

מכטרוניקה וכישורים מטה-קוגניטיביים

פורסם לראשונה בספר הכנס 20 PATT, תורגם מאנגלית על ידי: דוד מדר

האות האנגלית I. הקו האופקי התחתון של האות מסמל את הבסיס המוקנה במסגרת לימודים בבית ספר תיכון. במסגרת זו מפתחים התלמידים כישורים מטה-קוגניטיביים. הקו האנכי באות I מסמל את ליבת הלימודים האקדמיים, ובכללם לימודים באחד מתחומי ההנדסה. הקו האופקי העליון באות I מסמל את ההרחבה המכטרונית הבין-תחומית.

1. הגדרת המושג מכטרוניקה

ההגדרה הרשמית של מכטרוניקה שאימצה הוועדה המייעצת למחקר ולפיתוח תעשייתיים של הקהילה האירופית, ואשר גובשה על ידי ריצ'רד קומרפורד (Comerford), קובעת כי: "מכטרוניקה היא שילוב סינרגטי של הנדסת מכונות, בקרה אלקטרונית וחשיבה מערכתית, בתכנון מוצרים ובתהליכי ייצור" [1]. הגדרת נוספת של המכטרוניקה [2] אינה כוללת רק את השילוב הסינרגטי של תחומי המכטרוניקה השונים, אלא כפי שכתב ג'ון מילבנק, [3] היא כוללת חשיבה מערכתית: "מעצם הגדרתה, המכטרוניקה איננה נושא, מדע או טכנולוגיה. יש לראות בה פילוסופיה, דרך יסודית להתבונן בדברים ולעשות אותם, ולנוכח מהותה, נדרשת גישה מאוחדת כדי להנחילה לאחרים".

מערכות מכטרוניות משלבות בתוכן חלקים מכניים עם רכיבים אלקטרוניים, והבקרה שלהן נעשית באמצעות מחשב. מסיבה זו בדרך כלל הן מפותחות ומתוחזקות בידי אנשי מקצוע שעברו הכשרה בין-תחומית.

2. מהי מטה-קוגניציה

הגדרה לא רשמית של מטה-קוגניציה היא "חשיבה על המחשבות של עצמך". במאמר זה נדון בשלושה היבטים של מטה-קוגניציה [4]. היבט ראשון עוסק בידע מוקדם של האדם על תהליך החשיבה שלו ומשאביו המנטליים שבעזרתם הוא יכול למצוא פתרון לבעיה נתונה. היבט שני מתמקד בשליטה עצמית ובוויסות עצמי שיש לאדם על תהליך החשיבה שלו בשעה שהוא פותר בעיה. ההיבט השלישי סמוי יותר, שכן הוא עוסק באמונות ובאינטואיציות של האדם, בנוגע לפתרון הבעיה.

ד"ר אורי בן-חנן

המחלקה להנדסת מכונות, המכללה האקדמית להנדסה אורט
בראודה, כרמיאל, ישראל

עוזד רייכספלד

המחלקה להנדסת מכונות, המכללה האקדמית להנדסה אורט
בראודה, כרמיאל, ישראל

תקציר

מאמר זה מציג מודל חדש ללימוד מכטרוניקה השם דגש על שיפור כישורים מטה-קוגניטיביים. על פי מודל זה, התלמידים ישכללו את יכולתם המטה-קוגניטיבית כבר בבית ספר תיכון. שם הם ייחשפו לתחום המכטרוניקה וירכשו כלים הנדסיים בסיסיים, כמו הנדסה הפוכה ותהליך התיכון. בעזרת ההנדסה ההפוכה יקבלו התלמידים מושג על הדרך שבה מתוכננים מוצרי היי-טק ומוצרים יום-יומיים. הם יבחנו את הנימוקים ואת שיקולי הדעת שהיו למהנדסים שתכננו את המוצר. כלי נוסף שבעזרתו יוכלו לשפר את כישוריהם המטה-קוגניטיביים הוא תהליך התיכון. תהליך התיכון מתמקד בפתרון בעיות לצורך יצירת מוצר טכנולוגי. תהליך זה דורש כישורים מטה-קוגניטיביים רבים כגון: הבנת הבעיה, כתיבת מפרטים, חיפוש אחר פתרונות חלופיים ובחירת הטוב מביניהם. לאחר שהתלמידים יקבעו מהי המערכת הטובה ביותר, הם יבנו אותה בעזרת הכלים הטכניים שברשותם, לדוגמה אבני לגו ובקר זעיר של לגו.

