

תכן הנדסי חינוכי¹

כריס שון, schunn@pitt.edu

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

תורגם לעברית ע"י רונן יחיאל

תקציר

דימויים רבים ומגוונים נקשרו למחקר חינוכי. בראשם, בולט לאחרונה הדימוי למחקר קליני (רפואי). אך מה הוא דימוי ראוי לתכן ופיתוח חמרים חינוכיים? עקרונות תכן רבים מפותחים עבור חמרי לימוד, אך תהליך פיתוחם של אלה אינו שיטתי או מוגדר היטב כלל וכלל. הדבר מהווה ניגוד בולט להנדסה כענף מקצועי, בו קיימים תהליכים שיטתיים בכל הקשור לתכן, ויהיה זה תכן של מוצרים, תהליכים, מערכות או שירותים. במובן זה, קיים גם דמיון בין הנדסה ומדע, בו הליכים מדעיים שיטתיים מיושמים בקשת מדעים רחבה. במאמר זה, אציג מספר ממצאים בולטים ממחקרים העוסקים בהליכי תכן ואציג ניתוח בדבר המידה בה ניתן ליישם הליכי תכן הנדסי בתהליך הפיתוח החינוכי.

"לתכן" - כפועל

הפועל "לתכן" משמעו - התהליך בו רעיון ראשוני הופך למוצר ממומש במלואו (היינו - 'קורם עור וגידים'). המונח "תכן חינוכי" בדרך-כלל נתפס כעצם, ולא כפועל (Krajcik, 2005 & Davis, e.g.) ומתייחס למוצר אותו מפיקים - בין אם הוא יחידת-לימוד, הערכה, תוכנית לימודים (Curriculum), סדנת התפתחות מקצועית, מבנה חינוכי או צרוף כלשהו של אלה לכלל מוצר גדול יותר. בהתייחס למוצרים גופם, מירב תשומת-הלב מופנה למרכיבי תכן כלליים שיש לכלול בתכן טוב (לדוגמה - תכן טוב יסייע למורה להכיר ולהסתמך על שונות מושגית בחשיבת התלמידים). הדיון במרכיבי התכן הטוב לעיתים מתמקד במבני-משנה של המוצר המלא (לדוגמה - הערכה, הרצאות) אך גם בעקרונות ובערכים המשותפים למבני-משנה (כדוגמה - עקרון השימוש בעזרי-לימוד, חשיבה ביקורתית כערך).

אולם, בדיוק כפי שלמילה 'תכן' קיימות שתי משמעויות - האחת כשם עצם, והשנייה כפועל, כך גם למונח הנסמך - 'תכן חינוכי'. מילון מאריאם-וובסטר מגדיר 'תכן' כפועל, כך:

"Design," (2008): "1. To create, fashion, execute, or construct according to plan. 2. To conceive and plan out in the mind. 3. To indicate with a distinctive mark, sign, or name. 4. To make a drawing, pattern, or sketch of."

ההגדרה הראשונה מבליטה את משמעותו התכנונית (תכנונית = ללכת לפי תכנית) של התכן - למצוא את ההיגיון שבשיגעון. המשמעות השנייה מדגישה את הפעילויות השכליות החשובות של המתכנים (השלישית היא ארכאית משהו ואולי פחות רלוונטית, אולם, תכן קשור קשר הדוק לאישיותו של המתכנן, המנסה לבטא את ייחודיותו בכל מיזם). והמשמעות הרביעית מדגישה כי ביסודו של עניין, תכן מערב

¹ Schunn, C.D. (2008). Engineering Educational Design. Translated from: *Educational Designer*, 1(1): Retrieved from: <http://www.educationaldesigner.org/ed/volume1/issue1/article2>, with permission of the Journal Editors. *Educational Designer* is the Journal of the International Society for Design and Development in Education.

יצירה או שינוי (מניפולציה) של אבי-טיפוס של המוצר הסופי, ולא מפיק ישירות, מההתחלה, את המוצר הסופי גופו.

אף לא אחד ממשמעויות אלה של 'לתכן', כפועל, דנה בתתי-רכיבים של התכן, כפעילויות: האם תהליך התכן כולל צעדים משמעותיים? האם נדרש ארגון מסוים לביצוע צעדים אלה? סביר כי המפרש לא פרש את משמעות המושג 'לתכן' פרישה רחבה יותר, משני טעמים. האחד, לרוב אנשים משוללי הבנה או התנסות ישירה בתהליכים השכליים שהם מבצעים, ולו אף כאשר הם רק נדרשים לחזור באורח סדיר ומאורגן היטב על התנהגות מסוימת (Lovett, 1998 & Anderson, Lebiere). והשני, משום שלעיתים יקשה מאד למצוא ולהגדיר רכיבים כך שיהיו נכונים תמיד, לכל הדברים שניתן לתכנן, ולכל טווחי איכות המתכננים.

למרות חוסר - יכולתנו לבצע רפלקציה מלאה וישירה על הליכי התכן, הרי שברשותך אטען כי לחשיבה מעמיקה אודות היכי התכן עשויה להביא ערך רב. בכל אופנויות הפעילות האנושית, תהליכים הסוחפים אחריהם אנשים הם בעלי ערך רב הן לגבי איכות המוצר המתקבל, והן לגבי קיצור משך הפקתו (Ericsson & Charness, 1994). מעבר לכך, קיימים הבדלים בין - אישיים ניכרים (Hayes, 1985; Simonton, 1997): פרטים מסוימים מפקים - באורח עקבי והדיר - תוצרים איכותיים במהירות מרובה, בעוד שאחרים דורשים זמנים ארוכים להפקת תוצרים באיכות בינונית ומטה. מאחר והבדלים אלה אינם מקריים או אקראיים, הדעת נותנת כי חייב להיות 'משהו' שונה, באופן עקבי והדיר, בתהליכים שאותם פרטים מבצעים, מעבר לשינויים אקראיים או חוסר מזל. אם ברצוננו לשפר שיפור של ממש את איכות המוצר וזמני הפקתו, חובה עלינו להבחין בין מה עושים אותם מתכננים טובים, ולמצוא איך אפשר להעביר מיומנותיהם לשאר.

מדוע כדאי לדמות תכן הנדסי כאשר מבצעים תכן חינוכי?

כיצד מפתחים חינוכיים מפתחים את מיומנותם? החוסר בבסיס-ידע אקדמי לגבי תהליכי תכנון חינוכי מלמד שזו אומנות. סביר להניח שמתכני חינוך פיתחו את מיומנותם בתהליך בעזרת ניסוי-וטעייה או באמצעות היותם שוליות למתכנים אחרים. חינוך תחומי (היינו, לימודי המתמטיקה והפיזיקה, או לימודי החיבור וההלחנה) מקדיש תשומת-לב מועטה בלבד לנושאים חינוכיים וכלל אינו מתייחס לתכן חומרי לימוד (במקור - educational objects). קיימים ספרים אודות תהליך התכן החינוכי (לדוגמה, & Wiggins & McTighe, 2005) אולם הבסיס המחקרי שביסוד תכניהם אינו ברור. גם פקולטות לחינוך מציעות רק לעיתים נדירות קורסים בתכן חינוכי (הערת המתרגם: בולטת באלה לטובה המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים בטכניון, חיפה, מקיימת מזה שנים קורסי מוסמכים ב- "תכן קוריקולארי"). פעמים רבות, התוכן מתבסס על ידע אומנותי ולרוב מתמקד בתכן כשם-עצם, היינו - הערכה האם המוצר הוא טוב או לא, ומה עושה אותו ככזה, ולא בתהליך המוביל למוצרים טובים.

אומנות אכן מביאה תוצאות איכותיות, לעיתים. אולם, זו אינה הדרך היעילה ביותר להכשרה - השיעורים הנלמדים ממורה (או אומן) אחד, נעים לרוחב השדה לאט מאד, ולעיתים כלל אינם מגיעים לאומן אחר. אם ניקח דוגמה קיצונית, זיהוי מין התרנגולת נלמד בעבר בדרך של הכשרת מתלמידים. אולם, בעזרת הדרכה מובנית המועברת על-ידי מומחים, נדרש יום אחד בלבד להכשיר משתלמים לביצוע זיהוי מין נכון (Shiffrar, 1987 & Biederman).

מנגד, קיים חומר לימודי רב, ושיטות הוראה מוגדרות היטב בכל הנוגע להכשרת משתלמים בהליכי תכן הנדסי. קיימים קורסי הסמכה וקורסי מוסמכים, קיימים חומרי למידה התומכים בהם (לדוגמה - תהליכי תכן מכני - [Ullman, 2003](#), תכן מוצרים - [Wood, 2001 & Otto](#), תכן מוצרים עתידיים - [Vogel, Cagan & Boatwright, 2005](#)). בנוסף, קיימים כתבי-עת בהם מתפרסמים מאמרים (לדוגמה, *Journal of Engineering Design*, *Journal of Research in Engineering Design*, *Design Studies*, *Journal of Mechanical Design*). אם כך, הרי שתכן הנדסי מהווה דגם מבוסס ועשיר לבחינת שיפורים בתיאוריה ובפרקטיקה של הוראה ובתכן חינוכי.

תפוקות הנדסיות ותפוקות חינוכיות הן, בברור, שונות, וכמובן גם הליכי התכן בדיסציפלינות אלה, שונים. מאידך, עדיין קיים דמיון רב ביניהן, ואולי השוני בהליכים מועילים אינו כה גדול. לדוגמה, בשני תחומי-הדעת התוצרים הם מערכות מורכבות (בעלות קשרי-גומלין רבים ותלות הדדית בין תתי-מערכות) המתוכננות לענות למגוון אילוצים מתחרים (אין מצב בו תכן יחיד ממלא בצורה מושלמת את מכלול האילוצים); על התוצרים לפעול ביישומים רבים, עם קהל משתמשים מגוון (לא כל הצרכים של כל המשתמשים מובנים דיים או ניתנים לקביעה וודאית מראש); התכן מאלץ להפגיש מומחים מתחומי-דעת שונים; ולבסוף, הנדסה מכסה מגוון רחב של תוצרי תכן (מוצרים - כגון ה-iPhone, תהליכים - שיפור היעילות של הפקת חומר מסוים, או שיפור תזמון הטיסות בין רשת של יעדים, מערכות מורכבות - מעבורת החלל, או בניין משרדים רב-קומות או שירותים - מרכז שירות הממוקם במרחק גדול מקהל-היעד). תהליכי התכן הרלוונטיים - לפחות בחלק מתחומים אלו - ניתנים להעברה גם אל תחום התכן החינוכי.

