

כיצד ילדים ילמדו הנדסה: פרספקטיבה של מדעי הקוגניציה

כריס שון, schunn@pitt.edu

Learning Research & Development Center (LRDC), University of Pittsburgh

תורגם לעברית ע"י שגב נחמני וירון דופלט

מבוא

מספר התלמידים בארה"ב הנכנסים לתוכניות ההנדסה במכללות הינו בתחזית לירידה, מגמה אשר רבים מאמינים שתהיה לה השפעה שלילית על כוח העבודה בארה"ב (NAS/NAE/IOM, 2007; NRC, 2009). בנוסף, סטודנטים, אשר שואפים לתואר בהנדסה, אינם משקפים את מגוון אוכלוסיית הסטודנטים בארצות-הברית. לדפוס זה ייתכנו מספר השלכות שליליות, גם על ההתמחות המוצלחת בהנדסה וגם בהקשר של נושאים חברתיים רחבים יותר (NRC, 2009).

למרות שמספר קטן יחסית של ילדים נעשים מהנדסים, האזרחים בחברה שלנו, המבוססת על טכנולוגיה, צריכים להבין בעיות הנדסיות, אולי אפילו לעבוד תוך שיתוף פעולה עם מהנדסים (NRC, 2002, 2009). נושא זה דורש הבנה של מה היא הנדסה, ומה מהנדסים עושים. מספר תוכניות החשיפה הרשמיות להנדסה (למשל, בבתי ספר) והלא רשמיות (למשל, מוזיאונים, תחרויות, תוכניות אחרי ב"ס, תוכניות קיץ) הולך וגדל, אך לפנינו עוד דרך ארוכה, לפני שרוב הילדים בארצות הברית יחשפו באופן משמעותי להנדסה (NRC, 2009). עלייה דרמטית בחשיפה להנדסה יכולה בסופו של תהליך להוביל להגדלת המספר והמגוון של הסטודנטים הלומדים הנדסה.

חששות לגבי היעדר חשיפה להנדסה עבור כל הילדים, ושאיפה להבטיח מלאי גדול ואמין יותר של מהנדסים בעתיד, מעידות, כי עדיין לא קבענו את הדרך הטובה ביותר, כדי לחשוף את הילדים למושגים ולמיומנויות הנדסיים. אנו עדיין מחפשים אלו היבטים של הנדסה מתאימים לילדים מבחינה התפתחותית בגילאים שונים, ואלו סוגים של התנסויות לימודיות הן יעילות יותר. באופן כללי, מכיוון שתחום ההנדסה לא הודגש במבנה הלימודים הקדם-אקדמי, הידע התיאורטי על האופן בו ילדים לומדים הנדסה הינו מצומצם. עם זאת, מספר ממצאים חשובים התגלו ומסוכמים במאמר זה².

הגדרת הנדסה עבור הוראה

העיקרון הכללי לתכנן סביבות חינוך טובות הוא להתחיל עם מפרט של המצב הרצוי, במקרה זה, הגדרה של הנדסה (Wiggins and McTighe, 2005), ומה אנו מקווים להשיג באמצעות חינוך הנדסי. ברמה הרחבה ביותר, אני מניח, כי הנדסה כרוכה בניתוח תהליכים אנליטיים וניסויים כדי לעצב מערכות מורכבות היכולות לענות על מגוון יעדים מוגדרים תוך התחשבות באילוצים מדעיים וחברתיים ספציפיים.

¹ Schunn, C.D. (2009). How kids learn engineering: the cognitive science perspective. Translated from *The Bridge* 39(3): 32–37, with permission of the National Academy of Engineering, Washington, D.C.

