



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت

عنوان:

برنامه‌ریزی تولید میلگرد

نگارنده:

پدرام پیرو اصفیا - ۹۸۲۵۰۰۶

استاد: دکتر هادی مصدق

درس: برنامه‌ریزی تولید

پاییز ۱۴۰۱

فهرست مطالب

۱. مقدمه.....	۴
۲. پیشبینی میزان تقاضا.....	۴
۲.۱. روش میانگین متحرک ساده.....	۵
۲.۲. روش میانگین متحرک وزندار.....	۷
۲.۳. روش هموارسازی نمایی ساده.....	۸
۲.۴. روش رگرسیون خطی ساده.....	۹
۲.۵. تحلیل نتایج و انتخاب مقدار پیشبینی.....	۱۱
۳. تهیه برنامه‌ریزی فروش و عملیات برای شش ماه آینده.....	۱۳
۳.۱. مدل ریاضی در حالت جامع.....	۱۳
۳.۲. مدل ریاضی در مسئله مطرح شده.....	۱۷
۳.۳. پیاده‌سازی مدل در گمز.....	۲۰
۳.۴. بررسی نتایج حاصل از حل مدل در گمز.....	۲۵
۳.۵. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی.....	۲۹
۳.۵.۱. تغییر تقاضای هر دوره.....	۲۹
۳.۵.۲. تغییر مقدار تولید هر شیفت.....	۳۴
۳.۵.۳. تغییر قیمت تولید هر محصول.....	۳۸
۳.۵.۴. تغییر قیمت نگهداری هر محصول.....	۴۲
۴. سربرنامه تولید برای هر محصول.....	۴۴
۴.۱. محاسبه اندازه انباشه اقتصادی تولیدی هر محصول.....	۴۴
۴.۲. محاسبه جدول سربرنامه اصلی.....	۴۷
۵. برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز.....	۴۸
۵.۱. برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز بر اساس پارامترهای برنامه‌اصلی.....	۴۹
۵.۲. تحلیل حساسیت بر روی جداول برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز.....	۵۰
۵.۲.۱. تغییر موجودی اولیه.....	۵۱
۵.۲.۲. تغییر سفارشات از پیش تعیین‌شده.....	۵۱

۱. مقدمه

هر سازمان - بزرگ، کوچک، تولیدی و خدماتی - به عنوان وظیفه اصلی خود تولید مقداری خروجی تعریف شده از فرآیندهای خود را دارد. برای اینکه آن سازمان در خدمت‌رسانی به مشتریان خود مؤثر و کارآمد باشد، مدیران سازمان باید اصول اساسی برنامه‌ریزی برای تولید خروجی و همچنین کنترل فرآیند تولید خروجی را بدانند و به هنگام تولید به کار گیرند.

صنعت تولید فولاد نیز از این قوانین جدا نیست و باید برای فعالیت‌های مختلف آن، اعم از میزان نگهداری موجودی هر ماه، میزان تولید در هر ماه، تعداد شیفت روزانه، تعداد کارگر و ... برنامه‌ریزی کرد. در این پروژه قصد داریم تا با استفاده از دانشی که در درس برنامه‌ریزی تولید کسب کرده‌ایم، با یک مسئله واقعی روبرو شویم و حلش کنیم.

۲. پیش‌بینی میزان تقاضا

برای اینکه بتوانیم میزان تولید در هر ماه و میزان مواد اولیه، تعداد کارگر و ... مشخص کنیم، در ابتدا نیاز داریم تا متوجه شویم میزان تقاضا برای هر ماه چقدر است. برای کشف این موضوع، باید از تکنیک‌های سری زمانی^۱ استفاده کنیم و میزان تقاضا را برای ماه‌های آینده (در این مسئله برای یک پنجره زمانی شش ماهه) پیش‌بینی کنیم. همچنین سعی شده است از روش‌های مختلف پیش‌بینی استفاده شود. البته به علت کم بودن داده، نمی‌توان از تکنیک‌های پیشرفته‌تر و مدل‌های پیچیده‌تر، مثل ARIMA، ARIMAX، GARCH و ... استفاده کرد.

قابل ذکر است که از زبان برنامه‌نویسی R نسخه‌ی ۴.۲.۲ در این بخش استفاده شده‌است.

میزان فروش در ماه‌های گذشته به صورت زیر است:

جدول ۱- میزان فروش در شش ماه گذشته

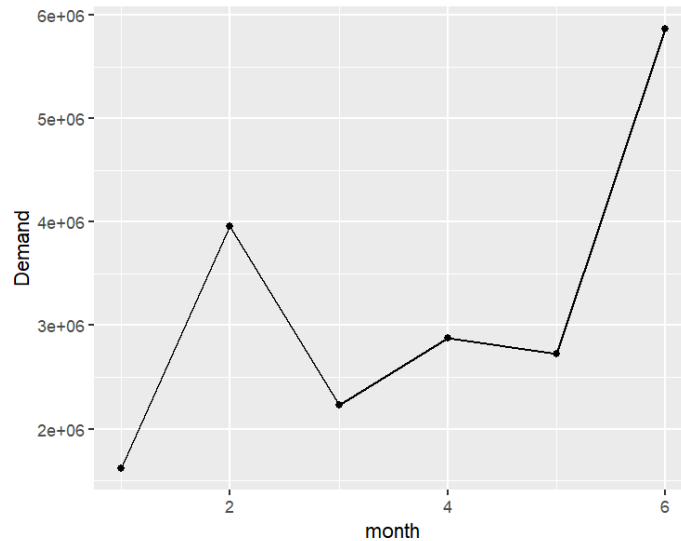
ماه	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان
فروش (کیلوگرم)	1,544,160	3,769,895	2,127,270	2,739,475	2,591,490	5,585,350

همانطور که گفته شد، در برنامه‌ریزی تولید به دنبال پیش‌بینی تقاضا هستیم و باید تقاضا را پیدا کنیم. با توجه به اینکه مقدار تقاضا حتماً از مقدار فروش یا مساوی بیشتر است، برای در محاسبه مقدار تقاضا، داده‌های هر ماه را در ۱.۰۵ ضرب می‌کنیم تا ۵٪ اضافه‌تر به طوری نماینده تقاضای اضافه‌تر از فروشمان باشد. مقدار تقاضا در ۶ ماه پیشین در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- میزان تقاضا در شش ماه گذشته

ماه	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان
تقاضا (کیلوگرم)	1,621,368	3,958,390	2,233,634	2,876,449	2,721,065	5,864,618

¹ Time-series



تصویر ۱- میزان تقاضا در شش ماه گذشته

در ادامه، روش های مختلف پیشبینی را به روی این داده ها پیاده سازی می کنیم.

۲.۱. روش میانگین متحرک ساده^۲

مقدار پیشبینی در این روش از رابطه زیر پیروی می کند:

اگر k را تعداد ماه های موثر در پیشبینی دوره آینده، D_i را مقدار تولید در دوره i و F_{m+1} را مقدار پیشبینی برای دوره $m + 1$ در نظر بگیریم، داریم:

$$F_{m+1} = \frac{\sum_{i=m-k}^k D_i}{k}$$

همچنین شایان ذکر است که در ادامه، از خطای جذر میانگین مربع خطاها^۳ برای ارزیابی مدل ها استفاده خواهیم کرد.

روش میانگین متحرک را به ازای k های ۱ تا ۵ پیاده سازی می کنیم و خطا را در هر کدام حساب می کنیم:

```
"RMSE for SMA Prediction:"
"k = 1 neighbours is: 1626410.38153601"
"k = 2 neighbours is: 647481.309637416"
"k = 3 neighbours is: 543697.69909868"
"k = 4 neighbours is: 193322.85640709"
"k = 5 neighbours is: 600086.099143285"
```

تصویر ۲- خطای پیشبینی به روش میانگین متحرک ساده

^۲ Simple Moving Average

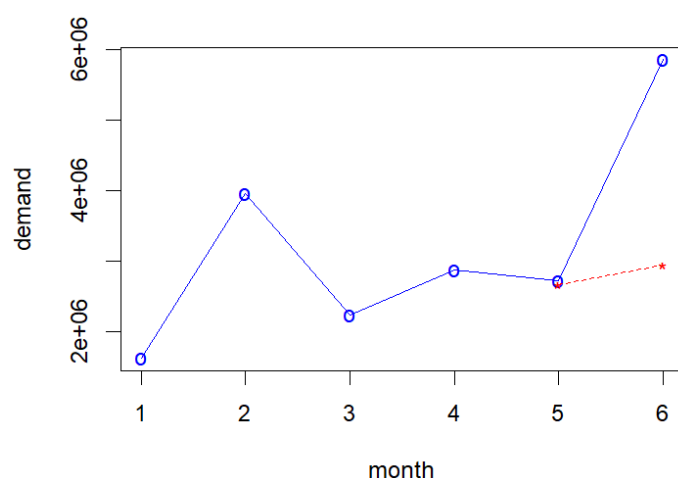
^۳ Root Mean Squared Error

با توجه به تصویر بالا، کمترین خطا به $k = 1$ یا روش آخرین دوره تعلق دارد، هرچند از این هایپرپارامتر استفاده نمی‌شود. چرا که خط پیشبینی هموار نخواهد بود و نمی‌توان عمومیت داد. به همین علت از $k = 4$ برای پیشبینی استفاده می‌کنیم. میزان پیشبینی برای ماه‌های آینده به صورت زیر است:

جدول ۳- مقدار پیشبینی به روش میانگین متحرک ساده

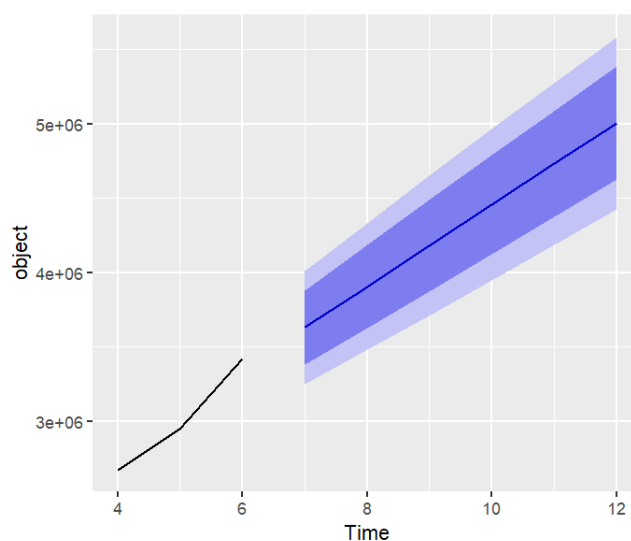
ماه	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
تقاضا (کیلوگرم)	3,632,453	3,907,378	4,182,302	4,457,226	4,732,150	5,007,074

همچنین میزان پیشبینی در ماه‌های مهر و آبان به صورت زیر است و می‌بینیم که روند افزایش را در ماه ۶ گرفته است:



تصویر ۳- پیشبینی به روش میانگین متحرک ساده با $k=4$

و مقدار پیشبینی در کنار بازه اطمینان ۹۵٪ و ۸۰٪ نیز به شکل زیر است:



تصویر ۴- پیشبینی دوره‌های آینده به روش میانگین متحرک ساده با $k=4$

۲.۲. روش میانگین متحرک وزن دار^۴

مقدار پیشبینی در این روش از رابطه زیر پیروی می‌کند:

اگر k را تعداد ماه‌های موثر در پیشبینی دوره آینده، D_i را مقدار تولید در دوره‌ی i ، w_i وزن مرتبط با هر ماه از دوره‌های گذشته و F_{m+1} را مقدار پیشبینی برای دوره $m + 1$ در نظر بگیریم، داریم:

$$F_{m+1} = \sum_{i=m-k}^m w_i D_i$$

$$\sum_i w_i = 1$$

در این روش با عنایت به این که در بخش قبلی، $k = 4$ به عنوان بهترین روش انتخاب شد، ۴ دوره گذشته را به عنوان دوره‌های موثر در پیشبینی می‌آوریم و به آن‌ها وزن می‌دهیم. وزن‌های داده شده برای ماه‌های ۳ تا ۶ به ترتیب برابر با ۰.۱، ۰.۱، ۰.۳ و ۰.۵ است. میزان پیشبینی برای ماه‌های آینده به صورت زیر است:

جدول ۴- مقدار پیشبینی به روش میانگین متحرک وزن‌دار

ماه	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
تقاضا (کیلوگرم)	3,371,806	3,548,185	3,724,564	3,900,943	4,077,322	4,253,701

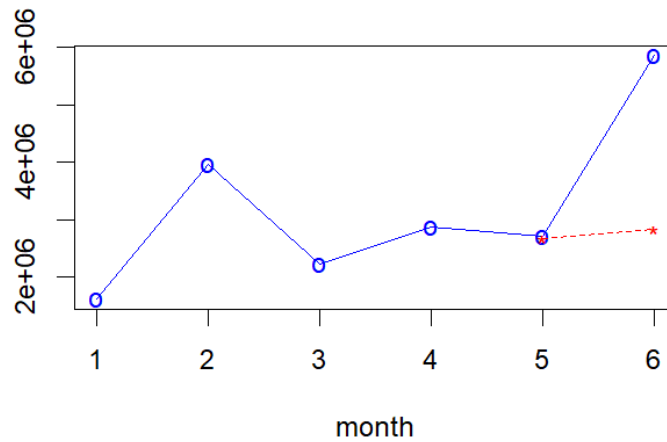
میزان خطای این روش در داده‌های آموزشی نیز برابر است با:

"RMSE Error for WMA with weights=(0.5,0.3,0.1,0.1): 631073.203628883"

تصویر ۵- خطای پیشبینی به روش میانگین متحرک وزن‌دار

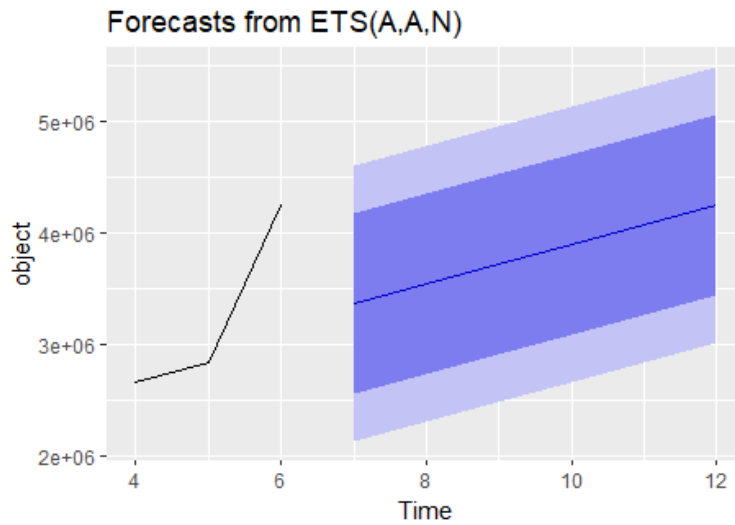
همچنین میزان پیشبینی در ماه‌های مهر و آبان به صورت زیر است و می‌بینیم که روند افزایش را در ماه ۶ گرفته است:

⁴ Weighted Moving Average



تصویر ۶- پیشبینی به روش میانگین متحرک وزن دار

و مقدار پیشبینی در کنار بازه اطمینان ۹۵٪ و ۸۰٪ نیز به شکل زیر است:



تصویر ۷- پیشبینی دوره های آینده به روش میانگین متحرک وزن دار

۲.۳. روش هموارسازی نمایی ساده^۵

مقدار پیشبینی در این روش از رابطه زیر پیروی می کند:

اگر α مقدار پارامتر هموارسازی، D_{m-1} مقدار واقعی تقاضای دوره گذشته، F_m مقدار پیشبینی دوره قبل و F_{m+1} را مقدار پیشبینی برای دوره $m + 1$ در نظر بگیریم، داریم:

$$F_{m+1} = \alpha A_{m-1} + (1 - \alpha)F_m$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

⁵ Simple Exponential Smoothing

روش هموارسازی نمایی ساده را به ازای α های ۰.۱، ۰.۳، ۰.۵، ۰.۷ و ۰.۹ پیاده‌سازی می‌کنیم و خطا را در هرکدام حساب می‌کنیم:

```
"RMSE for SES Prediction:"
"for alpha = 0.1 is: 1895064.71765515"
"for alpha = 0.3 is: 1677667.61436311"
"for alpha = 0.5 is: 1626431.21430876"
"for alpha = 0.7 is: 1653496.76290104"
"for alpha = 0.9 is: 1720236.77264013"
```

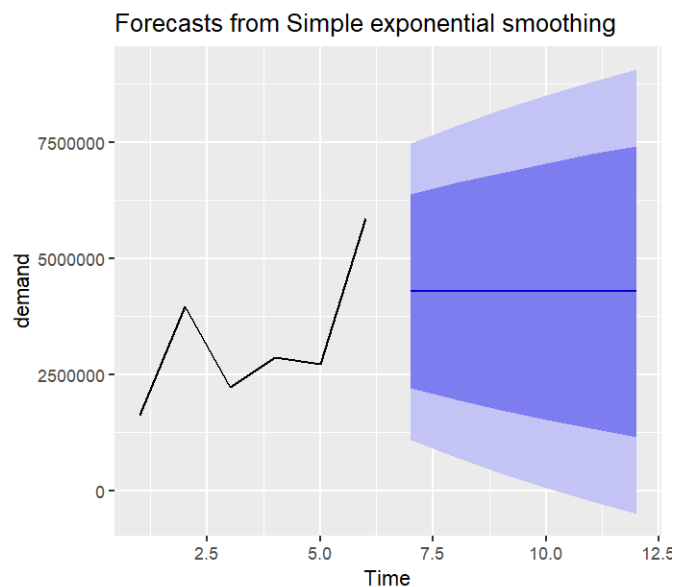
تصویر ۸- خطای پیشبینی به روش هموارسازی نمایی ساده

با توجه به تصویر بالا، کمترین خطا به $\alpha = 0.5$ یا روش آخرین دوره تعلق دارد. میزان پیشبینی برای ماه‌های آینده با این آلفا به صورت زیر است:

جدول ۵- مقدار پیشبینی به روش هموارسازی نمایی ساده

اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	ماه
5,551,322	5,551,322	5,551,322	5,551,322	5,551,322	5,551,322	تقاضا (کیلوگرم)

و مقدار پیشبینی در کنار بازه اطمینان ۹۵٪ و ۸۰٪ نیز به شکل زیر است:



تصویر ۹- پیشبینی دوره‌های آینده هموارسازی نمایی ساده با $\alpha = 0.5$

۲.۴. روش رگرسیون خطی ساده^۶

مقدار پیشبینی در این روش از رابطه زیر پیروی می‌کند:

^۶ Simple Linear Regression

ابتدا باید معادله خط رگرسیون $F_t = at + b$ را بیابیم که از دو پارامتر a و b تشکیل شده است که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$a = \frac{n \sum ty - \sum t \sum y}{n \sum t^2 - (\sum t)^2}, \quad b = \frac{\sum y - a \sum t}{n}$$

سپس پیشبینی برای دوره $m + 1$ برابر است با:

$$F_{m+1} = a(m + 1) + b$$

مقدار دو پارامتر a و b برابر است با:

```
Call:
lm(formula = demand ~ month, data = df)
```

```
Coefficients:
(Intercept)      month
1397878        518488
```

تصویر ۱۰- مقادیر ضرایب رگرسیون

که یعنی $a = 518488$ و $b = 1397878$

حال نتایج رگرسیون بدست آمده را تحلیل می‌کنیم.

```
Residuals:
    1      2      3      4      5      6
-294998 1523535 -719709 -595382 -1269255 1355810

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1397878    1207534   1.158   0.311
month        518488     310066   1.672   0.170

Residual standard error: 1297000 on 4 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4114,    Adjusted R-squared:  0.2643
F-statistic: 2.796 on 1 and 4 DF,  p-value: 0.1698
```

تصویر ۱۱- تحلیل نتیجه رگرسیون خطی

از آنجایی که مقدار $p - value$ بزرگتر از ۰.۰۵ است، یعنی از لحاظ آماره، با سطح معنادار ۵ درصد نمی‌توان فرض صفر را برای ضرایب با صفر رد کرد، پس می‌توان گفت که پارامترها برابر با صفر هستند. توجه کنید فرض‌های آماری در زیر نوشته شده اند:

$$\begin{cases} H_0: a = 0 \\ H_1: a \neq 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} H_0: b = 0 \\ H_1: b \neq 0 \end{cases}$$

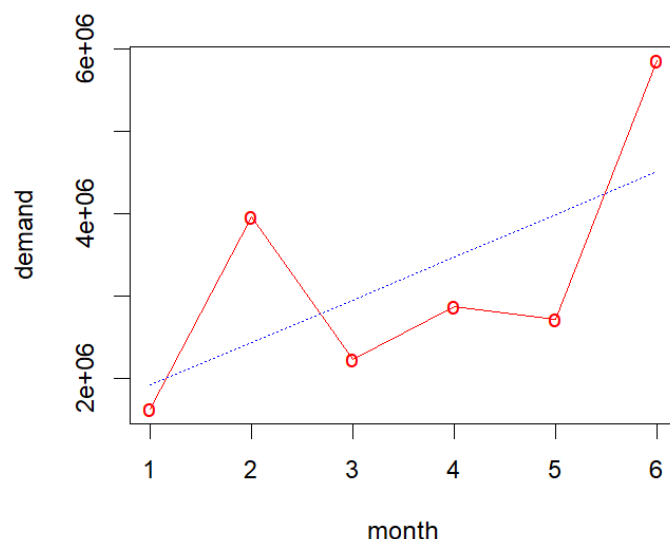
پس رگرسیون روش خوبی برای پیشبینی نیست، با این حال دیگر تحلیل‌ها را نیز انجام می‌دهیم. در کنار این موضوع، مقدار $Adjusted R-squared$ نیز پایین است که یعنی همبستگی بین ماه و تقاضا کم است.

میزان خطای این روش در داده‌های آموزشی نیز برابر است با:

```
"RMSE for Linear Regression Prediction: 1059077.69860885"
```

تصویر ۱۲- خطای پیشبینی به روش رگرسیون خطی ساده

همچنین میزان پیشبینی نیز برابر است با:



تصویر ۱۳- پیشبینی به روش رگرسیون خطی ساده

میزان پیشبینی برای ماه‌های آینده برابر است با:

جدول ۶- مقدار پیشبینی به روش رگرسیون خطی ساده

ماه	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
تقاضا (کیلوگرم)	5,027,296	5,545,784	6,064,272	6,582,760	7,101,249	7,619,737

۲.۵. تحلیل نتایج و انتخاب مقدار پیشبینی

مقادیر پیشبینی با استفاده از روش‌های مذکور در جدول ۷ آمده است:

جدول ۷ - مقدار پیشبینی به روش‌های مختلف

month	SMA	WMA	SES	SLR
7	3,632,453	3,371,806	5,551,322	5,027,296
8	3,907,378	3,548,185	5,551,322	5,545,784
9	4,182,302	3,724,564	5,551,322	6,064,272
10	4,457,226	3,900,943	5,551,322	6,582,760
11	4,732,150	4,077,322	5,551,322	7,101,249
12	5,007,074	4,253,701	5,551,322	7,619,737

حال باید بهترین روش را از بین ۴ روش مذکور انتخاب نماییم، برا این کار سه نوع خطای پیشبینی RMSE, MAPE و MAE را به عنوان معیارهایی برای تصمیم گیری مد نظر قرار می دهیم. مقایر خطاهای مختلف هر کدام از روش ها به صورت زیر است:

جدول 8 - ماتریس تصمیم خطایهای روش های مختلف

	RMSE	MAE	MAPE
SES	1720237.00	1260125.00	33.38
SMA	193322.90	631073.20	1720237.00
WMA	181736.60	472322.38	1260125.00
LR	1059078.00	959781.68	0.30

برای استفاده از روش های MCDM، باید ابتدا برای هر کدام از معیارها وزنی مناسبی بیابیم. این وزن ها می تواند بر اساس نظر کارشناسان باشد یا می تواند پایه و اساس محاسباتی داشته باشد که در این پروژه پایه و اساس محاسباتی مد نظر قرار گرفته است و از روش آنترویی^۷ در R برای یافتن وزن ها استفاده شده است. وزن هر کدام از معیارها در ادامه آمده است؛ همچنین توجه داشته باشید که تمامی معیارها از جنس هزینه هستند و به دنبال آن هستیم که آن ها را مینیمم کنیم.

```
library(creditmodel)
weights = entropy_weight(df_errors,pos_vars=c(),neg_vars=c('RMSE','MAE','MAPE'))
```

تصویر ۱۴- استفاده از روش آنترویی برای تعیین وزن ها

```
Feature    Weight
RMSE 0.2677770
MAE 0.3544454
MAPE 0.3777776
```

تصویر ۱۵- وزن های بدست آمده از روش آنترویی

حال از وزن های بدست آمده استفاده می کنیم و با استفاده از روش تاپسیس^۸ سعی در یافتن بهترین گزینه می کنیم.

```
library(topsis)
topsis(decision=data.matrix(df_errors) , weights=weights$Weight , impacts=c("-", "-", "-"))
```

تصویر ۱۶- استفاده از روش تاپسیس برای یافتن بهترین روش پیشبینی

⁷ Entropy

⁸ TOPSIS

	alt.row	score	rank
1	1	0.4467021	3
2	2	0.3939217	4
3	3	0.5040499	2
4	4	0.9999879	1

تصویر ۱۷- نتیجه بدست آمده از روش تاپسیس

با عنایت به نتیجه بدست آمده و ترتیب روش‌های پیشبینی که در جدول ۸ آمده است، ترتیب بهترین روش‌ها به صورت زیر است:

$$SLR > WMA (w_1 = 0.5, w_2 = 0.3, w_3 = 0.1, w_4 = 0.1) > SES (\alpha = 0.5) > SMA(k=4)$$

پس برای پیشبینی دوره‌های آتی از روش رگرسیون خطی ساده استفاده می‌کنیم.

۳. تهیه برنامه‌ریزی فروش و عملیات^۹ برای شش ماه آینده

برنامه‌های استراتژیک یک شرکت و برنامه‌های کسب‌وکاری که نشأت گرفته از برنامه استراتژیک هستند، تعداد محصول تولیدی و سطح محصولات را که در یک شرکت باید دنبال شود، به علاوه بازارهای هدف مختلف، میزان نفوذ در هر بازار و دیگر جوانب مهم کسب و کار را مشخص می‌کنند. برنامه‌های استراتژیک معمولاً به قدری جامع هستند که میزان منابع مورد نیاز و زمان مورد نیاز را مشخص نمی‌کنند. همچنین توانایی هماهنگ کردن برنامه‌ها را با منابع مورد نیاز مانند عملیات‌ها، بازاریابی و فروش، مالی، منابع انسانی و ... را نیز ندارند. بدین منظور است که از برنامه‌ریزی فروش و عملیات برای نوع منابع، تعداد منابع مورد نیاز، زمان‌بندی استفاده از منابع استفاده می‌کنیم.

