

התאוריה המאוחדת לחיזוי במערכות מורכבות

מסגרת לחשיבה, ניתוח והגדלת
הוודאות היחסית

ברנרד מורן

2026

1 @MoranBernard

התאוריה המאוחדת לחיזוי במערכות מורכבות

מסגרת לחשיבה, ניתוח והגדלת הוודאות היחסית

ברנרד מורן

כתב יד ערוך | מהדורת עבודה דיגיטלית | 2026

מן הנתון הבודד אל המבנה שמאחוריו

תוכן העניינים

הקדמת המחבר

פתח: הרוח סביב כנף המטוס

פרק 1: עקרונות החיזוי במערכות מורכבות

פרק 2: שפת הנתונים

פרק 3: המערכת כרשת

פרק 4: התהוות, המשכיות ושינוי מגמה

פרק 5: יכולת חיזוי, מרחב הזדמנות והכרעה

פרק 6: מודולי חשיבה, שזירה ומודל-על

הקדמת המחבר

מאז ומעולם ביקש האדם להציץ אל מעבר לאופק הזמן. הוא בחן את השמים כדי להבין את מזג האוויר, את הים כדי לצפות סערות, את האדמה כדי להעריך את היבול, את תנועת בני האדם כדי להבין חברה, ואת השווקים כדי לזהות שינוי עוד בטרם התגבש במלואו.

האם העתיד הוא מרחב אקראי לחלוטין, או שמא הוא מושפע ממבנים, קשרים וחוקים שעדיין איננו מבינים במלואם?

מערכות מורכבות נראות לעיתים בלתי צפויות משום שהן כוללות מספר רב של מרכיבים הפועלים בעת ובעונה אחת. כל שינוי עשוי להשפיע על שינוי אחר, וכל תוצאה עשויה להפוך לגורם חדש בתוך המערכת. נתונים, ציפיות, התנהגות, מחזוריות, תנאי סביבה והחלטות אנושיות נשזרים זה בזה ויוצרים מציאות שאינה ניתנת להסבר באמצעות משתנה בודד.

אך מורכבות אינה בהכרח היעדר חוקיות. לעיתים היא מעידה על כך שהחוקיות טרם זוהתה, שהנתונים עדיין אינם שלמים, שהקשרים בין המשתנים טרם פוענחו, או שהמערכת נבחנת ברמת התבוננות שאינה מתאימה לה.

הספר הזה מציע מסגרת לחקר מערכות מורכבות ולחיזוי התנהגותן. הוא אינו מבטיח ודאות מוחלטת, ואינו מניח שכל תופעה ניתנת לחיזוי מלא. מטרתו שאפתנית אך מדודה: להגדיל באופן שיטתי את יכולת החיזוי, להרחיב את הוודאות היחסית ולצמצם החלטות הנשענות על ניחוש בלבד.

המסגרת צמחה מן המפגש בין חשיבה הנדסית, חקירה שיטתית של כשלים ותהליכים, ועיסוק במערכות שבהן תוצאה נראית לעיתים ברורה רק לאחר שהתרחשה. היא מבקשת להפוך את כיוון החקירה: במקום לתאר את המציאות בדיעבד, לנסות לזהות את המבנים המתהווים בתוכה בזמן אמת.

התאוריה המוצגת כאן מבוססת על תפיסה שלפיה נתונים אינם רק מספרים. הם שפה. כל נתון הוא סימן; כל קשר בין נתונים נושא משמעות; וכל מערכת מורכבת מספרת סיפור באמצעות היחסים המשתנים בין מרכיביה.

כדי לקרוא את הסיפור הזה, אין די באיסוף מידע. יש למיין את הנתונים למשפחות, לבחון את מאפייניהן, לבצע טרנספורמציות, לזהות מחזוריות, להבין קבוצות ויחסי גומלין, ולבחון כיצד תובנות שונות נשזרות זו בזו. מתוך תהליך זה נבנים מודולי חשיבה מותאמים לתחום הנחקר, ומעליהם פועל מודל־על הבוחן את ההסכמות, הפערים והשינויים בין התובנות.

זוהי אינה רק שיטה לחיזוי. זוהי דרך לחשוב על איזודאות. במקום לראות באקראיות סוף פסוק, התאוריה מציעה לראות בה נקודת מוצא לחקירה: סימן לכך שייטכן שקיימים נתונים חסרים, קשרים שטרם זוהו, מחזורים שטרם פוענחו או רמת מערכת שעדיין לא נבחנה.

המסע מתחיל כאן.

פתח: הרוח סביב כנף המטוס

כאשר מטוס נע באוויר, הזרימה סביב כנפיו אינה נראית תמיד מסודרת. לעיתים נוצרים סביב הכנף מערבולות, שינויי לחץ, פיצולים בזרימה ותנועות מהירות שקשה לעקוב אחריהן. במבט ראשון, התופעה עשויה להיראות אקראית: כאילו כל מערבולת נוצרת ללא חוקיות, וכל שינוי הוא בלתי צפוי.

אך הזרימה אינה מתרחשת בחלל ריק. היא מושפעת מצורת הכנף, מזווית ההתקפה, ממהירות המטוס, מצפיפות האוויר, מהטמפרטורה, מהלחץ, מתנאי הסביבה וממערבולות שנוצרו קודם לכן. כל רכיב משפיע על רכיבים אחרים, וכל שינוי עשוי לשנות את התנאים שבהם יתר השינויים מתרחשים.

המערכת מורכבת מאוד, אך אינה בהכרח חסרת חוקיות. הקושי בחיזוי הזרימה אינו נובע בהכרח מהיעדר חוקים פיזיקליים, אלא מכך שאין בידינו תמיד את כל תנאי ההתחלה, את כל נתוני הסביבה ואת מלוא יכולת החישוב הדרושה כדי לתאר את המערכת ברמת דיוק מלאה.

