

# האם חוק מור הוא חוק טבע?

כפי שמעיר ברודריק, האדם נחת על הירח "שליש מאה לפני שמשוגעי-חלל כמו ארתור סי. קלארק ציפו שינחת."

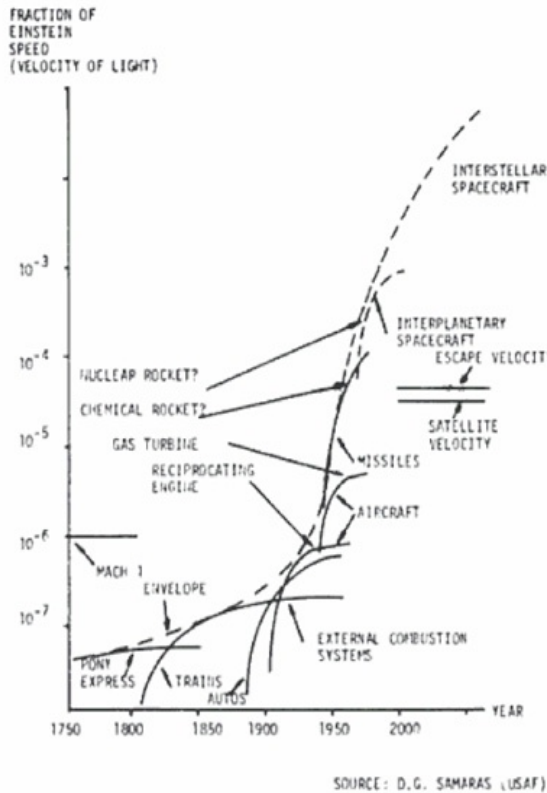


Fig. 1. Speed trend curve

מה ידעה העקומה שלא ידע ארתור סי. קלארק? כיצד היא כימתה את מאמצי הרוסים, וכן את מאמציהם של אינספור צוותים מרחבי העולם? האם הייתה העקומה נבואה שהגשימה את עצמה, או גילוי של מגמה המושרשת בטבע הטכניום? אפשר שהתשובה נמצאת בעקומות של מגמות אחרות שמופו מאז. העקומה המפורסמת ביותר נקראת 'חוק מור'. בקצרה, חוק מור חוזה שמעבדי מחשבים מתכווצים ומוזלים בחצי כל 18-24 חודשים. בחמישים השנים האחרונות, עמדה עקומה זו בתחזיותיה באופן מעורר פליאה.

הראשון להבחין במגמה זאת היה דאג אנגלברט, חוקר בפאולו אלטו, קליפורניה, שלימים ימציא את ממשק "החלונות והעכבר". בראשית דרכו כמהנדס, עבד אנגלברט בתעשייה האווירית – שם למד כיצד כיוון שיטתי הביא למיני יתרונות בלתי-צפויים: ככל שהדגם קטן יותר, כך קל יותר להטיסו. אנגלברט הבין כיצד יתרונות המזעור יכולים לשמש את ההמצאה החדשה שאז עבדו על פיתוחה – מספר מוליכים-למחצה שישולבו על שבב סיליקון אחד. ייתכן שאם יוקטנו, גם המעגלים החשמליים יוכלו לספק את אותו קסם מזעורי: ככל שהשבב קטן יותר, כך הוא יעיל יותר. אנגלברט הציג את

בתחילת שנות החמישים, אותה מחשבה ניקרה במוחם של אנשים רבים בעת ובעונה אחת: הכל משתפר בקצב מהיר וקבוע, כך שאולי יש לשיפורים הללו דפוס; אולי אפשר למפות את ההתקדמות הטכנולוגית עד כה, ואז להמשיך את עקומות המדדים אל צפונות העתיד.

חיל האוויר האמריקאי היה בין הראשונים לחשוב כך באופן שיטתי. החיל נזקק ללוח זמנים ארוך-טווח כדי לדעת אילו מטוסים הוא יתקצב, אלא שהתעופה עמדה אז בגבולה המתקדם ביותר של הטכנולוגיה והשתכללה במהירות מסחררת. כמובן שהם יבנו את המטוס המהיר ביותר שניתן, אבל מאחר שחיל האוויר צריך עשרות שנים להנדס, לשפר ואז להנפיק דגם של מטוס חדש, הגנרלים חשבו שמן הזהירות יהיה להציץ קדימה אל הטכנולוגיות העתידיות שיהיה עליהם לממן.

