

מה אפשר לדעת מספקטרום עכבה, ומה אי אפשר לדעת ממנו בשום מכשיר

ספקטרוסקופיית עכבה מודדת מערכת בעשרות תדרים ומחזירה עקומה, ומהעקומה מנסים להסיק מה מתרחש בפנים. זו בעיה הפוכה שהתשובה בה אינה יחידה. המסמך הזה מפריד בין שני סוגי אי הוודאות שקל לערבב ביניהם, מסביר מה חיפוש אבולוציוני משנה ומה הוא לא, ומסכם את מצב התחום בספטמבר 2026 לפי מעמד המקורות ולא לפי הכותרות.

7 בספטמבר 2026 · מהדורה מס' 9 · 3340 מילים

מעמד המסמך

זהו מסמך הרקע של מערכת "היום בקיצור", והוא המקור שהכתבה הראשית מפנה אליו. הוא נכתב בעקבות מחקר עומק שהתקבל ב-6 בספטמבר 2026, אך אינו אותו מסמך: כל טענה שנשארה כאן נבדקה מול מקור ראשוני, וטענות שלא עמדו בבדיקה הוסרו. פרק 14 מפרט מה נדחה ומדוע.

המסמך עבר שני סבבי אימות, והשני נערך אחרי שפרופ' יועד צור מהטכניון, שעבודתו נדונה כאן, מסר ביקורת מקצועית על הגרסה הראשונה של הכתבה. הביקורת הצביעה על טעות עובדתית אחת ועל שלוש החמצות מבניות. כולן טופלו, והכתבה פרסמה תיקון. מה שכתוב כאן הוא סיכום ספרות, לא מחקר מקורי ולא חוות דעת מקצועית. פרק 15 מפרט במפורש מה לא הצלחנו לאמת ואיפה עובר גבול הידיעה שלנו.

תוכן

1. מה מודדים, ולמה
2. הכיוון ההפוך, ושלושת התנאים
3. משפחת הבעיות ההפוכות
4. שני סוגים של אי ודאות, ורק אחד מהם ניתן לתיקון
5. מה מבחן קרמרס-קרוניג בודק, ומה הוא לא
6. רגולריזציה, והתפלגות זמני ההרפיה
7. תכנות גנטי: מה הוא משנה
8. הדקדוק הפיזיקלי, ומה האלגוריתם לא משוחרר ממנו
9. ניסויים משלימים: ארבע בדיקות קונקרטיות
10. CPE: הרכיב שכולם מפרשים ואיש לא הוכיח
11. הקו הישראלי: ISGP
12. חזית 2024 עד 2026, לפי מעמד
13. אילוץ הזמן בתדר נמוך
14. מה נדחה מהמסמך המקורי
15. גבולות הידיעה

1. מה מודדים, ולמה

ספקטרוסקופיית עכבה היא דרך להקשיב למערכת חשמלית או אלקטרוכימית בקצבים שונים. במקום להפעיל מתח קבוע ולמדוד כמה זרם עובר, מפעילים אות מתנדנד קטן וסורקים תדרים, בדרך כלל בטווח שבין אלפית הרץ למאה

קילוהרץ. בכל תדר מודדים שני דברים: פי כמה המערכת מקטינה את הזרם ביחס למתח, ובכמה היא מאחרת או מקדימה אותו בזמן.

הסיבה שהסריקה בתדרים שווה משהו היא שתהליכים פיזיקליים שונים עונים בקצבים שונים. דיפוזיה איטית ומגיבה בתדרים נמוכים. טעינה של השכבה הכפולה בממשק בין האלקטרודה לאלקטרוליט מהירה ושולטת בתדרים גבוהים. העברת מטען יושבת באמצע. סריקה על פני חמישה או שישה סדרי גודל של תדר פורשת את התהליכים האלה על ציר, וזה מה שהופך מדידה אחת למקור מידע על כמה מנגנונים בבת אחת.

שני המספרים הנמדדים בכל תדר מתאחדים למספר מרוכב אחד, העכבה. החלק הממשי הוא מה שהופך לחום, החלק המדומה הוא מה שנאגר ומוחזר. דוגמה מספרית שכדאי להחזיק: נגד של 100 אוהם בטור עם קבל של 10 מיקרופאראד, בתדר 100 הרץ. החלק הממשי הוא 100 אוהם, החלק המדומה הוא מינוס 159.2 אוהם, הגודל הוא 188.0 אוהם והזווית מינוס 57.9 מעלות.

היישומים הם הסיבה שהתחום גדול. בדיקת מצב בריאות של סוללות ליתיום, ניטור קורוזיה מתחת לציפוי, אפיון תאי דלק ואלקטרוליזרים, חיישנים ביולוגיים שמזהים קשירה של מולקולה. בכל אחד מהם המדידה עצמה זולה, מהירה יחסית ואינה הורסת את הדגימה. הקושי אינו במדידה.

2. הכיוון ההפוך, ושלושת התנאים

הכיוון קדימה קל. בהינתן מעגל שקול ופרמטרים, חישוב העקומה הוא הצבה בנוסחה. הקושי הוא בכיוון ההפוך: נתונה העקומה, מהי המערכת שייצרה אותה.