۳.۱. مدل ریاضی در حالت جامع

در این بخش با استفاده از مدل سازی ریاضی که به نظر مناسب یک فعالیت تولیدی پیوسته است می‌خواهیم میزان بهینه از هر کدام از منابع را برای شش ماه آینده بدست آوریم. در ادامه مدل ریاضی آورده شده است و توضیحات مربوطه بعد از مدل ذکر شده است:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$t \in \{0, 1, \dots, L_p\}$	مجموعه دوره‌ها	t
$n \in \{1, 2, \dots, N\}$	سایز میله‌های مختلف	n
$j = \{1, 2, 3\}$	شیفت‌های مختلف	j

پارامترها

c_{tn}	هزینه تولید محصول n در دوره t
----------	-----------------------------------

^۹ Sales & Operations Planning

h_{tn}	هزینه نگهداری موجودی محصول n در دوره t
π_{tn}	هزینه کمبود موجودی محصول n در دوره t
λ_{tn}	هزینه افزایش در مقدار تولید از دوره $t - 1$ به دوره t به ازای محصول n
ω_{ti}	هزینه کاهش در مقدار تولید از دوره $t - 1$ به دوره t به ازای محصول n
$b_{cost_{tn}}$	هزینه تهیه محصول n از روش برونسپاری در دوره t
s_{tj}	دستمزد پرسنل در دوره t و شیفت j به ازای هر نفر
e_t	هزینه افزایش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t به ازای هر نفر
e'_t	هزینه کاهش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t به ازای هر نفر
m	میزان تولید تجمیعی که در یک دوره اتفاق میفتد اگر با تمام ظرفیت در یک شیفت کار کنیم.
w	تعداد کارگری که به صورت ثابت در هر شیفت داریم.
I_{max}	ماکسیمم مقدار موجودی که می توان در انبار نگهداری کرد - ظرفیت انبار
B_{max_n}	ماکسیمم میزان محصول n که می توان برونسپاری کرد
D_{tn}	تقاضای محصول n در دوره t

پارامترها

X_{tnj}	میزان محصول تولیدی نوع n در دوره t در شیفت j
I_{tn}^+	سطح موجودی در دست در انتهای دوره t برای محصول n
I_{tn}^-	میزان کمبود در انتهای دوره t برای محصول n
Δ_{tn}^+	تعداد افزایش در سطح تولید از دوره $t - 1$ به دوره t برای محصول n
Δ_{tn}^-	تعداد کاهش در سطح تولید از دوره $t - 1$ به دوره t برای محصول n
B_{tn}	مقدار محصول n که در دوره t برونسپاری می شود.

WT_t	تعداد کل کارگر در دوره t
WT_t^+	میزان افزایش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t
WT_t^-	میزان کاهش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t
y_{tj}	متغیرهای باینری برای تعریف شیفت‌ها

$$\text{Min } Z = \sum_t \left(\sum_n \left(\sum_j (c_{tn} X_{tnj} + s_{tj} \cdot w \cdot y_{tj}) + h_{tn} I_{tn}^+ + \pi_{tn} I_{tn}^- + \lambda_{tn} \Delta_{tn}^+ + \omega_{tn} \Delta_{tn}^- + b_{tn} B_{tn} \right) + e_t WT_t^+ + e_t' WT_t^- \right)$$

st.

$$I_{tn} = I_{t-1,n} + B_{tn} + \sum_j X_{tnj} - D_{tn} \quad \forall n, t \neq 0 \quad (1)$$

$$\sum_j X_{tnj} = \sum_j X_{t-1,n,j} + \Delta_{tn}^+ - \Delta_{tn}^- \quad \forall n, t \neq 0 \quad (2)$$

$$I_{tn} = I_{tn}^+ - I_{tn}^- \quad \forall n, t \quad (3)$$

$$WT_t = WT_{t-1} + WT_t^+ - WT_t^- \quad t \neq 0 \quad (4)$$

$$my_{t2} \leq \sum_n X_{tn1} \leq my_{t1} \quad \forall t \quad (5)$$

$$my_{t3} \leq \sum_n X_{tn2} \leq my_{t2} \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_n X_{tn3} \leq my_{t3} \quad \forall t \quad (7)$$

$$WT_t = (y_{t1} + y_{t2} + y_{t3})w \quad \forall t \quad (8)$$

$$B_{tn} \leq B_{max} \quad \forall n, t \quad (9)$$

$$\sum_n I_{tn} \leq I_{max} \quad \forall t \quad (10)$$

$$I_{6,n} = 0 \quad \forall n \quad (11)$$

$$I_{0,n} = 0 \quad \forall n \quad (12)$$

$$X_{0,n,j} = 0 \quad \forall n, j \quad (13)$$

$$I_{0,n}^+ = 0 \quad \forall n \quad (14)$$

$$I_{0,n}^- = 0 \quad \forall n \quad (15)$$

$$WT_0 = w \quad (16)$$

$$WT_0^+ = 0 \quad (17)$$

$$WT_0^- = 0 \quad (18)$$

$$\Delta_0^+ = 0 \quad (19)$$

$$\Delta_0^- = 0 \quad (20)$$

$$B_{0,n} = 0 \quad \forall n \quad (21)$$

$$y_{0,1} = 1 \quad (22)$$

$$y_{0,2} = 0 \quad (23)$$

$$y_{0,3} = 0 \quad (24)$$

$$X_{tnj}, I_{tn}^+, I_{tn}^-, WT_t, WT_t^+, WT_t^-, \Delta_{tn}^+, \Delta_{tn}^-, B_{tn} \geq 0 \quad \forall t, n, j \quad (25)$$

$$X_{tnj}, I_{tn}, I_{tn}^+, I_{tn}^-, WT_t, WT_t^+, WT_t^-, \Delta_{tn}^+, \Delta_{tn}^-, B_{tn} \in \mathbb{Z} \quad \forall t, n, j \quad (26)$$

حال به توضیح هر کدام از محدودیت‌ها می‌پردازیم:

محدودیت (1)، محدودیت تعادل موجودی به همراه میزان تولید و برونسپاری است. محدودیت (2)، محدودیت بالانس تولید در هر دوره و در هر شیفت است. محدودیت (3)، محدودیت بالانس موجودی است. محدودیت (4)، محدودیت بالانس تعداد کارگران است. محدودیت (5)، (6) و (7)، به این معناست که باید حتما در شیفت یک کامل تولید داشته باشیم تا به شیفت دوم برسیم، و حتما باید در شیفت دوم تولید کامل شود تا به شیفت دوم برسیم. محدودیت (8) میزان تعداد کارگران را به ازای هر شیفت تعیین می‌کند. محدودیت (9)، محدودیت مقدار ماکسیمم برونسپاری است که می‌توانیم انجام دهیم. محدودیت (10)، میزان ماکسیمم موجودی است که در هر دوره می‌توانیم نگهداری کنیم. محدودیت (11) تا (24)، محدودیت‌های مربوطه برای این است که مقادیر در دوره فعلی باید صفر باشند. محدودیت (25)، نشان‌دهنده این است که متغیرها مثبت باید باشند. محدودیت (26)، محدودیت عدد صحیح بودن متغیرهاست.

۳.۲. مدل ریاضی در مسئله مطرح شده

مقادیر پارامترها و مدلی که در این مسئله به صورت خاص استفاده شده است را در ادامه ذکر می‌کنیم:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

t	مجموعه دوره‌ها $t \in \{0,1, \dots, 6\}$
n	سایز میله‌های مختلف $n \in \{1,2,3,4,5\}$ سایز ۱۴: $n = 1$ سایز ۱۶: $n = 2$ سایز ۱۸: $n = 3$ سایز ۲۰: $n = 4$ سایز ۲۵: $n = 5$
j	شیفت‌های مختلف $j = \{1,2,3\}$

پارامترها

c_n	هزینه تولید محصول n $c_1 = 171000, c_2 = 168000, c_3 = 160000, c_4 = 155000, c_5 = 147000$
h_n	هزینه نگهداری موجودی محصول n $h_1 = 51300, h_2 = 50400, h_3 = 48000, h_4 = 46500, h_5 = 44100$
π_n	هزینه کمبود موجودی محصول n $\pi_1 = 56430, \pi_2 = 55440, \pi_3 = 52800, \pi_4 = 51150, \pi_5 = 48510$
λ	هزینه افزایش در مقدار تولید برابر با 10000 به ازای هر کیلوگرم
ω	هزینه کاهش در مقدار تولید برابر با 15000 به ازای هر کیلوگرم
b_{cost_n}	هزینه تهیه محصول n از روش برونسپاری $b_{cost_1} = 239400, b_{cost_2} = 235200, b_{cost_3} = 224000, b_{cost_4} = 217000$