לכן ב-1953, משרד מדען חיל האוויר מיפה את ההיסטוריה של כלי התעופה המהירים ביותר. טיסתם הראשונה של האחים רייט הגיעה למהירות של 6.8 קמ"ש ב-1903, וזינקה ל-60 קמ"ש שנתיים מאוחר יותר. שיא המהירות התעופתית נשבר שנה אחר שנה, וב-1947 מטוס של לוקהיד-מרטין חצה את קו אלף הקמ"ש. השיא נשבר ארבע פעמים ב-1953, ובתום השנה האף-100 טס במהירות 1,215 קמ"ש. הכל התקדם מהר, ועיני כולם נישאו אל החלל. לפי דמיאן ברודריק, בשנת 1953, חיל האוויר האמריקאי "מיפה את עקומות ואת מטא-עקומות המהירות. העקומה הצביעה על משהו אבסורדי. הם לא האמינו למראה עיניהם. לפי העקומה, יהיו ברשותם מכונות שיהיו מהירות מספיק כדי לשמור על מסלול סביב כדור הארץ... בתוך ארבע שנים. קצת אחר כך, יוכלו המכונות שלהם להשתחרר מכוח הכבידה של הארץ. העקומה רמזה שיוכלו להיות להם לוויינים באופן מידי, ואם יחפצו בכך וישקיעו בכך את כספם – זמן קצר לאחר מכן הם יוכלו להגיע לירח."

יש לזכור שבשנת 1953, לא הייתה קיימת שום טכנולוגיה עתידנית למסעות כאלה. איש לא ידע אם וכיצד אפשר לשרוד טיסה כה מהירה. אפילו בעלי החזון, האופטימיסטים חסרי התקנה, לא ציפו לנחיתה על הירח לפני "שנת אלפיים" הפתגמית. הקול היחיד שטען שאפשר היה קולה של עקומה אחת על פיסת נייר. אבל העקומה צדקה. טעותה היחידה הייתה טעות פוליטית: ב-1957, ברה"מ שיגרה את ספוטניק, בהתאם לניבוי העקומה. 12 שנים מאוחר יותר, טילים אמריקאיים הגיעו לירח.

והרצה בפני חברות האלקטרוניקה, הצבא והאקדמיה, כשהוא מטיף לעתיד אלקטרוני הטמון בחתיכות קטנות יותר ויותר של סיליקון. מיד ניסה "לשכנע אנשים שזה באמת אפשרי לכווץ מכשירים, ולקבל ביצועים טובים יותר בפחות חשמל" – ושלמגמה פלאית זו אין קץ באופק.

היום, כשאנחנו מביטים בעקומה של חוק מור, נבחין במספר הבחנות מפתיעות שניפקה במהלך חמישים שנות בחינתה בפועל. ההפתעה הראשונה היא שזו תמונה של האצה. עלייתה הישרה של "העקומה" מעידה על שיפור טכנולוגי של עשרה מונים לכל נקודה על הציר האנכי. לא רק שמחשוב סיליקוני משתפר, הוא גם משתפר מהר יותר ויותר. האצה רצופה על פני חמישה עשורים היא תופעה נדירה בבילוגיה, ולא הייתה כדוגמתה בטכניום לפני המאה העשרים. למעשה, הפך חוק מור למייצג עקרון ההאצה עליו מושתתות ציפיותינו מהעתיד: העולם הטכני הופך טוב יותר, מהר יותר.

שנית, אפילו מבט מרפרף בגרף חושף את עקביותה מעוררת ההשתאות של עקומת מור. החל מנקודותיה הראשונות, התקדמותה שעונית בצורה מחשידה. השבבים הולכים ומתייעלים באופן אקספוננציאלי באותו הקצב, לא לאט יותר ולא מהר יותר, במשך יובל. העקומה לא יכולה הייתה להיות ישרה יותר גם אם הייתה משורטטת על ידי רודן טכנולוגי.

