



אילן גונן

תכנון הייצור ותזמונו במפעלים שמייצרים מיגוון רחב של מוצרים

המצב ברצפת הייצור, נוהה פיגורים בתהליכי הייצור, ובהתאם נבצע פעולות מתקנות. על-פניו נדמה, שאם סיכמנו עם לקוחותינו על מועדי אספקה סבירים, אזי נוכל להשביע את רצונם ולהפעיל בצורה מיטבית את משאבי הייצור. אלא שבפועל, תוצאותיו של תכנון זה הן: התארכות משך הייצור, דחיית מועדי אספקה, ניצול נמוך של משאבי המפעל, ורווחיות נמוכה.

תיאור משימת התכנון

סידור מנות ייצור "על-פי מועדי אספקה" הוא סידור אפשרי אחד מתוך סידורי מנות רבים. כמות הסידורים האפשרית להכנסת N מנות לקו ייצור היא $N!$ (סימול מתמטי: N!). לצורך ההמחשה, כמות האפשרויות לסידור 20 מנות ייצור היא בערך $2 \cdot 10^{18}$ (כ-2 מיליארד בריבוע).

לסידור מנות הייצור יש השפעה מהותית על משך הייצור הכולל, ואפשר לראות זאת בדוגמה הבאה: שני מוצרים A ו-B מיוצרים בשתי מכונות ייצור: M1 ו-M2. סדר הייצור הוא $M2 \leftarrow M1$ (קרי, תהליך העיבוד מתחיל במכונה M1 ונמשך במכונה M2). כדי לפשט את התכנון, נניח שאין דרישה לפעולות כינון (Setup), ושמועדי האספקה של המוצרים הם זהים.

הטבלה להלן מפרטת את כמויות המוצרים הדרושים ואת זמני העיבוד ליחידת מוצר (בדקות).

מוצר	כמות	M1	M2
A	5	20	10
B	5	10	20

הערה: המוצרים מסומנים בצבעים אדום וכחול בהתאמה

* עצרת היא מכפלת כל המספרים הטבעיים מ-1 ועד למספר נתון. קרי, $N! = 1 \times 2 \times \dots \times (N-2) \times (N-1) \times N$, ולדוגמה: "5 עצרת" היא מכפלת המספרים: $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 = 120$.

(המשך בעמ' 62)

לתכנון הייצור ולתזמונו במפעלים, שמייצרים מיגוון רחב של מוצרים (Planning & Scheduling Production, in Plants that Produce a Wide Variety of Products), יש השפעה ניכרת על רווחיות המפעל. לרוע המזל, הקשר בין התכנון ובין הרווחיות אינו מובן מאליו, ומנהלים במפעלים רבים מסתפקים בתכנון ייצור פשוט. לדעת המנהלים, התוצאות המתקבלות מכך: הררי מלאי בתהליך הייצור, זמני אספקה ארוכים ורווחיות נמוכה, נובעות מגורמים אובייקטיביים, שאין עליהם שליטה, כמו: לקוחות לוחצים, משאבים מוגבלים, וכו'.

מבוא

לתכנון הייצור יש מאפיינים ייחודיים, התלויים באופיו של המפעל. במאמר זה נתאר את תכנון קווי ייצור, המייצרים ו/או המרכיבים מוצרים רבים במנות ייצור קטנות. לכאורה, תכנון הייצור נראה פשוט: נזרים את המנות לייצור על-פי סדר כלשהו (כגון על-פי מועדי האספקה ללקוחות), מדי פעם נבדוק את





ERP.ORG.IL

מחשוב ותפעול הארגון

Improve your Organization's
Performance

הידע



המומחים



הפתרונות



Lean Manufacturing

WWW.ERP.ORG.IL

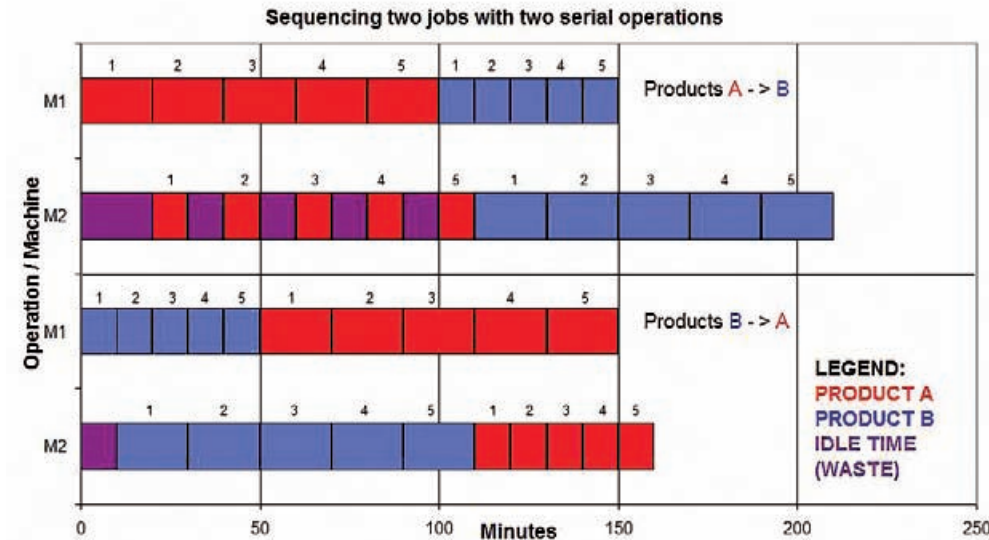
(המשך מעמ' 60)

