (Tuning)

- כיוול הגברי בקרים (PID)
- כיוון ספי התרעה (Threshold tuning)
- שיפור דיוק המודל



רמת הדימוי: מפרמטר בודד ועד לתאום דיגיטלי

הרמה והמורכבות נקבעות נטו לפי השאלות ההנדסיות שדורשות מענה.



משוואת הכדאיות: ההשקעה מול התמורה

ההשקעה

- עלות פיתוח הסימולטור בזמן ובכסף
- מורכבות התחזוקה
- התאמת מודלים



התמורה

- קיצור משך הפיתוח
- העלאת איכות המוצר הסופי
- הקטנת סיכוני אינטגרציה

חוק הברזל: חובה על עלות הסימולציה להישאר קטנה באופן משמעותי בהשוואה לאלטרנטיבות של ניסויים ואישור בעולם האמיתי.

מניע אסטרטגי 1: כלכלה קיצונית וסכנה

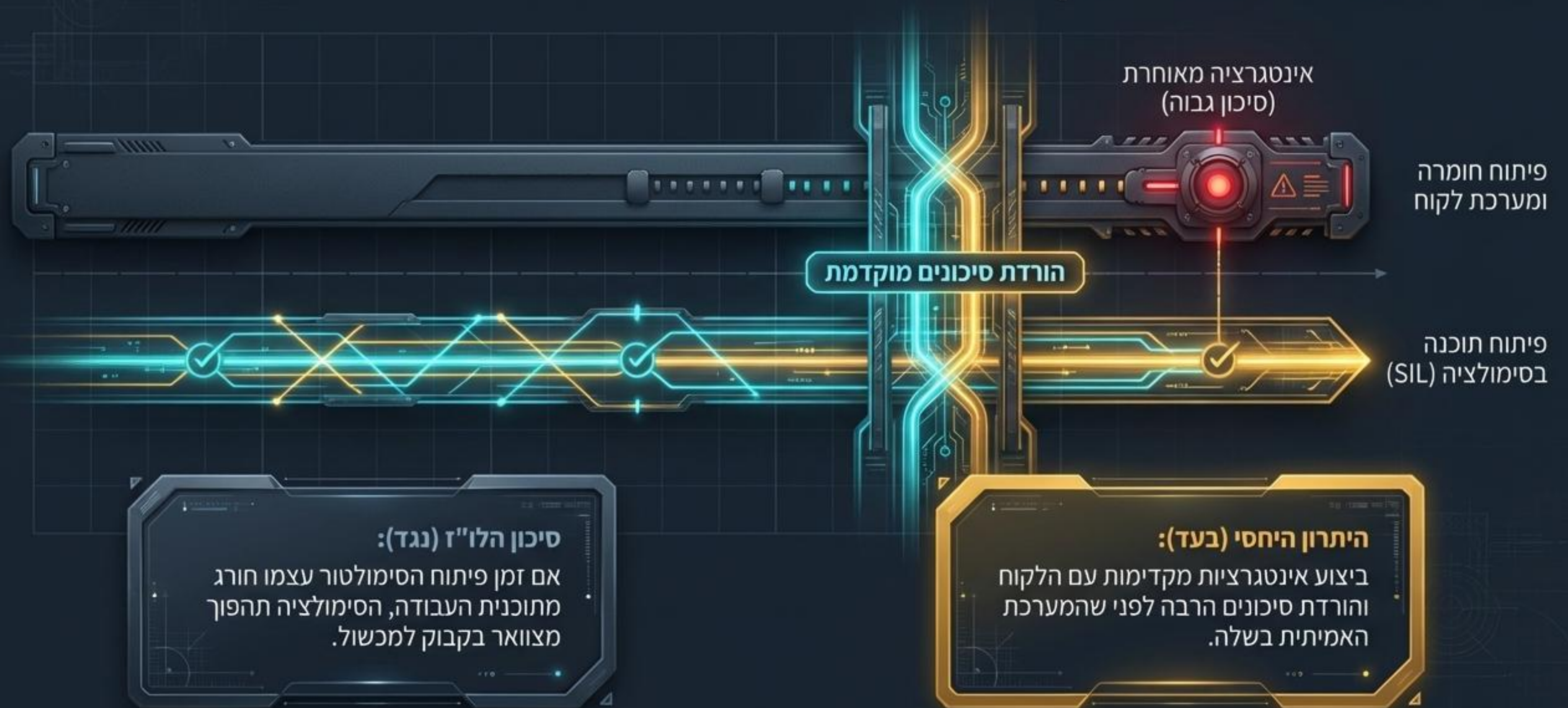
מתי כן לסמלץ? (המציאות יקרה מדי)