$b_{cost_5} = 2058000$	
$s_1 = 50000000, s_2 = 52500000, s_3 = 55000000$ دستمزد پرسنل به ازای هر نفر در شیفت j	s_j
هزینه افزایش در سطح نیروی کار به ازای هر نفر برابر با 24000	e
هزینه کاهش در سطح نیروی کار به ازای هر نفر برابر با 120000	e'
میزان تولید تجمیعی که در یک دوره اتفاق میفتد اگر با تمام ظرفیت در یک شیفت کار کنیم؛ برابر با 2,400,000 کیلوگرم	m
تعداد کارگری که به صورت ثابت در هر شیفت داریم برابر با 24 نفر	w
ماکسیمم مقدار موجودی که می توان در انبار نگهداری کرد - ظرفیت انبار برابر با 10,000,000 کیلوگرم	I_{max}
ماکسیمم میزان محصولی که می توان برونسپاری کرد، برابر با 300,000 کیلوگرم	B_{max}
تقاضای محصول n در دوره t $D_{11} = 150819, D_{12} = 1809827, D_{13} = 754094, D_{14} = 1357370, D_{15} = 955186$ $D_{21} = 166374, D_{22} = 1996482, D_{23} = 831868, D_{24} = 1497362, D_{25} = 1053699$ $D_{31} = 181928, D_{32} = 2183138, D_{33} = 909641, D_{34} = 1637353, D_{35} = 1152212$ $D_{41} = 197483, D_{42} = 2369794, D_{43} = 987414, D_{44} = 1777345, D_{45} = 1349237$ $D_{51} = 213037, D_{52} = 2556450, D_{53} = 1065187, D_{54} = 1917337, D_{55} = 1349237$ $D_{61} = 228592, D_{62} = 2743105, D_{63} = 1142961, D_{64} = 2057329, D_{65} = 1447750$	D_{tn}

متغیرها

میزان محصول تولیدی نوع n در دوره t در شیفت j	X_{tnj}
سطح موجودی در دست در انتهای دوره t برای محصول n	I_{tn}^+
میزان کمبود در انتهای دوره t برای محصول n	I_{tn}^-
تعداد افزایش در سطح تولید از دوره $t - 1$ به دوره t برای محصول n	Δ_{tn}^+
تعداد کاهش در سطح تولید از دوره $t - 1$ به دوره t برای محصول n	Δ_{tn}^-

B_{tn}	مقدار محصول n که در دوره t برونسپاری می‌شود.
WT_t	تعداد کل کارگر در دوره t
WT_t^+	میزان افزایش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t
WT_t^-	میزان کاهش در سطح نیروی کار از دوره $t - 1$ به دوره t
y_{tj}	متغیرهای باینری برای تعریف شیفت‌ها

و مدل ریاضی استفاده شده نیز به شکل زیر خواهد بود:

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^6 \left(\sum_{n=1}^5 \left(\sum_{j=1}^3 (c_n X_{tnj} + s_{tj} \cdot w \cdot y_{tj}) + h_n I_{tn}^+ + \pi_n I_{tn}^- + \lambda \Delta_{tn}^+ + \omega \Delta_{tn}^- + b_n B_{tn} \right) + e \cdot WT_t^+ + e' \cdot WT_t^- \right)$$

st.

$$I_{tn} = I_{t-1,n} + B_{tn} + \sum_{j=1}^3 X_{tnj} - D_{tn} \quad \forall n, t \neq 0 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^3 X_{tnj} = \sum_{j=1}^3 X_{t-1,n,j} + \Delta_{tn}^+ - \Delta_{tn}^- \quad \forall n, t \neq 0 \quad (2)$$

$$I_{tn} = I_{tn}^+ - I_{tn}^- \quad \forall n, t \quad (3)$$

$$WT_t = WT_{t-1} + WT_t^+ - WT_t^- \quad t \neq 0 \quad (4)$$

$$my_{t2} \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn1} \leq my_{t1} \quad \forall t \quad (5)$$

$$my_{t3} \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn2} \leq my_{t2} \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn3} \leq my_{t3} \quad \forall t \quad (7)$$

$$WT_t = (y_{t1} + y_{t2} + y_{t3})w \quad \forall t \quad (8)$$

$$B_{tn} \leq B_{max} \quad \forall n, t \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^5 I_{tn} \leq I_{max} \quad \forall t \quad (10)$$

$$I_{6,n} = 0 \quad \forall n \quad (11)$$

$$I_{0,n} = 0 \quad \forall n \quad (12)$$

$$X_{0,n,j} = 0 \quad \forall n, j \quad (13)$$

$$I_{0,n}^+ = 0 \quad \forall n \quad (14)$$

$$I_{0,n}^- = 0 \quad \forall n \quad (15)$$

$$WT_0 = w \quad (16)$$

$$WT_0^+ = 0 \quad (17)$$

$$WT_0^- = 0 \quad (18)$$

$$\Delta_0^+ = 0 \quad (19)$$

$$\Delta_0^- = 0 \quad (20)$$

$$B_{0,n} = 0 \quad \forall n \quad (21)$$

$$y_{0,1} = 1 \quad (22)$$

$$y_{0,2} = 0 \quad (23)$$

$$y_{0,3} = 0 \quad (24)$$

$$X_{tnj}, I_{tn}^+, I_{tn}^-, WT_t, WT_t^+, WT_t^-, \Delta_{tn}^+, \Delta_{tn}^-, B_{tn} \geq 0 \quad \forall t, n, j \quad (25)$$

$$X_{tnj}, I_{tn}, I_{tn}^+, I_{tn}^-, WT_t, WT_t^+, WT_t^-, \Delta_{tn}^+, \Delta_{tn}^-, B_{tn} \in \mathbb{Z} \quad \forall t, n, j \quad (26)$$

به علت این که محدودیت‌ها در بخش قبل توضیح داده شدند، از توضیح مجدد آن‌ها در این بخش خودداری می‌کنیم.

۳.۳. پیاده‌سازی مدل در گمز^{۱۰}

در این بخش به توضیح کدی که در گمز زده شده است، می‌پردازیم:

¹⁰ GAMS

ابتدا سه مجموعه تعریف می‌کنیم:

```
sets
    t      periods      /t0,t1,t2,t3,t4,t5,t6/
    n      products     /n1,n2,n3,n4,n5/
    j      shifts       /j1,j2,j3/
;
```

تصویر ۱۸- تعریف مجموعه‌ها در گمز

سپس اعداد ثابتی که در مدل وجود دارند را تغییر می‌کنیم:

```
Scalars
    m Aggregated amount produced in a single shift in a period /2400000/
    e Hiring and Training cost /24000/
    e_prime Firing cost /120000/
    lambda Increase in production cost (per kg) /10000/
    omega Decrease in production cost (per kg) /15000/
    w fixed number of workers /24/
    I_max capacity of warehouse /10000000/
    B_max max amount of subcontract /300000/
;
```

تصویر ۱۹- تعریف اعداد اسکالر در گمز

مقدار m در این پروژه متفاوت از توضیحات پروژه در نظر گرفته شده است، چرا که مقدار $300,000kg$ در هر شیفت که معادل $26 \times 300,000 = 7,800,000kg$ تولید در یک ماه با تولید فقط در یک شیفت است که حتی مقدار تقاضا در دوره ششم را که پیشبینی کرده بودیم (برابر با ۷,۶۱۹,۷۳۷) پوشش می‌دهد و دیگر استفاده‌ای از نگهداری موجودی، برونسپاری و تولید در شیفت‌های دوم یا سوم نمی‌شود. همچنین به علت این که این مقدار تولید، یک مقدار اسمی است و در واقعیت به علت خرابی‌های متعددی که برای ماشین‌آلات به وجود می‌آید، مقدار تولید واقعی کمتر از این است، مقدار تولید در هر شیفت را به $\frac{1}{3}$ برابر مقدار اسمی کاهش می‌دهیم و برابر با $100,000kg$ در هر شیفت یا $2,600,000kg$ در هر ماه با تولید در یک شیفت در نظر می‌گیریم.

همچنین دو عدد دیگر I_{max} و B_{max} نیز اضافه شده‌اند که به ترتیب ماکسیمم مقدار موجودی است که می‌توانیم در انبار نگهداری کنیم و ماکسیمم مقدار برونسپاری است که می‌توانیم انجام دهیم.

```
table D(t,n) demand for product n in period t
      n1      n2      n3      n4      n5
t1    150819  1809827  754094  1357370  955186
t2    166374  1996482  831868  1497362  1053699
t3    181928  2183138  909641  1637353  1152212
t4    197483  2369794  987414  1777345  1250724
t5    213037  2556450  1065187  1917337  1349237
t6    228592  2743105  1142961  2057329  1447750
;
```

تصویر ۲۰- تعریف جدول تقاضای هر دوره برای هر محصول در جدول در گمز

در این جدول نیز مقدار تقاضا را به تفکیک هر محصول در هر ماه بدست میاوریم و وارد می‌کنیم.

حال به تعریف پارامترهای مدل می‌پردازیم:

```
Parameters
c(n)  cost of producing product n (per kg)
      /n1  171000,
      n2  168000,
      n3  160000,
      n4  155000,
      n5  147000/
h(n)  holding cost of product n
      /n1  51300,
      n2  50400,
      n3  48000,
      n4  46500,
      n5  44100/
pi(n)  shortage cost of product n
      /n1  56430,
      n2  55440,
      n3  52800,
      n4  51150,
      n5  48510/
b_cost(n)  subcontract cost of product n
      /n1  239400,
      n2  235200,
      n3  224000,
      n4  217000,
      n5  205800/
s(j)  Workers payment
      /j1  50000000,
      j2  52500000,
      j3  55000000/
;
```

تصویر ۲۱- تعریف پارامترها در گمز

در پارامترهای مدل، دو پارامتر جدید نسبت به مدلی که در فایل manual آمده است، تعریف شده:

۱. مقدار هزینه برون‌سپاری: این هزینه برای هر محصول، با ۴۰٪ افزایش قیمت در حالت تولید عادی در نظر گرفته شده‌است.