תוצאתו של תזמון לא חכם תהיה משך עיבוד ארוך ויעילות נמוכה של קו הייצור. אלא שלרוע המזל, קשה להבחין מיד בהשלכותיו של תזמון שאינו יעיל. אמנם, בחלק מן המקרים אפשר לזהות "הררי מלאי בתהליך" ומועדי אספקה שהולכים ומתארכים. אולם, הנטייה המקובלת היא לראות זאת כהכרח, הנובע מן האילוצים ומן אופי הפעילות במפעל.

במקרה זה קיימות שתי אפשרויות ($2! = 1 \times 2 = 2$) לסדר את מנות הייצור:

1. תחילה נייצר את המוצר A ואחר-כך את המוצר B. ($B \leftarrow A$)
2. תחילה נייצר את המוצר B ואחר-כך את המוצר A. ($A \leftarrow B$)

תהליכי הייצור בשני המקרים מתוארים בתרשים גאנט^{**}, המוצג להלן:



חבילות באמצעות שליה. בדומה לעיל, גם במקרה זה, כמות האפשרויות לסידור N חבילות לצורך הפצתן היא N!

אפשר לראות, כי משך הייצור בסידור $B \leftarrow A$ הוא 210 דקות, וכי משך הייצור של הסידור $A \leftarrow B$ הוא 160 דקות. כלומר, משך הייצור על-פי הסידור $B \leftarrow A$ ארוך ב-31% ממשך הייצור על-פי הסידור $A \leftarrow B$.

נניח לצורך הדוגמה, שהשליח יחסוך את זמן תכנון החלוקה, והוא יפיץ את החבילות על-פי הסדר שהן מונחות אצלו. תרחיש אפשרי הוא, שהשליח ייסע לרמת אביב, כדי למסור את החבילה הראשונה, ימשיך לחולון וימסור את החבילה השנייה, משם הוא ימשיך לשיכון ל', יחזור לבת-ים וכך הלאה.

הסיבה לכך נעוצה בזמני ההמתנה (הקטעים בתרשים הצבועים בסגול), המבוזזים בתהליכי הייצור. המכונה M2 יכולה לעבד יחידות מוצר רק לאחר שהמכונה M1 סיימה לעבדן. בסידור $B \leftarrow A$, המכונה M2 נאלצת להמתין 60 דקות (20 דקות לקבלת היחידה הראשונה של המוצר A, ו-10 דקות נוספות לכל אחת מיחידות המוצר האחרות, או לחלופין, להמתין 60 דקות ואחר-כך לעבד ברצף את חמשת יחידות המוצר). מאידך, בסידור $A \leftarrow B$, המכונה M2 ממתנה 10 דקות בלבד לקבלת היחידה הראשונה של המוצר B ואחר-כך, היא מייצרת ברצף את היחידות האחרות.

ברור לנו, כי סידור ההפצה של השליח אינו יעיל, שכן הוא מאריך מאוד את משך זמן החלוקה ומקטין את כמות החבילות, שהשליח מסוגל לחלק ביום עבודה.

בסביבת ייצור אמיתית המצב מורכב יותר, היות שיש פרמטרים רבים, המשפיעים על משך הייצור, ולדוגמה:

בקו ייצור קשה לראות את ה"פריסה הגיאוגרפית" של תהליך העבודה, ולכן מנהלים רבים אינם מייחסים חשיבות הולמת לסידור מנות הייצור. סידור המנות המקובל הוא על-פי "ראשון נכנס - ראשון יוצא" (FIFO) (First In - First Out), או על-פי "מועד האספקה הקרוב" (EDD) (Earliest Due Date), וכך בלי משים, סידור העבודה מאריך את משך הייצור הכולל. נכון שבסידור המנות יש חשיבות רבה למועדי האספקה, אלא שאפשר לתכנן את הייצור כך, שגם נעמוד במועדי האספקה ושגם נקצר את משך הייצור הכולל.

- בדרך-כלל, קווי ייצור מכילים מרכזי עבודה רבים, ובכל אחד מהם יש מכונה אחת לפחות.
- בכל רגע נתון, מנות רבות נמצאות בקו הייצור, חלק מהן בתהליך ייצור וחלק מהן בהמתנה.
- לכל מוצר יש מאפייני עיבוד שונים, כגון: זמן כינון, זמן עיבוד, וכו'.
- לכל מנת ייצור יש מאפייני הזמנת לקוח שונים, כגון: כמות הפריטים, זמני אספקה, וכו'.