- מערכות מורכבות עם ניסויים יקרים במיוחד (טילים, מנחרות רוח)
- חיסכון במרכיבים שעלות הפעלתם קריטית (שעות מנוע, בלאי)
- בדיקת פרמטרים שיש סכנה ממשית לבדיקתם בניסוי חי

מתי לא לסמלץ? (המציאות נגישה)

- מערכות שקל וזול יחסית לבצע אינטגרציות ולבחון ישירות בשטח
- כאשר אנליזת בטיחות (Safety Analysis) נותנת מענה מספק

מניע אסטרטגי 2: שבירת התלות בנתיב הקריטי



מניע אסטרטגי 3: חשיפת המעטפת הבלתי נראית



תנאי קיצון ותקלות:

בדיקת מערכת בתנאי לחות חריגים, לחץ קיצוני, ושחזור מדויק של תקלות מהשטח שאינן ניתנות לשחזור במעבדה.

אופטימיזציה ורובוסטיות:

חקר ביצועים, מציאת נקודת עבודה אופטימלית, ומבחני הנדסת אנוש וממשק (השהיות, רגישות ניהוג).

השלמת פערי מידע:

בדיקת ביצועים ללא נתוני טלמטריה מלאים, תוך שימוש בפרמטרי כיול להשלמת התמונה המערכתית.

ניהול סיכונים מבוסס זמן: Shift-Left

ללא סימולציה



עם סימולציה



Shift-Left

מאפשר ביצוע אינטגרציות מקדימות להורדת סיכונים כאשר המערכת הסופית עדיין אינה זמינה.

מוריד את מורכבות השינוי: הרבה יותר זול לתקן באג בשלב מוקדם בסימולציה מאשר לשנות חומרה לאחר ניסוי מערכתי נכשל.

משוואת הכדאיות: עלות מול תועלת

[עלות וזמן אלטרנטיבו
[הבדיקה במציאות]



[עלות וזמן פיתוח
[הסימולציה]



האם הסימולציה תקצר את משך הפיתוח הכולל?

האם היא תעלה משמעותית את איכות המוצר הסופי?

מהי מורכבות העדכון של הסימולציה כאשר המערכת האמיתית משתנה ומתבגרת?

המטרה אינה להחליף את המציאות לחלוטין, אלא למצוא את נקודת האיזון שבה הקטנת הסיכון ההנדסי עולה על ההשקעה בפיתוח הכלי.

האשליה השבורה: סכנות המודל המדומה

מלכודת הקירוב (False Security):