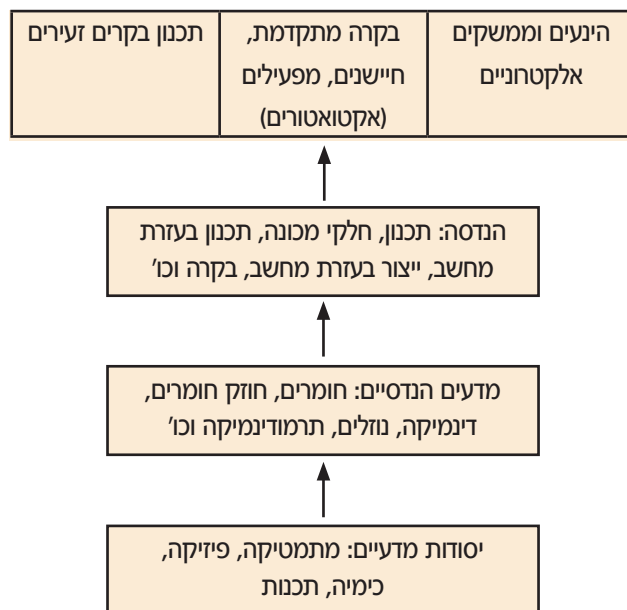
מטה-קוגניציה היא יכולת האדם להבין את תהליך החשיבה שלו ולבקר אותו. הערכת תהליך החשיבה דומה להתפתחותו של תהליך התיכון. שניהם מבוססים על מודעות האדם לאופי הבעיות ולמשאבים הנדרשים כדי לפתור אותן. כאשר אדם מחפש אחר הפתרונות הטובים ביותר לבעיה שאינה מוגדרת בבירור, הוא מתבסס על הידע והניסיון הקודם שלו, ובה בעת נעזר באינטואיציה.

את המודל הפדגוגי המוצג במאמר זה אפשר להדגים בעזרת

את הפרויקט, בהתאם למבנה המתודולוגי של השלבים העיקריים המקובלים בפיתוח פרויקטים. על אף שהתלמיד נחשף לקשת עשירה ורחבה של נתונים הנדסיים, המטרה העיקרית של התכנית אינה להקנות לתלמיד שליטה בהם אלא להשתמש בהם כסביבת למידה גמישה, רחבה ומאתגרת כדי לשפר כישורים מטה-קוגניטיביים.

3.2 מכטרוניקה באקדמיה, מודל ה-"T"

בכמה מוסדות אקדמיים ועל-תיכוניים תכנית המכטרוניקה היא התמחות שמציעה המחלקה להנדסת מכונות [8]. לפיכך הסטודנטים חייבים לרכוש בשנות לימודיהם הראשונות את הידע הבסיסי הדרוש למהנדסי מכונות. רק בשלב מאוחר יותר של התכנית הסטודנטים מתמחים בשדה המכטרוניקה. תכנית לימודים זו מוצגת באיור 1, והיא מכונה מודל ה-"T".



איור 1. התמחות מכטרונית רגילה מוצגת כמודל "T"

בשנות לימודיהם הראשונות, הסטודנטים להנדסת מכונות רוכשים כישורים הנדסיים ומדעיים בסיסיים. בהמשך הם לומדים את קורסי הליבה של הנדסת מכונות, ובנוסף קורסים בהנדסת אלקטרוניקה ובמדעי המחשב. אפשר לתאר את המבנה של תכניות המכטרוניקה הללו בעזרת צורת האות "T". הקו הניצב מייצג את השרשרת הארוכה של קורסים קלאסיים בנושאים הנדסיים, כמו שרשרת הקורסים בהנדסת מכונות שתוארה באיור. החלק האופקי העליון של האות "T" מייצג את תהליך ההרחבה של מערך הקורסים, והוא כולל קורסים שמציעים מחלקות אחרות אשר דרכם נחשפים

3. תכנית הלימודים במכטרוניקה

הצורך ההולך וגדל במהנדסים ובצוות טכני בעל הכשרה בין-תחומית רחבה הביא לפיתוח תכניות לימודים במכטרוניקה, ברמות שונות של חינוך והכשרה. תכניות במכטרוניקה נלמדות בעיקר במוסדות חינוך ותעשייה על-תיכוניים. ישראל היא בין המדינות היחידות שבהן נלמדת תכנית מכטרוניקה כבר ברמה התיכונית.