۲. مقدار هزینه حقوق کارگر: مقدار این پارامتر در مدل به ازای هر شیفت ثابت و برابر با 50,000,000 داده شده بود، اما برای شیفت دوم و سوم مقداری ضریب سختی کار در نظر گرفته شد و حقوق کارگران در شیفت دوم و سوم به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ اضافه شد. قابل توجه است که کارگران به صورت چرخشی کار خواهند کرد، یعنی کارگری که در این هفته در شیفت اول کار می‌کند، در هفته بعد به شیفت دوم منتقل می‌شود.

سپس به تعریف متغیرهای مسئله می‌پردازیم و با متغیر مربوط به تابع هدف شروع می‌کنیم.

```
variable
    Z
;
```

تصویر ۲۲- تعریف متغیر تابع هدف در گمز

متغیرهای عدد صحیح را تعریف می‌کنیم:

```
integer variables
(1)  X(t,n,j),
      I_plus(t,n),
      I_minus(t,n),
      I(t,n),
      WT(t),
      WT_plus(t),
      WT_minus(t),
      delta_plus(t,n),
      delta_minus(t,n),
      B(t,n);
(2)  X.up(t,n,j)=3000000;
      I_plus.up(t,n)=3000000;
      I.up(t,n)=3000000;
      I_minus.up(t,n)=3000000;
      WT.up(t)=72;
      WT_plus.up(t)=72;
      WT_minus.up(t)=72;
      delta_plus.up(t,n)=3000000;
      delta_minus.up(t,n)=3000000;
      B.up(t,n)=300000;
(3)  I.fx('t6',n)=0;
      X.fx('t0',n,j)=0;
      I.fx('t0',n)=0;
      I_plus.fx('t0',n)=0;
      I_minus.fx('t0',n)=0;
      WT_plus.fx('t0')=0;
      WT_minus.fx('t0')=0;
      WT.fx('t0')=w;
      delta_plus.fx('t0',n)=0;
      delta_minus.fx('t0',n)=0;
      B.fx('t0',n)=0
;
```

تصویر ۲۳- تعریف متغیرهای عدد صحیح در گمز

در بخش اول مشخص شده در عکس بالا، صرفاً متغیرها را تعریف می‌کنیم. در بخش دوم، با توجه به این که در نرم افزار گمز، حد بالای اعداد صحیح به صورت خودکار تا ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود، این مقدار را تغییر می‌دهیم تا جواب شدنی بدست آید. در بخش

سوم نیز محدودیت های مربوط به این که باید یک سری از متغیرها در دوره صفر، صفر باشند (اعم از میزان موجودی، میزان تولید و ...) اضافه می کنیم، به علاوه این که موجودی در دوره ششم نیز صفر است و تعداد کارگران در دوره صفر ۲۴ نفر است.

```
binary variables
    y(t,j);
    y.fx('t0','j1')=1;
    y.fx('t0','j2')=0;
    y.fx('t0','j3')=0
;
```

تصویر ۲۴- تعریف متغیرهای باینری در گمز

در این مرحله، متغیرهای باینری را تعریف می کنیم. تنها متغیر باینری استفاده شده، مربوط به شیفت هاست. همچنین این متغیر در دوره صفر فقط در حالت $j = 1$ برابر با یک است که به این معناست که یک شیفت داریم.

در ادامه محدودیت ها را وارد می نماییم:

```
equations
    obj                objective function
    InvProdBal(t,n)    Balance of inventory Production
    InvBal(t,n)         Balance of inventory
    ProdBal(t,n)        Balance of Production
    WorkerBal(t)         Balance of total workers
    ShiftProdU(t,j)     Upper bound of shift production
    ShiftProdL(t,j)     Lower bound of shift production
    ShiftProd3L(t)      Lower bound of third shift production
    TotalWorker(t)      Total Workers in period t
    SubCont(t,n)        Sub contract product
    Warehouse(t)        Capacity of warehouse

;

obj .. Z =e= SUM(t$(ord(t)<>1),SUM(n,c(n)*SUM(j,X(t,n,j)) + h(n)*I_plus(t,n)
+ pi(n)*I_minus(t,n) + lambda*delta_plus(t,n) + omega*delta_minus(t,n)
+ b_cost(n)*B(t,n) + SUM(j,y(t,j)*w*s(j)) + e*WT_plus(t) + e_prime*WT_minus(t));

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)*$(ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - D(t,n);
InvBal(t,n) .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n) .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))*$(ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t) .. WT(t)*$(ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t) .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t) .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n) .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t) .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;
```

تصویر ۲۵- تعریف محدودیت ها در گمز

محدودیت obj، برای تعریف تابع هدف است و مقدارش تنها برای دوره یک به بعد حساب شده است و دوره صفر دخیل نشده است. محدودیت InvProdBal همان تعادل مقدار تولید و موجودی است. محدودیت ProdBal برای تعادل میزان تولید است. محدودیت WorkerBal برای تعادل تعداد کارگران است. محدودیت ShiftProdU، برای حد بالای متغیرهای تعریف شیفت است که در ادامه آورده شده است:

$$\sum_{n=1}^5 X_{tn1} \leq my_{t1}$$

$$\sum_{n=1}^5 X_{tn2} \leq my_{t2}$$

$$\sum_{n=1}^5 X_{tn3} \leq my_{t3}$$

محدودیت ShiftProdL نیز برای تعریف حدپایین محدودیت‌های شیفت است:

$$my_{t2} \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn1}$$

$$my_{t3} \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn2}$$

هرچند برای محدودیت آخر حد پایین از محدودیت ShiftProd3L استفاده می‌کنیم که برابر با محدودیت زیر است:

$$0 \leq \sum_{n=1}^5 X_{tn3}$$

محدودیت TotalWorker برای کل تعداد کارگران هر دوره است که می‌تواند برابر با ۰، ۲۴، ۴۸ و یا ۷۲ باشد. محدودیت SubCont برای میزان مجموع برونسپاری است که می‌توانیم انجام دهیم. در نهایت، محدودیت Warehouse نیز برای ماکسیمم میزان موجودی است که می‌توانیم نگهداری کنیم.

در نهایت مدل را با MIP حل می‌کنیم و متغیرهای Z ، X ، I ، B ، y و WT را به عنوان خروجی می‌گیریم.

```
Model ProductionPlanningFinalProject /All/;
option limrow=100 , limcol=100 , optca=0 , optcr=0;
Solve ProductionPlanningFinalProject Using MIP minimizing Z;
Display Z.l,X.l,I.l,y.l,B.l,WT.l;
```

تصویر ۲۶- حل مدل در گمز با MIP

۳.۴. بررسی نتایج حاصل از حل مدل در گمز

در این بخش به بررسی مقادیر بدست آمده بهینه از حل مدل در گمز می‌پردازیم.

مقدار تابع هدف در حدود ۶۱ بیلیون ریال بدست می‌آید، مقدار دقیق آن برابر با 61,668,662,727,900 ریال است.

Proven optimal solution.

MIP Solution: 6166862727900.000000 (136 iterations, 0 nodes)
Final Solve: 6166862727900.000000 (0 iterations)

Best possible: 6166862727900.000000
Absolute gap: 0.000000
Relative gap: 0.000000

تصویر ۲۷- مقدار تابع هدف در حالت بهینگی

مقادیر تولید در هر شیفت به تفکیک محصول و دوره نیز به صورت زیر است:

جدول ۹- مقادیر تولیدی در هر شیفت به تفکیک محصول و دوره

	j1	j2	j3
t1.n1	150819		
t1.n2		1809827	
t1.n3		590173	163921
t1.n4	1293995		63375
t1.n5	955186		
t2.n1			166374
t2.n2		1996482	
t2.n3	428350	403518	
t2.n4	1497362		
t2.n5	474288		579411
t3.n1	69868		112060
t3.n2		2183138	
t3.n3	692779	216862	
t3.n4	1637353		
t3.n5			1152212

t4.n1	197483		
t4.n2		2369794	
t4.n3		30206	957208
t4.n4	951793		825552
t4.n5	1250724		
t5.n1	220814		
t5.n2		2400000	247425
t5.n3			1065187
t5.n4	829949		1087388
t5.n5	1349237		
t6.n1	220814		
t6.n2		2400000	247425
t6.n3			1065187
t6.n4	829949		1087388
t6.n5	1349237		

البته که می‌دانیم در S&OP باید حالت تجمیعی تولید را به ازای هر ماه و هر شیفت داشته باشیم و باید کل محصولات تولیدی را از طریق جمع بستن روی محصولات متفاوت بدست آوریم:

جدول 10 - مقدار تولید تجمیعی به تفکیک دوره و شیفت

	j1	j2	j3
t1	2400000	2400000	227296
t2	2400000	2400000	691471
t3	2400000	2400000	1264272

t4	2400000	2400000	1782760
t5	2400000	2400000	2400000
t6	2400000	2400000	2400000

مقدار موجودی نگهداری شده نیز به صورت زیر است:

جدول 11 - مقدار موجودی نگهداری شده

	n1	n2
t5	7777	90975

همانطور که معلوم است، تنها در دوره پنجم موجودی نگهداری می‌کنیم و در دیگر دوره‌ها اقدام به این کار نمی‌کنیم و برابر با صفر است.