והנה עלינו להאמין שמסלול ישר זה חוצה בדרך נס את הכאוס של השוק העולמי ואת התחרות המדעית הפרועה, האכזרית והבלתי-מתואמת. הקו כל כך ישר וחסר פניות, שלא ברור מדוע מור ומיד ניסו לשכנע מישהו "להאמין" בו.

השאלה היחידה היא האם אדם מאמין בחוק כחוק, או בחוק כאמונה חברתית המגשימה את עצמה. האם חוק מור הוא בלתי-נמנע, כיוון שנדחף קדימה על ידי טבע החומר, ללא תלות בחברה אליה נולד, או שמא הוא יציר-כפיה של שאפתנות מדעית וכלכלית מאורגנת?

מור ומיד עצמם מאמינים באפשרות האחרונה. לרגל 40 שנות החוק, כתב מור: "חוק מור הוא למעשה חוק כלכלי."

קארבר מיד היה נחרץ אף יותר: "אחרי שהחוק התממש די זמן, אנשים התחילו לדבר עליו ברטרוספקטיבה, וברטרוספקטיבה העקומה באמת צלחה מספר נקודות, כך שהחוק נראה כמו חוק פיזיקלי. אבל האמת היא שאם אתה חי את זה, ואני חי את זה, אז זה לא מרגיש כמו חוק פיזיקלי. זה עניין של פעילות אנושית, זה חזון שאתה מרשה לעצמך להאמין בו. אנשים מוגבלים על ידי מערכת האמונות שלהם, הם מגבילים את עצמם למה שהם מאמינים שהוא בגדר האפשר."

רעיונותיו על המזעור בפני קהל של מהנדסים בכנס המוליכים-למחצה של 1960. משתתף נוסף בכנס היה גורדון מור, חוקר בחברת פיירצ'ילד סמיקונדקטורס.

בשנים הבאות החל מור לאסוף סטטיסטיקה על השבבים הראשונים. עד 1964 היו בידיו מספיק משתנים כדי לגזור את מגמת העקומה עד אז. מור המשיך להוסיף משתנים בזמן שתעשיית המוליכים-למחצה גדלה. הוא עקב אחר פרמטרים רבים – מספר המוליכים-למחצה, עלותו של כל מוליך, מספר הפינים, מהירות החישוב ומספר המוליכים לכל פרוסת סיליקון. אבל רק אחד מהמשתנים התלכד לידי עקומה יפה: מספר המוליכים לכל שבב. ב-1965, בהזמנת עורך המגזין אלקטרוניקס, כתב מור רשימה בשם "עתיד המיקרו-אלקטרוניקה". בכתבה קצרה זו, הצהיר מור שעקומת דחיסת השבבים עולה בחזקה, באופן אקספוננציאלי, מדי שנה.

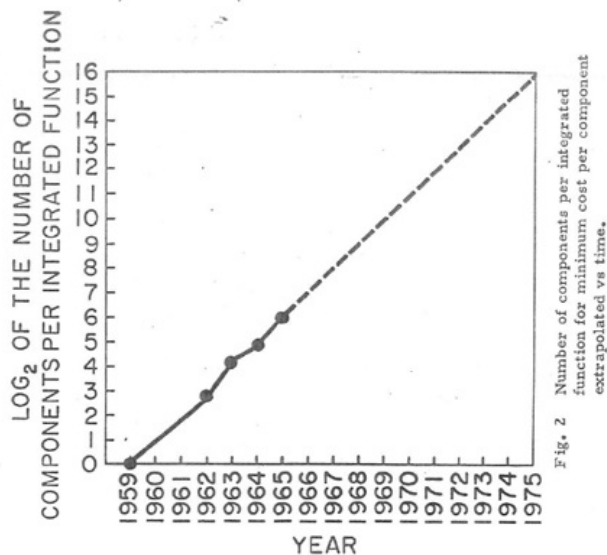


Fig. 2 Number of components per integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.