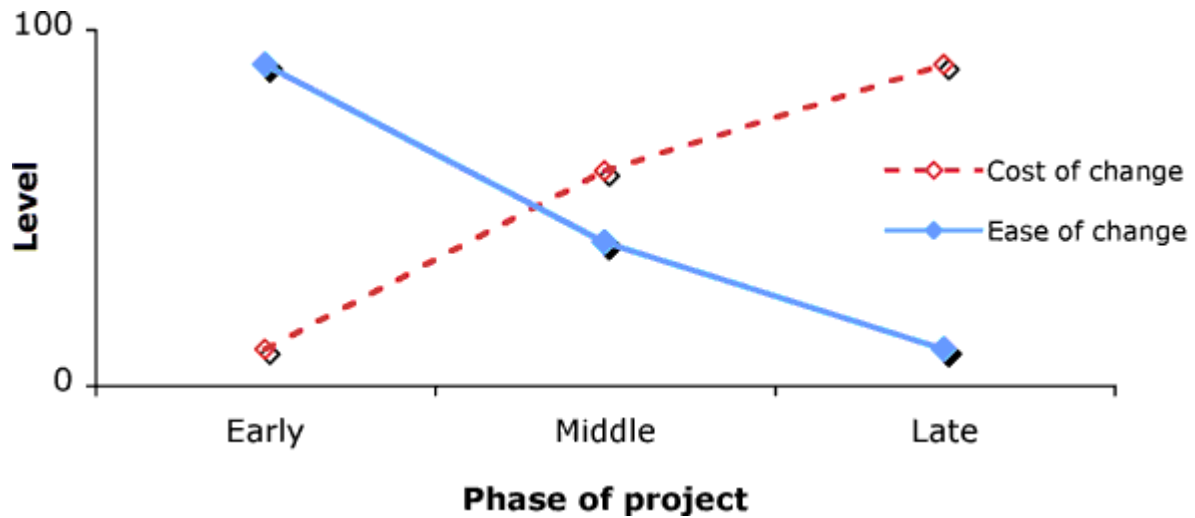
מאמר זה מתאר שיעורים שלמדתי במסגרת עבודתי האקדמית בתהליכי תכן הנדסי וחוקר את אפשרות מיפויים לשדה החינוך. תרמתי לגוף הידע בתחומי תכן הנדסי, והובלתי את התכן החינוכי בחינוך מדעי, חינוך לאוריינות, וחינוך מתימטי. תרגיל המיפוי, המוצג במאמר זה, מושפע עמוקות מהתנסויות אלה ודוגמאות מהן מובאות כאן כדי לסייע בהטמעת התכנים, כך שתובן הבנה טובה כיצד ניתן ליישם תהליכי תכן הנדסי בתכן חינוכי.

מדוע לתכן הנדסי יש השפעה גדולה על תוצרי תהליך התכן?

אתחיל בניתוח מופשט של הסיבה בעטייה נודעת השפעה כה משמעותית לטיב התהליך על טיב התוצר. הבה נשקול שני גורמים. הראשון הוא ניתוח תמחיר ומורכבות התכנון. כבר בתחילת תהליך התכן, קיימת גמישות רבה לגבי הבחירה בתכן כזה או אחר. בשלבים המוקדמים, אין נטל זמן או תקציב גדול על כל שינוי שמבצעים בתכנון. אולם, ככל שהתכנון מתקדם, ומעגלי פעילות נוספים מצטרפים (מעבדות, שיווק, הקמת תשתית ייצור) העלות של כל שינוי נוסקת (איור 1). מסיבה זו, חשוב ביותר לייצר ולבחור תפישה תכנונית טובה מוקדם ככל האפשר בתהליך התכן, שכן מחוייבות לבחירהנחותה עקב תהליכי תכן לקויים עלולה לגרום תוצאות הרסניות.

בו בזמן, שלבי התכן המוקדמים זרועים חוסר-וודאות. השוק עלול להשתנות עד הפקת המוצר. ייתכן ויידרש לפתח את התשתית הטכנולוגית ולהבינה יותר. גרוע מכך, ייתכן ואופק התפישה התכנונית גדול ורחב מדי מכפי שניתן להבינו, שהרי הפיתוי גדול לחדש תכן מוכח שעולה בדעת המתכנן מאשר לפרוץ דרך חדשה.

לסיכום - חשוב ביותר לבצע עבודה טובה בשלבי התכן הראשוניים. אולם, קשה לעשות זאת. הספרות אודות תהליכי תכן הנדסי פורמאלי הקדישה תשומת-לב רבה לשיפור הליכי תכן ראשוני (קונספטואלי) כדי לאפשר קבלת החלטות אמינה יותר בשלבים מוקדמים של מיזמים.



איור 1: עלות וקלות יישום שינויי תכנון משמעותיים לאורך התקדמות הפרוייקט.

תהליכים שהוכחו כחשובים בתכן הנדסי

Mehalik and Schunn סקרו, בשנת 2006, ספרות אמפירית (ניסויית) אודות תהליכי תכן הנדסי בהם נקטו בידי מתכננים מומחים ו/או הביאו לתוצרים איכותיים. כפי שניתן לאפיין מדע כאוסף הליכים החוברים יחדיו בדרכים שונות ובמצבים שונים, (Malhotra, 2002 & Chinn), הרי שניתן לאפיין תכן כאוסף תהליכים המשמשים בירופים שונים כתלות בנסיבות. למעשה, אחד מסימני ההיכר של תכן הנדסי איכותי הוא שימוש בהליכים איטרטיביים ואינטר-אקטיביים, ולא בתהליכים קוויים פשטניים.

למרות שמתבקש כי הליכי התכן יהיו איטרטיביים ואינטר-אקטיביים, עדיין קיים סדר - לפחות מקורב - של צעדים. אדון כאן באלה בערך באותו סדר בהם עליהם להתרחש במציאות, כולל מיפויים להקשר החינוכי. אולם, שני צעדים (פיתוח פירוק לתת-מערכות, וכן פיתוח דגמים לניתוח) הם מורכבים וגדולים, ויצריכו דיון בפרק משל עצמם.

פיתוח דרישות ומדדים

אחד הרעיונות הגדולים בתכן חינוכי הוא הדרישה לבהירות בקביעה - מראש - של המטרות החינוכיות - מה ברצוננו שהתלמידים יידעו ויישמו (McTighe, 2005 & Wiggins)? ממקורות העוסקים בתכן הנדסי, אנו יודעים כי חשיבה אודות דרישות מהמוצר או התהליך הן נקודת התחלה טובה. אלא מאי? חשיבה במונחים של "מפרט" לרוב מראה כי מטרות לימודיות הן רק אחד מהמרכיבים של דרישות תכן שיש לנסח בקפידה כבר בתחילת הדרך. עריכת מפרט מסודר מסבה תשומת-לב למכלול על כל מימדיו הנדרשים להשפיע על בחירת התכן, כך שלא תיווצר התמקדות מוקדמת מדי ותמנע ממתכננים לזנוח גורמים מכריעים בחשיבותם כגון זמן להגעה לשוק או עלויות החמרים או עלויות ההכשרה. מפרט ממוקד נבנה בעזרת ריאיונות עם הלקוחות, ניתוח שוק, ותובנות ממומחים. המפרט ייבחר כך שישקף מימדים החיוניים להצלחה, ולכן יכולים להציב אילוצים חשובים על התכנונים המוצעים.

גורמים נוספים העשויים להשפיע יכללו שאלות כגון - האם חשוב כי התכן להועיל גם למורים בעלי ידע נמוך יחסית בתחום התוכן? - האם המוצר נועד להשפיע על זהות התלמידים (היינו - האם התלמיד יעוצב כך שישאף להיות מהנדס או מדען)?

ראוי גם להבין כי ניסוח מפרט מעורפל וכללי אינו מועיל, מאחר ומפרטים שונים אפילו במעט עשויים לגרור תכנונים נבדלים מהותית. לדוגמה, האם חשוב להצליח במבחן מסוים, כגון מבחנים אחידים (כדוגמת הבגרות)? האם המבחן בו יש להצליח הוא מבחן ניסוח חופשי, או מבחן בחירה מרובה? ניסוח המפרט במונחים של השגת ערכים רצויים במדדים מסוימים (כגון השפעת היקף לימוד מסוים על הציון במבחן נתון) מאפשרת לצוות התכן למצוא פתרונות אפשריים היכולים לספק את מכלול הדרישות (ראה נספח א').

קיימות שגיאות חוזרות ונשנות בהרכבת מפרט לצורך משימת תכן. הראשונה היא ניסוח הדרישה במונחים של פתרון רצוי במקום במונחים משימתיים. כל עניינן של דרישות הוא בתוצאה שיש להשיג (היינו, המשימה שעל התלמיד לבצע), ובאילוץ המשאב (כלומר, עלויות החומרים, זמן הפיתוח, או מידת מומחיות המורה). אולם, לעיתים מתכננים ירשמו במפרט בשוגג רשימת דרכים בהם ניתן להשיג את התוצאה. לדוגמה, יחידת לימוד במדעים חייבת לכלול התנסות, או יחידת לימוד במתימטיקה נדרשת לכלול תרשים מסוים. "התנסות", או "תרשים מסוים" הינן פתרונות, לא דרישה ולא אילוץ. אפילו אם הפתרונות מתאימים לבעייה עימה מתמודדים, הכנסתם למפרט תמנע מהמתכננים לשקול חלופות, כולל שינויים קלים שיכולים להועיל הרבה יותר בסיכומו של דבר.