همچنین همانطور که در مقدار تولید دیدیم، مقدار تولید در هر سه شیفت اتفاق می‌افتاد پس منطقی است که مقدار متغیر Y در تمامی دوره‌ها (جز دوره صفر که دره فعلی است و گفته شده است که تنها یک شیفت داریم) یک شود.

جدول 12 - تعداد شیفت‌ها در هر دوره

	j1	j2	j3
t0	1		
t1	1	1	1
t2	1	1	1
t3	1	1	1
t4	1	1	1
t5	1	1	1
t6	1	1	1

مقدار برونسپاری نیز به صورت زیر است:

جدول 13 - مقدار برونسپاری به تفکیک دوره و سایز محصول

	n1	n2	n3	n4	n5
t6	1	4705	77774	139992	98513

همانطور که در جدول آمده است، تنها در دوره ششم برونسپاری داریم و در دوره‌های دیگر تنها با تولید داخلی تقاضا را تامین می‌کنیم.

در نهایت برای تعداد کارگران نیز داریم:

جدول 14 - تعداد کارگران در هر دوره

	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6
Total Wrokers	24	72	72	72	72	72	72

به این علت که در هر دوره جز دوره فعلی، ۳ شیفت کارخانه در حال فعالیت است، باید حتما ۷۲ کارگر داشته باشیم.

۳.۵. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی

در این بخش، روی تعدادی از پارامترهای ورودی مسئله که حائز اهمیت هستند، تحلیل حساسیت انجام خواهیم داد، بدین شکل که مقادیر هر پارامتر، ۱۰ درصد بیشتر و کمتر خواهد شد و تاثیرش روی متغیرها و تابع هدف بررسی خواهد شد.

۳.۵.۱. تغییر تقاضای هر دوره

در این بخش مقدار تقاضای هر دوره به ازای هر محصول را ۱۰ درصد کمتر و بیشتر می‌کنیم و سپس تنها تغییراتی که نسبت به مدل اولیه ایجاد شده است را بررسی می‌کنیم.

ابتدا تحلیل حساسیت را با ۰.۱ کمتر از تقاضای اصلی بررسی می‌کنیم:

```

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)$ (ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - ROUND(0.9*D(t,n));
InvBal(t,n) .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n) .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))$ (ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t) .. WT(t)$ (ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t) .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t) .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n) .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t) .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;

```

تصویر ۲۸- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۰.۹ تقاضای اصلی

تغییرات به شکل زیر است:

• مقدار تابع هزینه (Z): 5,532,627,552,000

• مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1	135737		
t1.n2		1628844	

t1.n3	182963	495722	
t1.n4	1221633		
t1.n5	859667		
t2.n1		149737	
t2.n2		149737	
t2.n3	748681		
t2.n4	1347626		
t2.n5	303693	453429	191207
t3.n1		163735	
t3.n2		1964824	
t3.n3	818677		
t3.n4	1473618		
t3.n5	107705	271441	657845
t4.n1		177735	
t4.n2		2132815	
t4.n3	888673		
t4.n4	1511327		88284
t4.n5		89450	1036202
t5.n1	191733		
t5.n2		2300805	
t5.n3		99195	859473
t5.n4	993954		731649
t5.n5	1214313		

t6.n1	205733		
t6.n2		2400000	68795
t6.n3			1028665
t6.n4	891292		960304
t6.n5	1302975		

- مقدار نگهداری موجودی: در تمامی دوره ها صفر

----- 142 VARIABLE I.L

(ALL 0.000)

- شیفت های کاری:

	j1	j2	j3
t0	1		
t1	1	1	
t2	1	1	1
t3	1	1	1
t4	1	1	1
t5	1	1	1
t6	1	1	1

- مقدار برونسپاری: در تمامی دوره ها صفر

142 VARIABLE B.L

(ALL 0.000)

در مرحله بعدی، تقاضا را برای ۱۰ درصد بیشتر از وضعیت فعلی بررسی می‌کنیم.

```

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)$ (ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - ROUND(1.1*D(t,n));
InvBal(t,n) .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n) .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))$ (ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t) .. WT(t)$ (ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t) .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t) .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n) .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t) .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;

```

تصویر ۲۹- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۱.۱ تقاضای اصلی

تغییرات به شکل زیر است:

• مقدار تابع هزینه (Z): 6,864,413,013,100

• مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1		165901	
t1.n2		1990810	
t1.n3		243289	586214
t1.n4	1349295		143812
t1.n5	1050705		
t2.n1		183011	
t2.n2		2196130	
t2.n3	915055		
t2.n4	1484945		162153
t2.n5		20859	1138210
t3.n1	200121		
t3.n2		2400000	1452
t3.n3			1000605
t3.n4	891411		909677

t3.n5	1308468		
t4.n1	217231		
t4.n2		2400000	206773
t4.n3			1086155
t4.n4	848008		1107072
t4.n5	1334761		
t5.n1	217231		
t5.n2		2400000	317416
t5.n3			1017748
t5.n4	890244		1064836
t5.n5	1292525		
t6.n1	217231		
t6.n2		2400000	317416
t6.n3	890244		119522
t6.n4			1963062
t6.n5	1292525		

• مقدار نگهداری موجودی:

	n1
t5	41035

• شیفتهای کاری: تغییری نمی کند.

• مقدار برونسپاری:

	n1	n2	n3	n4	n5
t5	17110	94679	153958	153991	191636
t6	34220	300000	247491	300000	300000

۳.۵.۲. تغییر مقدار تولید هر شیفت

در این بخش مقدار تولید در هر شیفت را ۱۰ درصد کمتر و بیشتر می‌کنیم و سپس تنها تغییراتی که نسبت به مدل اولیه ایجاد شده است را بررسی می‌کنیم.

ابتدا تحلیل حساسیت را با ۰.۱ کمتر از مقدار تولید اصلی بررسی می‌کنیم:

Scalars

```

m Aggregated amount produced in a single shift in a period /2160000/
e Hiring and Training cost /24000/
e_prime Firing cost /120000/
lambda Increase in production cost (per kg) /10000/
omega Decrease in production cost (per kg) /15000/
w fixed number of workers /24/
I_max capacity of warehouse /1000000/
B_max max amount of subcontract /300000/
;
```

تصویر ۳۰- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۰.۹ مقدار تولید اصلی

تغییرات به شکل زیر است:

- مقدار تابع هزینه (Z): 6,252,159,224,400

- مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1		150819	
t1.n2		1809827	
t1.n3		199354	554740
t1.n4	1204814		152556
t1.n5	955186		
t2.n1		166374	
t2.n2	2856	1993626	

t2.n3	831868		
t2.n4	1325276		172086
t2.n5			1053699
t3.n1	181928		
t3.n2		2160000	23138
t3.n3			943129
t3.n4	776604		880765
t3.n5	1201468		
t4.n1	197483		
t4.n2		2160000	209794
t4.n3			953926
t4.n4	761049		996280
t4.n5	1201468		
t5.n1	197483		
t5.n2		2160000	283105
t5.n3			934333
t5.n4	814767		934333
t5.n5	1147750		
t6.n1	197483		
t6.n2		2160000	283105
t6.n3	814767		119566
t6.n4			1757329
t6.n5	1147750		

- مقدار نگهداری موجودی:

	n3	n4	n5
t3	33488	20016	49256

- شیفت‌های کاری: تغییری نمی‌کند.

- مقدار برونسپاری:

	n1	n2	n3	n4	n5
t5	15554	113345	130854	160008	201487
t6	31109	300000	208628	300000	300000

در مرحله بعدی، مقدار تولید در هر شیفت را برای ۱۰ درصد بیشتر از وضعیت فعلی بررسی می‌کنیم.

Scalars

```

m Aggregated amount produced in a single shift in a period /2640000/
e Hiring and Training cost /24000/
e_prime Firing cost /120000/
lambda Increase in production cost (per kg) /10000/
omega Decrease in production cost (per kg) /15000/
w fixed number of workers /24/
I_max capacity of warehouse /1000000/
B_max max amount of subcontract /300000/

```

تصویر ۳۱- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۱.۱ مقدار تولید اصلی

- مقدار تابع هزینه (Z): 6,144,990,149,000

- مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1	150819		
t1.n2		1809827	
t1.n3	176625	577469	

t1.n4	1357370		
t1.n5	955186		
t2.n1		166374	
t2.n2		1996482	
t2.n3	831868		
t2.n4	1497362		
t2.n5	310770	477144	265785
t3.n1		181928	
t3.n2		2183138	
t3.n3	909641		
t3.n4	1637353		
t3.n5	93006	274934	784272
t4.n1		197483	
t4.n2		2369794	
t4.n3	987414		
t4.n4	1652586		124759
t4.n5		72723	1178001
t5.n1	213037		
t5.n2		2556450	
t5.n3		83550	981637
t5.n4	1077726		839611
t5.n5	1349237		
t6.n1	228592		

t6.n2	2640000	103105	
t6.n3	1142961		
t6.n4	963658	1093671	
t6.n5	1447750		

- مقدار نگهداری موجودی: در تمامی دوره ها صفر

---- 142 VARIABLE I.L

(ALL 0.000)

- شیفت‌های کاری:

	j1	j2	j3
t0	1		
t1	1	1	
t2	1	1	1
t3	1	1	1
t4	1	1	1
t5	1	1	1
t6	1	1	1

- مقدار برونسپاری: در تمامی دوره ها صفر

142 VARIABLE B.L

(ALL 0.000)

۳.۵.۳. تغییر قیمت تولید هر محصول

در این بخش قیمت تولید هر محصول را ۱۰ درصد کمتر و بیشتر می‌کنیم و سپس تنها تغییراتی که نسبت به مدل اولیه ایجاد شده است را بررسی می‌کنیم.