אבל עד לאן תוכל העקומה להגיע? מור הצטוות לקארבר מיד, מהנדס אלקטרוניקה ומהמומחים המוקדמים למוליכים-למחצה. ב-1967, שאל מור את מיד אילו מגבלות תיאורטיות יש למזעור אלקטרוני. למיד לא הייתה תשובה מן המוכן, אך בשעה שערך את חישוביו הוא גילה תגלית מדהימה: יעילותו של השבב עולה ביחס ישיר למידת הכיווץ. יתרונות המזעור היו "אקספוננציאליים". לא רק שהמיקרו-אלקטרוניקה תהיה זולה יותר מהאלקטרוניקה, היא גם תהיה עוצמתית יותר. כפי שמור ניסח זאת: "על ידי הקטנה, הכל משתפר סימולטנית. מהירות המוצרים שלנו תואץ, צריכת החשמל שלהם תפחת ואמינות המערכת תשתפר פלאים."

קארבר מיד, שנשבה בקסם העקומות של ריד, כינה אותן חוק מור. הוא הפך למיסיונר של הרעיון,

מור הרחיב את דברי חברו במאמר מ-1996: "ארגון הגג של תעשיית המוליכים-למחצה מפרסם מדי שלוש שנים מפת-דרכים טכנולוגית שמתווה את השיפור הזה. כל אחד בתעשייה מבין שאם אתה לא עוקב אחר העקומה ההיא אתה תישאר מאחור. כך שהחוק מניע את עצמו."

אנדרו אודליזקו ממעבדות AT&T-בל מבהיר: "ההנהלה לא אומרת לחוקר, 'אתה הטוב ביותר שמצאנו, הנה הכלים, בבקשה לך חפש משהו שיזניק אותנו ביחס למתחרים'. הגישה היא, 'אתה ו-999 הקולגות שלך תכפילו את ביצועי המיקרו-מעבדים שלנו ב-18 החודשים הקרובים, כדי שנמשיך להיות תחרותיים, או שאתה מפוטר."

אין ספק שהציפיות להתקדמות בעתיד מכתבות את ההשקעות בהווה. נחרצותו של חוק מור מסייעת למקד כסף ומחשבה במטרה מוגדרת מאוד – לעמוד בחוק. הבעיה היחידה עם התיאוריה הזאת היא שטכנולוגיות אחרות, שיכולות בהחלט להרוויח מאמונה דומה, לא מייצרות עקומות כיוון דומות. היום אנו עדים להתקדמות יציבה ומדידה בטכנולוגיות אחרות של מצבים מוצקים, כמו לוחות סולריים, שגם הם עשויים מסיליקון. מחירם של אלה צונח בשני העשורים האחרונים, אך לא באופן אקספוננציאלי. בדומה ללוחות הסולריים, גם דחיסותן החשמלית של סוללות עולה באופן עקבי מזה שני עשורים – אך שוב, בקצב ציבי לעומת מעבדי המחשבים.

אם כך, מה מספר לנו חוק מור שלא מספרים לנו המומחים מהתעשייה? חוק מור מספר שהאצה זו אינה רק הסכמה כללית. מקורה בטכנולוגיה גופא. ישנן טכנולוגיות אחרות, מאותה משפחה של מדע החומרים המוצקים, שכן מציגות האצה אקספוננציאלית. נדמה שגם הן מצייתות לחוק השיפור המואץ של מור.

הבה נחשוב על ההיסטוריה הקרובה (10-15 השנים האחרונות) של רוחב הפס בתקשורת ושל האכסון הדיגיטלי. תמונת האצתן האקספוננציאלית של שתי הטכנולוגיות האלה מקבילה לזו של המעבדים בכל

אמת מידה מלבד אחת – הקצב שבו הן מאיצות. מדוע תקופת ההכפלה של טכנולוגיה אחת היא שמונה שנים ושל אחרת, שנתיים? האין אותה מערכת כלכלית של ציפיות מכתובה את קצב שתיהן? בחוגים הפנימיים של תעשיית ההיי-טק, קצב צניחת מחירי האחסון