דוגמה זו אינה מוכיחה שאין אקראיות בטבע. היא מדגישה עיקרון חשוב יותר: חלק ממה שנראה אקראי עשוי להיות תוצאה של הבנה חלקית, מדידה חלקית או מודל חישובי שטרם הושלם.

חלק ממה שנראה אקראי עשוי להיות תוצאה של הבנה חלקית, מדידה חלקית או מודל חישובי שטרם הושלם.

אותו עיקרון עשוי להתקיים גם במערכות אחרות. בשוק ההון, תנועת מחיר בודדת עשויה להיראות מקרית, אך היא יכולה להיות קשורה לנתוני מציאות, לציפיות, להתנהגות משתתפים, לקבוצות, למחזוריות, לזרימות משאבים וליחסי גומלין רחבים יותר. בספורט, תוצאה אחת עשויה להיראות בלתי צפויה, אך היא יכולה להיות קשורה לעומס, לכושר, להחלטות, לסגנון משחק, למבנה הקבוצה ולתנאי הסביבה.

במערכות שבהן בני אדם מעורבים מתווספים גם אינטרסים, תמריצים, פחדים, מידע חלקי, מדיניות, תגובות הדדיות ושינויי התנהגות. אלה אינם מבטלים את אפשרות החיזוי. הם מחייבים תצפית רחבה יותר, טיפול מדויק יותר בנתונים והבנה עמוקה יותר של הקשרים בין המרכיבים.

מכאן נובע קו ההנחיה של הספר: אקראיות אינה סוף החיזוי. היא סימן לכך שהמערכת עדיין אינה מובנת במלואה. כאשר תופעה נראית אקראית, יש לשאול מה עדיין איננו יודעים, אילו נתונים חסרים, אילו יחסי גומלין טרם נבדקו, האם נבחרה רמת ההתבוננות הנכונה, והאם מתחת לרעש מסתתר מבנה שעדיין לא הצלחנו לקרוא.

התאוריה המאוחדת לחיזוי במערכות מורכבות מבקשת לבנות דרך סדורה להתמודד עם שאלות אלה. היא מתחילה בנתון הגולמי, אך אינה נעצרת בו. היא בוחנת אותו דרך משפחת הנתונים שאליה הוא שייך, דרך טרנספורמציות אפשריות, דרך היחסים בינו לבין סדרות אחרות, דרך קבוצות, מחזוריות, שינויים במבנה המערכת ושזירה בין מודולי חשיבה.

מטרת התהליך אינה ליצור ודאות מדומה. מטרתו להגדיל בהדרגה את יכולת החיזוי, להרחיב את הוודאות היחסית ולצמצם את מרחב ההחלטות המבוססות על ניחוש בלבד.

עקרונות החיזוי במערכות מורכבות

מורכבות, אקראיות נתפסת ויכולת הקריאה של המערכת

מערכת מורכבת אינה אוסף של חלקים

מערכת מורכבת אינה רק מערכת גדולה. היא מערכת שבה מרכיבים רבים פועלים במקביל, משפיעים זה על זה ומגיבים לשינויים שנוצרים בתוכה. לעיתים שינוי קטן ברכיב אחד יוצר השפעה מצטברת על קבוצה שלמה; לעיתים אותה השפעה חוזרת ומשנה את הרכיב שממנו התחילה. לכן אין די בבחינת כל מרכיב לחוד. יש להבין את יחסי הגומלין ואת המבנה שמחבר ביניהם.

המורכבות מתעצמת כאשר המערכת כוללת זמן, זיכרון, תגובות חוזרות, ציפיות, מגבלות קיבולת או משתתפים אנושיים. במערכות כאלה, הנתון של אתמול אינו רק תיאור של עבר. הוא עשוי להשפיע על החלטות של היום ועל התנאים שבהם תתקבל התוצאה של מחר.

לכן חיזוי במערכת מורכבת אינו חיפוש אחר מספר אחד שיספק תשובה. הוא ניסיון להבין את המארג שבו מספרים, החלטות, קשרים ותנאי סביבה מקבלים משמעות.

אקראיות נתפסת מול אי־ודאות

כאשר אנו מתקשים להסביר תופעה, הנטייה הטבעית היא לכנות אותה אקראית. אולם יש להבחין בין אקראיות ממשית, אם קיימת, לבין אקראיות נתפסת: מצב שבו התוצאה נראית חסרת חוקיות מפני שהמידע חלקי, מפני שהקשרים אינם נראים, או מפני שהמודל שבו אנו משתמשים צר מדי.

התאוריה אינה מבקשת להכריע בשאלה הפילוסופית או הפיזיקלית אם כל תופעה ניתנת לפענוח מלא. היא מציעה הנחת עבודה: במערכות רבות, חלק מן האקראיות הנראית לעין נובע מגבולות מדידה, מעודף רעש, מחוסר נתונים, משינוי משטר או מאי־הבנה של רמת המערכת הנכונה. לכן האקראיות אינה מונח לסיום הדיון; היא סימן לכיוון שבו יש להעמיק את החקירה.

המטרה אינה לבטל אי־ודאות. המטרה היא להפריד בין מה שאיננו יודעים עדיין לבין מה שאיננו יכולים לדעת, ולשפר ככל האפשר את החלק הראשון.

התכנסות וקושי

יכולת החיזוי עולה כאשר משפחות נתונים בלתי תלויות יחסית מספרות סיפור דומה. כאשר נתוני מציאות, ציפיות והתנהגות מצביעים על אותו מבנה, נוצרת התכנסות. התכנסות אינה הוכחה מוחלטת; היא מצב שבו כמה עדויות שונות מחזקות זו את זו ומקטינות את מרחב ההסברים המתחרים.