ז'אק אדמר הציג את הדרישה בתחילת המאה העשרים, בהרצאה שנשא בפרינסטון ב-1901 ופורסמה ב-1902, ופיתח אותה במלואה בהרצאות י"ל שלו ב-1923. הניסוח המקובל היום מונה שלושה תנאים לבעיה מוצבת כהלכה: שקיים פתרון, שהוא יחיד, ושהוא תלוי ברציפות בנתונים. בעיה שמפרה אחד מהם נקראת בעיה שאינה מוצבת כהלכה.

דיוק היסטורי

בספר מ-1923 שלושת הרעיונות נמצאים, אבל לא כהגדרה משולשת אחת. אדמר מגדיר שם בעיה מוצבת כהלכה על פי קיום ויחידות בלבד, ומציג את התלות הרציפה בנתונים כשלושים עמודים אחר כך, כדרישה שהמשמעות הפיזיקלית מחייבת. הוא כותב שם שבעיה שפתרונה אינו תלוי ברציפות בנתונים הייתה נראית כנשלטת בידי מקרה טהור ולא כמצייתת לחוק כלשהו. הניסוח המשולש המוכר הוא גיבוש מאוחר יותר של רעיונותיו, ולכן חלק מספרי העיון מתארכים את המושג ל-1923 ולא ל-1902.

פענוח ספקטרום עכבה מפר את התנאי השני ואת השלישי. הקיום אינו הבעיה, ולהפך: הבעיה היא שיש יותר מדי פתרונות, לא מעט מדי.

דיוק במונחים

כשמדובר בהתאמה של מעגל שקול עם מספר סופי של פרמטרים, המונח המדויק הוא ill-conditioned ולא ill-posed. הבעיה במובן המחמיר, שבה מרחב הפתרונות אינו סופי, היא חילוץ התפלגות רציפה של זמני הרפיה. בפועל שתי הצורות סובלות מאותה תופעה, ושתיהן נפתרות באותן שיטות, ולכן הספרות משתמשת במונח הרחב.

3. משפחת הבעיות הפוכות

זו הפרספקטיבה שקל להחמיץ כשמסתכלים על עכבה לבדה: הבעיה אינה ייחודית לאלקטרוכימיה. היא מקרה פרטי במשפחה גדולה ומוכרת של בעיות הפוכות לא יציבות, וכולן נפתרות באותה משפחת שיטות.

- שחזור תמונת CT מהיטלי רנטגן. זהו המקרה הקל של המשפחה, מפני שמסובבים את המקור סביב הגוף ואוספים מספר עצום של היטלים בלתי תלויים. לכן מכשיר בבית חולים מחזיר תמונה שאפשר להסתכל עליה.

- חידוד תמונה מטושטשת, שבו מנסים להפוך את פעולת הטשטוש. רעש קטן בתמונה הנתונה מתפוצץ לארטיפקטים גדולים בתמונה המשוחזרת.
- היפוך גאופיזי, שבו מודדים שדה על פני השטח ומנסים להסיק מבנה שכבות מתחתיו.
- ניתוח זמני הרפיה ב-NMR, שבו מפרידים סכום של דעיכות מעריכיות חופפות.

הקרובה ביותר לעכבה היא דווקא האחרונה. חילוץ התפלגות זמני הרפיה מספקטרום עכבה הוא התאום, בתחום התדר, של ההתמרה ההפוכה שספקטרוסקופיסט NMR מבצע בתחום הזמן. גרעין ההתמרה בעכבה הוא אחד חלקי אחד ועוד ג'יי אומגה טאו, וזהו גרעין לפלס על הציר המדומה. שתי הבעיות קשות מאותה סיבה בדיוק: שתי מעריכיות בעלות קבועי זמן דומים כמעט אינן ניתנות להבחנה זו מזו בנוכחות רעש.

מה זה לא

זו אינה התמרת פורייה הפוכה. פורייה הפוכה היא פעולה יציבה ומוגדרת היטב, והבלבול בין השניים מסתיר בדיוק את מקור הקושי.

4. שני סוגים של אי ודאות, ורק אחד מהם ניתן לתיקון

זו ההבחנה החשובה ביותר במסמך הזה, והערבוב ביניהם שני צדדיה הוא הטעות הנפוצה בתחום.

אי זיהוי מבני הוא תכונה של המודל, לא של המדידה. שני מבנים שונים לחלוטין מייצרים בדיוק אותה פונקציית עכבה, בכל תדר, לכל ערך. סקירת ההוראה של לזנס ופרודרומידס מ-2023 מדגימה זאת על זוג קונקרטי: מעגל Voigt, שהוא נגד בטור עם שלוש חוליות RC מקביליות, ומעגל סולם בעל אותם רכיבים במבנה מקונן, מייצרים ספקטרום זהים. לא דומים: זהים. הכיתוב באיור שם אומר זאת בפירוט, ובגוף הטקסט נכתב שאין מעגל מודל יחיד לספקטרום עכבה נתון ושחלק מהמעגלים זהים מתמטית, ולכן בחירת המעגל המתאים דורשת ידע עמוק על המערכת האלקטרוכימית.