השגיאה השכיחה השנייה היא לא להבחין בין דרישות חיוניות לבין דרישות רצויות, אך שאינן חיוניות. רבות מתכניות הלימוד הנפוצות קשות למורים בגלל שמוערמים עליהן "תכני בונוס" (למשל, דרכי הוראה שונות לאותו שיעור, כאשר כל אחת מהן דורשת הנחיות שונות). אחת הדרכים בהן ניתן לחשוב על תופעה זו היא כעל הכללת יותר מדי תכנים "רצויים" אך שאינם "הכרחיים". כך נוצרת החלשה ניכרת של הדרישות ה- "הכרחיות" (לדוגמה, דרישה כי רוב המורים ייתמקדו ברעיונות הגדולים, או כי רוב המורים יבינו כיצד ליישם את הקוריקולום ביסודיות).

כחלופה, ניתן לנסח דרישות כך שיכללו הן ערך מזערי והן ערך מיטבי. כאשר משקללים ייתרונות וחסרונות בין פתרונות חליפיים, שווה לא להקריב ערך מזערי במימד מסוים תמורת השגת ערך מיטבי במימד אחר. כך, למשל, יהיה זה רעיון רע לשנות משכה של יחידת-לימוד למשך שאינו נתמך על-ידי הפיקוח, אפילו אם הדבר עשוי לשפר את הלימוד.

חקר חלופות

אחד המנבאים המובילים להצלחת תכן הוא מספר החלופות שנבדקו. דבר זה נכון במגוון רחב של תחומים. כמובן שלחקור יותר מדי חלופות אך בשטחיות אינו מומלץ. ניתן לשקול חלופות באופן וירטואלי או במחשבה בלבד, וניתן לשקלן ניסויית כאבי-טיפוס. האפשרות המיטבית תלויה הדרישה לדיוק ההערכה, והזמן הנדרש לפתח, ליישם ולחקור ביצועי אבי-טיפוס. ברוב תחומי התכן החינוכי, תיאוריות קיימות וניסיון העבר אינן מצטיינים בדיוק הניבוי שלהם. מסיבה זו, ניסויים מעשיים בתחום פיתוח חמרי הלמידה עשויים להיות חשובים. אולם, ללא תלות בכיוון הנבחר, חשוב לחקור ריבוי חלופות בטרם מבצעים בחירה עיקרית. חשוב גם שהחקירה תהיה מספיק יסודית כדי לאפשר הערכת ביצועים של דרישות מפתח, ולו רק באמצעות הערכת מומחים לגבי טיב המענה לדרישות המפתח (ראה נספח ב').

אחת מצורות הפיתוח, אשר מחקר מראה כי אינה אפקטיבית, היא "סיעור מוחות". סיעור מוחות מערב העלאת רעיונות תוך דחיית שיפוט. סיבה אפשרית לחוסר המועילות של סיעור מוחות היא כי קבוצות נוטות להתכנס לקונצנזוס שאינו בהכרח פתרון מיטבי. דרך מועילה יותר היא לבצע הערכה ביקורתית או אף לבקש מיחידים לסער מוחם לבד ואז להציג את התוצאות לשיפוט הקבוצה (Yang, 2000 & Paulus).

חקר ייצוג של בעיות

פיתוח פתרון משופר בצורה בולטת הוא סוג של בעיית תובנה. מאפיין שכיח בבעיות תובנה הוא קיומו של מרחב פתרונות גדול אך ללא משוב מחשבתי או ניסויי על טיבה של כל חלופה. אין גם הצבעה האם אנו מתכנסים או מתרחקים מפתרון (Perkins, 1994). דמיינו חיפוש זהב באורח אקראי, מלווה כשלונות, והעדר כל רמז או סימן היכן נחפור מחר. במקום להסתמך על מזל עיוור, יהיה מועיל הרבה יותר למצוא ייצוג אמין לבעייה שיאיר לנו אילו פתרונות סביר שיהיו מועילים, ואילו פחות מועילים (Simon, & Kaplan; Schunn, 1999 & Lovett; 1990). לצורך כך, יועיל לפתח תהליכי עיבוד מידע זריזים (היוריסטיקות):

1. מה משותף לכישלונות? מה משותף להצלחות?

2. האם ניתן לזנוח מאפיינים מסוימים שאינם משפיעים?

ייצוג הולם עשוי לסייע לתחזית מוצלחת. לדוגמה, בתכן במעבדתנו אנו עשויים למצוא כי הפרדת תכנונים לשתי קבוצות - היבטים המופשטים יותר של תוכנית לימודים, המרחיקים בין המורה לתלמידים (רע) לעומת תכנים המקרבים את המורה לתלמידים (טוב). זה הוא סיווג עדיף על-פני סיווג לפי מאפיינים אינסטרומנטליים (הדגמות וידאו, או הנחיות כתובות, היכולות להיות הן טובות והן רעות).

חקר נקודת המבט של משתמש-הקצה

לרוב, מעצבים ומתכננים אינם מבצעים את הפיתוח עבורם, ואפילו לא עבור אנשים כמותם. תכן חינוכי יוצר חמרים עבור אנשים צעירים בהרבה מאיתנו, מרקעים דמוגרפיים או סוציו-אקונומיים שונים, ולבטח כאלה שיודעים פחות מאיתנו על הנושא הנדון. יתרה מזאת - צוותי תכן הם לרוב רב-תחומיים, כך שמרחקו של כל אחד מהם מקהל היעד - שונה. תחת נסיבות אלה, קל ונוח, יחסית, לתפור פתרון מתאים למפתחים, אך לא ממש למשתמשי הקצה. לדוגמה, מספר חברי צוות ברוב צוותי התכן החינוכי היו בשלב עזה או אחר מורים, והם בעלי שליטה גבוהה בתכני הלימוד ובשיטות ההוראה. מורים-מומחים אלה מועדים לתכנן תוצרים חינוכיים שהיו עובדים עבורם כמורים, אך הם אינם מייצגים את ציבור המורים בכלל. לכן, יועיל מאד למתכננים לחקור את נקודת המבט של משתמשי הקצה במהלך התכן, כדי להתחבר מחדש עם צרכיהם והמשאבים הזמינים למשתמשי הקצה. ביקורים באתרים הפיזיים בתחילתו של תהליך התכן יאפשרו למתכננים לדמות מנטלית את תוצרי התכנון בפעולה בסביבה לה הם נועדו - הדמיות מנטליות הן דרך שחיכה בה מתכננים פותרים אי-וודאויות בתהליך התכן (Schunn, 2008 & Christensen).

בתכן חינוכי, ביקורים מוקדמים באתרים הפיזיים ישלבו לרוב תצפיות על כיתות כדי להבין מה הם האילוצים הפיזיים, יחסי-גומלין נפוצים בין מורים לתלמידים, רקע וידע קודם של התלמידים, או מטרות התלמידים בהקשר לנושא הנדון. ערוב אנשים המייצגים את קול הכיתה בצוות התכנון לרוב אינו מספק חלופה הולמת לביקורי שטח אלה. מדהים להיווכח כמה מעט תצפיות שטח מקיימים אנשי סגל הפיקוח, אשר לכאורה מייצגים את עמדת הכיתה בצוותי התכן.

עקרונות חשובים בתהליך התכן

בנוסף לחשיבה אודות תהליכי התכן, קיימים עקרונות תכן חשובים הקשורים הדוקות לתהליך התכן. תקצור היריעה מלפרטם כאן, נדגיש כאן שניים עיקריים המארגנים את המושגים המפורטים: (1) תכן מערכות; ו- (2) אופטימיזציה תחת אילוצים (Schunn, 2008 & Silk).

עקרון תכן הנדסי מרכזי ראשון - תכן מערכות

מהנדסים רואים כל אובייקט תכנוני (שעון, מכונית, מטוס או מבנה) כקופסא שחורה המאופיינת בקלטים ופלטים, וכן כתת-מערכות המסייעות להשגת התפקוד הרצוי. צורה זו של "חשיבה מערכתית" מתמקדת בטבע הפונקציונאלי של המוצרים, שחיוני לשיפור תיפקוד.

תכן תת-מערכות

אחד מההיבטים החשובים בתהליכי תכן ובחשיבה מערכתית הוא הגדרת המערכת בכללה כתפקוד של תת-מערכות. לדוגמה, מערכת התרעה מוגדרת כתת-מערכת גלאים, תת-מערכת חיווי, תת-מערכת אספקת כוח ותת-מערכת בקרה. יתרונה של חשיבה מערכתית - במקום חשיבה במונחים של המערכת כולה או רכיבים נפרדים - הוא בהגברת יעילות התכנון בעזרת הגדלת הקצאת הזמן לתכנונה של כל תת-מערכת, אם כי עדיין נדרש להקדיש זמן לאינטגרציה. האחים רייט, למשל, הצליחו להתקדם במהירות בחתירתם להשגת טיסה ממונעת בעוד מתחריהם כמעט לא הצליחו להתקדם, בעזרת פירוק המערכת "מטוס" לתת-מערכות של עילוי, הנעה ובקרה (Bradshaw, in press). בהתחלה הם התמקדו בתת-מערכת ייצור העילוי ובחנו במנהרת-רוח את המבנה שיצר את מירב העילוי. לאחר מכן הקדישו תשומת-לב לבקרה, ואז פנו לפיתוח תת-מערכת ההנעה. מתחריהם, לעומת זאת, בחנו תכנונים למטוסים שלמים, ונדרש להם הרבה יותר זמן לפתח, לתכנן, ולהכליל שינויים במטוס שלם, כאשר כישלונות היו קשים מאד לניתוח (האם הייתה זו צורת חתך הכנף? או כשל במערכת הבקרה?).