מנגד, כאשר הנתונים מתפצלים, כאשר קבוצות פועלות בכיוונים סותרים, או כאשר אותו מקבל משמעות שונה לפי ההקשר, רמת הקושי עולה. קושי אינו בהכרח כישלון של המערכת. הוא מידע בפני עצמו: הוא מצביע על כך שנדרשת הרחבת שדה המחקר, בחינה של קבוצה אחרת, בדיקה של מחזוריות או שינוי במבנה ההנחות.

מכאן נובע כלל פשוט: ככל שההתכנסות קטנה, גדלה ההסתברות להימצא במרחב חיזוי מורכב יותר; ככל שההתכנסות גדלה, גדלה היכולת לקרוא את המערכת באופן יציב יותר.

קיבולת ופוריות

קיבולת היא יכולתה של מערכת להכיל עומס, שינוי או הפרעה מבלי לאבד את מבנה פעולתה. מערכת הקרובה לגבולותיה עשויה להיות רגישה יותר לשינויים קטנים. מערכת בעלת מרחב פעולה רחב יותר עשויה להגיב באופן מדוד יותר. לכן קיבולת אינה רק נתון תפעולי; היא תנאי המשפיע על יציבותו של תהליך.

פוריות היא מושג משלים. היא מתארת את מידת היכולת של מצב מסוים לייצר תרחישים, הסתעפויות ושינויים אפשריים. ככל שהפוריות גבוהה, מספר האפשרויות שהמערכת עשויה לפתח גדל. הפוריות אינה רק מדד צדדי; היא שכבת פרשנות המשנה את המשקל שאנו מעניקים לאותות אחרים. במרחב פורה במיוחד, נדרשת התכנסות רחבה יותר לפני שמעניקים לאות בודד משמעות גבוהה.

קיבולת ופוריות נשזרות זו בזו. מערכת בעלת קיבולת מצטמצמת ופוריות גבוהה עשויה להיכנס למרחב שבו הקושי גדל במהירות. מערכת בעלת קיבולת רחבה ופוריות נמוכה עשויה להיות קריאה יותר, אף שאין בכך הבטחה לגבי כיוון התוצאה.

ברבור לבן וברבור שחור

בתאוריה זו, ברבור לבן וברבור שחור אינם מתארים בהכרח אירוע טוב או רע, עלייה או ירידה. הם מתארים את איכות מרחב החיזוי. ברבור לבן הוא מצב שבו רמת האקראיות הנתפסת נמוכה יותר, הקשרים בין הנתונים בהירים יחסית והמערכת ניתנת לקריאה יציבה יותר. ברבור שחור הוא מצב שבו האקראיות הנתפסת גבוהה, רמת הקושי עולה ויכולת החיזוי נחלשת ללא כלים, אלגוריתמיקה והבנה מערכתית מתאימה.

הברבור השחור אינו בהכרח אירוע יחיד. הוא יכול להיות אזור במרחב החיזוי שבו הנחות קודמות אינן מספיקות. גם אז אין הכרח לנטוש את החיזוי. ייתכן שהבהירות אינה נמצאת ביחידה הנבחנת אלא בקבוצה, ברשת, במחזור או במשטר רחב יותר.

מכאן עוברת התאוריה לשלב הבא: אם המערכת מדברת באמצעות נתונים, יש ללמוד כיצד לקרוא את שפתם.

שפת הנתונים

מן הנתון הגולמי אל משמעות מערכתית

נתונים אינם מספרים בלבד

נתון בודד הוא סימן. הוא עשוי להיות מדויק, אך עדיין לא לספר את הסיפור. משמעותו נוצרת מתוך המקום שבו הוא מופיע, מתוך היחסים שלו עם סדרות אחרות, מתוך רצף הזמן ומתוך השאלה שאנו מבקשים לשאול.

אפשר לחשוב על נתונים כשפה. שדה נתונים הוא אות. כמה שדות שמתחברים זה לזה יוצרים מילה. קשרים מתמשכים בין קבוצות של נתונים יוצרים משפט. ורק כאשר המשפטים נקראים בתוך הקשר רחב, ניתן להבין את הסיפור שהמערכת מספרת.

הטעות הנפוצה ביותר היא לפרש נתון מחוץ להקשרו. עלייה יכולה לבטא התחזקות, אך גם תגובת יתר. ירידה יכולה לבטא היחלשות, אך גם התאמה זמנית. הנתון עצמו אינו מספיק; ההקשר הוא שמעניק לו משמעות.

שלוש משפחות הנתונים

כדי למנוע ערבוב בין סוגי מידע שונים, התאוריה מחלקת את הנתונים לשלוש משפחות יסוד. המשפחה הראשונה היא משפחת המציאות: הנתונים המתארים את מצב המערכת בפועל. אלה יכולים להיות ביצועים, משאבים, עומסים, תפוקות, תוצאות, תקלות, הכנסות, מלאי או כל מדד אחר המשקף את רצפת האמת של התחום הנחקר.

המשפחה השנייה היא משפחת הציפיות. היא מתארת את מה שמתתפים, חוקרים, לקוחות, מנהלים או קהלים סבורים שיקרה. ציפיות עשויות להופיע בתחזיות, בתכניות, בהערכות, בסנטימנט, בהתחייבויות או בהנחות תפעוליות. הן אינן המציאות, אך הן משפיעות עליה משום שהן מכוונות החלטות.

המשפחה השלישית היא משפחת ההתנהגות. היא מתארת מה מרכיבי המערכת עושים בפועל: פעולות, בחירות, זרימות, שימוש במשאבים, תגובות, שינויי מדיניות או דפוסי תנועה. לעיתים הפער בין מה שקיים, מה שמצפים שיקרה ומה שנעשה בפועל הוא מקור התובנה החשוב ביותר במערכת כולה.