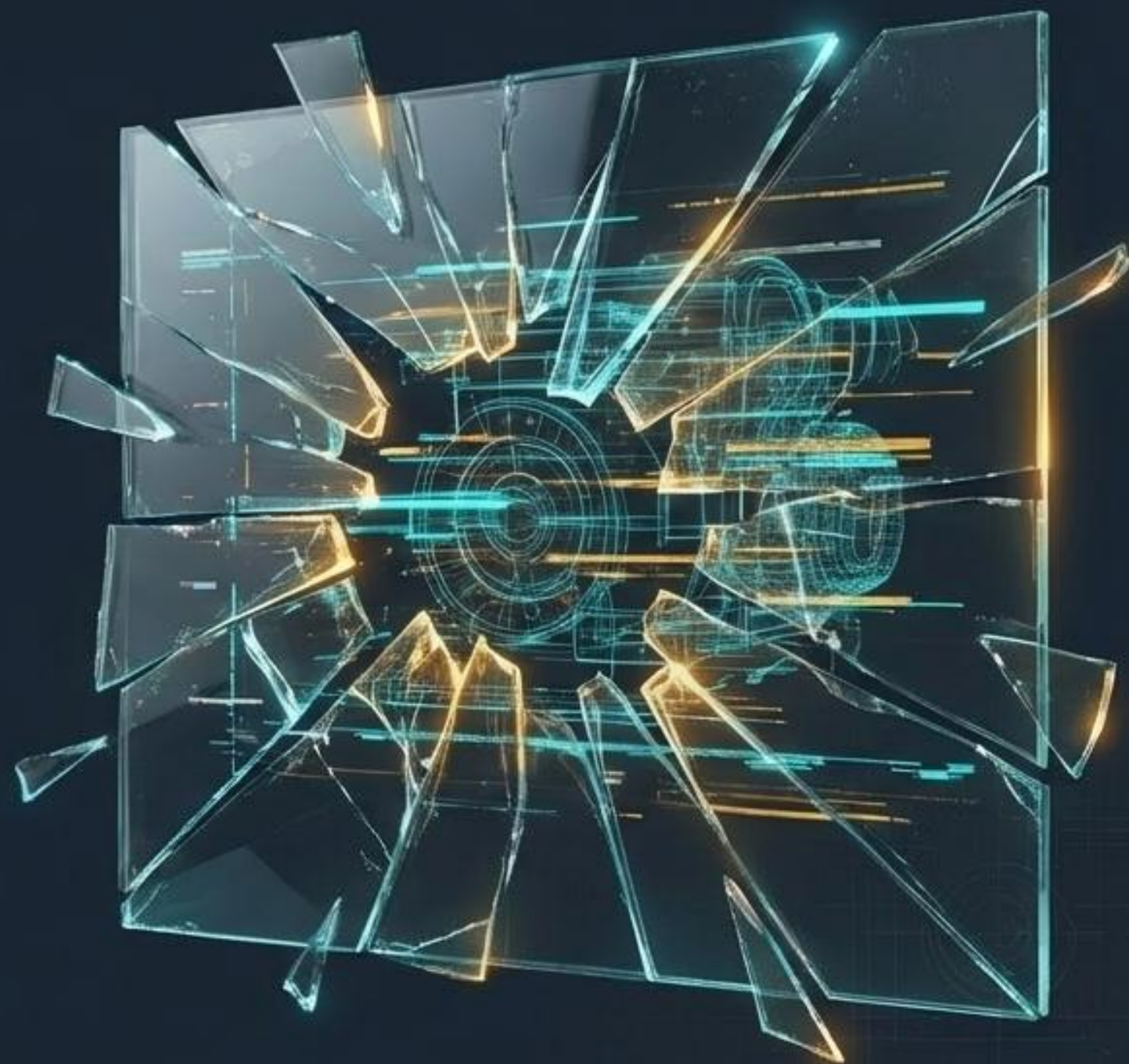
הסקת מסקנות מוטעות לחלוטין עקב שגיאה בסימולציה, הנחות שגויות, או קירוב מתמטי שאינו מתקיים במציאות.

מלכודת העדכון האינסופי:

דרישה למשאבים עצומים לעדכונים רצופים של הסימולטור עקב שינויים תכופים בתכן המערכת האמיתית.

מלכודת הלו"ז:

זמן הקמה ארוך שעלול להפוך את הסימולציה לצוואר בקבוק, במיוחד במערכות עתירות חומרה שדורשות צב"ד ייעודי לייצור.