תחום המכטרוניקה, מנקודת מבט דידיקטית, מתואר ומנותח ב-[2,5]. מחברי המאמר דנו במודל התפתחותי שמסביר את המעבר של המכטרוניקה מהשקפה תחומית (דיסציפלינרית) להשקפה נושאית (תמטית). המניע שהוביל לשינוי זה מבוסס הן על תיאוריות למידה עכשוויות, כגון קונסטרוקטיביזם, והן על דרך פיתוח של מוצרים מכטרוניים. תיאוריית הלמידה הקונסטרוקטיביסטית מתאימה למסלול למידה של מהנדסי מכטרוניקה עתידיים כיוון שבדומה לבניית הידע בתודעת הלומד, אפשר לבנות בעולם האמיתי (construct) מערכות מכטרוניות רבות תוך שימוש בתת-מערכות, הנקראות "מוצרי מדף". הדגש העיקרי בפיתוח תת-מערכות אלו הוא על שילובן הפשוט עם מוצרי מדף נוספים. אחת ההשלכות הפדגוגיות של גישה הנדסית זו היא התמקדות בחינוך להבנה בין-תחומית, שמובילה לשילוב טוב יותר בין תת-מערכות המוכנות השונות. מטרה זו מושגת בצוותים שבהם כל אחד מחברי הצוות מייצג תחום ידע אחר. מכטרוניקה היא לא "קצת מכל דבר". חייבים ללמד אותה בגישה מוכוונת-מערכת, שבה ייחשפו התלמידים לפרויקטים ויעבדו בצוותים, לצד רכישת הרקע התיאורטי הדרוש.

3.1 מכטרוניקה כבתי ספר תיכוניים

תלמידים המשתתפים בתכנית המכטרוניקה לבתי ספר תיכוניים הם תלמידים בעלי הישגים גבוהים הלומדים מקצועות מדעיים ומתמטיקה ברמה גבוהה, 4 ו-5 יחידות. תכנית המכטרוניקה נמשכת שלוש שנים, מכיתה י' עד י"ב. במהלך תקופה זו התלמידים לומדים מכניקה, אלקטרוניקה ויסודות של מדעי המחשב. הם מתמקדים בשאלה כיצד לשלב את הידע לבניית מערכת סינרגטית. החלק התיאורטי מוצג בעזרת מודל של מערכת מכטרונית. מודל זה שם דגש על הדרכים שבהן מידע, אנרגיה וחומר מועברים בין תת-מערכות שיוצרות את המערכת המכטרונית. לצד החלק התיאורטי, רוכשים התלמידים ניסיון וידע בשדה המכטרוניקה באמצעות עבודה על פרויקטים (Project Based Learning). הפרויקטים דורשים מהתלמידים לתכנן, לבנות, להריץ ולהציג מערכת המורכבת מתת-מערכות מכניות וממתקנים אלקטרוניים המבוקרת על ידי מחשב. במקרים רבים, המודלים נבנים בעזרת לבנים ומפעילים של לגו המופעלים ומבוקרים בעזרת ממשקי המחשב של לגו. הלמידה מתבצעת בקבוצות של שלושה או ארבעה תלמידים המפתחים

4.1 תהליך התיכון

בתהליך התיכון [14], תלמידי התיכון מתכננים מערכת מכטרונית שפותרת בעיה אותנטית שמקורה בחיי היום-יום שלהם. פרויקטי התכנון הללו מאלצים כל תלמיד להשתתף באופן פעיל בדיונים ובוויכוחים שמתעוררים, בשעה שהם מגדירים את הבעיה שבכוונתם לפתור. התלמידים פועלים כקבוצה של פרטים. הם אוספים נתונים רלוונטיים מתוך מגוון מקורות. כחלק מתהליך איסוף המידע, מעודדים את התלמידים לצאת מן הכיתה אל העולם האמיתי ולפגוש את האנשים שעשויים להשתמש בעתיד במערכת שיתכננו. הכישורים המטה-קוגניטיביים הנדרשים במהלך חלק זה של תהליך התיכון הם: הכרה ביכולת לפתור את הבעיה, מציאת כלים לפתרון הבעיה, רכישת הידע הנדרש ותכנון לוח זמנים לעבודה.