² לעיון במה שאנו יודעים על הוראת מיומנויות מורכבות ומידע באופן כללי, ראה: *How People Learn* (NRC, 1999) and *Taking Science to School* (NRC, 2007)

ישנו ויכוח האם ההוראה בבתי הספר צריכה להתמקד בהכנת ילדים ללמוד הנדסה במכללה (למשל, התמקדות במתמטיקה ומדע, וגירוי העניין בהנדסה) או להתמקד בניסיון לפתח כישורי הנדסה וחשיבה כשלעצמם. ברור שמיומנויות במתמטיקה ובמדע הן דרישה למילוי המחסור הצפוי של מהנדסים בעתיד. פעילויות מורכבות כמו במקצוע ההנדסה מחולקות בדרך כלל למיומנויות ומושגים (טבלה 1). למרות שמקצוע ההנדסה משותף וחופף עם מדע ומתמטיקה, קיימות מיומנויות וידע של מושגים מסוימים, אשר חיוניים הרבה יותר להנדסה. לכן, כדי שכל הילדים יקבלו חשיפה רחבה להנדסה נדרשות תוכניות, לימודים, המקנות יותר מאשר כישורים בסיסיים במתמטיקה ובמדע. מתן השראה לילדים שהנדסה היא קריירה מעניינת, דורש התנסות בהנדסה.

טבלה 1: דוגמאות למיומנויות מרכזיות ומושגים בהנדסה

מיומנויות	מושגים
תכן	מערכות
אופטימיזציה	תת-מערכות
מידול	מבנה- התנהגות-פונקציה
ביצוע ניסויים	אילוצים
עבודת צוות	פשרות
	דרישות
	תופעות לוואי

פיתוח חומרי לימוד בהנדסה המותאמים לילדים

הרבה סטודנטים להנדסה באוניברסיטאות נאבקים כדי לעמוד ברמה גבוהה של דרישות רציניות בקורסי הלימוד ההנדסיים, במיוחד, כאשר הם מתבקשים ליישם עקרונות מתמטיים ומדעיים לבעיות תכן מורכבות. כתוצאה מכך, אוניברסיטאות רבות סובלות מנשירת סטודנטים ממקצועות ההנדסה.



כאשר סגל הוראת ההנדסה בוחן את הדברים מנקודת מבט זו, הוא עשוי לתהות, אם לימוד מושגים ומיומנויות הנדסיות מתאים לילדים מתחת לגיל 18.



קיימות מספר הוכחות המראות, כי עם תמיכה מתאימה, תחום ההנדסה מתאים לילדים. ברמת בית הספר התיכון, אלפי ילדים מתעסקים בתחרויות רובוטיקה הדורשות עבודה בצוותים גדולים ושיתוף פעולה כדי לעמוד באתגרים של הנדסת מכונות והנדסת חשמל. אני אחראי על תחרות תכן אזורית לתלמידי בתי ספר תיכוניים, שבה הקבוצות המובילות מכיתות מדעים של בתי הספר המשתתפים, צריכים להגיש תוצר המצאתי של פרויקט תכן שהתבצע במשך שמונה שבועות של פרויקט תכן שהתבצע במשך שמונה שבועות על (Reynolds et al., 2009). הקבוצות נשפטות על איכות השילוב של מדע בפתרונות תכן חדשניים.

איור 1: שני צוותים זוכים בתחרות תכן הנדסי לבית ספר תיכון.

למרבה הפלא, תלמידי כיתות ט' (תלמידי ביולוגיה) מצליחים לעיתים להתעלות על תלמידים מבוגרים בהרבה יותר מהם (כיתות של כימיה, פיזיקה או מדעי הסביבה), עובדה זו מצביעה, כי מיומנויות תכן המצאתי בתחומי הנדסה יכולות להתפתח בשנים שלפני בית הספר התיכון.

מספר של תוכניות לימוד מבוססות הנדסה, אפילו בשלבים המוקדמים של בית ספר היסודי, מיושמות כדי ללמד אלפי ילדים מרקעים מגוונים בארה"ב. ההצלחה של תוכניות אלה מצביעה על כך, שחלק מההיבטים של הנדסה נגישים בדרך כלל למגוון רחב של ילדים ברמות גיל שונות¹.