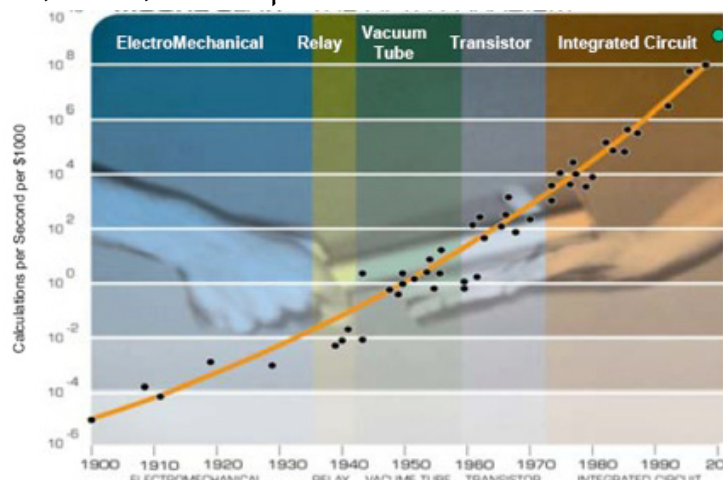
המגנטי נקרא 'חוק קריידר'. חוק מור של אחסון המידע נקרא על שם מארק קריידר, הטכנאי הבכיר של חברת סיגייט, יצרנית גדולה של דיסקים קשיחים. חוק קריידר קובע כי פער המחירים/ביצועים של הדיסקים הקשיחים גדל בקצב אקספוננציאלי וקבוע של 40% כל שנה.

שאלתי את קריידר האם חוק קריידר תלוי בחוק מור. אם המעבדים לא היו משתפרים ומוזלים מדי שנה, האם הדיסקים הקשיחים היו ממשיכים בנסיקתם? קריידר השיב: "אין קשר ישיר בין חוק מור לחוק קריידר. התהליכים הפיזיקליים שונים במוליכים-למחצה ובאחסון מגנטי. לכן, סביר מאוד שתיעצר האצת המעבדים בשעה שהאצת הדיסקים הקשיחים תמשך." מטבע הדברים, אם מחשבים לא יהיו עוצמתיים יותר ויותר, צורך השוק באחסון רב יותר ויותר גם כן יאט, כך שכוחות שוק עקיפים כן קושרים את שני החוקים, אבל באופן משני בלבד.

ציפיות יכולות בהחלט להדריך האצה טכנולוגית, אבל האצה קבועה, דמוית-חוק, מוכרחה להיות יותר מנבואה שמגשימה את עצמה. ראשית, הציות לעקומה מתחיל לעיתים קרובות לפני שמישהו מבחין בחוק, והרבה לפני שמישהו יכול לשנות אותו. ההאצה האקספוננציאלית של האחסון המגנטי החלה ב-1956, כמעט עשור לפני שמור ניסח את החוק שלו למעבדים, ויובל לפני שקריידר ניסח אותו.

ריי קורצווייל חפר בארכיונים והראה ששורשי חוק מור נטועים כבר ב-1900, לפני המחשב האלקטרוני, וכמובן לפני שניתנה הנבואה. קורצווייל כימת את מספר "החשובים לכל שנייה לכל 1,000 דולר" – תחילה, של מכונות החישוב האנלוגיות של תחילת המאה ה-20, לאחר מכן של מחשבי שפורפרות הואקום, ולאחר מכן של שבבים מודרניים. הוא קבע שהיחס הזה של האצה אקספוננציאלית לא השתנה ב-110 השנים האחרונות. חשוב מכך, העקומה (לצורך העניין, 'חוק קורצווייל') מקיפה חמישה סוגים של מחשוב: אלקטרו-מכני, ממסרי, מחשוב באמצעות שפורפרות

ואקום, מוליכים-למחצה ומעגלים משולבים. קבוע אחד ובלתי-מובחן שפעל בחמש פרדיגמות טכנולוגיות שונות חייב להיות יותר ממפת-רומז לנו שטבע היחס הזה מונח ביסוד הטכניום עצמו.



ונפער זה הוא תוצאה של החומר הטכנולוגי המסוים.