לאחר איסוף הנתונים, התלמידים מתחילים להעריך את הרלוונטיות, את הרמה ואת החיוניות של הנתונים. על בסיס מבנה ידע שהם יצרו זה עתה כפרטים וכקבוצה, הם פונים למימוש המערכת המושגית שלהם בעזרת מערכות מודולריות כגון לגו. בשלב המימוש, הקונסטרוקטיביזם הוא גם קוגניטיבי-פנימי וגם מוחשי-חיצוני. מודל הלגו שהתלמידים בונים בעולם המוחשי-חיצוני מייצג בסיס ידע קוגניטיבי-פנימי שנבנה במוחם. תהליך הבנייה החיצוני והפנימי הוא ספירלי, כיוון שדרך החשיבה של התלמידים משפיעה על הדרך שהמודל נבנה, והמודל מניע את התלמידים להעריך מחדש את הנחותיהם הקודמות, ולשנות את בסיס הידע שלהם בהתאם. השימוש באבני לגו, שקל לפרק אותן וקל להרכיב מהן מבנה חדש ושונה בלי שהתלמידים יצטרכו לשלם שום "קנס" או מחיר נוסף, מאפשר להם לבחון ולאשש את הנחותיהם בו במקום, בלי לצאת מן הכיתה. מערכת הלגו נותנת לתלמידים משוב בזמן אמת, וכך עוזרת להם בתהליך הממושך של התפתחות המוצר.

מערכת הלגו כוללת, בנוסף לאבנים ה"חכמות" והרגילות גם מפעילים כמו: מנועים, נורות, זמזמים וחיישנים ידידותיים שאפשר לחבר בקלות לבקר זעיר הניתן לתכנות בעזרת מחשב אישי. בעזרת "אבני הבניין" האלה אפשר לתכנן, לבנות ולהריץ את המערכת כמערכת עצמאית או כמערכת הנשלטת באופן מקוון דרך המחשב.

המגבלות העיקריות של מערכת הלגו הן שהתלמידים אינם נחשפים לרכיבים מן העולם האמיתי כמו: חומרי בנייה שונים, ברגים, אומים וכדומה. השימוש ברכיבים מן העולם האמיתי יעשה את תהליך התיכון להרבה יותר ארוך ויקר, בשעה שאפשר לרכוש את העקרונות הבסיסיים של תכנון המערכת והפעלתה בדרך טובה גם בעזרת מערכת לגו.

השלמת תהליך התיכון ותהליך הבנייה בזמן, לאחר שנוסו כמה פתרונות ובלי להיצמד לרעיון יחיד, תורמת לפיתוח הכישורים המטה-קוגניטיביים של התלמיד.

הסטודנטים לשדות נוספים של ידע הנדסי הקשור למכטרוניקה. סטודנטים הלומדים לפי מודל "T" חווים לעתים קרובות קשיים בשלבים המוקדמים של הכשרתם [9]. הם נדרשים לבנות את בסיס הידע המכטרוני שלהם בעצמם, תוך חיבור של פיסות מידע דיסציפלינרי בידך שהם מקבלים בהרצאות השונות. בחלק מהמוסדות האקדמיים נלמדים קורסי מבוא אקדמיים שמטרתם לעזור לתלמידי השנה הראשונה להתגבר על משוכה זו [1]. קורסים אלו עוזרים לסטודנטים לבנות מבנה סכמתי של ידע דיסציפלינרי בעזרת מונחים איכותניים כלליים. המשימה של המבנה האיכותני היא לספק מסגרת מושגית שתאפשר לסטודנטים לקשר יחדות נתונים חדשות לבסיס נתונים הוליסטי ומובנה היטב.