עם זאת, העבודה עם תלמידי תיכון אינה זהה לעבודה עם סטודנטים הלומדים במכללה. ברור, כי ישנם הבדלים בין קבוצות הגיל השונות במהירות התפיסה, מידת האיכות של שילוב מידע מורכב ועד כמה יש להם ידע רלוונטי במתמטיקה ומדעים.

למרות שתוכניות הלימודים של האוניברסיטה אינן ברמה המתאימה לילדים, למושג של חומר לימוד "המתאים לילדים" יש מעט קשר לגיל עצמו (כלומר, מבוסס על-ידי זמן) ויותר קשר לכמה רחוק עבר הילד הממוצע התקדמות התפתחותית רלוונטית, שעבורה קיים טווח השתנות רחב התלוי במידה רבה בתנאים סביבתיים (NRC, 2007).

בתנאים הנכונים, תלמידים יכולים לעסוק בפעילויות תכן הנדסי מתוחכמות יחסית, זמן רב לפני התבגרותם.

סיוע לילדים ללמוד הנדסה

לאחר שאנו יודעים, כי ילדים יכולים ללמוד היבטים חשובים בהנדסה, נשאלת השאלה הטבעית: מהן תמיכות סביבתיות שימושיות? אני מציג לכם ארבע עקרונות, שנמצאו יעילים ללמידה מוקדמת של הנדסה על-ידי תלמידים.

1. ילדים עוסקים מההתחלה בפתרון בעיות תכן משמעותיות.

חלק חשוב בלמידת מיומנויות ומושגים מורכבים הוא על ידי ביצוע גרסאות שונות של תכן הנדסי, כפי שהתלמידים ידרשו לעשות בתום יחידת הלימוד. מיומנויות ומושגים נרכשים באמצעות תרגול שיטתי, ולא בעזרת "כדורי קסם"² (Anderson and Schunn, 2000). למרבה הצער, בסביבות חינוכיות, פעילויות מורכבות מפורקות באופן מוגזם עד כדי כך שהיבטים קריטיים אובדים לגמרי, עקב כך מיומנויות עיקריות לא נלמדות (Chinn and Malhotra, 2002).

יתכן, כי זה נראה נכון, להתחיל ללמד מושגים בסיסיים כדי לבצע תכן של בעיה (למשל, רקע הנדסי מדעי או רקע מתמטי) ולאחר מכן רק להציג את משימת התכן. בדרכים רבות, תוכניות לימודים מסורתיות של הנדסה בנויות לפי מודל זה, שבו לעתים קרובות משאירים את האתגרים המשמעותיים בתכן הנדסי לשנת הלימודים האחרונה באוניברסיטה. עם זאת, "יסודות-תחילה" הינה אסטרטגית הוראה לקויה מסיבות שונות.