מטריצת ההחלטות להנדסת בדיקות

מורכבות בדיקה במציאות

חובה לסמלץ

- מערכות לא זמינות
- סכנות בטיחותיות
- עתירות תוכנה (COTS)
- שעות מנוע יקרות.

צב"ד ייעודי / בדיקה פיזית

- מערכות עתירות חומרה ייעודית
- מותאם לשלבי ייצור ותחזוקה.

שילוב חלקי / SIL

- אינטגרציה עם לקוח
- ממשקי אנוש
- חקר ביצועים
- שחזור תקלות.

להימנע מסימולציה

- מערכות שקל לבחון בשטח
- מוצרים עם תכן משתנה בתדירות גבוהה
- אנליזת בטיחות קיימת.

מורכבות וסיכון אינטגרטיבי

מטריצת קבלת החלטות: האם הפרויקט שלך מתאים?



מתי נכון להשתמש בסימולציה? מטריצת כדאיות



חוק אצבע: עלות הסימולציה בזמן ובכסף חייבת להיות קטנה בהשוואה לפרויקט החלופי של בדיקות פיזיות בלבד.

אשליית המודל

מודל מתמטי אינו תחליף למציאות מורכבת.

דחליל מהווה סימולציה של אדם עבור הציפור. הוא מספק קירוב ויזואלי מוצלח, אך הוא חסר דינמיקה, חסר תגובה, ואינו נתון לעומס או קבלת החלטות.

סימולציה טובה ככל שההנחות שעליהן היא מבוססת מדויקות (Fidelity). כאשר אנו שוכחים שזהו רק "דחליל", אנו חשופים לסכנה של הסקת מסקנות מוטעות.



השורה התחתונה

סימולציה מערכתית אינה מטרה בפני עצמה, אלא כלי אסטרטגי לניהול סיכונים.



3. כדאיות כלכלית

ודאות מוחלטת שההשקעה בפיתוח נמוכה ממשאבי הניסוי והטעייה הפיזיים שנחסכו.



2. עמידה בתוכנית העבודה

הבטחה שהסימולטור מאיץ את הפרויקט ולא הופך לצוואר בקבוק המעכב שחרור גרסאות.



1. ביטחון הנדסי

הבנה עמוקה של מגבלות הסימולציה והפער בינה לבין המערכת האמיתית.



מהירות שיוט: 828 קמ"ש

מהירות נחיתה: 140 קשר

סאלי: נס על ההדסון

סכנת האמון העיוור: כשסימולציות מושלמות פוגשות מציאות שבורה

ניתוח הנדסי של מגבלות סימולציה, מודלים מתמטיים והגורם האנושי



מקרה בוחרן: נס על ההדסון

(RAF#19117871)

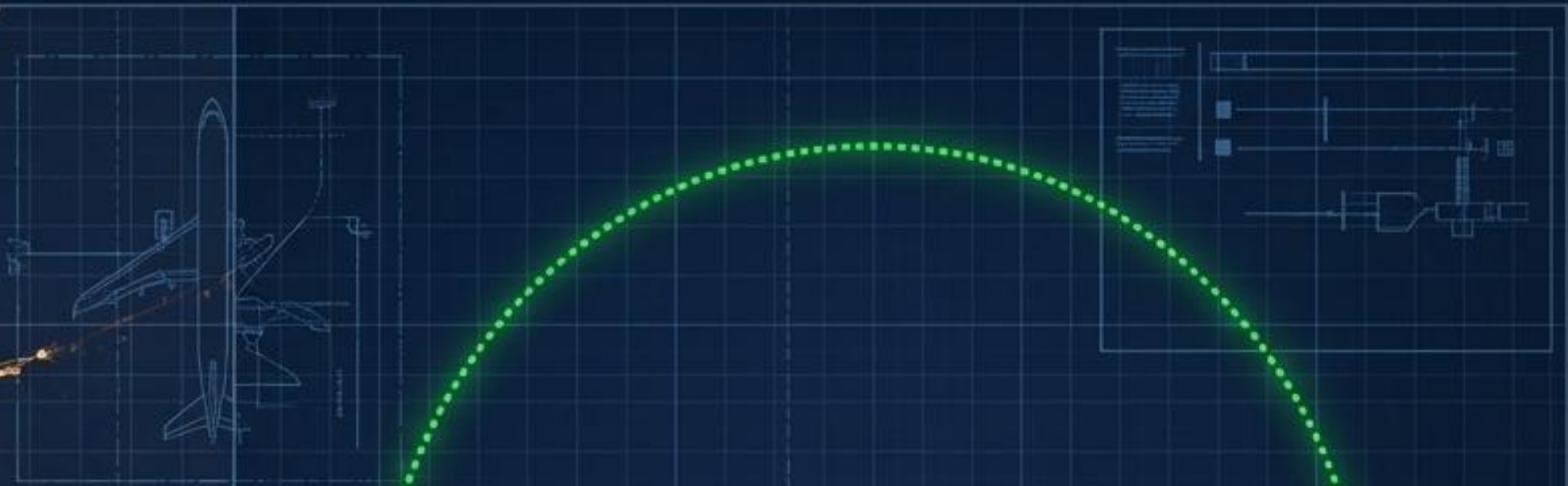
טיסת 1549 Airways ממריאה מניו יורק.