ואיך נוכל למקד תשומת-לב מדורגת בתכן חינוכי? ובכן, ניתן לבחון כיצד נרכשים רעיונות וכישורים חדשים עד לבקיות אם אכן היו נבחנות שתי תת-מערכות אלה, של הצגת רעיונות חדשים, ושל תרגול רעיון חדש. צוות תכן עשוי להתמקד ראשית ברכישת רעיון חדש. מהו הידע הקודם הנדרש? אילו תפישות מאותגרות על-ידי הרעיון החדש? כיצד ניתן למדוד את מידת הקליטה ההתחלתית? איזו רמת קליטה הגיוני לדרוש מתכנונה של אותה תת-מערכת? צוות התכן יוכל גם לבדוק ניסויית שיטות חלופיות להצגת הרעיון במהירות כאשר הם נעזרים בתת-מערכת התרגול. לאחר שבידם שיטה מוכחת להצגת הרעיונות, יוכל צוות התכן לפנות לפיתוח ובחינת תת-מערכת התרגול. יקשה לבצע הערכה מועילה של תת-מערכת התרגול ללא שיטה עובדת להצגת הרעיון. בדומה, גם אין טעם להכשיר מורים ללא חמרי-למידה.

מה הם מרכיבי השלם?

היבט חשוב אחר בחשיבה מערכתית בתכן הוא להציף למודעות תת-מערכות קריטיות ודרכים בהן הן תלויות זו בזו. הנורה החשמלית שהמציא אדיסון (Hughes, 1987). אדיסון נאלץ לפתח מערכת שלמה: דרך לייצור חשמל, דרך להעברת חשמל מתחנת הייצור אל הצרכן, דרך לחלוקת החשמל בביית, דרך למדידת הצריכה כך שאנשים יחויבו בהתאם לה, ועוד. לרוב, מהנדסים מתכננים רכיב יחיד (למשל, נורה

יעילה יותר) הנדרש להתאים למערכת קיימת ולא בונים מערכת מהתחלה. אולם, על המהנדסים להבין את המערכת בכללה, ולראות מה יידרש לתכנן מחדש.

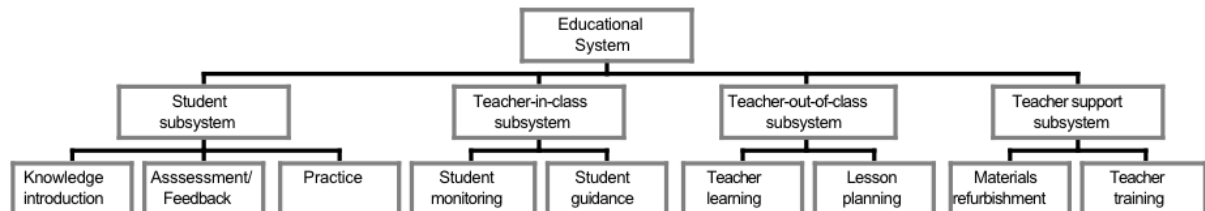
בתכן חינוכי, ישנן דרכים רבות לפירוק המערכת לתת-מערכות תפקודיות, עקב ריבוי הדגמים העיוניים ללימוד והוראה. ככלל, פירוק טוב לתת-מערכות יהיה כזה שיתמוך בשלוש פעולות תכן לגבי כל רכיב:

1. מטרות תפקודיות ברורות;

2. מדדים ברורים לכל תת-מערכת;

3. הזדמנויות לבדיקה נפרדת של כל תת-מערכת.

איור 2 להלן מדגים פירוק אפשרי אחד בו השתמשתי לתכנון קוריקולום מדעי לחטיבות בייניים ותיכונים (ראה נספח ג). כאן, כל תת-מערכת מוגדרת על-פי תפקודה ולא על-פי זהותה הפיסית. כך, לדוגמא, ראוי לדון במערכת התמיכה למורים, במקום להעלות דרישה להתמקצעות ספציפית, ואכן המורים עצמם הם חלק משתי תת-מערכות שונות.



איור 2: ניתוח תפקודי של מערכת חינוכית לתת-מערכות

עקרון תכן הנדסי שני - מיטוב על רקע האילוצים

העיקרון השני הוא עקרון כללי של מיטוב על רקע האילוצים. בכל משימות התכן בעולם האמיתי יהיו אילוצים מתחרים, כך שלתכנן דבר כל שהוא כך שיתגבר על אילוץ יחיד בצורה מיטבית לרוב לא יהווה פתרון מיטבי לאילוץ אחר. כך, למשל, הפתרון החסכוני ביותר לא יהיה זה שעובד בצורה הטובה ביותר. ככלל, יידרשו פשרות בין אילוצים. מהנדסים מוצאים כי חשיבה במונחים של פשרות מועילה, מאחר וחשיבה כזו מאפשרת קבלת החלטות במקום תלונות על מאפיין חסר או תוצאות לא מספקות במימד נתון: אם ברצונך לשפר תוצאות במימד נתון, היכן יידרשו ויתורים? אם ברצונך לרכוש רכב מהיר יותר - האם תהיה מוכן לשלם יותר? אם ברצונך להשיג רמת חשיבה גבוהה יותר בקרב תלמידיך, האם תסכים להשקיע יותר זמן בהכשרת מורים? אם ההתמקדות היא רק בבקשות המשתמשים, מפתה מאד לנסות לספק הכל. ואכן, בפיתוח קוריקולרי, קיים לחץ גדול להכניס שינויים בגלל דרישות למרכיבים משניים (למשל - הכלילו את הנושא החביב עלי, או את שיטות ההוראה המוכרות לי, או תמכו באוכלוסיות הקרובות לליבי). אולם, הכללת רכיבים נוספים אלה, ושכדוגמתם, גוררת מחיר ניכר: איכות כל שאר הרכיבים תרד, או - עלות (במונחי זמן וכסף) תגדל משמעותית.

כדי לאפשר שיקולי "תן וקח", ניסוח מפורש של הדרישות, ושקלולן, הופך גורם מכריע בבחירת פתרונות מייטביים לאילוצים המתחרים. כך, למשל, בעוד שעלות פיתוח אפס היא אולי רצויה, אפשר גם לקבוע כי עלות פיתוח של \$100,000 היא מתקבלת על הדעת, ואין הכרח לצמצמה מעבר לכך צורך פגיעה במרכיבים אחרים. יסוד חשוב אחר במיטוב התכן הוא קביעת נישת משתמש (או מספר של כאלה). אי אפשר לבנות רכב מיטבי למשפחה בת שמונה נפשות ועם זאת גם מיטבית לצעיר רווק. בדומה, בלתי אפשרי לבצע תכנון תוכנית לימודים מיטבי לסביבות למידה שונות במובהק (כיתה של תלמידים בקיאים ב-'חדו"א'

ומעבדת פיזיקה בה לומדים תלמידים המתקשים באלגברה בסיסית). ניתן למטב לרוחב מספר נישות קרובות, אולם חייבים להעריך באיזו מידה נפגעת התועלת מכך לכל אחת מהנישות.

מיטוב נשמע מתימטי. ואכן כך הוא לעיתים, בהנדסה (שם הוא נקרא ניתוח הנדסי). חלק מן המהנדסים ירחיק לכת ויטען שניתוח זה הוא ליבו של תכן ראוי לשמו (מעבר לכל הקרוי בהכללה - 'חשיבה'). כאשר עוסקים בתת-מערכת של תכן כולל כל שהוא, המהנדסים יעלו פרטים מפיזיקה, כימיה, ביולוגיה וכו' (או יבנו ידע מדעי חדש אם כזה אינו קיים כבר) כדי להבין כיצד לנבא תוצאות והשלכות של החלטות תכן על מימדים שונים, ובעזרת מתימטיקה (לרוב תכנה אנליטית) יחליטו אילו צירופים יביאו לתוצאה מיטבית. דוגמה מרשימה לכך היא מטוס הנוסעים בואינג 777 החדש, בו מליוני חלקים תוכננו ונבנו ווירטואלית כדי לנפות שגיאות תכנון. צורה זו של אנליזה מתימטית יעילה הרבה יותר משיטות ניסוי והערכה. זאת, ועוד אנליזה מתימטית כזו יכולה להציף מצבי-ביש בהם אין פתרון ידוע במרחב האפשרויות שנבדקו, כך שיופעל מנגנון של יצירת אפשרויות חדשות. (בואינג נבהלה במהלך התכנון, והזמינה דגם מבני של חרטום המטוס לצורך בדיקות, אלא שאלה היו כה מוצלחות עד שבדיקות על דגמים מבניים אחרים בוטלו).

כמובן שניתן לטעון כי חינוך אינו יכול לסבול מיטוב מתימטי משום שאין בו פונקציות מתימטיות החוזות בדיוקנות תוצאים של בחירות תכנוניות. אך, אפילו בהעדרן, לרוב ניתן לחזות בקירוב תוצרים של בחירות שונות יחסית לדרישות המקוריות בכל מימד (היינו - מעל או מתחת ערך הסף). כך, המתכנן יכול למטב פונקצייה יחידה המחשבת את מספר המימדים בהם דרישת סף או ערך מיטבי מתקבל (לדוגמה, האם התכן מספק מוצר זול מספיק, מהר מספיק, ומקדם במידה מספקת את אוכלוסיית היעד?). בנוסף, ייתכנו מספר תחומים בהם ידועות פונקציות מתימטיות, לפחות בנישה כזו או אחרת. פונקציות עלות פיתוח ידועות במוסדות המפתחים תכנים חינוכיים. פונקציות למידה מתגלות במספר סביבות. כך, למשל, אנו למדים כי איכות ההוראה וטיב הלמידה אינם מתנהגים לינארית עם שעות ההשתלמות המקצועית של המורה. העקומה דומה יותר לעקומת S, בה שעות מתחת מספר סף מסוים הן חסרות משמעות במידה דומה, אחריהן קיים תחום בו כל תוספת שעת הכשרה מביאה לתוספת איכות דרמטית, ולאחריה כל שעה נוספת שוב כמעט ולא יוצרת הבדל. ממספר תחומים, ערכי המעבר מתחילים להתבהר - כך, למשל, פחות מעשרים שעות השתלמות אינן משמעותיות למורי מתימטיקה בחטיבות הביניים בארה"ב (Garet, Porter, Birman, 2003 & Desimone, Yoon, 2001 & Desimone, Birman). (ראה גם נספח ד).