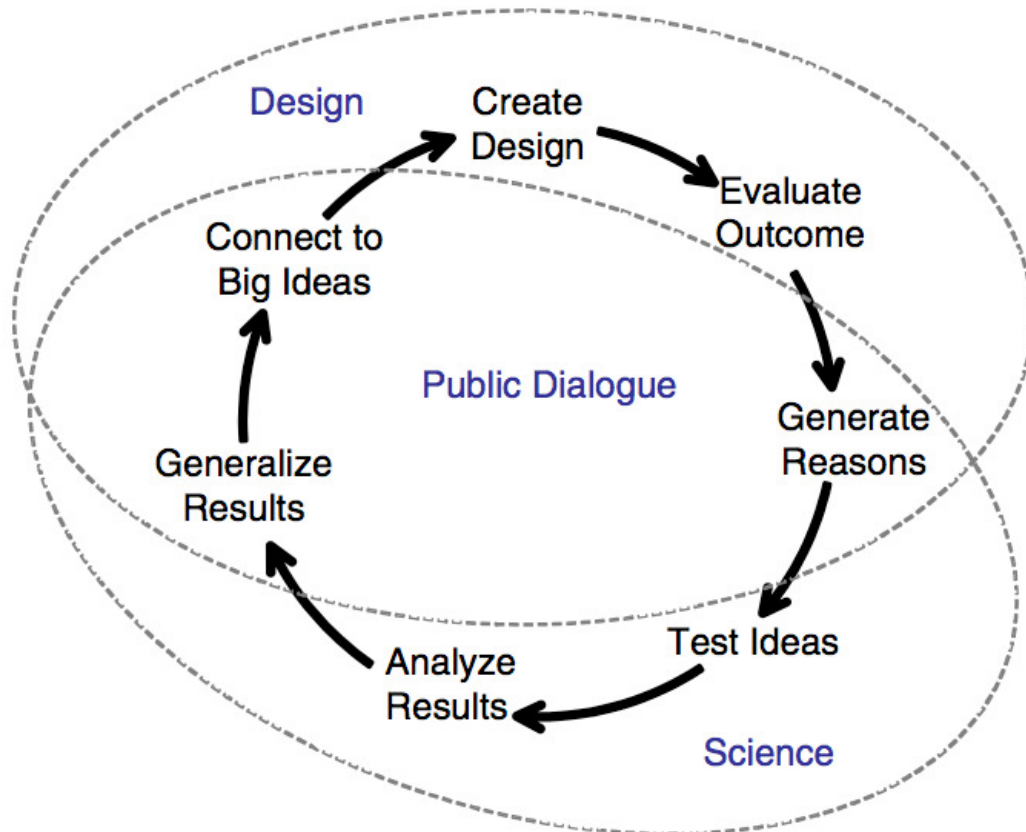
¹ See for example City Technology (<http://www.citytechnology.ccnny.edu>) and Engineering is Elementary (<http://www.mos.org/eie>).

² כדורי קסם – Magic bullets, הכוונה בפעילות בודדת מרתקת שאין לה השפעה לימודית עמוקה מעבר לחוויה החד פעמית. לדוגמא, הדגמה קסומה של עקרון מדעי פעם בחודש, אינה יכולה להיות תחליף ללמידה התנסותית מסודרת המתרגלת באמת את תהליך החקר. כנ"ל בהנדסה (הבהרה של כריס שון בדוא"ל).

תחילה, תלמידים מוצאים את בעיות התכן ההנדסי מעניינות, ולכן הן יכולות להוות תמריץ ללמידה של מושגים ומיומנויות בסיסיים, שחייבים להירכש לפני פיתוח של מיומנויות חשיבה מסדר גבוה בהנדסה. לדוגמה, בעיות תכן יכולות ליצור מוטיבציה חזקה כדי ללמוד נושאים מדעיים רלוונטיים (Hmelo et al., 2000; Schauble et al., 1991). הצגת בעיית תכן אחרי לימוד המדעים מבטל תמריץ זה.

בארצות הברית, ביצועים ירודים בסיסיים במתמטיקה ובמדעים (בניגוד לקריאה) נחשב כמקובל חברתית, ולסטודנטים רבים אין מוטיבציה להצליח בנושאים אלו. לכן, דרושים בדחיפות תמריצים חדשים, ופעילות תכן בהנדסה היא אחת מהם.

בנוסף, תכן הנדסי יכול להיות משולב באופן הדוק בהוראת מדעים עד כדי כך, שהוא הופך לכלי שבאמצעותו מדע רלוונטי נלמד (Hmelo et al., 2000; Mehalik et al., 2008). לדוגמה, מספר חוקרים יצרו יחידות לימוד בהן פעילויות לימודיות במדעים משולבות באופן טבעי בתהליך התכן ההנדסי. תלמידים מתחילים אתגר תכן; התכן הראשוני נכשל ונוצר צורך בידע מדעי; הידע נרכש דרך ניסויים וקריאה; אתגר התכן מתחיל מחדש, עם ידע מדעי חדש (ראו איור 2).