אם נצא אי-פעם לעולמות מיושבים אחרים בגלקסיה שלנו, עלינו להניח שחלקם הגיעו לשלב המיקרו-אלקטרוני בטכניום שלהם. מהרגע בו גילו את יישומי הלוגיקה הבינארית במיקרו-מעגלים, גם הם יחוו גרסא זו או אחרת של חוק מור. איכויותיו של המזעור יעשו את שלהן: ככל שהמעגלים ימוזערו, הם יעשו מהירים יותר, מדויקים יותר וזולים יותר. המחשבים החיזריים יתעצמו ויוזלו בעת ובעונה אחת, מה שיניע בהכרח טווח רחב של האצות טכנולוגיות אחרות, לשמתם הרבה של החיזריים. אוניברסאלית, האצת המחשוב תישאר קבועה לפחות ל-25 הכפלות (מספר ההכפלות שבני האדם חוו עד כה), ובמילים אחרות: שיפור של פי 33 מיליון ביכולת המעבדים.

עקומת ההאצה בעולם זה או אחר יכולה בהחלט להיות תוצאה של מערכת כלכלית. כאן ייתכן והצדק עם מור ומיד: קצב האצת החוק תלוי בכסף. ביצועי המחשב יכולים להכפיל את עצמם כל שנה או כל עשור, בהתאם לגודל האוכלוסייה, נפח הכלכלה, נזילות ההון וטיב המוסדות הפיננסיים באותה חברה.

כך או כך, יבוא הרגע בעולם שלנו, ובכל עולם אחר, בו העקומה תשבר. חוק מור לא יהיה איתנו לעד. כל האצה אקספוננציאלית תאט בסופו של דבר ותשקע חזרה. זהו דפוס ארכיטיפי של האצה: אחרי צבירת המהירות באה ההמראה, שסופה להתאזן במסלול. אך השליטה בטכנולוגיה מסוימת מולידה שאיפות טכנולוגיות אחרות. דוגמא עכשווית אחת היא המצלמות הדיגיטליות. למצלמות הדיגיטליות הראשונות הייתה רזולוציית תמונה גסה מאוד. המדענים החלו לדחוס עוד ועוד פיקסלים לכל חיישן, ואיכות התמונה השתפרה. לא עבר זמן רב ומספר הפיקסלים לחיישן עלה בעקומה אקספוננציאלית, בהגיעו למחוזות המגה-פיקסל. אבל אחרי עשור של האצה, הצרכנים התנערו מדחיסת הפיקסלים; הרזולוציה הקיימת ענתה על צרכיהם. רצונם הוסט עתה למהירות החיישנים או לצילום באור חלש – עניינים שקודם-לכן לא עניינו אף אחד.

אנחנו יכולים להיות בטוחים שחוק מור – כספירת המוליכים בכל מעבד – ידעך, גם אם נותרו לו עוד עשור, שניים או שלושה להניע את כלכלתנו. לאחר מכן תחליפו האצה אחרת, בטכנולוגיה אחרת. כאשר נגיע לקצה יכולת המזעור, ולא נוכל לדחוס יותר מעגלים בשבב אחד, נוכל פשוט להגדיל את השבב (זו הצעתו של מור!) קארל אנדרסון מאיי.בי.אם מונה שלוש חלופות עתידיות לחוק מור: לערום את

הואיל וניתן להשפיע על קצב ההאצה באמצעות השקעה כספית, העקומות לא יכולות להיות אך ורק תוצר של החומר עצמו. בד בבד, הואיל והעקומות התגבשו עצמאית וללא ידיעתנו, והן אינן סוטות מהקו הישר תחת התחרות העזה ולחץ המשקיעים, עלינו להסיק שעקומות אלו כפופות לחומר.

מהירות הסיבוב של המנוע החשמלי לא מדגימה עקומה אקספוננציאלית. גם תפוקת הקילומטר לכל ליטר בנזין של המכונית אינה משתפרת באופן אקספוננציאלי. למעשה, השיפורים במרבית סוגי הטכנולוגיות אינם אקספוננציאליים ואינם קבועים. אפילו בתוך תחום הנדסת החומרים רוב השיפורים אינם מאיצים. אנחנו לא מקשיחים את הפלדה באופן אקספוננציאלי, ואנחנו לא מגדילים אקספוננציאלית את אחוזי התשואה ממזקקות הדלק.