רקע, לא ציטוט

הטופולוגיות האלה מתאימות לצורות הקנוניות הקלאסיות של סינתזת רשתות פסיביות, צורת פוסטר וצורת קאואר. בספרות האלקטרוכימית הן מוכרות כרשתות מנוונות, על שם עבודתו של סטיבן פלטשר מ-1994, שפרסם טבלאות שלמות של רשתות כאלה לשימוש מפורש של אלקטרוכימאים. המאמר הזה מובא כמצביע ולא כמצוטט: המוציא לאור חוסם גישה לטקסט, וגם התקציר שלו אינו זמין.

חברת BioLogic מציגה בחומרי ההדרכה שלה מקרה שבו ארבע טופולוגיות אינן ניתנות להבחנה על סמך הספקטרום בלבד.

מול ניוון כזה, מכשיר טוב פי אלף אינו מקדם בכלום. אין בנתונים מה לחלץ, מפני שהמידע המבחין אינו קיים בהם.

אי זיהוי מעשי הוא תכונה של הנתונים שבמקרה נאספו. שני תהליכים עם קבועי זמן קרובים מצטיירים כקשת רחבה אחת. תהליך שקבוע הזמן שלו נופל מחוץ לחלון התדרים שנסרק אינו נראה כלל. שני פרמטרים יכולים להיות מתואמים עד כדי כך שהנתונים אינם קובעים אף אחד מהם בנפרד, אף שהם קובעים היטב את המכפלה שלהם.

כאן, ורק כאן, מדידה טובה יותר היא בדיוק הפתרון. הורדת רעש, ממוצע על יותר סריקות, הרחבת חלון התדרים ושקלול נכון של השגיאה מצמצמים ממש את קבוצת המודלים שהנתונים מתירים. ההגדרה המקובלת אומרת זאת במפורש: פרמטר הוא מזוהה מעשית אם רווח הסמך שלו סופי, וזה בדיוק מה שנתונים טובים יותר עושים לרווח הסמך.

מעגלים שקולים שונים יכולים להיות בעלי תגובת עכבה זהה לחלוטין. מעבר לכך, ייתכן שבתוך שגיאת הניסוי שני מעגלים לא קשורים ייתנו גרפים כמעט דומים.

ברנרד בוקאמפ, Journal of Physics: Energy 2, 042001 (2020), בפרפרזה עברית של שני משפטים עוקבים

זהה לחלוטין מול כמעט דומה. זו כל ההבחנה, והיא קובעת מה כדאי לעשות: מול המקרה השני משפרים את המדידה, ומול המקרה הראשון משנים את הניסוי או מוותרים על ההכרעה. ההבחנה עצמה אינה מקומית לאלקטרוכימיה. היא מנוסחת פורמלית בביולוגיה חישובית, אצל ראואה ועמיתיו, שם היא משמשת לזהות אילו פרמטרים במודל של מסלול ביוכימי בכלל ניתנים לאמידה מנתוני ניסוי נתונים.

שלוש שכבות שהשפה מערבת

מדידה היא לא התאמה טובה, והתאמה טובה היא לא פירוש. ההחלקה בין השכבות היא המקום שבו מאמרים נשברים: חוקר מודד עקומה, מתאים לה מעגל, מקבל שגיאה קטנה, וכותב שהתהליך הדומיננטי הוא העברת מטען. השגיאה הקטנה היא עובדה. המשפט האחרון הוא השערה.

5. מה מבחן קרמרס-קרוניג בודק, ומה הוא לא

יש כלי שנועד לשמור על השכבה הראשונה, וכדאי לדעת בדיוק מה הוא לא עושה. יחסי קרמרס-קרוניג קושרים מתמטית את החלק הממשי והמדומה של תגובה של מערכת ליניארית, סיבתית, יציבה וסופית. אם הנתונים אינם מקיימים אותם, משהו במדידה שבור.

בוקאמפ פרסם ב-1995 מימוש מעשי של הרעיון, המבחן שמוכר היום כ-Lin-KK. סקירת ההוראה של לזנס ופרודרומידיס מתארת אותו כך: בוקאמפ הציע להתאים לספקטרום מעגל Voigt עם התפלגות קבועה מראש של קבועי זמן, ואם המערכת מתוארת היטב על ידי מעגל כזה היא נחשבת מקיימת את יחסי קרמרס-קרוניג. קיבוע קבועי הזמן מראש הוא מה שהופך את ההתאמה לליניארית, ולכן ליציבה: שרשרת כזו מקיימת את היחסים בהגדרה, ולכן שארית גדולה מעידה על נתונים שאינם מקיימים אותם.

המבחן יתפוס אות עירור גדול מדי שהוציא את המערכת מהתחום הליניארי, ארטיפקט של מכשיר, ובעיקר מערכת ששינתה את עצמה תוך כדי הסריקה. הוא לא יכריע בין שני מעגלים, מפני שהוא בודק את הנתונים ולא את המודל.

סקירת Nature Reviews Methods Primers מ-2021 מנסחת את המסקנה חד: כל ספקטרום שעקבי עם קרמרס-קרוניג ניתן להתאמה על ידי מעגל שקול, והבעיה היא שמודלים כאלה אינם יחידים. במילים אחרות, מעבר במבחן הוא תנאי הכרחי לדיון, לא ראיה לפירוש.