איכות הנתון והטיפול בו

לפני שמחשבים, יש לשאול מהו אופי הנתון. האם הוא עדכני? האם מקורו אמין? האם הוא שלם? האם הוא נמדד באותה שיטה לאורך זמן? האם קיימים פערים, שההיות, שינויים בהגדרה או הטיות של מקור? איכות החיזוי אינה יכולה לעלות על איכות הקריאה של הנתונים שעליהם היא נשענת.

הנתון הגולמי נשמר תמיד. הוא רצפת האמת שאליה ניתן לחזור כאשר פירוש מסוים מתברר כשגוי. אך לצד הנתון הגולמי ניתן ליצור ייצוגים נוספים, המאפשרים לראות מבנים שלא היו ברורים קודם. פעולה זו נקראת טרנספורמציה נתונים.

טרנספורמציה אינה זיוף הנתון אלא שינוי מכוון של צורת הקריאה שלו. לדוגמה, סדרה שבה ערך עולה, נותר כמעט ללא שינוי ואז יורד, יכולה להיבחן גם כייצוג כיווני פשוט: 1, 0, -1. הייצוג החדש אינו מחליף את עוצמת השינוי המקורית, אך הוא מאפשר לבחון רצף, שינוי מומנטום, דפוס מחזורי או מעבר בין מצבים.

פישוט, משקלים ומחזוריות

לכל סדרת נתונים יכולים להיות כמה ייצוגים: ערך גולמי, שיעור שינוי, יחס לממוצע, חריגה מגבול, דירוג יחסי, כיוון תנועה, קצב שינוי או מצב מחזורי. הפישוט אינו מטרה בפני עצמה. מטרתו להפיק נקודת מבט נוספת על אותה תופעה.

לאחר הטרנספורמציה ניתן לבחון משקלים, ערכים יחסיים, גבולות, גזרה ופריצות תחום. אפשר לשאול אם ערך חזר על תבנית קודמת, אם הוא התקרב לגבול שהיה משמעותי בעבר, אם הוא יצא מטווח מוכר או אם היחסים בין שתי סדרות השתנו. גם מחזוריות אינה נבחנת כאות קסם; היא דרך לבחון אם ההתנהגות הנוכחית מזכירה מבנים חוזרים או חורגת מהם.

בכל שלב יש להיזהר מהתכנסות מדומה. כמה מדדים יכולים להיראות כתמיכה רחבה, אף שהם נגזרים מאותו מקור או מאותו נתון בסיסי. לכן שפת הנתונים דורשת לא רק צבירה של מידע, אלא גם בדיקה של עצמאות המקורות ושל משמעות הקשרים ביניהם.

מורכבות מבוקרת

יותר נתונים אינם בהכרח יותר הבנה. מערכות נתונים עלולות להפוך למורכבות כל כך עד שהן מייצרות רעש, שכפול ותלות סמויה בין מדדים. התאוריה מבקשת מורכבות מבוקרת: מספיק שכבות כדי לראות את המערכת, אך לא כל כך הרבה שכבות עד שהמבנה המרכזי נעלם.

השאלה אינה כמה נתונים נאספו, אלא אילו נתונים משנים את יכולת הקריאה של המערכת. כל שדה נתונים צריך להצדיק את מקומו: האם הוא מוסיף משמעות, האם הוא משפר את ההבחנה בין חלופות, האם הוא משתלב במשפחת הנתונים המתאימה, והאם אפשר לבחון את תרומתו לאורך זמן.

לאחר שהנתונים קיבלו שפה, נדרש להבין היכן הם פועלים. לשם כך עוברת התאוריה מן הסדרה הבודדת אל הרשת.

המערכת כרשת

יחידות, קבוצות, מחזוריות ומשטר

מן היחידה אל הרשת

יחידה בודדת אינה פועלת לבדה. חברה, קבוצה, רכיב, מחלקה, שחקן, מכונה או תחנת שירות פועלים בתוך סביבת קשרים. לעיתים התנהגותה של היחידה מוסברת טוב יותר על ידי מקומה ברשת מאשר על ידי הנתונים הפנימיים שלה בלבד.

לכן החיזוי אינו מתבצע על אובייקט מבודד. הוא מתבצע על רשת של יחסים. כאשר יחידה נעשית עמומה, אין הכרח להפסיק לחזות. לעיתים יש להרחיב את שדה המחקר: אל הקבוצה שאליה היא משתייכת, אל קבוצות משיקות, אל שרשרת אספקה, אל סביבה תפעולית או אל המחזור הרחב יותר.

הרחבת השדה אינה חיפוש אחר פשטות. לעיתים השדה הרחב מורכב יותר. אך הוא עשוי להיות עשיר יותר בסימוכין, ולכן קריא יותר מן הנקודה הבודדת.

קבוצות כמבנה מחקרי

קבוצה אינה רק רשימת פריטים בעלי תווית משותפת. היא מבנה מחקרי שבו נבחרים יחסים פנימיים: מי מוביל, מי נגרר, מי מתנתק, האם שינוי מתפשט בין מרכיבים, והאם הכיוון הנראה מבחוץ נתמך ברוחב הקבוצה או רק במספר קטן של יחידות בולטות.

יחידה יכולה להשתייך למספר קבוצות בו־זמנית. היא עשויה להיות חלק מקבוצה ענפית, תפעולית, טכנולוגית, התנהגותית או קבוצת מחקר שנבנתה לצורך בדיקת השערה. ההשתייכות המרובה אינה פגם. היא מאפשרת לראות פערים: יחידה יכולה להיראות חזקה בהקשר אחד וחלשה בהקשר אחר. הפער עצמו עשוי להיות מידע.

כאשר כמה יחידות בתוך קבוצה מתחילות להציג שינוי דומה, יש לבחון אם מדובר בהתארגנות קבוצתית או בצירוף מקומי. כאשר קבוצה שלמה משנה את יחסיה לקבוצות אחרות, ייתכן שהמערכת הרחבה מתחילה לעבור שינוי.