פגיעת ציפורים גורמת לאובדן דחף בשני המנועים בגובה נמוך.

הקברניט צ'סלי "סאלי" סאלנברגר מבצע נחיתת חירום מוצלחת על נהר ההדסון, ומציל את כל 155 הנוסעים.

**השאלה ההנדסית של החוקרים:
האם ניתן היה לחזור לנחיתה
בטוחה בשדה התעופה?**

הכישלון של הסימולציה הממוחשבת



Bird Strike
הזות לתים



LaGuardia
מוחטיברו

הסימולציה הניחה החלטה ופעולה רובוטית ברגע האפס. המודל התעלם לחלוטין מהגורם האנושי האנושי. הטייסים בסימולציה תופעלו כ"זחללים" מושלמים חסרי זמן שהייה או עיבוד.

סימולציות החקירה הראשוניות (NTSB) הראו תוצאה חד משמעית: המטוס *היה יכול* המטוס *היה יכול* לחזור לנחיתה בטוחה בלה-גווארדיה או בטטרבורו.

(הגורם האנושי) Human-in-the-Loop

מערכות אמיתיות כוללות שיהיו קבלת החלטות (Decision Latency). כדי שהסימולציה תהיה בעלת תוקף במציאות, היא חייבת לכלול:



3. תהליך קבלת החלטות (Decision process) הזמן הנדרש לבצע אבחון תקלות (Troubleshooting) ולשקול חלופות לפני נקיטת פעולה.

2. עומס קוגניטיבי (Cognitive load) תגובת ההלם (Startle effect) והקושי לעבד מידע סותר תחת לחץ קיצוני.

1. זמן תגובה (Reaction time) הזמן הפיזיולוגי שלוקח לקלוט את הגירוי ולהניע את הגוף.