צווארי בקבוק בתכן - קיבעון

דרך נוספת להתבונן בהליכי תכן היא לשים לב למתכננים עצמם, ואיך ולמה תהליכים מסויימים נדרשים, מנקודת-ראות של פסיכולוגיה קוגניטיבית. מעבר לשפע הבדיחות על הבדלים בין אנשים רגילים למהנדסים, הרי שסביר להניח כי אותם מחסומי-תכן הפועלים בקרב מהנדסים יהיו קיימים גם בקרב אנשי תכן חינוכי. אחת המכשלות הקוגניטיביות הבולטות היא קיבעון תכנוני. כשמו, קבעון תכנוני מתרחש כאשר מתכנן ננעל על תכן מסוים וקשה לו לחשוב על חלופות, גם כאשר ברור שלתכנון מגבלות רבות. קוגניטיבית, קבעון מקושר עם בעיות זיכרון כלליות (Schumacher, 1993 & Smith, Ward) בהן קיומו של רעיון מסוים בזיכרון הפעיל מונע קלט לרעיונות אחרים בזכרון ארוך-הטווח (כפי שהנעלות על שם שגוי מונעת הזכרות בשם הנכון של האדם).

מחקר קלאסי המבליט את עצמת הקיבעון הוא מחקרם של Smith, 1991 & Jansson. במחקר זה, סטודנטים לקראת סיום ומהנדסים בתחום המכונות התבקשו לתכנן מוצר חדש (לדוגמה, ספל קפה חסין נזילות). לחלקם הוצגה דוגמה ראשונית הכוללת מאפיין בלתי-רצוי (קש לשתייה). למשתתפים נאמר אילו מאפיינים אינם רצויים ומדוע (לדוגמה - קש תמיד ינזול). למרות הנחיות אלה, אותם משתתפים

שהוסברה להם הדוגמה השגויה הפיקו את התכנונים הגרועים יותר, והרבה פעמים כאלה שכללו היבטים של הדוגמה שהוצגה להם, כולל היבטים פחות רצויים בה.

אנשי תכן חינוכי לרוב חשופים למגוון רחב של דוגמאות קיימות. מחד, דוגמאות אלו עלוות להשרות קבעון, כאשר גם אותם מאפיינים שהתבררו כפחות רצויים 'יזלגו' לקוריקולום החדש. מאידך, דווקא עיון בדוגמאות אלה עשוי להפחית קבעון, וזאת משום שתכנונים קודמים מצאו דרכים להתמודד עם רבות מהבעיות הסבוכות, ותהיה זו שטות להתחיל מבראשית כל פרויקט.

הפתרון, כך מסתבר, נעוץ בתזמון ובאופן בו נזכרים בדוגמאות קיימות. [Altshuller, 1973](#), פיתח את החשיבה המצאתית שיטתית היוצרת נתיבים עוקפי דילמות. בין מרכיביה קיים הליך המערב מעבר מהבעייה הקונקרטית אל בעייה מופשטת, פתרון הבעייה המופשטת בעזרת עקרון כללי, ויישום העקרון הכללי על הבעייה הקונקרטית (ראה נספח ה).

כוואריאציה לרעיון זה, מתכננים יכולים לשקול מספר מופעים של הבעייה הנחקרת, ואז לנסות להסיק אודות התופעה המופשטת שביסודם. לרוב, המבנה הפנימי העמוק של הבעייה חבוי בין מאפיינים שוליים רבים, והשוואה בין המופעים עשויה להיות דרך מועילה להבלטת מבנה עמוק זה, אפילו בקרב מתחילים ([Koh, 1987 & Holyoak](#); [Loewenstein, Thompson](#); [Gentner, 2003](#)). ככל שהייצוג התפקודי מופשט יותר, כך הוא יועיל יותר למתכננים לחשוב על דוגמאות קודמות מתחומים אחרים (הדמייות) שיציעו פתרונות חדשים למשימת התכן. ככלל, הדמיות נחשבות למועילות מאד בתכן חדשני ([Christensen & Schunn, 2007](#); [Dahl](#); [Moreau, 2002](#)) ובהתגברות על קבעון ([Christensen & Schunn, 2005](#)). ייצוג מופשט (כזה המשתמש בתוויות תפקודיות) גם נראה כמסייע למתכננים ליצור הדמיות שימושיות ([Linsey](#), [Wood](#), [Clauss](#), [Laux](#), [Markman, 2007](#) & [Tseng, Moss, Cagan](#); [Kotovsky, 2008](#)).

האם תכן חינוכי אכן דומה לתכן הנדסי? נקודות שוני אפשריות

יכולת לביצוע ניתוח תכן ומיטוב

כבר נגעתי בהבדל תהומי אחד בין תכן הנדסי ותכן חינוכי, והוא המידה בה ניתן לבצע ניתוח כמותי מדויק בשני אלה, כדי להנחות החלטות תכן ומיטוב בצורה אמינה. בנוסף, מחקר רב עושה שימוש בכלים איכותניים (ריאיונות) ולא בכלים כמותיים (תוצאות מבחנים), ואותם מחקרים שכן מיישמים כלים כמותיים, לרוב מכוונים רק למציאת קיום או העדרות סיבתיות ולא קובעים כמותית את מידת ההשפעה, שלא לדבר כלל על פונקציית התגובה והשתנותה (כלומר, שיפור בלמידה כפונקציה של מספר המשתתפים בקבוצת לימוד). מעבר לכך, תכנונים חינוכיים רבים אינם עוברים הערכה מספקת או ראויה, לבטח לא בצורה גלויה (לציבור). לכן, יארך זמן רב טרם נוכל לנקוט בתכן חינוכי וירטואלי לחלוטין. עדיין, ניתן ליישם חשיבה כמותית בתכן חינוכי לפחות כדי לשקול חלופות ואת הוויתורים שנאלץ לקבל עם כל חלופה. לבסוף, קיימים תהליכים רבים בתכן הנדסי שאינם מתימטיים (פירוק לתת-מערכות, שקילת חלופות, פיתוח ייצוג פונקציונלי הולם של הבעייה) ויישומם בתכן חינוכי אינו תלוי בניתוח מתימטי.

יכולת בניית אב-טיפוס מהירה

מעבר לאפשרויות ההנדסה הווירטואלית, עדיין חייבים לבנות אב-טיפוס פיזיים לצורך בדיקה. במעבדות הנדסה רבות קיים ציוד מתקדם לבניית אב-טיפוס. ניתן כיום לבצע מתאר (Mock-up) מהיר מחומרים פלסטיים תוך דקות משרטוט תלת-מימדי. יכולת זו משלימה תכן וירטואלי, כך שניתן לבחון תכנונים

רבים בזול ובמהירות. מאידך, תכן חינוכי אינו מתאים במידה כה רבה להכנה מהירה של אבי-טיפוס (משום שבחינה מצריכה גישה לתלמידים או משתמשים רלוונטיים אחרים) כי בחינה מהירה היא מפתח להאצת התכן, ואין לרשותנו תלמידים בטלים במעבדה הממתינים לבחינה אקראית, או - גרוע מכך - תלמידים עשויים להיות בעמדה מתאימה לבחינה רק בנקודת זמן יחידה בשנה. מעבר לכך, ביצוע אבי-טיפוס מהירים אפשרי גם בתחום החינוך. תכניות לימוד רבות מצריכות שנים עד לפיתוח מלא, והצגת שינויים תאפשר לבחון חלופות במקביל בקבוצות לומדים מגוונות. הערכה אמפירית של מקטעים מפורטים עשויה לספק משוב שימושי ואפשר נאמנות לתהליכי תכן חינוכי (Nieveen, 1999).

המימד הפיזי של האובייקטים המתוכננים

תכן הנדסי לרוב ממוקד בעצמים מוחשיים הנסמכים על חוקי הטבע ועל יחסי הגומלין עם המשתמשים. תכן חינוכי, לעומתו, פשוט מבחינה מוחשית ומורכבותו טמונה בסימבוליות אשר ביטוייה המוחשיים כמעט אינם רלוונטיים. כמובן שאפשרי לטעון סימבוליות זו היא הגוררת חוסר-יכולת לחזות מראש הקשרים של יישום, אולם הערכת מידת הפלואידיות של תכנים לימודיים לרוחב ההיבטים השונים היא, כנראה, מוגזמת. שגיאות תפישה הן חסינות במידה מפתיעה בפני שוני בגילאים, ברקע התרבותי, ובהוראה. שיטות הדרכה טובות שימושיות על-פני מגוון רחב של הקשרים שונים. בנוסף, הרבה מהמחקר שנערך בתחומי תהליכי תכנון מערב הנדסת תכנה (Schunn, 2006 & Mehalik) שהוא תחום סימבולי הרבה יותר מאשר פיסיקלי.

מורכבות המערכות המתוכננות

אפילו אסלת שירותים פשוטה היא מערכת מורכבת דיה כדי להיות בלתי-מובנת לרוב המבוגרים (Keil, 2003). אך אפילו מורכבותם של מטוס או בניין משרדי היא פשוטה להחריד בהשוואה למורכבות מוחו של ילד. לבצע הנדסה הפוכה על מוח אנושי הוגדרה כאחד האתגרים של US National Academy of Engineering (<http://www.engineeringchallenges.org>). בהמשכם של דברים אלו, מורכבותה של מערכת תלמידים / כיתה / מורה אינה פחות ממטילת מורא.