יחסי גומלין בין קבוצות

החלק החשוב ביותר אינו רק מצב הקבוצות אלא יחסי הגומלין ביניהן. קבוצה אחת יכולה להשפיע על אחרת, להתחרות איתה על משאבים, להוביל אותה, להיגרר אחריה או לשמש גשר בין שני מרחבים שונים. כאשר יחסים כאלה משתנים, משתנה גם משמעותו של המידע בתוך כל קבוצה.

במערכות פיננסיות אפשר לחשוב על מעבר של תשומת לב והון בין קבוצות. במערכות תפעוליות אפשר לחשוב על מעבר של עומס, ביקוש או משאבים בין יחידות. במערכות הנדסיות אפשר לחשוב על השפעה הדדית בין רכיבים, תנאי סביבה ועומסים. העיקרון זהה: אין די לבדוק מה קורה בתוך רכיב. יש לבדוק מה עובר בין רכיבים.

תנועה ברשת אינה הוכחה סופית לסיבה מסוימת. היא סימן שיש לבחון בהקשר רחב. כאשר כמה משפחות נתונים, קבוצות ומחזורי זמן מצביעים על אותו שינוי יחסי, גדלה האפשרות שהמערכת אכן משנה את מבנה הקשרים שלה.

מחזוריות ומשטר

כל מערכת חיה בזמן. לכן אין די במצב הנוכחי; יש להבין גם את התנועה שממנה הוא נוצר. מחזוריות מתארת רצפים אפשריים של התארגנות, התרחבות, בגרות, היחלשות, התאמה והתחדשות. אין מדובר בתבנית קשיחה שכל מערכת חייבת לעבור, אלא במסגרת קריאה המאפשרת לשאול באיזה שלב נמצא התהליך ומה השתנה ביחס לשלב הקודם.

משטר הוא תנאי הפעולה הרחב שבתוכו המחזור מתקיים. הוא אינו כיוון בלבד. הוא מבטא מצב שבו יחסי הכוחות, המשקלים והתגובות במערכת מקבלים אופי מסוים. באותו משטר, אות מסוים עשוי להיות משמעותי; במשטר אחר, אותו אות יכול להיות חלש, מטעה או חסר הקשר.

לפיכך, נתון אינו נושא משמעות קבועה. משמעותו תלויה בשאלה באיזה מחזור ובאיזה משטר הוא נוצר, כיצד הקבוצה מתנהגת, ואילו קשרים מתקיימים בינו לבין יתר רכיבי הרשת.

קריאה רבי־רמתית

המערכת כרשת מחייבת מעבר מתמיד בין רמות: מן היחידה לקבוצה, מן הקבוצה לרשת, מן הרשת למשטר, ואז חזרה אל היחידה. אין מדובר בזום מכני פנימה והחוצה. מדובר בבחירה מודעת של רמת ההתבוננות שבה הנתונים מתחילים לקבל משמעות.

כאשר רמה אחת אינה מספקת תשובה, אין הכרח להסיק שהמערכת בלתי ניתנת לחיזוי. ייתכן שהשאלה נשאלה ברמת מערכת צרה מדי. כך נוצר הקשר לפרק הבא: תהליך אינו נבחן רק לפי מצבו ברגע נתון, אלא לפי האופן שבו הוא מתהווה, מקבל המשכיות או משנה מגמה.

התהוות, המשכיות ושינוי מגמה

קריאת תהליכים לאורך זמן

התהוות: כאשר המבנה מתחיל להשתנות

תהליך חדש אינו מופיע תמיד ברגע חד וברור. לעיתים הוא מתחיל כפער קטן בין רכיבים, כתגובה שאינה מתאימה עוד לדפוס הקודם, כקשר חדש בין קבוצות או כשינוי עדין בדרך שבה המערכת מגיבה לאותם תנאים. בשלב זה עדיין אין בהכרח מגמה ברורה, אך מתחיל להיווצר מבנה חדש.

המונח התהוות מדויק יותר ממונחים מוחלטים כגון לידה. הוא מתאר שינוי הדרגתי שבו המערכת מתרחקת מן המבנה הקודם, אך עדיין אינה בהכרח מגובשת למבנה חדש. התהוות יכולה להיות תחילתה של התחזקות, של היחלשות, של שינוי משטר, של ארגון מחדש או של כל כיוון אחר.

לא כל חריגה היא התהוות. מערכת מורכבת מייצרת תנודות ותוצאות מקומיות שחלקן נעלמות. התהוות מתחילה כאשר השינוי מקבל הקשר: הוא מתמיד, מתחבר לנתונים נוספים, מתפשט לקבוצה או משנה יחסים במערכת.

המשכיות: כאשר התהליך מקבל תמיכה

התהוות לבדה אינה מספיקה. תהליך יכול להופיע ולהיעלם. לכן השאלה הבאה היא אם המבנה החדש מקבל המשכיות. המשכיות אינה רק תנועה מתמשכת באותו כיוון. היא קיומה של תמיכה מערכתית בתהליך: יחסים שנותרים עקביים, קבוצה שמתחילה להשתתף, נתונים שממשיכים להתחבר, או מחזור רחב יותר שאינו סותר את ההתפתחות.

תהליך עשוי להמשיך להיראות כלפי חוץ גם כאשר התמיכה הפנימית בו נחלשת. לכן אין לבחון רק זמן וכיוון. יש לבחון אם המבנה שתמך בתהליך נשמר, מתחזק או מתרחב. האם יותר יחידות בקבוצה מגיבות? האם הפערים מצטמצמים או גדלים? האם קבוצות משיקות תומכות? האם המשטר עדיין מאפשר את אותו פירוש?

המשכיות אינה אישור אוטומטי. היא שלב מחקרי שבו יש להמשיך ולבדוק את עמידות המבנה, את התנאים שעשויים לשבור אותו ואת החלופות שמתחילות להופיע סביבו.