כל הדוגמאות להאצה אקספוננציאלית הן תוצר של מזעור. בעולם המזערי אין לאנרגיה חשיבות רבה. לא נמצא האצה אקספוננציאלית בהגדלה של חומרים, בגורדי-שחקים ובתחנות-חלל. גודרון מור התלוצץ באומרו שאם טכנולוגית התעופה הייתה מאיצה כמו שבבי אינטל, מטוס נוסעים מסחרי היה עולה \$500, מקיף את העולם בעשרים דקות וצורך בטיסתו 15 ליטר דלק – אבל גודלו היה כגודל קופסת-נעליים!

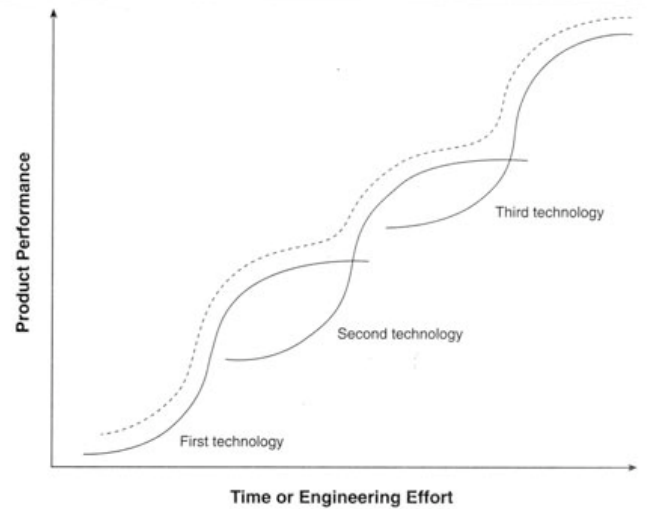
אנחנו לא רואים את האצת מור במכוונות גדולות, כי צריכת האנרגיה שלהן תאיץ באותו קצב. שלא כמו מידע, אנרגיה מהווה מגבלה רצינית. כך שהכלכלה החדשה שלנו סובבת סביב טכנולוגיות ברות-מזעור – פוטונים, אלקטרונים, ביטים, פיקסלים, תדרים וגנים. ככל שהטכנולוגיות הללו מתכווצות, הן מתקרבות לרמת האטום וליסוד החומר והמידע.

העניין השני שיש לתת עליו את הדעת הוא היקפן הצר של העקומות, של זמן ההכפלה (בחודשים). הכוח המסוים שמתיעל בטכנולוגיות המאיצות מוכפל כל 8 עד 30 חודשים. לא חשוב באיזו טכנולוגיה מדובר, היא מתעצמת פי שניים כל שנה-שנתיים.

מדוע? המהנדס מארק קריידר סבור שזהו "תוצר-נלווה של מבנה התאגידים, המנפקים את רוב ההמצאות הללו. לוקח בין שנה לשנתיים להגות, להנדס, לבנות אב-טיפוס, לייצר ולשווק המצאה חדשה." אולם, כפי שכבר נאמר, בטכנולוגיות אחרות, שגם להן תאגידים ומהנדסים, אנחנו לא רואים האצה אקספוננציאלית.

מתמיהה עוד יותר העובדה שהיחס בין שתי עקומות אקספוננציאליות הוא אקספוננציאלי בעצמו. משמעות הדבר היא שעם הזמן, ביצועיהן של שתי טכנולוגיות המאיצות תחת אותו משטר כלכלי, באותה חברת מהנדסים, באותו הטכניום, מתפצלות זו מזו בקצב אקספוננציאלי. אין ספק שפער הולך

המוליכים זה על גבי זה (מה שידוע בתור שבבי תלת-מימד), מחשוב אופטי או האצת המעבדים הקיימים. וכמובן שישנה אפשרות למעבדים מקבילים, שיעבדו בתיאום זה עם זה. במילים אחרות, אולי אנחנו בכלל לא צריכים יותר ויותר מוליכים על כל שבב, אולי עלינו לארגן מחדש את השבבים הקיימים. אפשר שנחשיב את עצמנו לחכמים פי מיליון מקוף, אבל אין לנו פי מיליון גנים או פי מיליון נוירונים מהקוף. מספר הגנים והנוירונים שלנו כמעט זהה לאלו של כל הקופים. הצמיחה האבולוציונית הכמותית נעצרה עם הספיאנס, והוחלפה בצמיחה אחרת.