6. רגולריזציה, והתפלגות זמני ההרפיה

המענה המתמטי לחוסר יציבות נקרא רגולריזציה, וכדאי לקרוא לו בשמו מפני שהוא חוט מקשר בין חלקים בסיפור שנראים נפרדים.

אפשר לוותר על ההנחה שיש מעגל, ובמקום זה לשאול איזו התפלגות רציפה של זמני הרפיה מסבירה את הספקטרום. זה מוותר על שאלת הטופולוגיה ומחליף אותה בשאלה פיזיקלית ישירה: אילו תהליכים פועלים, ובאילו קצבים. המחיר הוא שהבעיה נעשית לא יציבה במובן המחמיר, ורעש קטן בנתונים מייצר תנודות גדולות בהתפלגות.

השיטה הסטנדרטית היא רגולריזציית טיכונוב. במקום לשאול רק איזו התפלגות מתאימה הכי טוב לנתונים, מוסיפים לפונקציית המטרה קנס על חספוס, ומבקשים את ההתפלגות החלקה ביותר שעדיין עקבית עם המדידה. זה מייבא הנחה מוקדמת: שהתשובה הנכונה חלקה.

מחיר שכדאי להכיר

עוצמת הרגולריזציה משנה את התוצאה. בחירות שונות של פרמטר הרגולריזציה נותנות מספר שונה של פסגות. מי שקורא פסגות כתהליכים פיזיקליים קורא גם את בחירת הפרמטר, ולכן פרסום רציני מדווח איך נבחר הפרמטר ובודק את רגישות המסקנה לבחירה.

7. תכנות גנטי: מה הוא משנה

אלגוריתם גנטי רגיל מקבל מבנה קבוע מראש ומחפש את הערכים הטובים ביותר עבורו. אם הוחלט שהמעגל הוא נגד בטור עם צמד מקבילי, האלגוריתם מחפש שלושה מספרים במרחב תלת ממדי.

תכנות גנטי עושה משהו אחר. הפרט באוכלוסייה אינו רשימת מספרים אלא עץ, ולעץ יש גודל ומבנה משתנים. מוטציה יכולה להחליף קבל ברכיב פאזה קבועה, והכלאה יכולה להעביר ענף שלם ממעגל אחד לאחר. החיפוש רץ בו זמנית על הצורה ועל המספרים. זה מתאים לבעיה מפני שמה שרוצים לגלות הוא אובייקט סימבולי בעל מבנה משתנה, לא נקודה במרחב פרמטרים ידוע.

אבל חיפוש חופשי על מבנה מייצר בעיה משלו. אם הציון היחיד הוא טיב ההתאמה, האבולוציה תלמד מהר שכל רכיב נוסף מקטין קצת את השגיאה, והעצים יתנפחו. בספרות זה נקרא bloat. בעכבה זה מסוכן במיוחד, מפני שכל רכיב מזמין פירוש כימי, ומעגל מנופח מייצר סיפור מנופח.

לכן ציון רציני מוסיף קנס על מורכבות. זו אותה תנועה בדיוק שעושה טיכונוב בהתפלגות זמני ההרפיה: לייבא הנחה מוקדמת שהתשובה צריכה להיות פשוטה, כדי לייצב בעיה שהנתונים לבדם אינם מכריעים. הניסוח המדויק הוא שהמטרה משתנה. לא המעגל שנותן את השגיאה הקטנה ביותר, אלא מעגל מזוהה, סיבתי, מוצדק סטטיסטית וסביר פיזיקלית.

עד כמה המקבילה מדויקת

הזהות בין קנס מורכבות לרגולריזציה מדויקת עבור קנס ריבועי, שהוא רגרייט רכס. עבור קריטריונים כמו AIC ו-BIC מדובר במקבילה רעיונית ולא בזהות מתמטית: שם הקנס נגזר משיקולים של תורת האינפורמציה ולא מייצוב של בעיה הפוכה.

דוגמה מיושמת: עבודת Gene Expression Programming של ואן האברבקה, סטוק ודה באטס מאוניברסיטת חנט, שפורסמה ב-2021 ב-IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, מסירה רכיבים מיותרים במפורש ומחפשת את המעגל הפשוט ביותר שמסביר את המדידות. חשוב לדעת את מעמדה: היא נבדקה בעיקר על סימולציות, ובסופה מקרה בוחן אחד של מדידות ביולוגיות אמיתיות.

8. הדקדוק הפיזיקלי, ומה האלגוריתם לא משוחרר ממנו

הניסוח המקובל בעיתונות הוא שהאלגוריתם מגלה מבנים בלי הטיה אנושית. זה הפוך מהמצב.

חיפוש אבולוציוני על מעגלים זקוק לדקדוק פיזיקלי שנקבע מראש: אילו רכיבים מותרים, אילו חיבורים חוקיים, אילו גבולות על קבועי הזמן, איזו התנהגות חייבת להיות סיבתית, ואיזה ערך הוא בלתי אפשרי פיזיקלית. בלי הדקדוק הזה החיפוש מייצר ביטויים מתמטיים חסרי פשר שמתאימים לנתונים מצוין, וזו התוצאה הגרועה מכולן: התאמה מושלמת שאי אפשר לפרש.