שינוי מגמה: כאשר הסיפור משתנה

תהליך אינו חייב להסתיים באופן חד. לעיתים הוא מאבד קוהרנטיות, משנה צורה, מתפצל או מתחלף במבנה אחר. לכן עדיף לדבר על שינוי מגמה ולא על מות התהליך. שינוי מגמה אינו רק היפוך של כיוון. הוא שינוי ביחסים שתמכו בתהליך הקודם.

השינוי מתחיל לעיתים לפני שהתוצאה החיצונית ברורה. יחידה יכולה להמשיך להיראות חזקה, אך הקבוצה נחלשת. קבוצה יכולה להמשיך להתקדם, אך מספר היחידות התומכות בה מצטמצם. ציפיות יכולות לגדול, בעוד נתוני המציאות או ההתנהגות כבר אינם תומכים באותה עוצמה. במצבים כאלה, הסיפור הקודם עדיין נראה לעין, אך המבנה הפנימי שלו מתחיל להשתנות.

לא כל תיקון הוא שינוי מגמה. מערכת יכולה לעצור, להתאים את עצמה או לחוות תנודתיות זמנית ועדיין לשמור על המבנה המרכזי. השאלה אינה רק האם חל שינוי, אלא האם חל שינוי במערכת היחסים בין היחידה, הקבוצה, הרשת, המחזור והמשטר.

שלושת המצבים כרצף אחד

התהוות, המשכיות ושינוי מגמה אינם שלושה תאים סגורים. הם רצף של קריאה. בכל רגע יש לשאול: האם המבנה הקודם עדיין מסביר את הנתונים? האם מתחיל להיווצר מבנה חדש? האם המבנה החדש מקבל תמיכה? והאם ההנחות שעליהן נשענו קודם עדיין תקפות?

המעבר בין המצבים אינו חייב להיות אחיד בכל תחום. במערכת הנדסית הוא יכול להתבטא בשינוי בדפוס עומסים או כשלים. במערכת כלכלית הוא יכול להופיע ביחסים בין קבוצות, בציפיות ובהתנהגות. במערכת חברתית הוא יכול להתבטא בשינויי תמריצים, נורמות ותוצאות. לכן אופן הבחינה יוגדר בהמשך על ידי מודולי חשיבה מותאמים לתחום.

עם זאת, העיקרון נשאר קבוע: החיזוי אינו מחפש רק מצב, אלא תהליך. וכדי להחליט אם תהליך ראוי לתשומת לב, יש לבחון עד כמה ניתן לחזות אותו ביחס לשאלה מסוימת.

יכולת חיזוי, מרחב הזדמנות והכרעה

מן הבנת המערכת אל בחירה בין חלופות

יכולת חיזוי היא תכונה של השאלה

השאלה החשובה אינה רק מה צפוי לקרות, אלא עד כמה ניתן לחזות את מה שעליו נשאלת השאלה. יכולת חיזוי אינה תכונה קבועה של אובייקט. היא תכונה משתנה של שדה המחקר, של טווח הזמן, של רמת המערכת ושל הנתונים הזמינים.

ייתכן שקשה לחזות את התנועה המדויקת של יחידה בזמן קצר, אך ניתן להבין טוב יותר את מצבה היחסי בתוך קבוצה. ייתכן שקשה לזהות את מועדו המדויק של מעבר, אך ניתן לזהות שהמשטר משתנה ושמגמות ישנות מאבדות תוקף. לכן אין חיזוי מוחלט; יש חיזוי ביחס לשאלה מוגדרת.

כאשר יכולת החיזוי של שכבה מסוימת נמוכה, אין פירוש הדבר שיש להפסיק לחקור. יש להרחיב את שדה הבדיקה אל שכבות, קבוצות ומערכות שכנות. לעיתים המערכת עצמה נעשית עמומה, בעוד שסביבתה ממשיכה לשדר מידע בעל ערך חיזוי גבוה יותר.

מדידת הבהירות היחסית

יכולת חיזוי עולה כאשר יש התכנסות בין משפחות הנתונים, כאשר הקשרים בין הקבוצות קריאים, כאשר המחזוריות והמשטר אינם סותרים את הסיפור, וכאשר רמת הקושי והפוריות מאפשרות להעניק משמעות לאותות. היא יורדת כאשר המקורות מתפצלים, כאשר המשטר משתנה במהירות, כאשר הקבוצה מאבדת קוהרנטיות או כאשר קיימות חלופות רבות שלא ניתן להעדיף ביניהן.

אין מדובר בציון קסם. יכולת חיזוי היא הערכה מצטברת של איכות המארג. היא יכולה להיות גבוהה ביחס לכיוון אחד ונמוכה ביחס לכיוון אחר; גבוהה בטווח אחד ונמוכה בטווח אחר; ברורה בקבוצה אחת ועמומה בקבוצה אחרת. מטרת המדידה אינה לייצר ודאות מדומה, אלא לדעת היכן המערכת ניתנת לקריאה בצורה אחראית יותר.

במובן זה, יכולת חיזוי היא מנגנון ניווט. היא מכוונת את החוקר אל השדה שבו נכון להעמיק, אל האותות שדורשים חיזוק, ואל המקרים שבהם יש לבחון מחדש את הנחות היסוד.

מרחב הזדמנות

לא כל אפשרות היא הזדמנות. אפשרות היא דבר שעשוי לקרות; הזדמנות היא אפשרות שקיבלה עדיפות יחסית בתוך מערכת של מטרות, זמן, אילוצים וחלופות. היא אינה בהכרח אירוע חיובי, ואינה בהכרח קריאה לפעולה מיידית.

מרחב הזדמנות יכול להצדיק המשך חקירה, שינוי מוקד הקשב, העברת משאבים, המתנה, הימנעות או בחירה בין דרכי פעולה. הוא נוצר כאשר אפשרות מסוימת מתיישבת טוב יותר עם המידע, עם תנאי המערכת ועם המטרה שהוגדרה, לעומת החלופות האחרות.