קשה להשוות אובייקטיבית בין תפוחים (גשרים) ותפוזים (כיתות לימוד) מבחינת מורכבותם. אולם, לעיתים טיעון זה נראה כטיעון "הדשא שלך ירוק יותר"... הקשיים שמהנדסים חווים בהנדסה נראים להם קשים מאלה של תכן חינוכי. במטוסים יש מליוני חלקים החייבים לפעול בתיאום מדויק כדי למנוע תוצאות הרסניות. בנוסף, גם מפעלים ובתי-חולים, למשל, כוללים מרכיב אנושי ניכר. כך, המורכבות היחסית של מערכות חינוכיות עשויה שלא להוות מרכיב משמעותי המשפיע על יישום חינוכי של שיטות תכן הנדסי.

המשך ההתקדמות

הראיתי מיפוי אפשרי של תהליכי תכן הנדסי בתחום התכן החינוכי. קבוצת התכן החינוכי שלי מצאה אנלוגיה זו כמועילה ביותר. הדוגמאות שהבאתי במאמר זה הן רק דוגמה לחשיבה הנדסית המועברת לתחום החינוך. ברוב הדוגמאות, המרכיבים שהשתמשנו בהם בהצלחותינו כללו:

- ניסוח מפורש של הדרישות;
- שימוש בדרישות אלה לקבלת החלטות;
- פירוק לתת-מערכות תוך שימת לב מירבית לקוריקולום ולהתפתחות מקצועית;

- בניית הזדמנויות מרובות לקבלת משוב לתהליכי התכנון.

ועדיין, בקושי גרדתי את פני-השטח של תחום הידע של תכן הנדסי. בנוסף לצורך במחקר רב נוסף על תהליכי תכן הנדסי, קיימים היבטים נוספים שעשויים להניב פירות אם יועברו ויושמו בתכן חינוכי (שיטות ייחודיות למערכות מורכבות, שיטות להתמודדות עם עבודת-צוות, שיטות לשיתוף-פעולה בין-תחומי, שיטות תכן בר-קיימא, ויזמות, אם נמנה רק אחדים מאלה). נדרשת עבודה נוספת כדי לבחון מיפויי של שיטות אלה לתכן חינוכי.

המבחן הסופי של הרעיון שהבאתי במאמר זה יבוא מבחינה מעשית של תכן חינוכי. אולי כבר כעת מתכנני קוריקולום טובים כבר נוקטים בשיטות רבות רותן מיישמים מהנדסים. אולם כדי שנוכיח זאת, עלינו ללמוד כיצד פועלים מתכננים חינוכיים. מחקר כזה פשוט אינו קיים כיום. אני מקווה כי לפחות חלק מקוראי מאמר זה יסכימו להשתתף במחקר הלומד את דרכי פעולתם, שכן השתתפות שכזו חיונית לבניית גוף יד חשוב זה.

שלמי תודה

מאמר זה נתמך במענק SBE-0738071 של המוסד הלאומי למדע של ארה"ב. תודות גם ל- Hugh Burkhardt ול- Alan Schoenfeld על תרומתם לכתיבתו.

נספחים

נספח א'

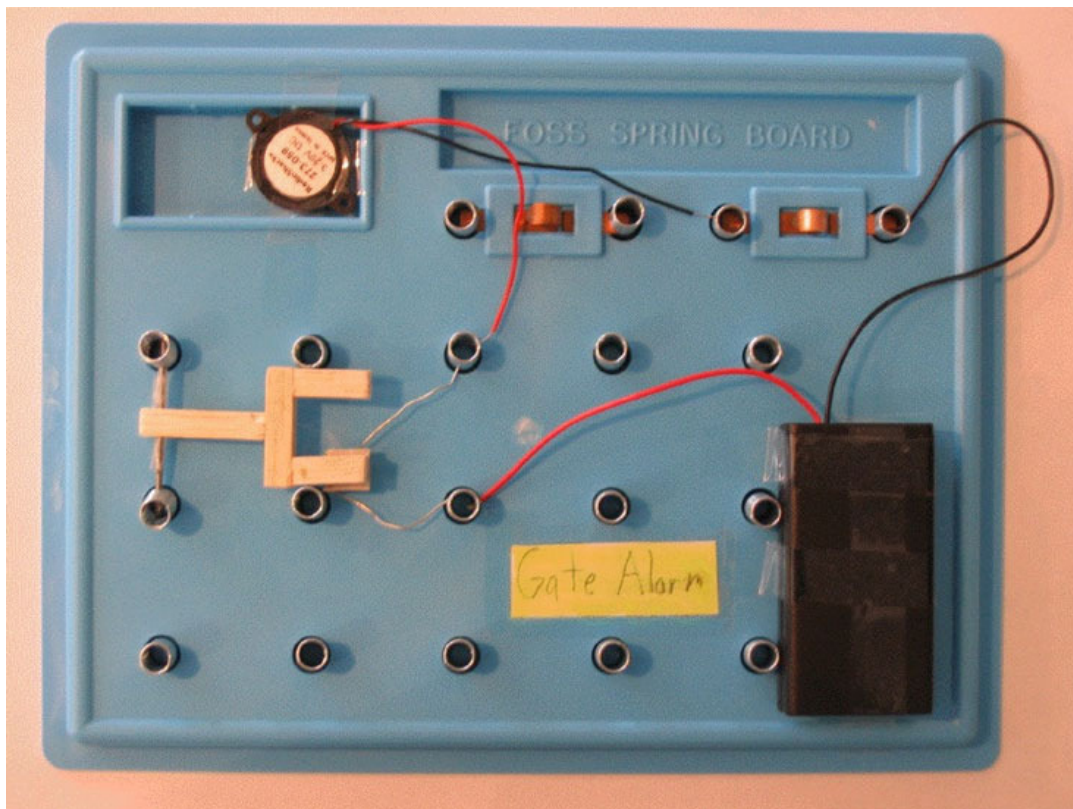
בשנים 2002 - 2005 מילאתי תפקיד במיזם גדול לקידום לימודי המדע בכיתות א' עד י"ב, במחוז גדול בארה"ב. פיתחנו רעיון כללי של יחידות היצף (יחידות היצף הן יחידות לימוד העושות שימוש בלעדי במונחים של התחום הנלמד, מבלי "לתרגם" אותם לשפת היום-יום) במהלך הגשת הצעה לקבלת מענק במסגרת רפורמה בית-ספרית. חשבנו על יחידות היצף כיחידות לימוד בהן התלמיד ייחשף רק לעבודה כמדען או כמהנדס. הגדרה זו הוכחה כמעורפלת וכמצריכה פירוט נוסף כדי להפיק תוצא מספק. ידענו כי קיימים מספר תוצרים חינוכיים המספקים זאת, אולם הדעה הרווחת הייתה כי בסביבה עירונית רובם ייכשלו להביא שיפור משמעותי, בין אם משום שפעלו במספר מצומצם ביותר של סבבות, או כיהם עברו שינוי לצורות פחות מועילות כשקנה-המידה התרחב. במקום לצלול ישירות לתכן, שקענו שמונה חדשים לזקק את עקרון ההיצף לדרישות מוגדרות במגוון מימדים. זאת השגנו בעזרת מערבות רחבה של מפתחים, חוקרים, ומשתמשים רבים. המפתחים והחוקרים היו בעלי נסיון רב אך נחלקו בדעותיהם כיצד יחידות היצף אמורות לפעול, וביניהם היו כאלה שסברו כי הרעיון כולו מועד לכשלון. המשתמשים היו משכבות מגוונות של המארג החינוכי, החל ממפקחים על לימודי המדעים וכלה במורי המדעים.

חלק מהדרישות שניסחנו היו:

- חובה לכסות מושגי גרעין קשים כדי להצדיק את מך הזמן שהתכנית דורשת; תפעולית, דרישה זו מערבת סיכון גבוה, שכן התלמידים נדרשו לעמוד במבחנים ארציים מטיפוס בחירה מרובה.
- חובה להגביר את עניין התלמידים בקורסי מדעים מאוחרים יותר ובלמודי המשך בתחומי המדע / טכנולוגיה, בייחוד בקרב כאלה שנמנעו מכך בעבר.

- חובה לכלול לפחות מחזור מדעי (מהיפותזה עד מסקנות מניסוי) או הנדסי (מרעיון לאב-טיפוס) שלם, ועל התלמידים להיות מעורבים פעילים בכל שלב במחזור.
- עלות החומרים לא תעלה על 10\$ לתלמיד.
- התכנית חייבת לעבוד עם מורים מועטי - נסיון בסביבה מבוססת חקר.
- התכנית חייבת לעבוד עם מורים בעלי שליטה מועטה במדעים.
- התכנית חייבת להיות ניתנת להחלה בקנה מידה רחב תוך שנים מועטות.

ברשימה זו קיימים מספר מאפיינים בולטים. ראשית, היא כוללת את יחידות ההיצף בלימודי הליבה ולא כתוסף. יחידות ההיצף קיימות נטו לכלול רק נושאי 'בונוס' מוגבלים. שנית, היא קהל היעד של התכנית הוא הכלל (כל המורים, כל התלמידים) ולא רק מורים נבחרים ותלמידים רבי - הישגים כפי שהיה נהוג עם יחידות ההיצף. שלישית, התכנית מפרטת טווח רחב של פעילויות בהן על התלמיד להיות מעורב, ובכך נמנעת גישה של 'מתכונים' כפי שהייתה נהוגה ברוב לימודי המדע רחבי-ההיקף. רביעית, התכנית כוללת תוצאים קוגניטיביים כמו גם אפקטיביים, ואלו - במונחים מדויקים יחסית (שינוי בתוצאות מבחנים, עניין מוגבר בלימודי המשך ובחירת קריירה). לבסוף, היא מספקת בסיס מוצק ויציב לעלות מטרה, שנגזרה מניתוח עלויות ספקים ותקציבי בתי-הספר לחמרי לימוד. עם דרישות אלה, היינו מסוגלים לפתח יחידות לימוד במהירות יחסית שזכו ברובן להצלחה גורפת ויישום נרחב.