מחיר המציאות: הוספת 35 שניות

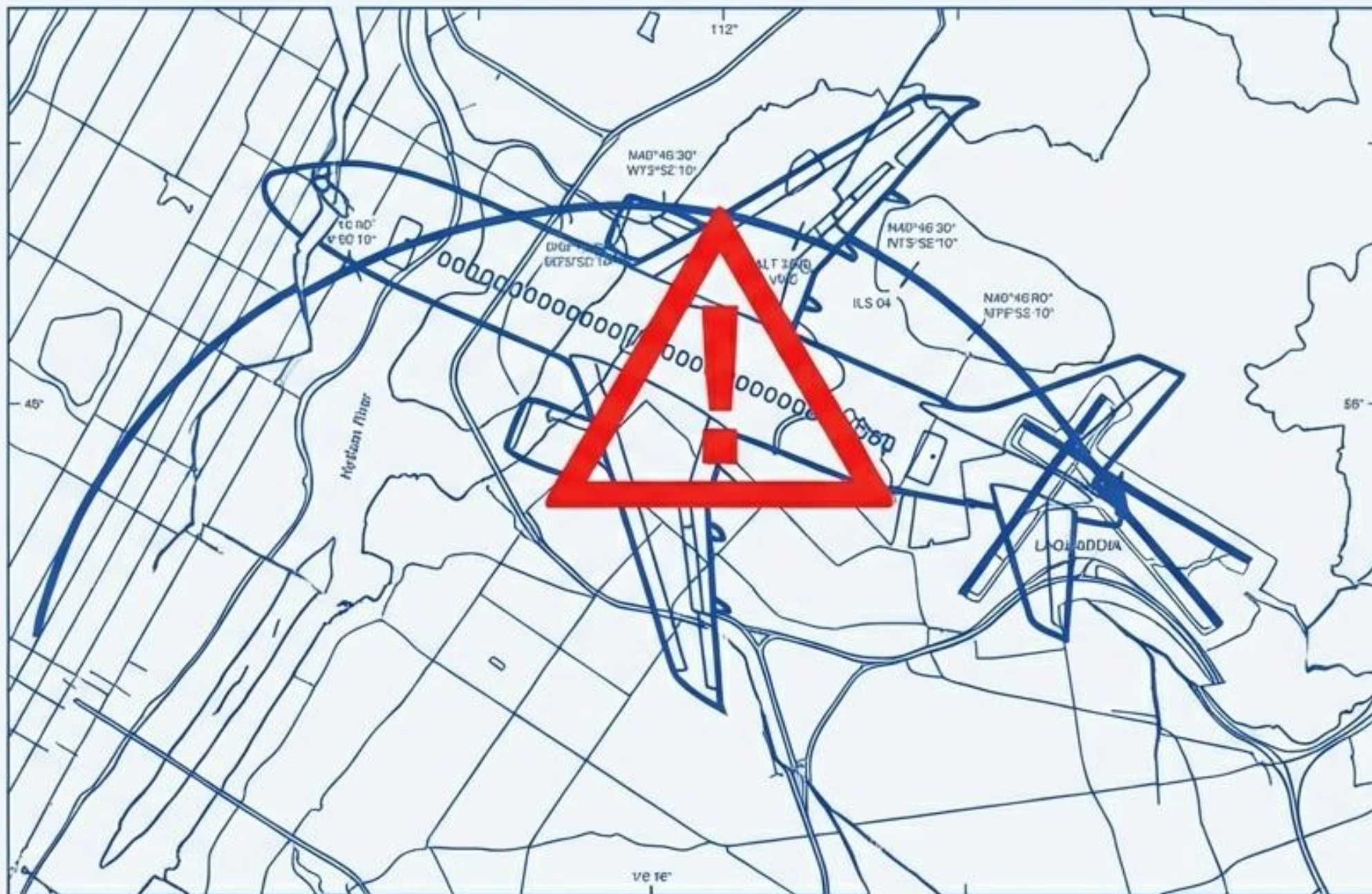
35s

כאשר החוקרים הוסיפו השהיה של 35 שניות לזמן התגובה בסימולציה—כדי לדמות את ההלם, ניתוח המצב וההחלטה האנושית—התמונה השתנתה לחלוטין.

בכל הסימולציות המתוקנות, המטוס התרסק אל תוך מבנים ולא הצליח להגיע למסלול.

מסקנה: קברניט סאלי קיבל את ההחלטה הנכונה והישרדותית היחידה. המודל הראשוני היה שגוי ומסוכן.