יכולת חיזוי ומרחב ההזדמנות אינם אותו דבר. יכולת החיזוי מאפשרת להבין; מרחב ההזדמנות מאפשר להעדיף. גם מערכת קריאה מאוד אינה מציגה תמיד חלופה מעשית עדיפה, וגם אפשרות מושכת אינה הופכת להזדמנות כאשר רמת הקושי גבוהה מדי או כאשר התנאים אינם מתאימים למטרה.

הכרעה בין חלופות

הכרעה היא בחירה מודעת בין חלופות אפשריות. היא אינה נגזרת אוטומטית מתחזית אחת, וגם אינה מסתכמת בפעולה או באי־פעולה. הכרעה יכולה להיות המשך בדיקה, שינוי מסגרת המחקר, הקצאה חלקית של משאבים, המתנה או בחירה בחלופה מסוימת על פני אחרת.

כדי להכריע נכון יש להגדיר מטרה. אותו מידע יכול להוביל להחלטות שונות לפי טווח הזמן, הקיבולת, תנאי הבטיחות, מגבלות המשאבים או סוג התוצאה המבוקשת. לכן אי אפשר לדבר על החלטה טובה מחוץ להקשר. ההחלטה הטובה היא זו שמעדיפה חלופה מסוימת ביחס לחלופות האחרות, בתנאים המוגדרים באותו זמן.

גם שמירת קיבולת היא חלופה. כאשר אין עדיפות מספקת, שימור של זמן, קשב, הון, כוח אדם או משאבים אחרים אינו היעדר החלטה; הוא החלטה לשמור יכולת תגובה. מערכת שאינה משאירה מרחב תגובה עלולה לאבד את חופש הבחירה שלה דווקא כאשר המבנה משתנה.

הכרעה מתעדכנת

מערכות מורכבות משתנות, ולכן גם החלטות צריכות להיבחן מחדש. תהליך שהיה עדיף אתמול יכול לאבד את עדיפותו מחר. חלופה שנראתה משנית יכולה להתחזק. מידע חדש יכול לשנות את הפרשנות של מידע קודם. ההכרעה אינה סוף החשיבה; היא נקודת פעולה בתוך מחזור למידה.

העיקרון המנחה הוא פשוט: אין לבחור באפשרות מפני שהיא נראית טובה בפני עצמה, אלא מפני שהיא עדיפה באופן יחסי ביחס למטרה, לזמן, לאילוצים ולחלופות. כדי לממש עיקרון זה נדרשת ארכיטקטורת חשיבה המאפשרת לנתונים, לנוסחאות ולתובנות לפעול יחד.

מודולי חשיבה, שזירה ומודל-על

מן הנתון הבודד אל תובנה מערכתית

מודולי חשיבה מותאמים לתחום

התאוריה אינה מציעה נוסחה אחת קבועה לחיזוי כל מערכת. מערכת פיננסית, הנדסית, תפעולית, ביטחונית, ספורטיבית או חברתית עשויה להיות מורכבת באותה מידה, אך היא מדברת בשפת נתונים אחרת. לכן אין לקבע מראש רשימה אחת של מודולים, מבחנים או ספים שתתאים לכל תחום.

במקום זאת, התאוריה מציעה לבנות מודולי חשיבה ייעודיים. מודול חשיבה הוא מסגרת ממוקדת לבחינת שאלה מסוימת בתוך מערכת: הוא יכול לארגן נתונים, לבחון קשרים, לזהות שינוי, להשוות חלופות, לבדוק מחזוריות או להעריך את תנאי הפעולה של תהליך.

המודולים משתנים לפי התחום, אך עקרון הפעולה נשמר. כל מודול מתחיל בנתונים הרלוונטיים למשפחה שאליה הוא מחובר, בוחן את מאפייני הסדרות, מפעיל טרנספורמציות ומייצר תובנות שניתנות לשזירה עם מודולים נוספים.

מן הנתון אל מודול המשנה

השלב הראשון הוא נתון הגולמי. אליו מצטרפים מאפייני הסדרה: קצב העדכון, טווח הערכים, רעש, רציפות, פערים, מהירות תגובה, אמינות המקור והקשר למשפחת הנתונים. לאחר מכן מתבצעת טרנספורמציה, כאשר היא נדרשת, כדי לבחון את התופעה בצורות נוספות.

סדרה אחת יכולה להיבחן כערך, כשינוי, ככיוון, כיחס לממוצע, כחריגה, כמעבר גבול או כחלק ממחזור. מכאן נוצרים מודולי משנה. מודול אחד יכול לבחון התמדה; אחר יכול לבחון מחזוריות; שלישי יכול לבחון שינוי ביחס בין שתי סדרות; ורביעי יכול לבחון אם תופעה מתפשטת בתוך קבוצה או בין קבוצות.

מודולי המשנה אינם איים נפרדים. תוצאה של אחד מהם יכולה לשנות את משקל הבדיקה במודול אחר. למשל, זיהוי מחזוריות עשוי לשנות את הדרך שבה נבחנת חריגה, ופער בין משפחות נתונים עשוי לדרוש בחינה נוספת של ההתנהגות בתוך קבוצה.

שזירת נוסחאות

במערכת מורכבת, נוסחה אחת אינה רק מפיקה תוצאה. היא יכולה לשנות את תנאי הפעולה של נוסחה אחרת. זהו עקרון השזירה. במקום לחשב מדדים בנפרד ואז לחבר אותם באופן שטוח, נבחן כיצד תוצאה אחת משנה משקל, פירוש או סף של תוצאה אחרת.

נוסחת עיקרון יכולה להיכתב כך: משמעותו של נתון נקבעת כפונקציה של הערך הגולמי, הטרנספורמציה שנעשתה עליו, הקשר במשפחת הנתונים, שלב המחזור, רמת הקושי ויחסי הגומלין שלו עם קבוצות וסדרות אחרות. אין זו נוסחה סופית אלא מבנה מחשבתי: הנתון אינו פועל לבד.