איור 2: תהליך למידה מדעי מבוסס תכן הנדסי מחזורי אומץ מתוך: *Apedoe et al., 2009*

נקודה נוספת: אם תלמידים מעורבים בתכן רק בסוף המשימה, הם מעורבים מעט זמן יחסית בתכן הנדסי, ולכן לומדים מעט מאוד בנושא זה.

בתוכניות לימוד רבות, נושאים חשובים, שנחקים לסוף יחידת הלימוד מקבלים מעט מאוד תשומת לב, לצורך העניין פעילויות לימודיות הנמצאות בסוף יחידת הלימוד לעיתים לא נלמדות כלל או שנלמדות במהירות רבה בהתאם לזמן המועט שנשאר. לכן, ככלל אצבע, אם פעילות חשובה במיוחד, אסור לדחוק אותה לסוף!

כמו כן, כאשר המדע הנלמד מועבר בצורה מופשטת ופורמלית ללא קשר לתוכן ממשי, תלמידים נתקלים לעיתים קרובות בקשיים בשימוש בידע זה מאוחר יותר כדי לפתור בעיות (NRC, 2007). בעיות תכן הנדסיות יוצרות תוכן טבעי המקושר למושגים מדעיים, בדיוק כמו שהנדסה ומדעים יוצרים תוכן טבעי המקושר למושגים מתמטיים.

לבסוף, פתרון בעיות תכן משמעותיות נראה כבעל יכולת לשנות את העניין של תלמידים בקריירה בהנדסה (Reynolds et al., 2009). יעדי הקריירה של ילדים ניתנים להשפעה החזקה ביותר לפני שנתנו להם הזדמנות לבצע בחירות משמעותיות לגבי קורסי בחירה או אפשרויות למידה לא פורמליות (בחטיבת הביניים). בתקופה זו, הם רשאים לבטל השתתפותם בפעילויות רלוונטיות במדעים והנדסה. התעניינות בקריירה בתחום הנדסה לא מושפעת רק על ידי מודלים לחיקוי, אלא גם על-ידי תפיסת הקריירה עצמה. לדוגמה, הצגת מהנדסים כאנשים אשר פותרים בעיות יומיומיות נמצא כקשור לרצון של ילדים לבחור בקריירה של מהנדסים. בנוסף, התנסות בתכן הנדסי כדי לפתור בעיות מחיי היום-יום נמצא כמחזק תפיסה זו ומגדיל את העניין של תלמידים בקריירה הנדסית (Reynolds et al., 2009).

2. ליצור מודלים ויזואליים אשר תומכים בתכן ההנדסי.

תכן הנדסי לעיתים קרובות מבוסס על מושגים מופשטים בעלי שכבות רבות; המופשט וגם מגוון השכבות בהגדרת המושג המופשט יכולים להוות מחסום ללמידה. לדוגמה, תכן הנדסי דורש לשקול פשרות, כלומר יכולת לשקול גורמים רבים בו-זמנית. אנו יודעים כי בהשוואה למבוגרים, ילדים מתקשים מאוד בפתרון בעיות מרובות גורמים בעת ובעונה אחת (Kuhn, 1991; Sweller, 1988).

אפילו מהנדסים מומחים מוגבלים קוגניטיבית בכמות המשתנים אותם הם יכולים לשקול בו-זמנית. רוב הבעיות ההנדסיות מסובכות מדי לפתרון בצורה שכלית גרידא. לכן, מהנדסים משתמשים במודלים בצורות שונות כדי להעביר קושי זה למערכת חישובית, חיצונית וגדולה יותר (Hutchins, 1995). בימים המוקדמים של ההנדסה זה נעשה על דפי נייר וסרגלי חישוב; כיום מהנדסים עושים שימוש נרחב בתוכנות ניתוח ותכן מתקדמות.