אבל בשעה שהאצת המוליכים צפויה למוות בלתי-נמנע, יהיה זה אסון אם גרסת המטא של חוק מור – ביצועים יותר ויותר זולים ויותר ויותר חזקים של מחשוב ואינטרנט – ייעצרו פתאום. יחסי ביצועים אלה מכפילים את עצמם בערך מדי שנה. משמעות הדבר היא שהדברים שאכפת לנו מהם משתפרים פי שניים כל שנה. דמיינו אם הייתם נעשים חכמים פי שניים בכל שנה, או זוכרים פי שניים השנה מכפי שזכרתם אשתקד. יכולת ההכפלה הזאת מעוגנת בבסיס הטכניום. האופטימיות של תקופתנו מסתמכת על ההבטחה של מור: ההבטחה שהמכשירים ישתפרו גם מחר. אם המכשירים שאנחנו מייצרים ישתפרו מחר, סימן שעידן הזהב עוד לפנינו, לא בעברנו.

אך מה יכול לעצור את מטא חוק מור? נדמיין, לצורך העניין, קונספירציה שמטרתה לעצור את ההאצה הטכנולוגית שלנו, כי היא מעוררת ציפיות מוגזמות של סינגולאריות. מה תוכל לעשות בנידון? כיצד לעצור אותו? אלה שמאמינים כי כוחו יפה רק בציפיות שלנו, יאמרו: פשוט הכריזו על עצירתו והוא יעצור. לולאת הנבואה העצמית תישבר. אבל מספיק מהנדס מורד אחד שיצמד קדימה, ומרוץ החימוש שוב יהיה בעיצומו, וחוזר חלילה עד שהפיזיקה של המזעור עצמה תתמצה.

אפילו תחת משטר כלכלי אחר החוק לא יעצור. בהיסטוריה חלופית, שבה הקומוניזם היה מנצח במלחמה הקרה, והמיקרו-אלקטרוניקה הייתה מומצאת בשטחי ברה"מ, אני מנחש שגם אז המדיניות הכלכלית החלופית לא הייתה עוצרת את חוק מור. ייתכן שההאצה הייתה אטית יותר, אבל אין לי ספק שהמדענים הסטליניסטים היו מפצחים את חוק המזעור ומשתאים נוכח אותו פלא טכנולוגי שאנו משתאים בפניו: מעבדים המעבדים מהר יותר וזול יותר באופן אקספוננציאלי.

אני חושד שחוק מור הוא חוק שאין לנו השפעה עליו, מעבר לקצב ההכפלה. העקומות הישירות שגילו מור, קרייידר וקורצווייל ימשיכו במסלולן. דחף העקומה הוא בלתי-נמנע, מסלולו נקבע על ידי טבע החומר. מרגע שהוצאו לחופשי, כל אחת מעקומות אלה – מעבדים, רוחב-פס, אחסון – ישאפו בהתמדה אל תחתיתה של הפיזיקה.

הבחירה שלנו, והיא בחירה משמעותית, היא להתכונן לקראת המתנה – ולבעיות שהיא טומנת בחובה. אנחנו יכולים לבחור להתכונן טוב יותר לנחשולים הבאים והבלתי-נמנעים. אנחנו יכולים לבחור לחנך את עצמנו לשימוש נכון יותר בטכנולוגיות הללו. אנחנו יכולים לשנות את הנחותינו החוקיות, הפוליטיות והכלכליות כך שיתאימו לאבולוציה הטכנולוגית שלפנינו, אבל אנחנו לא יכולים להימלט ממנה.

כאשר אנו מזהים את גורלנו הטכנולוגי במרחק, אל לנו לברוח מפחד היותו גורל בלתי-נמנע; עלינו לזנק לעברו ערוכים.

/ קווין קלי