המשקלים, הספים וגבולות הגזרה אינם חייבים להיות קבועים. ניתן לבחון אותם לאורך זמן, להתאים אותם לתחום, לבדוק פריצות גבול, לזהות דפוסים מחזוריים ולבחון מתי נוסחה מסוימת מוסיפה משמעות ומתי היא רק משכפלת רעש. כך נבנית אלגוריתמיקה שזורה: נוסחאות בתוך נוסחאות, מודולים המשפיעים זה על זה ומעגלי בדיקה חוזרים.

מודל-העל והמשוב כלפי מטה

מעל מודולי המשנה פועל מודל-על. תפקידו אינו רק לאסוף ציונים או לסכם נתונים. הוא מתבונן ביחסים בין התובנות: האם כמה מודולים מזהים שינוי דומה, האם משפחות הנתונים תומכות או סותרות זו את זו, האם תהליך נראה רק בסדרה אחת או מתפשט לרשת רחבה יותר, והאם שינוי מקומי מתחיל לקבל משמעות מערכתית.

מודל-העל אינו רק שלב סיכום. הוא מחזיר מידע כלפי מטה. כאשר הוא מזהה פער, סתירה או תבנית חדשה, הוא יכול לעורר מחזור בחינה נוסף במודולי המשנה, לשנות סדרי עדיפויות, לבקש אימות נוסף או להצביע על צורך בטרנספורמציה שונה של הנתונים.

כך נוצרת תנועה מחזורית: נתונים, טרנספורמציה, מודולי משנה, שזירה, מודל-על, משוב, ובחינה מחודשת. החיזוי אינו אירוע חד-פעמי; הוא מערכת לומדת של תצפית, פירוש, בדיקה ותיקון.

מערכות תלויות אדם ומערכות אחרות

במערכות שבהן בני אדם מעורבים, חלק ניכר מן האקראיות הנתפסת עשוי לנבוע מהחלטות, תמריצים, מידע חלקי, תגובות הדדיות, שינויי מדיניות והתנהגות קבוצתית. תצפית שיטתית בתוצאות אנושיות, במסגרת חוקית, מורשית ואיתית, יכולה להעשיר את החקירה. גרפי מסחר, טבלאות ספורט, נתונים ממשלתיים, תהליכים תפעוליים ומערכות ניהוליות הם דוגמאות למרחבים שבהם תוצאות אנושיות משאירות עקבות שניתן לבחון.

במערכות שאינן תלויות אדם, כגון מערכות פיזיקליות, הנדסיות או טבעיות, קיימים לעיתים משתנים נסתרים, מגבלות מדידה, השפעות זעירות או מורכבות חישובית גבוהה. התאוריה אינה טוענת שכל תופעה אקראית ניתנת לשליטה או לפענוח מלא. היא מציעה להמשיך ולבדוק האם מה שנראה אקראי הוא באמת חסר מבנה, או שמא הוא מצביע על רמת הבנה, תצפית או חישוב שעדיין לא הושלמה.

בכך הופכת האקראיות לקו מנחה. היא מסמנת היכן חסרה הבנה, היכן נדרש מידע נוסף, והיכן עשויה להימצא שכבת החוקיות הבאה.

אחרית דבר: צוהר לרמת חיזוי גבוהה יותר

התאוריה המאוחדת לחיזוי במערכות מורכבות אינה מסתפקת בתיאור המציאות לאחר שהתרחשה. מטרתה היא לבנות דרך חדשה לקריאת המציאות לפני שהיא מתגבשת במלואה.

היא מתחילה בנתון הגולמי, אך אינה נעצרת בו. היא מפרקת את הנתונים למשפחות, מבצעת טרנספורמציות, בוחנת סדרות, מזהה מחזוריות, משווה בין קבוצות, מפעילה מודולי משנה, שוזרת ביניהם נוסחאות ותבנות, ומעלה את כלל המידע אל מודל-על המתבונן במערכת כמכלול אחד.

כך נוצר מעבר מהתבוננות בנתונים בודדים אל הבנת המבנה שמאחוריהם; מן התגובה לאירוע אל זיהוי התהוותו; מן ניחוש אל חיזוי מבוסס; ומן הסתמכות על סימן יחיד אל התכנסות של שכבות מידע, יחסים ומחזורים.

מטרת התאוריה אינה להבטיח ודאות מוחלטת, משום שמערכות מורכבות כוללות תמיד משתנים נסתרים, שינויי תנאים ואי-ודאות. אך מטרתה ברורה: להגדיל באופן שיטתי את יכולת החיזוי, להרחיב את רמת הוודאות היחסית ולצמצם את מרחב ההחלטות המבוססות על ניחוש בלבד.

ככל שהנתונים מטופלים נכון יותר, ככל שמודולי החשיבה מתאימים יותר לתחום הנחקר, וככל שהשזירה בין המודולים מדויקת יותר, כך ניתן להפיק תובנות עמוקות יותר, להבחין מוקדם יותר בין רעש לבין מבנה, ולהתקרב לרמת חיזוי גבוהה יותר.

המערבולת סביב כנף המטוס אינה נעלמת. גם המורכבות אינה נעלמת. אך כאשר יכולת הקריאה שלנו מעמיקה, חלק גדול יותר מן הבלתי ברור נעשה ניתן לחקירה, להערכה ולחיזוי. העתיד אינו חייב להישאר מרחב אטום. הוא יכול להפוך, בהדרגה, למרחב שבו ההבנה עמוקה יותר והוודאות היחסית גבוהה יותר.

סוף כתב היד הערוך

התאוריה המאוחדת לחיזוי במערכות מורכבות

ברנרד מורן

2026