מה שהאלגוריתם משוחרר ממנו הוא ההנחה על הטופולוגיה, לא ההנחות הפיזיקליות. זה הרבה, וזה לא אותו דבר. בעבודה של קבוצת חנט, למשל, ההגבלות על מרחב החיפוש הן חלק מהשיטה ולא תוספת.

9. ניסויים משלימים: ארבע בדיקות קונקרטיות

אם המידע הדרוש להכרעה אינו נמצא בספקטרום, השאלה המעשית היא מאיפה הוא כן מגיע. התשובה המקובלת בתחום מנוסחת היטב בסקירת Nature Reviews Methods Primers: מודלים של עכבה אינם יחידים, וספקטרוסקופיית עכבה אינה טכניקה עומדת בפני עצמה. מודל שנבנה כהשערה מכוון את הבחירה בניסויים משלימים שיכולים לחזק אותו או להפריך אותו.

ההכרעה אינה מגיעה מעיבוד טוב יותר של אותה עקומה, אלא ממדידה חוזרת תוך שינוי מכוון של תנאי הניסוי, ובדיקה אם כל רכיב זז לכיוון שהפירוש שלו מחייב. להלן ארבע בדיקות שאפשר לתכנן מראש.

טמפרטורה. תהליך אמיתי של העברת מטען מופעל תרמית: צפיפות זרם החליפין מצייתת לחוק ארניוס עם אנרגיית שפעול, ולכן התנגדות העברת המטען צונחת כשמחממים את התא. קיבול גאומטרי או דיאלקטרי כמעט אינו זז. מדידה של אותו תא בכמה טמפרטורות מפרידה בין שתי הפרשנויות.

דיוק שחייבים לשמור עליו

חוק ארניוס חל על צפיפות זרם החליפין, לא על ההתנגדות עצמה. התנגדות העברת המטען שווה ל-RT חלקי מכפלת מספר האלקטרונים, קבוע פאראדיי וצפיפות זרם החליפין, ולכן היא נושאת גורם טמפרטורה נוסף מעבר למעריך. את אנרגיית השפעול קוראים מצפיפות הזרם, לא ישירות משיפוע ההתנגדות.

גודל וגאומטריה. קיבול השכבה הכפולה הוא תכונה של שטח פנים ואמור לגדול איתו. התנגדות העברת המטען אמורה לקטון איתו. התנגדות האלקטרוליט מתנהגת אחרת ותלויה בגאומטריית התא: עבור אלקטרודת דיסק היא הולכת כהופכי הרדיוס, לא כהופכי השטח, ואפשר לחזות אותה מתוך מוליכות ידועה. זה נותן בדיקה בלתי תלויה על איכות המדידה עצמה.

מתח. התנגדות העברת מטען תלויה מעריכית במתח היתר דרך קשר באטלר-וולמר ותוזז בסדרי גודל כשמשנים את נקודת העבודה. קיבול גאומטרי או דיאלקטרי לא יזוז.

דיוק שני

קיבול השכבה הכפולה עצמו כן משתנה עם המתח, וקיבול מטען המרחב במוליך למחצה תלוי במתח בחוזקה, וזה בדיוק הבסיס לניתוח מוט-שוטקי. לכן מבחן המתח מפריד קינטיקה מגאומטריה, ולא קיבול מהתנגדות.

ריכוז. דילול של אלקטרוליט הרקע מעלה בעיקר את התנגדות התמיסה. דילול של החומר הפעיל מעלה את מקדם ורבורג וגם את התנגדות העברת המטען. לכל רכיב יש כפתור אחר שמזיז אותו, וזה מה שהופך אותם לניתנים להפרדה.

10. CPE: הרכיב שכולם מפרשים ואיש לא הוכיח

רכיב הפאזה הקבועה, CPE, נמצא כמעט בכל מעגל שקול מודרני. הוא קבל לא אידאלי: העכבה שלו הולכת כאחד חלקי מכפלת מקדם ו-ג'יי אומגה בחזקת מעריך שערכו בין אפס לאחד. כשהמעריך שווה לאחד מתקבל קבל רגיל.

ההסבר שנלמד בדרך כלל הוא חספוס פני השטח, והוא כמעט תמיד מובא בלי סייג. הראיות חלשות בהרבה ממה שהשימוש מרמז.

- חומר ההדרכה של Gamry ממליץ להתייחס למעריך כאל קבוע אמפירי, בלי בסיס פיזיקלי ממש.
- סקירת Nature Reviews Methods Primers מ-2021 כותבת שמקור ה-CPE אינו ודאי ושההסברים המקובלים כנראה אינם חלים.
- סקירת הוראה מ-2023 של לונס ופרודרומידס מדווחת על ממצא לא נוח: השוואה בין אלקטרודות בדרגות חספוס שונות הראתה שדווקא האלקטרודה המחוספסת יותר התנהגה קרוב יותר לאידאלי, כלומר הפוך מהניכוי של הסבר החספוס.

רכיב שמופיע כמעט בכל התאמה, ושהפירוש הנפוץ שלו נסתר בניסוי, הוא התזכורת הטובה ביותר לכך שהמעגל אינו התא. הוא תיאור מתמטי מוצלח, וזה לא אותו דבר כמו מנגנון.