אמנם, מנהלי ייצור מנוסים מסתייעים בשיקול דעת (Common Sense), כדי לשפר את תוצאות התכנון, אלא שכמות האפשרויות היא כה רבה, שדרושה מערכת מורכבת יותר לטיפול בבעיה.

^{**} תרשים גאנט (Gant Chart): תרשים סכמתי, המתאר את משימות הפרויקט/העבודה לאורך ציר זמן. את התרשים פיתח הנרי גאנט בשנת 1910.

תזמון חכם עשוי להגדיל את התפוקה ב-30%-40%, ביחס לתזמון פשוט (כגון תזמון על-פי מועדי אספקה), וב-15%-20%, ביחס לתכנון המבוסס על שיקול דעתו של מנהל ייצור מנוסה

השפעת תזמון אופטימלי על רווחיות המפעל

קיצור משך הייצור מאפשר למתכננים להגדיל את התפוקה ולקבל הזמנות רבות יותר מן הלקוחות. תזמון חכם עשוי להגדיל את התפוקה ב-30%-40%, ביחס לתזמון פשוט (כגון תזמון על-פי מועדי אספקה), וב-15%-20%, ביחס לתכנון המבוסס על שיקול דעתו של מנהל ייצור מנוסה. תוספת התפוקה כמעט שאינה מוסיפה הוצאות (למעט הוצאות על חומרי-גלם, ההוצאות האחרות אינן משתנות), ולכן השפעתה על רווחיות המפעל היא משמעותית מאוד.

כדי להדגים את המתאם בין תכנון חכם לבין רווחיות המפעל, נניח שתכנון נכון מביא להגדלת התפוקה במפעל, ב-15%. מכירות המפעל בתקופה נתונה הן: מיליון דולר, ההוצאות על חומרי-גלם הן: 400 אלף דולר, הוצאות אחרות הן: 400 אלף דולר, והרווח הוא: 200 אלף דולר. אפשר לראות בטבלה להלן, כי כאשר התזמון הוא אופטימלי, הגידול ברווחיות הוא 45%.

הגלם, המלאי בתהליך, וכו'. נתונים אלה זמינים במרבית המפעלים - בין אם אלה מפעלים המשתמשים במערכות ממוחשבות, כגון: תכנון משאבי הארגון (Enterprise Resource Planning) [ERP], או תכנון משאבי הייצור (Manufacturing Resource Planning) [MRP], ובין אם אלה מפעלים מסורתיים, שמעבדים נתונים בעזרת אמצעים פשוטים (כגון טבלאות Excel), או בצורה ידנית.

משך תכנון הייצור חייב להיות קצר, ובעיקר, כאשר מדובר בתכנון מחדש, הנובע מתקלות ומשינויים בלתי-צפויים. מכאן, שרצוי לבצע את התכנון באמצעות מערכת ממוחשבת ובצורה אוטומטית עם האפשרות, העומדת למתכנן להתערב בכל שלב בתהליך.

סיכום

סידור מנות הייצור משפיע מאוד על שביעות רצונו של הלקוח (המקבל את האספקה במועד) ועל יעילות הייצור. ככל שקיימות מנות ייצור רבות יותר, כך גדלה

#	מכירות (K\$)	חומרי גלם (k\$)	הוצאות אחרות (k\$)	רווח (k\$)	גידול הרווחיות (%)
1	1,000	400	400	200	-
2	1,150	460	400	290	45

השפעת תזמון אופטימלי על רווחיות המפעל

כמות האפשרויות לסידור המנות (N!). אין פתרון מתמטי למציאת הסידור הטוב ביותר, וגם התוצאה שמושגת באמצעות שיקול דעת היא מוגבלת מאוד. לכן נדרש פתרון יוריסטי (שאינו מתמטי), שמנצל את כוח עיבודו החזק של המחשב. בשוק קיימות תוכנות רבות, המשמשות לתכנון הייצור ולתזמונו. חלק מהן משתמשות בכללי אצבע פשוטים לתכנון הייצור ולתזמונו, וחלק מהן משתמשות בכלים מתוחכמים יותר. איתור תוכנה, התואמת את צורכי המפעל, הוא צורך חיוני והיא תשפר את רמת השירות ללקוחות, תגדיל את יעילות הייצור, ותביא להגדלת רווחי המפעל. ■

הגידול ברווחיות נובע, הן מן הגידול בתפוקה והן מן הצמצום בחלקן היחסי של ההוצאות האחרות. כמובן, במפעל אמיתי, חישוב רווחיות המפעל יהיה מורכב יותר, אך בכל מקרה התוצאה תהיה זהה.

יישום התכנון במפעל

תכנון שמפיק את המקסימום מן משאבי המפעל, תוך עמידה במועדי האספקה ואילוצים אחרים, הוא משימה חשובה ביותר, ולכן הוא חייב להתבצע בחוכמה. בתהליך התכנון נדרשים נתונים רבים, כגון: מבנה המוצר [BOM] (Bill of Material), מועדי האספקה, סוגי המכונות, משכי הייצור, מלאי חומרי-