4. קונסטרוקטיביזם ומכטרוניקה

קונסטרוקטיביזם היא תיאוריית למידה מקובלת המציעה הסבר לשאלה עתיקת יומין: כיצד אנחנו לומדים? שורשי התיאוריה הקונסטרוקטיביסטית קשורים לעבודות הקלסיות שעשו ז'אן פיאז'ה, לב ויגוצקי ואחרים [10, 11, 12]. על פי תיאוריות אלו, מנקודת מבט של תלמיד, הלמידה היא תהליך פעיל וחברתי בעת ובעונה אחת. התיאוריות הקונסטרוקטיביסטיות מניחות שהתלמידים מגיעים לכיתה עם בסיס ידע אינהרנטי ואותנטי שנרכש לפני כן. בתהליך הלמידה, התלמידים מחברים פיסות של מידע חדש שהם קולטים למבנה הידע שכבר קיים בתודעתם. במילים אחרות, כל תלמיד נכנס לכיתה עם מבנה ידע אישי ושונה. במהלך הלמידה הוא מחבר אליו חלק מהידע שהוא רוכש בשיעור. כאשר התלמידים עוזבים את הכיתה, כל אחד מהם עדיין את בסיס הידע הפרטי שלו בעזרת "אבני" המידע החדשות שאליהן נחשף. לכן, בסיס הידע המעודכן שיש לתלמיד בסוף השיעור הוא ייחודי לו ושונה מתלמיד לתלמיד.

מנקודת מבט של מורה בכיתה קונסטרוקטיביסטית, המורה אינו ממלא את התפקיד הקלאסי של סמכות הידע הבלעדית שאין עליה עוררין. במקום זאת, הוא משמש כעין מורה דרך או מדריך, שמשפך לתלמידים סביבה מטפחת שבה הם יכולים לפעול וללמוד בחופשיות.

התיאוריה הקונסטרוקטיביסטית יכולה להסביר את נקודת התורפה של מודל ה-"T" בכך שהוא מבוסס על פרדיגמת למידה שמתעלמת מהידע הקודם של התלמיד, ומניחה שהוא מגיע לכיתה כ"לוח חלק" ("טבולה רסה"). בנוסף, התיאוריה הקונסטרוקטיביסטית מסבירה מדוע קורסי המבוא שניתנו לתלמידי השנה הראשונה מסייעים להם ליצור את מבנה הידע שישמש בסיס מוצק לאבני הבניין של הקו הניצב ב-"T".

תכנית לימודי המכטרוניקה לבתי ספר תיכוניים נבנתה על בסיס ההשקפה של האסכולה הקונסטרוקטיביסטית. מחברי מאמר זה מציעים שתי אסטרטגיות ליצירת בסיס ידע מכטרוני איכותני מוצק.

הספר התיכון. כמו כן, הניסיון שנצבר בהפעלת התכנית במשך שש שנים מלמד שלימוד מכטרוניקה בבתי הספר התיכוניים מעודד בנות ללמוד תחומים הנחשבים "גבריים" יותר, כגון הנדסת מכונות והנדסת חשמל.

5. מודל ה-"I"

שילוב תכנית המכטרוניקה התיכונית עם תכניות אקדמיות על-תיכוניות ייצור תהליך הכשרה חינוכי ממושך יותר. לתהליך הארוך שני יתרונות:

היתרון הראשון הוא שתכנית כזו תעודד תלמידים, ובעיקר תלמידות לראות בהנדסת מכונות תחום לימוד מעניין ומאתגר. בשביל תלמידים אלו הנדסת מכונות תהיה חלק מחיי היום-יום ולא תצטמצם לתעשייה ולמפעלים. כמו כן, הם ידעו שכמהנדסים לעתיד יוכלו ליצור מוצרים חדשים ולהשפיע על העולם שאנו חיים בו.

היתרון השני הוא שבוגרי מגמת מכטרוניקה בבית הספר התיכון לא ילמדו על פי מודל ה-"T" הקיים, כיוון שהם יחליפו אותו במודל למידה חדש, מודל ה-"I". על פי מודל ה-"I", החלק האנכי המייצג את קורסי היסוד שיילמדו במוסדות על-תיכוניים, ייבנה על בסיס הידע שנוצר בבית הספר התיכון.