11. הקו הישראלי: ISGP

קבוצתו של יועד צור בטכניון מריצה מאז תחילת העשור הקודם שיטה בשם ISGP, שבה תכנות אבולוציוני מפענח ספקטרום עכבה. חשוב לדייק במה השיטה עושה: ISGP אינו מייצר מעגל שקול, ומחבריו מנגידים אותו במפורש לניתוח מעגלים. הוא מחפש צורה פרמטרית להתפלגות זמני ההרפיה, כלומר אילו תהליכים פועלים ובאילו קצבים, בלי לקבוע מראש טופולוגיה.

קו העבודה עבר מקתודות של תאי דלק במוצק ב-2012, דרך סופר-קבלים ב-2014 ו-2016, ועד ניתוח קרמיקה מיוננת ב-2017.

העבודה מ-2026 מעניינת יותר מכולן, מפני שהיא בודקת את השיטה מול תשובה ידועה. במאמר שפורסם במרץ 2026 ב-Journal of Solid State Electrochemistry בנו אלאא אנבאריה, שמעיה זברי ויועד צור מחולל של ספקטרומים סינתטיים, כלומר נתונים שבהם התשובה הנכונה ידועה מראש, והריצו עליהם את השיטה של עצמם.

ISGP שחזר היטב התנגדות אפקטיבית, קיבול וזמני הרפיה, ושחזר פסגה רחבה גם בנוכחות רעש. פסגה צרה מאוד הוא לא שחזר: היא חזרה כפסגה רחבה ונמוכה יותר, אף שהשטח שמתחתיה נשמר.

למה הכישלון הזה שווה יותר מהצלחה

זהו כישלון שהחוקרים מדווחים על השיטה של עצמם, והוא מגדיר את גבול ההפרדה של הכלי במקום להשאיר אותו לניחוש. שימו לב שזו הבחנה מהסוג המעשי לפי פרק 4: היא נקבעת על ידי רעש ועל ידי הייצוג, ולכן היא נושא לשיפור.

12. חזית 2024 עד 2026, לפי מעמד

סביב הקו הזה מסתדרת חזית שכולה משנת 2024 ואילך. הדרך הנכונה לקרוא אותה היא לפי מעמד כל פריט, ולא לפי מה שהכותרת מבטיחה.

- AutoEIS משלב חיפוש אבולוציוני עם הסקה בייסיאנית ובדיקת סבירות סטטיסטית. התוכנה פורסמה במאי 2025 ב-Journal of Open Source Software. מעמד: תוכנה מפורסמת ונגישה.
- מחקר קורוזה מ-2024 ב-npj Materials Degradation השתמש בהסקה בייסיאנית כדי לזהות מתי הספקטרום אינו מכיל מספיק מידע כדי להצדיק מבנה מעגל מסוים. מעמד: מאמר שפוט, אך הורץ על נתונים מסומלצים.
- בסוף 2025 הציעו פאן ועמיתיו מערכת דו שלבית שבה אלגוריתם גנטי בוחר את המבנה וריבועים פחותים לא ליניאריים מתאימים את הפרמטרים, עם שגיאה מנורמלת מרבית של 1.07 אחוזים על שתי סוללות של 25 אמפר שעה. מעמד: מאמר שפוט על מדידות אמיתיות, אך על שתי סוללות בלבד.
- AutoREC היא preprint שגרסתו האחרונה מ-30 באוגוסט 2026. מעמד: לא עבר שיפוט עמיתים.
- EIS-GPT התקבל לפרסום ב-Cell Reports Physical Science אך טרם פורסם. ה-preprint שלו מתואר בידי מחבריו כהוכחת היתכנות שנשענת בעיקר על נתונים מסומלצים. מעמד: התקבל, לא פורסם, ואין רשומה בכתב העת.

התמונה שמצטיירת מהרשימה הזו אינה של תחום שנפתר. היא של תחום שבו כל רכיב קיים כאב טיפוס משכנע, ומה שחסר הוא מערכת שמחברת אותם ומראה, על נתונים ניסויים רחבים ומגוונים, שהיא מייצרת מסקנה פיזיקלית שאפשר לשחזר ולא רק התאמה טובה.

13. אילויץ הזמן בתדר נמוך

יש אילויץ פיזי שאי אפשר לתכנת סביבו. מדידה בתדר נמוך אורכת זמן, פשוט מפני שמחזור אחד אורך זמן. מחזור בודד בתדר של אלפית הרץ אורך אלף שניות בדיוק, כלומר קרוב לשבע עשרה דקות. בעשירית מיליהרץ מחזור בודד אורך כבר קרוב לעשרים ושמונה שעות.

המחקר ב-npj Materials Degradation מ-2024 נוקב במינימום של כ-0.3 שעות למדידה בודדת בתדר של אלפית הרץ. כדאי לדעת מאיפה המספר הזה מגיע, מפני שקל לפרש אותו לא נכון: הוא אינו כולל התייבשות ואינו כולל ממוצע על כמה מחזורים. אלף שניות הן 0.278 שעות, והמספר הוא בדיוק אורכו של מחזור אחד. זו הסיבה שהמאמר כותב מינימום. הוא רצפה, לא אומדן.