ילדים יכולים לטפל בבעיה בעלת עומס יתר קוגניטיבי באותו אופן. בדיוק כמו שמודלים חיצוניים מסייעים למהנדסים לפתור בעיות תכן הנדסיות, הם יכולים גם לסייע לילדים להבין ולהגדיר בעיה על-ידי הצגת דרישות ואילוצים באופן שניתן לבדיקה חיצונית (Penner, 2001; Resnick and Wilensky, 1998). עם זאת, למרות שמודלים הינם בדרך כלל אמצעי שקוף ומובן למומחה, התרגום שלהם עשוי להיות מייגע ומבלבל לתלמיד (Berthold and Renkl, 2009; Hegarty et al, 2003). עבור כל סוג של מודל (למשל, טבלת נתונים, גרפים, דיאגרמת כוח או משוואה מתמטית), ילדים צריכים זמן כדי להבין מה מייצג המודל וכיצד לפרש אותו.

דוגמאות מוחשיות יותר (למשל, דיאגרמות, אב טיפוס הנדסי) יכולים לשמש כנושא הדיון עבור קבוצות ילדים, כך לתת להם להתבסס על הרעיונות אחד של השני (Roth, 2001). אך מודלים מתמטיים גם עשויים להועיל, מכיוון שהם עוזרים לילדים למקד את תשומת ליבם על מידע קריטי הנקי מפרטים שטחיים או לא רלוונטיים. על אף שלתלמידים יש כישורים מתמטיים חלשים בהרבה מסטודנטים באוניברסיטה, אפילו תלמיד בכיתה ג' יכול ללמוד להשתמש בקשרים מתמטיים כדי לתמוך בתהליכי חשיבה המתבצעים בעת תכן הנדסי (Lehrer et al., 2000).

3. תכן איטראטיבי ותכן מחדש עדיפים ממחזור תכן יחיד.

בפועל, תכן הנדסי הינו תהליך מתכנס ומורכב שבמהלכו התכן צועד לקראת פתרונות טובים ויעילים יותר. עבור סטודנטים, תהליך מחזורי זה לא רק משפר את הפתרון, אלא גם מספק הזדמנויות למידה חשובות לפיתוח הבנה טובה יותר של מושגים ומיומנויות בהנדסה. כאשר תלמידים ממש חווים יותר ממחזור תכן אחד לבעיה נתונה, הם מתחילים להעריך כי תהליך התכן הוא תהליך איטראטיבי. למרבה הצער, לעתים קרובות תלמידים חווים רק מחזור תכן אחד. כתוצאה מכך, ולעיתים קרובות התכן ירוד מאוד, למרות שהתוצר הסופי עשוי להשתפר על ידי רמזים כבדים מהמורה. בכל מקרה, התלמיד ממשיך לתהות, כיצד מהנדסים מצליחים לפתור בעיות רב מימדיות.

מספר מחזורי תכן מאפשרים גם לילדים לפתח הבנה מורכבת ומושלמת יותר של מושגים הנדסיים רלוונטיים. בתחילת פעילות תכן, תלמידים נוטים להתמקד בהיבטים שטחיים של הדגמים עליהם הם עובדים, לעתים קרובות הם מגלים חוסר הבנה של היבטים תפקודיים של התכן ומבצעים חיבורים קונספטואליים חלשים בין הדגם לתכן ההנדסי. לדוגמה, ילדים עשויים ליצור אב-טיפוס של מפרק המרפק שצבעו דומה לזה של אדם, אך מלבד זאת המפרק שיצרו שונה לחלוטין ממרפק אנושי, ובכך יצרו תותבת מלאכותית, שאין לה שימוש. הדגם הראשוני נוטה להיות יותר פונקציונלי ומורכב על-ידי מחזורי הערכה ותכן איטראטיביים (Penner et al., 1997). תהליך איטראטיבי זה, מוביל לא רק לתכן טוב יותר, אלא גם להבנה עשירה יותר של התפקיד הפונקציונלי של דגמים בתכן. עם כל איטרציה, תלמידים יכולים להתחשב יותר בדרישות של התכן ולבצע יותר פשרות כדי להשיג את התכן האידיאלי (Sadler et al., 2000). תכן הנדסי של אב טיפוס מנקודת אפס נוטה לקחת כל כך הרבה זמן עד כדי כך שלרוב הילדים נגמר הזמן, עוד לפני שהגיעו לאיטראציות קריטיות (Hmelo et al., 2000). כאשר הזמן קצר, משימת תכן מחדש יכולה להיות דרך יעילה ל"יצירת" מחזורי תכן נוספים.