בסיס הידע האיכותני הרחב והיציב שירכשו עם סיום הלימודים בתיכון יאפשר להם להטמיע יותר מידע ובקצב גבוה יותר, כסטודנטים בראשית דרכם. זאת, כיוון שהם כבר למדו באופן אישי כיצד לעשות זאת. תלמידים אלו ידעו כיצד לקשר יחידות מידע חדשות לבסיס הידע הקיים שלהם, כמתואר במודל המוצע באיור 2.

הנדסת חשמל	הנדסת מכונות מתקדמת	מדעי המחשב
	תכנון הנדסי	
	מדעי ההנדסה	
	יסודות מדעיים	

תהליך תיכון ותהליך הנדסה הפוכה בבית ספר תיכון

איור 2. ההתמחות המכטרונית המוצעת מיוצגת כמודל "I"

4.2 תהליך ההנדסה הפוכה

תהליך ההנדסה הפוכה [6, 13] הוא תהליך גילוי העקרונות הטכנולוגיים של מתקן, של חפץ או של מערכת, על ידי ניתוח מבנהו, תפקידיו ופעולתו. בתהליך ההנדסה הפוכה משיגים אותן מטרות מטה-קוגניטיביות קונסטרוקטיביסטיות שהושגו בעזרת תהליך התכן בדרך הפוכה לכאורה. במקום לתכנן מערכת, התלמידים מפרקים מוצר מכטרוני שהם משתמשים בו בחיי היום-יום, כגון: סורק, מדפסת וכדומה.

כדי לתמוך בתהליך אפשר להציע לתלמידים אוסף של שאלות מנחות שיעזרו להם לגלות היבטים חדשים של המוצר. כל שאלה צריכה להיות מלווה בדוגמה המבוססת על מכשיר מוכר, כמו למשל סורק שולחני. השאלות המלוות את תהליך ההנדסה הפוכה מנחות את התלמידים לאסוף נתונים על המוצר ועל מי שייצר אותו. לדוגמה, הם מתבקשים למצוא מה היו השיקולים והאילוצים שהכתיבו את התפתחות המוצר; לתאר את קהל היעד של המוצר; לנתח את הפעולות העיקריות והמשניות שמבצעות תת-המערכות של המוצר; לחקור ולהסביר את העקרונות המדעיים המיושמים בפעולת המוצר. בתהליך הפדגוגי של הנדסה הפוכה המוצר משמש מקור לא-מילולי של נתונים, והתלמידים הם הבלשים שמנסים לרדת לנבכי תעלומתו. כמו כן, למידה דרך תהליך ההנדסה הפוכה מאפשרת לתלמידים להוסיף לבסיס הידע הקיים שלהם ידע ממגוון מקורות מידע. הם לומדים שמוצרים מצויים בתחרות מתמדת, בסביבת שוק תובענית מאוד המשתנה במהירות. דרישה זו מופיעה מחדש כמעט בכל מנגנון במערכת. במהלך הלימוד התלמידים מבינים שמאחורי כל פרט קטן במערכת עומדים רעיונות ושיקולים אנושיים. בסוף התהליך, התלמידים יראו את המוצרים שהם משתמשים בהם בחיי היום-יום באופן אחר.

4.3 היתרונות של תכנית המכטרוניקה

תהליך הלמידה הקונסטרוקטיביסטי שהתלמידים חווים בשיעורי המכטרוניקה משפר את כישוריהם המטה-קוגניטיביים, כגון: הערכה עצמית, חשיבה ביקורתית ויצירתיות. לימוד מכטרוניקה ברמת בית ספר תיכון עוזר לתלמידים לבנות בסיס ידע אישי מוצק בהנדסה ובמדעים. לבסיס זה יוכלו להוסיף את פיסות המידע החדשות בהנדסה ובמדע שבהן יפגשו בעתיד. בכל מקרה, תלמידים אלה במסגרת מסלול הלימודים העל-תיכוני שלהם לא יסבלו מטכנופוביה, כיוון שהפנימו את ההבנה שכמעט כל המערכות הן תוצר של חשיבה אנושית. תהליך בניית הידע שחוו יעודד אותם לחזור עליו בתחום שיבחרו לעסוק בו בעתיד. מחברי המאמר סבורים שבוגרי תיכון במגמת מכטרוניקה שימשיכו את לימודיהם בתחום ההנדסה, יקשרו בקלות את המידע שיקלטו במסגרת הרצאות אקדמיות לבסיס הידע שנוצר בתודעתם כבר בבית

להיות בסיס ידע רחב, שאליו יוכל כל אחד מהם לחבר נתונים חדשים שהוא קולט. זו הסיבה שמוסדות אקדמיים רבים מציעים כעת לתלמידי השנה הראשונה קורס מבוא שמטרתו לסייע להם לבנות את בסיס הידע הדרוש, כדי להבין את ההיגיון שמאחורי תכנית לימודי ההנדסה.