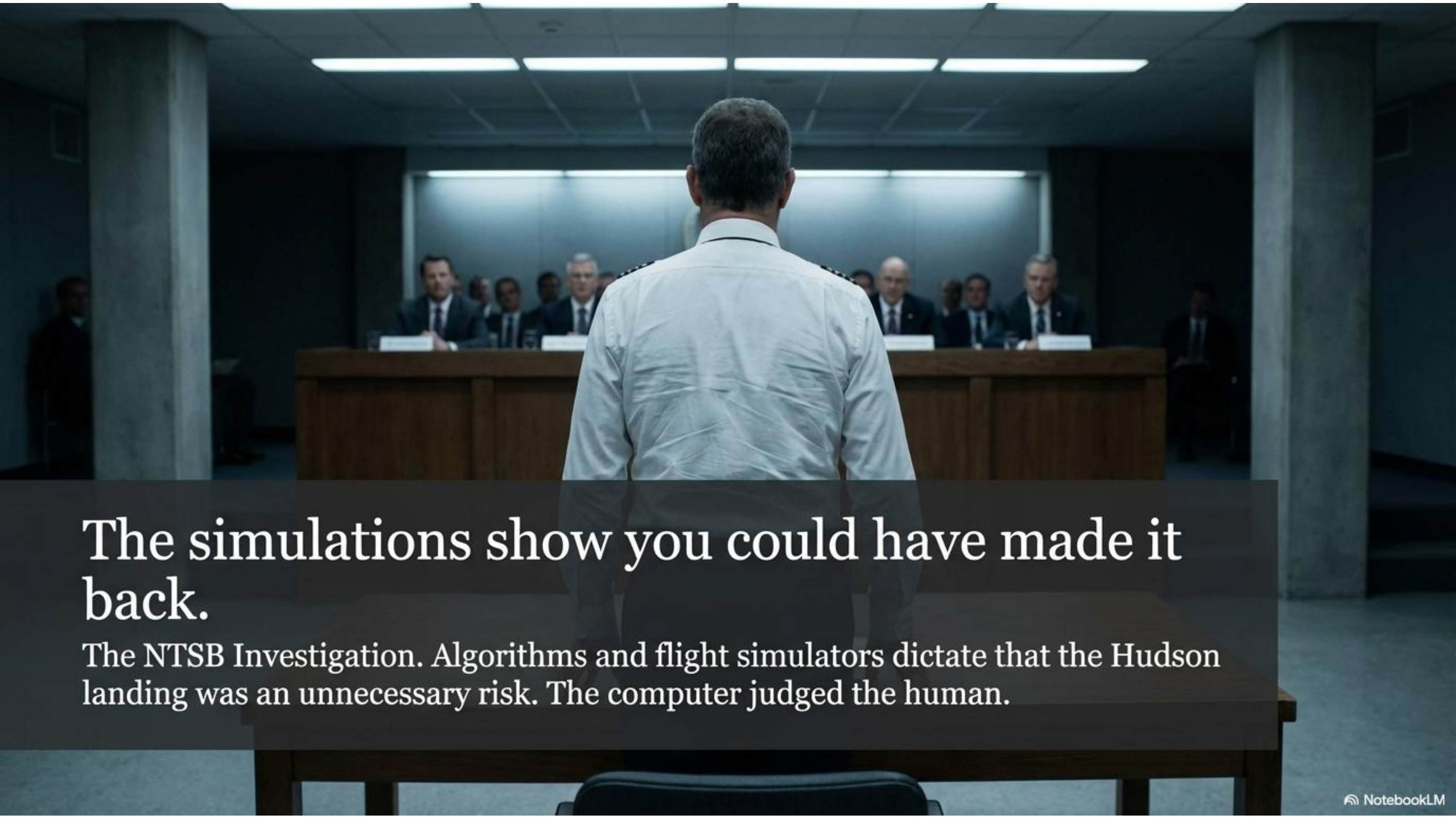
הסכנה מתחילה כשהקירוב ההנדסי לא מתקיים מותקיים במציאות.



סכנות הסימולציה.

המקור הגדול ביותר לסיכון הוא הסקת מסקנות מוטעות עקב שגיאה במודל או "קירוב שלא מתקיים" (Approximation).