4. חשוב לספק מספיק זמן חשיפה לחומרים הנדסיים.

לעיתים, חומר הנדסי מוכנס לתוך תוכנית לימודים (ת"ל), אך רק למשך זמן קצר מאוד, במקרה הטוב חמש שעות או פחות (למשל, ביקור בודד במוזיאון, סדנת בסוף שבוע אחד, או כמה שיעורים בסוף יחידת לימוד). חשיפות קצרות טווח אלו אינן ארוכות מספיק כדי לערב את התלמיד בתכן איטראטיבי איכותי של בעיות רב מימדיות תוך שימוש במודלים מוחשיים, עקב כך, הם אינם צפויים להוביל ללימוד משמעותי אודות הנדסה. אולם, הם עשויים להיות יעילים עבור תחליפים שונים להוראת הנדסה. למרבה הצער, הזדמנויות קצרות טווח הן הקלות ביותר עבור מורים לתכנן וליישום, בהתחשב בהכשרה המוגבלת, שיש למורה אופייני בהנדסה. לרוב, מורים משקיעים רק מספר שעות או ימים בתכנון פעילויות הנדסה לתלמידים שלהם. רמת השקעה כזו יכולה לתמוך רק במספר שעות הוראה בודדות. בנוסף, עבור רוב המורים תוכנית הלימודים כבר עמוסה, ולחץ לכסות את התכנים המרכזיים גדל עם הופעתן של בחינות משוות חיצוניות. כתוצאה מכך, לימוד הנדסה עשוי להיחשב כפעילות העשרה בלבד, כלומר למורה יש מעט מאוד הזדמנויות ללמד הנדסה. אין ויכוח כאן, שיש לאפשר מספיק שעות הוראה בכל התנסות כדי ללמד ילדים טווח רחב של מושגים בהנדסה, מיומנויות או ידע, שעל אנשים במאה העשרים ואחת לדעת, או להכין אותם לעבר המשך לימודים לקראת תואר בהנדסה באוניברסיטה. כל אחד מתוצרים אלו דורש ליישם ת"ל רב שנתית ללימוד הנדסה. הנקודה היא שלילדים חייב להיות פרק זמן מינימלי בכל חשיפה לתכן הנדסי, או במילים אחרות מערכת החינוך צריכה לתכנן ת"ל כך, שתהיה לה השפעה אמיתית על הלמידה של תלמידים והקצאת שעות מתאימה היא חלק הכרחי, להשגת ההשפעה הרצויה. לוקח זמן רב, כדי שרעיונות גדולים בהנדסה יהפכו להיות מובנים לתלמידים.

חוויות מוקדמות ומוצלחות בתכנ הנדסי יכולות לארוך כ-20 עד 30 שעות (למשל, שבוע של מחנה קיץ, חודש של סדנאות כל יום שישי במוזיאון, סמסטר של פעילויות העשרה לאחר בית ספר, או שישה שבועות של לימודי מדע רגילים). במסגרת זמן כזאת, למעשה, ילדים יכולים לפרק משימת תכן לתת-מערכות ולבצע איטרציות חוזרות ונשנות שוב ושוב על כל תת-מערכת, רכישת מושגים מדעיים רלוונטים לאורך הדרך והבנת רעיונות הנדסיים קריטיים.

מסקנות

נשאר עוד הרבה ללמוד, כיצד להתגבר על הקשיים, שיש לילדים בהפנמת היבטים, מושגים, ומיומנויות של הנדסה וכמובן מהן הדרכים הטובות ביותר כדי לעזור להם להתגבר על קשיים אלה (NRC, 2009). עם זאת, העקרונות, שתוארו במאמר זה יכולים לספק הדרכה מסוימת לחשיפת ילדים להנדסה.