למה זה משנה

אותו מאמר מציין שהורדת רעש מחייבת לחזור על המדידה יותר מפעם אחת, ושמדידות חוזרות יכולות להאריך את הזמן בשעות. מי שקורא את 0.3 השעות כזמן המדידה בפועל מזלזל בעלות בסדר גודל. לשם השוואה, ספקטרום טיפוסי של שישים תדרים בין מאה קילוהרץ לעשירית הרץ אורך שתיים עד שלוש דקות בסך הכול.

בזמן הזה המערכת הנמדדת ממשיכה לחיות. סוללה נרגעת, משטח ממשיך להיאכל בקורוזיה, חיישן ממשיך לקשור מולקולות. התוצאה היא שמדדתם משהו שהשתנה תוך כדי המדידה, וזה בדיוק מה שמבחן קרמרס-קרונינג נועד לתפוס.

הממצא הלא אינטואיטיבי באותו מחקר הוא שאפשר להשמיט חלק ניכר מהנקודות בתדר הנמוך בלי לפגוע מהותית באמידת הפרמטרים. התנאים חשובים כאן יותר מהכותרת. הבדיקה נעשתה על אלף מערכי נתונים מסומלצים לכל מערכת, עם שני אחוזי רעש, ולא על מדידות אמיתיות. שלוש המערכות שנבדקו נתנו סף שונה מאוד זו מזו.

- קורוזיה אחידה, הנשלטת בהעברת מטען: ההסקה נשארה מדויקת עד תדר מינימלי של 0.36 הרץ בלבד. מתחת לזה השגיאה היחסית עוברת ארבעה אחוזים.
- מערכת מפסיבה, שבה נוסף רכיב ורבורג: ההסקה נשארה בתוך ארבעה אחוזים עד עשירית מהרץ, וחיסכון הזמן עולה על תשעים אחוזים ממשיך המדידה.
- מתכת מצופה עם פגם חודר: השמטת נקודות מתחת ל-0.018 הרץ כמעט אינה משפיעה על הדיוק, וחוסכת יותר מ-94 אחוזים מזמן המדידה.

כלומר התוצאה אינה כלל אצבע. סדר הגודל של הסף משתנה פי עשרים בין המערכת הראשונה לשנייה, והוא נגזר מהמבנה שמניחים. מי שמקצר סריקה על סמך הכותרת בלי לבדוק את המקרה שלו עלול לאבד בדיוק את הרכיב שרצה למדוד.

14. מה נדחה מהמסמך המקורי

המסמך שהתקבל ב-6 בספטמבר 2026 שימש נקודת פתיחה טובה, אבל חמש טענות בו לא עמדו בבדיקה מול המקורות שהוא עצמו מצטט. הן אינן מופיעות במסמך הזה, והן מפורטות כאן כדי שהדחייה תהיה ניתנת לבדיקה.

- המסמך כתב שמדידה בתדר נמוך אורכת שעות, וערבב זאת עם המספר 0.3. המקור אומר דבר אחר: מדידה בודדת באלפית הרץ דורשת כ-0.3 שעות, כלומר כשמונה עשרה דקות. מספר השעות הפך בטעות לתדר.
- המסמך תיארך את עבודת הסופר-קבלים של קבוצת צור ל-2012. אין מאמר כזה. המוקדם ביותר הוא 2014 בכנס, ומאמר כתב העת הוא 2016.
- המסמך תיארך את עבודת תא הדלק ל-2011. המאמר יצא באינטרנט בינואר 2012 ובדפוס בפברואר 2012. יש עבודה מ-2011 של אותה קבוצה, אבל היא על מוליכים מעורבים ולא על קתודות.

- המסמך אגד את ISGP יחד עם AutoREC, EIS-GPT ו-AutoEIS כשיטות שבונות מעגל שקול. ISGP אינו עושה זאת, ומחבריו מנגידים אותו במפורש לניתוח מעגלים.

- המסמך הציג את המחקר הבייסיאני על קורוזיה כאילו הורץ על מאגר מדידות אמיתיות. הוא הורץ על נתוני עכבה מסומלים.

בסבבי האימות שלאחר מכן נדחו ארבע טענות נוספות, שלא הופיעו במסמך המקורי אלא נוסחו כאן ונראו סבירות עד שנבדקו. שלוש מהן מתועדות במקומן בפרק 9: התנגדות העברת המטען אינה מצייתת בעצמה לחוק ארניוס, קיבול השכבה הכפולה כן תלוי במתח, והתנגדות אוהמית של אלקטרודת דיסק הולכת כהופכי הרדיוס ולא כהופכי השטח. הרביעית מתועדת בפרק 13: ההנחה שכ-0.3 שעות הן משך מדידה מלא הכולל התייצבות וממוצע. מעקב אחר המקור שהמאמר אליו מראה שזהו בדיוק אורכו של מחזור אחד, ולא יותר.

15. גבולות הידיעה

מה שלא אומת נכתב כאן במפורש, כדי שקורא יוכל לשקול את המסמך לפי מה שהוא באמת.