כאשר המודל מתעלם ממשתנים דינמיים ואינו משקף את מלוא המורכבות של העולם האמיתי, קבלת ההחלטות הופכת שגויה ומסוכנת.



The simulations show you could have made it back.

The NTSB Investigation. Algorithms and flight simulators dictate that the Hudson landing was an unnecessary risk. The computer judged the human.

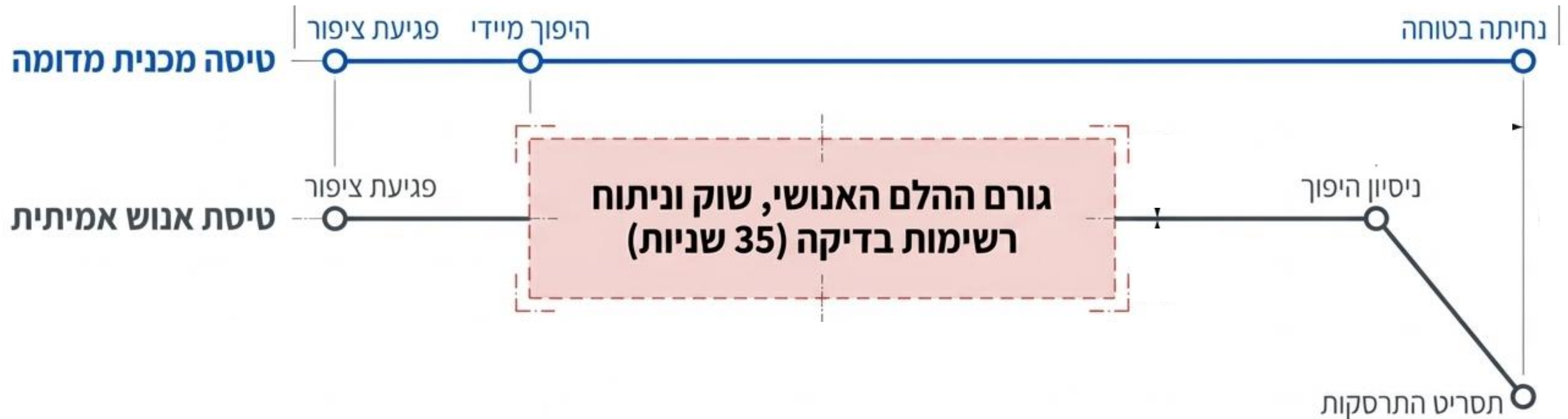
מטריצת הכשל: המחשב מול הטייס המופתע

	המודל המושלם (סימולציית NTSB)	המציאות הכאוטית (טיסה 1549)
זמני תגובה	<p>0 שניות (תגובה מיידית)</p> 	<p>35 שניות (זמן עיבוד אנושי)</p> 
ידע מוקדם	<p>התקלה והתוצאה ידועות מראש לטייס</p> 	<p>אירוע פתאומי, חסר תקדים, "אפקט ההפתעה"</p> 
הנדסת אנוש	<p>התעלמות מוחלטת ממגבלות הקוגניציה</p> 	<p>גורם אנושי קריטי תחת לחץ קיומי</p> 

ההנחה שקורית בסימולטור היא 'קירוב שלא מתקיים' במציאות.

ה-35 שניות החסרות של מציאות אנושית.

הסימולציה של ה-NTSB הניחה תגובה מיידית ורובוטית. היא הסירה באופן בסיסי את "הגורם האנושי". טייסים אמיתיים חווים הלם, מריצים רשימות בדיקה, ומנתחים לפני שהם מתחייבים לתמרונים קריטיים לחיים או מוות.



לחץ לסרט

Factoring in the Human Changes the Math.

When the NTSB investigators were forced to include the 35 seconds of human reaction time, every single virtual flight crashed into the city. The algorithms were technically perfect, but reality is deeply human. Sully's water landing was the only survivable option.