מקורות

- Anderson, J.R., and Schunn, C. D. (2000). Implications of the Act-R Learning Theory: No Magic Bullets. In R. Glaser 9(Ed.) *Advances in Instructional Psychology*, Vol. 5, pp. 1–33. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Apedoe, X., Reynolds, B., Ellefson, M. R., and Schunn, C. D. (2009). Bringing engineering design into high school science classrooms: The heating/cooling unit. *Journal of Science Education and Technology*.
- Berthold, K., and Renkl, A. (2009). Instructional aids to support a conceptual understanding of multiple representations. *Journal of Educational Psychology* 101(1): 70–78.
- Bransford, J.D., Brown, A. L., and Cocking, R. R. (1999). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. Washington, D.C.: NRC, National Academy Press.
- Chinn, C.A., and Malhotra, B.A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: a theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education* 86(2): 175–218.
- Hegarty, M., Kriz, S., and Cate, C. (2003). The roles of mental animations and external animations in understanding mechanical systems. *Cognition and Instruction* 21(4): 325–360.
- Hmelo, C.E., Holton, D.L. and Kolodner, J.L. (2000). Designing to learn about complex systems. *Journal of the Learning Sciences* 9(3): 247–298.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kuhn, D. (1991). *The Skills of Argument*. Cambridge, Mass.: Cambridge Press.
- Lehrer, R., Schauble, L., Carpenter, S., and Penner, D.E. (2000). The Interrelated Development of Inscriptions and Conceptual Understanding. In P. Cobb. (Ed.) *Symbolizing and Communicating in Mathematics Classrooms: Perspectives on Discourse, Tools, and Instructional Design*, pp. 325–360. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.

- Mehalik, M.M., Doppelt, Y., and Schunn, C.D. (2008). Middle-school science through design-based learning versus scripted inquiry: better overall science concept learning and equity gap reduction. *Journal of Engineering Education* 97(1): 71–85.
- NAS/NAE/IOM (National Academy of Sciences/National Academy of Engineering/Institute of Medicine). (2007). *Rising Above the Gathering Storm: Energizing and Employing America for a Brighter Economic Future*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- NRC. (2002). *Technically Speaking*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- NRC. (2007). *Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K–8*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- NRC. (2009). *Understanding and Improving K–12 Engineering Education in the United States*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Penner, D.E. (2001). Complexity, Emergence, and Synthetic Models in Science Education. Pp. 177–208 in *Designing for Science: Implications from Everyday, Classroom, and Professional Settings*, edited by K. Crowley, C.D. Schunn, and T. Okada. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Penner, D.E., Giles, N.D., Lehrer, R., and Schauble, L. (1997). Building functional models: designing an elbow. *Journal of Research in Science Teaching* 34(2): 125–143.
- Resnick, M., and Wilensky, U. (1998). Diving into complexity: developing probabilistic decentralized thinking through role-playing activities. *Journal of the Learning Sciences* 7(2): 153–172.
- Reynolds, B., Mehalik, M.M., Lovell, M.R. and Schunn, C.D. (2009). Increasing student awareness of and interest in engineering as a career option through design-based learning. *International Journal of Engineering Education*. Forthcoming.
- Roth, W.-M. (2001). Learning science through technological design. *Journal of Research in Science Teaching* 38(7): 768–790.
- Sadler, P.M., Coyle, H.P., and Schwartz, M. (2000). Engineering competitions in the middle school classroom: key elements in developing effective design challenges. *Journal of the Learning Sciences* 9(3): 299–327.
- Schauble, L., Klopfer, L.E., and Raghavan, K. (1991). Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching* 28(9): 859–882.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: effects on learning. *Cognitive Science* 12: 257–285.
- Wiggins, G.P., and McTighe, J. (2005). *Understanding by Design*, 2nd ed. Alexandria, Va.: Association for Supervision and Curriculum Development.