מחברי מאמר זה מציעים שתלמידים יבנו את בסיס הידע הנדרש כבר בבית ספר תיכון, היות שלתלמידי תיכון יש יכולת טובה יותר להטמיע ידע מדעי הנדסי איכותני. המחברים סבורים אמנם שבסיס זה ישרת את התלמידים בכל כיוון שיבחרו בעתיד, אבל הם מקווים שהוא יגביר את משיכתם למדעי ההנדסה והמכטרוניקה.

6. מסקנות

הצורך הגובר והולך במהנדסי מכטרוניקה ובצוות טכני מכטרוני בכל הרמות מחייב דרכים חדשות ללימוד נושאים טכנולוגיים ברמת בית ספר תיכון. אף על פי שמכטרוניקה היא התמחות של מחלקות להנדסת מכונות, מודל ההכשרה של מהנדסי המכטרוניקה, המיוצג על ידי האות "I" חייב להיות שונה ממודל הלימוד הקלסי של מהנדסי המכונות, המיוצג על ידי האות "T".

התיאוריה הקונסטרוקטיביסטית שנסקרה בקצרה במאמר זה מציעה קווי מתאר לבניית מודל ה-"I" הנחוץ להכשרת אנשי מכטרוניקה. על פי מודל זה לתלמידים בתחילת דרכם חייב

מקורות

1. Comerford, R., Sr., Editor. Mecha...what?, IEEE Spectrum, August 1994, p. 46.
2. Grimheden M., Hanson M., Mechatronics – The Evolution of an Academic Discipline in Engineering Education, Mechatronics, Volume 15, Issue 2, March 2005, pp 179-192.
3. Millbank, J. "Mecha-What", Mechatronics Forum Newsletter, No. 6, 1993.
4. Schoenfeld A, H, what's all the fuss about metacognition in "Cognitive science and mathematic education" LEA Hillsdale, New Jersey 1987
5. Grimheden M., Hanson M., What is Mechatronics? Proposing a Didactical Approach to Mechatronics, 1st Baltic Sea Workshop on Education in Mechatronics, Kiel, Germany, 2001.
6. Mohamad Saleh. Reverse Engineering: An Effective Approach to Studying Mechatronics at Undergraduate Tertiary Education. ICIT 2003–IEEE, 2003. Maribor. Slovenia. pp. 824-829.
7. Eder, W. E. Learning Design – Advantages for Procedures. 1995 ASEE Annual Conference Proceedings, Vol. 2. pp. 1775-1779.
8. Memis Acar, Mechatronics Challenge for the Higher Education World. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology—part c, vol. 20, no. 1, January 1997.
9. Nagchaudhuri A., Introduction to Mechatronics in Pre-college Programs and Freshman Design Courses in an Active and Cooperative Learning Framework, 31st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, October 2001, Reno, NV.
10. Piaget J., The Development of Thought: Equilibrium of Cognitive Structures. 1977, New York: Viking Press.
11. Farrell S., Hesketh R.P., Newell J.A. and Slater C.S., Introducing Freshmen to Reverse Engineering and Design through Investigation of the Brewing Process, Int. J. of Engineering Education, 2001, 17, 6, pp. 588-592.
12. Shunck D. H. Learning Theories: An Educational Perspective, 3rd Ed. 2000, pp. 241-244, Columbus, Ohio; Merrill.
13. Bruner, J. Celebrating Divergence: Piaget and Vygotsky. Human Development 40, 1997, pp.63-73.
14. Bigge, M. L. & Shermis, S. S., Learning Theories for Teachers 6th Ed., 1999, pp. 133-144. New York: Longman