איור א'-1: מערכת אזעקה פשוטה שפותחה ע"י צוות של תלמידים

לדוגמה, פיתחנו יחידת מערכת אזעקה אשר שמשה להעברת נושאי גרעין באלקטרוניקה (מתח, התנגדות, חיבור בטור ובמקביל) בכך שתלמידים תכננו ובנו מערכת אזעקה למילוי צורך בחייהם (למשל, אזעקה למנעול התא שלהם).

יחידת הלימוד הראשונה שעברה ניסוי שדה הראתה כי תלמידים השיגו שיפור כולל של פי 2 במבחני בחירה מרובה לעומת תכניות קיימות המשלבות ניסויים, ושיפור של מעל פי 6 בקרב תלמידים בני מיעוטים. בתום תקופת הניסוי, הפיקוח אימץ את התכנית כדרישה בלימודי מדעים לכיתות ח' והיא יושמה על-ידי למעלה מ- 80% מהמורים. לפרטים נוספים, ראו (Mehalik, Doppelt, & Schunn, 2008).

נספח ב'

בתכן חינוכי, כמו בכל תכן אחר, קיים פיתוי רב "לקחת את פטיש ביד ולהתחיל לתקן", במקום לבנות מוצר חדש מההתחלה. קיים גם הפיתוי הנגדי, והוא לפתח דבר מאפס ולו רק עבור החדשנות שבכך - מתכננים הם אנשים יצירתיים ובעלי צורך חזק בחידושים, ולעיתים יקל "למכור" משהו בעל מראית-עין של חדשנות. הסתמכות על נסיון וחקר דרכים חדשות עשויים - שניהם - להוות דרכי פיתוח ראויות. אך, יהיה עדיף ליצור מספר חלופות בטרם פוסלים פיתוחים קיימים.

בתחילתו של תהליך תכן עבור פרויקט חינוכי כולל, בתחילתו של תכן תת-מערכת, או כשנעצרים מול מרכיב שאינו עובד, הדבר הראשון שעושה כל אחד מהצוותים הוא להעלות שתיים עד ארבע חלופות תכן, טרם שתעשה בחירה. לדוגמה, בפיתוח יחידות היצף לכיתות פיזיקה תיכונית ללימוד חוקי התנועה של ניוטון, השקענו רבע מהזמן בחקירת מוקדי פעילות אפשריים:

1. יחידת שיגור שפיתחנו שנה קודם, והנבנית בעזרת צינורות PVC וקפיצים.
2. מערכת הרמה קיימת שפיתחנו מספר שנים קודם, והנבנית מלגו®.
3. זרוע רובוטית שאחד המורים המפתחים פיתח קודם, תוך שימוש בצינורות PVC.
4. טרבושה (מנוע-מצור ימי-ביינמי) שמורה אחר פיתח קודם.
5. יחידת לכידה של ביצה נופלת עליה ביצענו סיעור מוחות של פגישה אחת.



Figure B1: *Launcher unit*



Figure B2: *Lift system unit*

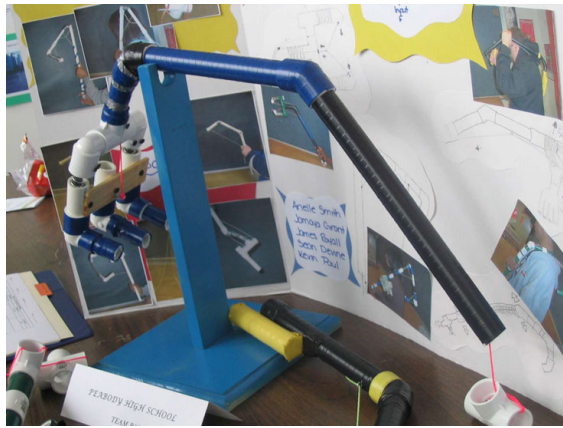


Figure B3: Artificial arm unit

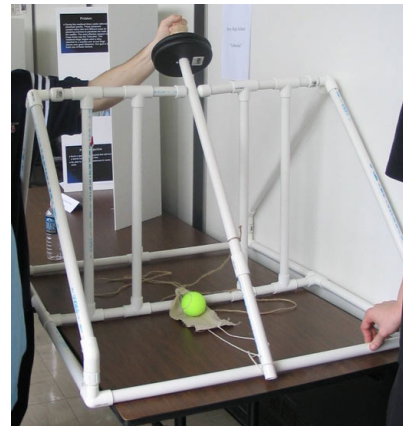


Figure B4: Trebuchet unit

חלק מהרעיונות היו בעייתיים מבחינת בטיחותם. חלק הדגישו בעצמה את הרעיונות הפיזיקליים שנלמדו, אך לא דרבנו את התלמידים להשתתף בתכנון, בייחוד בהתחשב באילוף המחיר. חלק מהרעיונות העבירו לתלמידים מושגים פיזיקליים שגויים - אמנם כל נושא עירב תחום רעיונות פיסיקליים רחב, אך לרוב נדרש סט מצומצם של מושגים פיזיקליים להצלחה במשימת התכן. לבסוף, בחרנו בזרוע הרובוטית כמספקת את רוב הדרישות ביעילות המירבית. ההערכה לא התבססה על בדיקות רחבות היקף של אבי-טיפוס של כל יחידה, אלא על שיפוטם של חברי צוות הפיתוח, המבוססת על התנסות קודמת עם הרעיונות, דיווח על פרטי היחידות, וכן ניסויים פיזיקליים מוגבלים. במילים אחרות, היה ראציונאל לתהליך הבחירה, אך לא נדרשו אמצעים ניכרים ליישמו.

ביצוע הערכה שיטתית של החלופות מול הדרישות המפורטות שניסחנו אפשרה הסכמה רחבה על הגישה המתאימה. בנוסף, השתמשנו ברעיונות חזקים מיחידות אחרות - לדוגמה, בחירת חמרים וביצוע מדידות.

נספח ג'

הטבלה הבאה מייצגת את תת-המערכות ביחידת האזעקה לתלמידי כיתה ח' (Mehalik et al., 2008). נאלצנו לבנות מערכת שלמה שכללה התנסות וחמרי לימוד, פעילויות וסדר הפעלתן, הכשרה מקצועית למורים, ומערכת ברת-קיימא לאימון וחמרים. במקום לשקול חלקים מבודדים, חשבנו על התפקוד הכולל של המערכת, ועל פתרונות הנדרשים להוות חלק מן המערכת. תצפיות כיתתיות וניתוח צילומי ווידאו שימשו כדי לבחון האם כל רכיב יושם כך ששיג את ייעודו. כך, למשל, ראינו בשלב מוקדם כי מצגות של צוותים לכלל הכיתה לא הועילו להערכה ומשוב, כפי שהתכוונו. בסדנאות מאוחרות יותר למורים שינינו את הדרך בה נוהלו והוערכו מצגות אלה. הפעלנו הליכי ניפוי שגיאות דומים בכל רכיב ורכיב.

Student	Knowledge introduction	Students generate hypotheses for observed phenomena in groups and then share these ideas in full-class discussion; teachers add/elicite missing key ideas if necessary.
	Assessment/feedback	Students get primary feedback through reflective testing of ideas in embedded science and design activities in the unit. Students also get feedback from other student teams and the teacher via regular presentations to the whole class of team progress.
	Practice	Warm-up exercises at the beginning of class refresh ideas from prior classes. Students apply ideas learned through systematic testing to improve their initial design ideas.

Teacher in the class	Student monitoring	Teachers must walk from team to team during their hands on work to monitor student progress. Teachers must elicit ideas from multiple groups in whole class discussions.
	Student guidance	Teachers should provide small suggestions or hints during teamwork activities, but not directly provide the answer. Via whole class discussion, teachers must make sure that target understandings of each curricular unit emerge as the final word at the end of that curricular unit.
Teacher out of the class	Teacher learning	4-hour teacher workshops every two weeks were used to provide just-in-time exposure to unit materials and pedagogical strategies. Teachers were encouraged to share adaptations and reflections on the successes/failures of these adaptations in each workshop.
	Lesson planning	Teacher materials included focal goals of each lesson along with space to be filled-out by the teacher prior to the lesson with detailed plans for the lesson.
Teacher support	Materials refurbishment	Detailed plans were provided to the school district central office regarding what materials were likely to require annual refurbishment along with cost-effective supplier information. In the Alarm unit, the primary refurbishment concern (other than new printed teacher and team worksheets) was new 1.5v batteries.
	Teacher learning	Teachers who emerged as strong implementers and good communicators with other teachers at the teacher workshop were identified to the school district. These teachers were then provided with professional development workshop materials (e.g., powerpoint slides) such that they could guide the professional development workshops (with central office support) with later cohorts of teachers.

נספח ד'

מקרה אחד הפיק תועלת מרובה משיקולי גומלין מפורטים. פרוייקט זה עסק בפיתוח חמרי לימוד מקוונים להתנהגות אקולוגית וברת-קיימא במבנה אקולוגי חדש לבין-חולים. מערכת בית-החולים שאפה להעביר את סגל והחולים הכשרה רחבה כדי להפיק תועלת מירבית מיזמת בר-הקיימות (?) וכדי לייצר הד חיובי בעיתונות עבור בית - החולים, וסיפקה רשימה ארוכה מאד של דרישות לכך. הוחלט כי מענה מלא לדרישות אלה אינו מעשי:

1. הייתה סבירות נמוכה כי אדם יילמד את מלוא התכנים שברשימה, או שיטמיע אותם, בייחוד במסגרת הזמן שהוקצבה;
2. חלק מהפעולות שנדרשו הלומדים לבצע היו בספק האם הן בכלל תורמות לשימור הסביבה;
3. חלק מן הפעולות לא ערבו את רוב האנשים שהיו מיועדים לעבור את ההדרכה.