- לא הושג ציטוט מילולי ממאמר Lin-KK של בוקאמפ מ-1995. הרשומה הביבליוגרפית אומתה בשלושה מאגרים בלתי תלויים, אך המוציא לאור מסתיר את התקציר בכל אחד מהם וחוסם גישה אוטומטית לטקסט. תיאור המבחן כאן נשען על סקירת ההוראה של לזנס ופרודרומידס, שנקראה במלואה, ולא על בוקאמפ עצמו.
- אותה חסימה חלה על מאמר הרשתות המנוונות של פלטשר מ-1994. הוא מובא כמצביע לנושא, ולא צוטט ממנו דבר. עבודותיהם של פוסטר ושל קאואר על הצורות הקנוניות לא נקראו במקור. הן מוזכרות כרקע היסטורי, והטענה האלקטרוכימית עצמה נשענת על מקור שנקרא.
- המאמר של אדמר מ-1902 לא נמצא בשום מאגר פתוח, ולכן לא ניתן לאמת מה בדיוק נכתב בו. קיומו והפניה אליו אומתו מתוך הערת שוליים של אדמר עצמו בספר מ-1923, שנקרא במלואו.
- החלוקה של משפחת הבעיות ההפוכות בפרק 3 היא סינתזה של המערכת, ולא ציטוט ממקור יחיד שמונה את כולן יחד.
- שתי הפניות לספרות נעשו דרך מראה, מפני ש-IEEE ו-ScienceDirect חוסמים גישה אוטומטית. התאריכים, המחברים וכתבי העת נלקחו מ-Crossref עצמו.

וטענה אחת שראוי להדגיש את מעמדה: המסקנה הכללית של המסמך, שאוטומציה של מידול עובדת ואוטומציה של הבנה פיזיקלית לא, היא קריאה של המערכת את הספרות. היא נשענת על מעמד המקורות בפרק 12, והיא לא ציטוט של אף אחד מהם.

1. Orazem, M. E. ואחרים, סקירת יסוד על ספקטרוסקופיית עכבה אלקטרוכימית. *Nature Reviews Methods Primers* 1, 41 (2021). doi:10.1038/s43586-021-00039-w
2. Boukamp, B. A. סקירה על מעגלים שקולים והמגבלות שלהם. *J. Phys. Energy* 2, 042001 (2020). doi:10.1088/2515-7655/aba7bd
3. Boukamp, B. A. מבחן קרמרס-קרוניג הליניארי לאימות נתוני עכבה. *J. Electrochem. Soc.* 142(6), 1885-1894 (1995). doi:10.1149/1.2044210
4. Fletcher, S. טבלאות רשתות חשמליות מנוונות לשימוש בניתוח מעגלים שקולים. *J. Electrochem. Soc.* 141(7), 1823 (1994). doi:10.1149/1.2055011
5. Raue, A. ואחרים, ניתוח זיהוי מבני ומעשי של מודלים דינמיים. *Bioinformatics* 25(15), 1923-1929 (2009). doi:10.1093/bioinformatics/btp358
6. Van Haeverbeke, M., Stock, M., De Baets, B. זיהוי מעגלים שקולים בעזרת *Gene Expression Programming*. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70 (2021). doi:10.1109/TIM.2021.3113116
7. Egbaria, A., Zabari, S., Tsur, Y. בחינת ISGP מול ספקטרומים סינתטיים שהתשובה בהם ידועה. *J. Solid State Electrochem.* פורסם 5 במרץ 2026, (2026).
8. Pan. ואחרים, זיהוי דו שלבי של מבנה מעגל ופרמטרים לסוללות ליתיום. *J. Energy Storage* 127, 117147 (2025).
9. AutoEIS. כלי לניתוח אוטומטי של ספקטרום עכבה עם הסקה בייסיאנית. *J. Open Source Software* (2025). doi:10.21105/joss.06256
10. Zhang, R. ואחרים, הערכה בייסיאנית של מעגלים שקולים נפוצים לניתוח קורוזיה בספקטרוסקופיית עכבה. הורץ על נתונים מסומלים. *npj Materials Degradation* 8, 120 (2024). doi:10.1038/s41529-024-00537-8
11. Lazanas, A. Ch., Prodromidis, M. I. סקירת הוראה על ספקטרוסקופיית עכבה אלקטרוכימית. המקור המרכזי כאן לזהות בין מעגלים שונים, לתיאור מבחן Lin-KK ולחישוב משך המדידה בתדר נמוך. *ACS Measurement Science Au* 3(3), 162-193 (2023). doi:10.1021/acsmeasuresciau.2c00070
12. Gamry Instruments, חומרי הדרכה על יסודות ספקטרוסקופיית עכבה ועל רכיב הפאזה הקבועה. gamry.com
13. BioLogic, הערות יישום על אי יחידות של מעגלים שקולים ועל אימות קרמרס-קרוניג. biologic.net
14. Tsur, Y. וקבוצתו, קו העבודה על ISGP מ-2012 ועד 2017: קתודות תאי דלק במוצק, סופר-קבלים וקרמיקה מיוננת. *Fuel Cells* (2012), doi:10.1002/fuce.201100126; *AIP Conf. Proc.* (2014), doi:10.1063/1.4901661; *Solid State Ionics* (2016), doi:10.1016/j.ssi.2015.11.008; *Solid State Ionics* (2017)
15. Hadamard, J. הרצאות על בעיית קושי במשוואות דיפרנציאליות חלקיות ליניאריות. נקרא במלואו לצורך בדיקת התיארוך. Yale University Press (1923); archive.org/details/lecturesoncauchy00hadauoft