אולם, הייתה מערכת אילוצים מורכבת שהסבירה מדוע כל פריט היה חייב להכלל בהדרכה (יזמות הנהלה בכירה שזכו לחשיפה גבוהה, ציפיות של חברי סגל, וכו'). לכן, בנינו טבלאות החלטה כדי לצמצם את הרשימה לגודל סביר. המימדים בהם השתמשנו מפורטים להלן:

Level of impact	Corporate priority	0=low or none 1=medium 2=high
	Percent of operating budget	1=0% - 30% 2=31% - 60% 3=61% - 100%
	Potential for cost savings	0=neutral 1=long payback 2=short payback
	Users decision-making control	0=no choice 1=choices affect building performance
Users	Does this action affect clinical staff?	0=no 1=yes
Transferability	Is this action / behavior easily transferred outside of building?	0=no 1=yes
Education	Information availability	0=nothing to teach 1=general "green" concepts 2=existing instruction on corporate policies and procedures
	Training already provided?	0=yes 1=no

אספנו מידע על כל אחת מהיזמות הראשיות בכל אחד מהמימדים. לחישוב הציון הכולל, שקלנו 5 שיקלולים שונים, המייצגים את החשיבות היחסית של כל אחד מבעלי העניין: שקלול שווה, שקלול כפול לאימון, היפוך הערך היחסי של תועלות לטווח קצר וארוך, והסרת ההעברתיות. אספנו את אותם פריטים שדורגו בשלוש רמות הדרוג הגבוהות, בכל אחד מן השקלולים. הגענו לעקיבות גבוהה לרוב דרכי השקלול השונות, אך בזכות החישוב המפורט הבטחנו כי כל אחד מבעלי העניין זכה להערכה של עמדתו.

נספח ה'

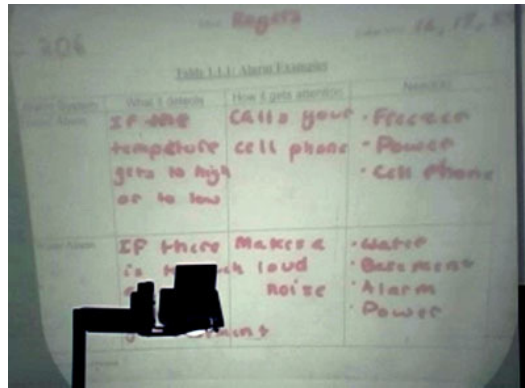
נבחן מקרה של פיתוח הערכת בייניים על מערכת האזעקה שהראנו קודם. מאפיין טיפוסי של תכני-לימוד מדעיים הוא כי ההערכה מתבצעת בסוף יחידת הלימוד בעזרת דף ועט, לרוב במבחנים מרובי ברירה ושאלות הדורשות תשובה קצרה בלבד. במקום להמשיך נוהל זה, העדפנו לקחת צעד לאחור ושאלנו את רצף השאלות הבא:

1. מהי המטרות שהערכה מסכמת ממלאת?
2. אילו חלופות יש בחמרים אינסטרומנטליים אחרים ממלאים את אותן מטרות?
3. אילו אפשרויות אחרות היינו מדמיינים כדי למלא מטרות אלה?

התשובות שפיתחנו לשאלות אלה הן:

1. הנחיית מורים לבצע הדרכה מאוחרת ויידוע מווסת-עצמית;
2. הערכת פוטפוליו (תיק העבודות) והערכה הדדית;
3. מצגות כיתתיות.

לבסוף, החלטנו כי מצגות כיתתיות הן מיידיות יותר ומספקות הדרכה פעילה למורים ולתלמידים בהשוואה למבחנים מקובלים. יכולנו גם ליישם מסגרת פונקציונלית זו גם בסדנאות הכשרת המורים כדי לשכנעם שאין זה נחוץ להשתמש בהערכה שגרתית בפרק זה של יחידת הלימוד.



איור ה'-1: דוגמא לתוצר שתלמידים הציגו עבור ניתוח התהליך ביחס למטרות הלמידה

רשימת מקורות

- Altshuller, G. (1973). *Innovation Algorithm*. Worcester, MA: Technical Innovation Center.
- Anderson, J. R., Lebiere, C., & Lovett, M. (1998). Performance. In Anderson, J. R. & Lebiere, C. (Eds.), *Atomic Components of Thought*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Biederman, I., & Shiffrar, M. M. (1987). Sexing day-old chicks: A case study and expert systems analysis of a difficult perceptual-learning task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 13(4), 640-645.
- Bradshaw, G. L. (in press). Heuristics and strategies of invention: Lessons from the invention of the airplane. *Cognitive Science*.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218.
- Christensen, B. T., & Schunn, C. D. (2005). Spontaneous access and analogical incubation effects. *Creativity Research Journal*, 17(2), 207-220.
- Christensen, B. T., & Schunn, C. D. (2007). The relationship of analogical distance to analogical function and pre-inventive structure: The case of engineering design. *Memory & Cognition*, 35(1), 29-38.
- Christensen, B. T., & Schunn, C. D. (2008). The role and impact of mental simulation in design. *Applied Cognitive Psychology*.
- Dahl, D. W., & Moreau, P. (2002). The influence and value of analogical thinking during new product ideation. *Journal of Marketing Research*, 39, 47-60.
- Davis, E. A., & Krajcik, J. S. (2005). Designing Educative Curriculum Materials to Promote Teacher Learning. *Educational Researcher*, 34(3), 3-14.

MoreTech 6, 2011

Design. (2008). Meriam-Webster Online Dictionary (Vol. 2008).

Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance: Its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49(8), 725-747.

Garet, M. S., Porter, A. C., Desimone, L. M., Birman, B. F., & Yoon, K. S. (2001). What makes professional development effective? Results from a national sample of teachers. *American Educational Research Journal*, 38(4), 915-945.

Hayes, J. R. (1985). Three problems in teaching general skills. In Chipman, S., Segal, J. W. & Glaser, R. (Eds.), *Thinking and learning skills*, Vol. 2 (pp. 391-406). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15, 332-340.

Hughes, T. P. (1987). The evolution of large technological systems. In Bijker, W. E., Hughes, T. P. & Pinch, T. J. (Eds.), *The social construction of technological systems*. Cambridge, MA: MIT Press.

Jansson, D. G., & Smith, S. M. (1991). Design fixation. *Design Studies*, 12, 3-11.

Kaplan, C. A., & Simon, H. A. (1990). In search of insight. *Cognitive Psychology*, 22, 374-419.

Keil, F. C. (2003). Folkscience: Coarse interpretations of a complex reality. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 368-373.

Linsey, J. S., Laux, J., Clauss, E. F., Wood, K., & Markman, A. (2007). Increasing Innovation: A Trilogy of Experiments towards a Design-By-Analogy Methodology. Paper presented at the ASME Design Theory and Methodology Conference, Las Vegas, NV.

Loewenstein, J., Thompson, L., & Gentner, D. (2003). Analogical learning in negotiation teams: Comparing cases promotes learning and transfer. *Academy of Management Learning and Education*, 2(2), 119-127.

Lovett, M. C., & Schunn, C. D. (1999). Task representations, strategy variability and base-rate neglect. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128(2), 107-130.

Mehalik, M. M., Doppelt, Y., & 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.

Mehalik, M. M., & Schunn, C. D. (2006). What constitutes good design? A review of empirical studies of the design process. *International Journal of Engineering Education*, 22(3), 519-532.

Nieveen, N. (1999). Prototyping to reach product quality. In Akker, J. v. d., Branch, R. M., Gustafson, K., Nieveen, N. & Plomp, T. (Eds.), *Design Approaches and Tools in Education and Training*: Kluwer Academic Publishers.

MoreTech 6, 2011

- Otto, K. N., & Wood, K. L. (2001). *Product Design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Paulus, P. B., & Yang, H.-C. (2000). Idea generation in groups: A basis for creativity in organizations. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 82(1), 76-87.
- Perkins, D. N. (1994). Creativity: Beyond the Darwinian paradigm. In Boden, M. A. (Ed.), *Dimensions of creativity*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Porter, A. C., Garet, M. S., Desimone, L. M., & Birman, B. F. (2003). Providing effective professional development: Lessons from the Eisenhower Program. *Science Educator*, 12(1), 23–40.
- Silk, E., & Schunn, C.D. (2008). Core Concepts in Engineering as a Basis for Understanding and Improving K-12 Engineering Education in the United States. Unpublished manuscript.
- Simonton, D. K. (1997). Creative productivity: A predictive and explanatory model of career trajectories and landmarks. *Psychological Review*, 104, 66-89.
- Smith, S. M., Ward, T. B., & Schumacher, J. S. (1993). Constraining effects of examples in a creative generations task. *Memory and Cognition*, 21, 837-845.
- Tseng, I., Moss, J., Cagan, J., & Kotovsky, K. (2008). The role of timing and analogical similarity in the stimulation of idea generation in design. *Design Studies*, 29, 203-221.
- Ullman, D. G. (2003). *The mechanical design process* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2008). *Product design and development* (4th ed.). New York: McGraw Hill.
- Vogel, C. M., Cagan, J., & Boatwright, P. (2005). *The design of things to come*. Upper Saddle River, NJ: Wharton School Publishing.
- Wiggins, G. P., & McTighe, J. (2005). *Understanding by Design* (2nd ed.): Association for Supervision & Curriculum Development.

About the author

Christian Schunn is a Research Scientist at the Learning Research and Development Center, and also an Associate Professor of Psychology, Learning Sciences and Policy, and Intelligent Systems at the University of Pittsburgh. His current research focuses on understanding complex forms of expertise, building models of authentic practice in science and engineering, and applying those models to improve K-20 science education.

He co-directs five educational reform projects: robotics units designed to teach mathematics; systematic efforts to reform science education materials via cognitive science principles; intelligent training systems using neuroscience data; a set of design-based learning replacement units for high school biology, chemistry, and physics; and a web-based peer-review of writing tool called SWoRD that is used in a wide number of undergraduate and post-graduate course settings.

He received his PhD in Psychology from Carnegie Mellon University in 1995.