ابتدا تحلیل حساسیت را با ۰.۱ کمتر از قیمت تولید اصلی بررسی می‌کنیم:

```
obj .. Z =e= SUM(t$(ord(t)<>1),SUM(n,0.9*c(n))*SUM(j,X(t,n,j)) + n(n)*I_plus(t,n)
+ pi(n)*I_minus(t,n) + lambda*delta_plus(t,n) + omega*delta_minus(t,n)
+ b_cost(n)*B(t,n)) + SUM(j,y(t,j)*w*s(j)) + e*WT_plus(t) + e_prime*WT_minus(t));

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)*(ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - D(t,n);
InvBal(t,n) .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n) .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))*(ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t) .. WT(t)*(ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t) .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t) .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n) .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t) .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;
```

تصویر ۳۲- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۰.۹ هزینه تولید اصلی

تغییرات به شکل زیر است:

• مقدار تابع هزینه (Z): 5,567,061,027,44

• مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1	87444		63375
t1.n2		1809827	
t1.n3		590173	163921
t1.n4	1357370		
t1.n5	955186		
t2.n1			166374
t2.n2		1996482	
t2.n3	428350	403518	
t2.n4	1497362		
t2.n5	474288		579411
t3.n1	69868		112060
t3.n2		2183138	
t3.n3	692779	216862	

t3.n4	1637353		
t3.n5			1152212
t4.n1	197483		
t4.n2		2369794	
t4.n3		30206	957208
t4.n4	951793		825552
t4.n5	1250724		
t5.n1	220814		
t5.n2		2400000	247425
t5.n3			1065187
t5.n4	829949		1087388
t5.n5	1349237		
t6.n1	220814		
t6.n2		2400000	247425
t6.n3			1065187
t6.n4	829949		1087388
t6.n5	1349237		

- مقدار نگهداری موجودی: تغییری نمی‌کند.

- شیفت‌های کاری: تغییری نمی‌کند.

- مقدار برونسپاری: تغییری نمی‌کند.

در مرحله بعدی، هزینه تولید در هر شیفت را برای ۱۰ درصد بیشتر از وضعیت فعلی بررسی می‌کنیم.


```

obj .. Z =e= SUM(t$(ord(t)<>1),SUM(n,1.1*c(n))*SUM(j,X(t,n,j)) + h(n)*I_plus(t,n)
+ pi(n)*I_minus(t,n) + lambda*delta_plus(t,n) + omega*delta_minus(t,n)
+ b_cost(n)*B(t,n)) + SUM(j,y(t,j)*w*s(j)) + e*WT_plus(t) + e_prime*WT_minus(t));

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)$(ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - D(t,n);
InvBal(t,n) .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n) .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))$(ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t) .. WT(t)$(ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j) .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t) .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t) .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n) .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t) .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;

```

تصویر ۳۳- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۱.۱ هزینه تولید اصلی

• مقدار تابع هزینه (Z): 6,766,657,428,200

• مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت:

	j1	j2	j3
t1.n1		590173	163921
t1.n2	1357370		
t1.n3	955186		
t1.n4			166374
t1.n5		1996482	
t2.n1	428350	403518	
t2.n2	1497362		
t2.n3	474288		579411
t2.n4	69868		112060
t2.n5		2183138	
t3.n1	692779	216862	
t3.n2	1637353		
t3.n3			1152212
t3.n4	197483		

t3.n5		2369794	
t4.n1		30206	957208
t4.n2	951793		825552
t4.n3	1250724		
t4.n4	220814		
t4.n5		2400000	247425
t5.n1			1065187
t5.n2	829949		1087388
t5.n3	1349237		
t5.n4	220814		
t5.n5		2400000	247425
t6.n1			1065187
t6.n2	829949		1087388
t6.n3	1349237		
t6.n4		590173	163921
t6.n5	1357370		

- مقدار نگهداری موجودی: تغییری نمی‌کند.

- شیفتهای کاری: تغییری نمی‌کند.

- مقدار برونسپاری: تغییری نمی‌کند.

۳.۵.۴. تغییر قیمت نگهداری هر محصول

در این بخش قیمت نگهداری هر محصول را ۱۰ درصد کمتر و بیشتر می‌کنیم و سپس تنها تغییراتی که نسبت به مدل اولیه ایجاد شده است را بررسی می‌کنیم.

ابتدا تحلیل حساسیت را با ۰.۱ کمتر از قیمت نگهداری اصلی بررسی می‌کنیم:

```

obj      ..  Z =e= SUM(t$(ord(t)<>1),SUM(n,c(n)*SUM(j,X(t,n,j)) + 0.9*h(n)*I_plus(t,n)
+ pi(n)*I_minus(t,n) + lambda*delta_plus(t,n) + omega*delta_minus(t,n)
+ b_cost(n)*B(t,n)) + SUM(j,y(t,j)*w*s(j)) + e*WT_plus(t) + e_prime*WT_minus(t));

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)$ (ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - ROUND(0.9*D(t,n));
InvBal(t,n)      .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n)     .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))$(ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t)     .. WT(t)$ (ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j)  .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j)  .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t)   .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t)   .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n)     .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t)     .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;

```

تصویر ۳۴- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۰.۹ هزینه نگهداری اصلی

تغییرات به شکل زیر است:

- مقدار تابع هزینه (Z): 6,166,364,317,890

- مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت: تغییری نمی‌کند.

- مقدار نگهداری موجودی: تغییری نمی‌کند.

- شیفت‌های کاری: تغییری نمی‌کند.

- مقدار برونسپاری: تغییری نمی‌کند.

در مرحله بعدی، هزینه تولید در هر شیفت را برای ۱۰ درصد بیشتر از وضعیت فعلی بررسی می‌کنیم.

```

obj      ..  Z =e= SUM(t$(ord(t)<>1),SUM(n,1.1*c(n))*SUM(j,X(t,n,j)) + h(n)*I_plus(t,n)
+ pi(n)*I_minus(t,n) + lambda*delta_plus(t,n) + omega*delta_minus(t,n)
+ b_cost(n)*B(t,n)) + SUM(j,y(t,j)*w*s(j)) + e*WT_plus(t) + e_prime*WT_minus(t));

InvProdBal(t,n) .. I(t,n) =e= I(t-1,n)$ (ord(t)<>1) + B(t,n) + SUM(j,X(t,n,j)) - D(t,n);
InvBal(t,n)      .. I(t,n) =e= I_plus(t,n) - I_minus(t,n);
ProdBal(t,n)     .. SUM(j,X(t,n,j)) =e= SUM(j,X(t-1,n,j))$(ord(t)<>1) + delta_plus(t,n) - delta_minus(t,n);
WorkerBal(t)     .. WT(t)$ (ord(t)<>1) =e= WT(t-1) + WT_plus(t) - WT_minus(t);
ShiftProdU(t,j)  .. SUM(n,X(t,n,j)) =l= m*y(t,j);
ShiftProdL(t,j)  .. SUM(n,X(t,n,j)) =g= m*y(t,j+1);
ShiftProd3L(t)   .. SUM(n,X(t,n,'j3')) =g= 0;
TotalWorker(t)   .. WT(t) =e= w*(SUM(j,y(t,j)));
SubCont(t,n)     .. B(t,n) =l= B_max;
Warehouse(t)     .. SUM(n,I(t,n)) =l= I_max;

```

تصویر ۳۵- تغییر ایجاد شده در مدل برای ۱.۱ هزینه نگهداری اصلی

- مقدار تابع هزینه (Z): 6,167,361,137,910

- مقدار تولید هر محصول در هر دوره در هر شیفت: تغییری نمی‌کند.

- مقدار نگهداری موجودی: تغییری نمی‌کند.

- شیفت‌های کاری: تغییری نمی‌کند.

- مقدار برونسپاری: تغییری نمی‌کند.

۴. سربرنامه تولید برای هر محصول

ارائه سربرنامه تولید^{۱۱} مرحله بعدی در برنامه ریزی تولید است و فرض می‌کند که منابع مناسب برنامه‌ریزی شده‌است، همانطور که معمولاً در برنامه فروش و عملیات انجام می‌شود. معمولاً حاوی جزئیات بیشتری نسبت به S&OP است، اما افق زمانی معمولاً کوتاه‌تر از S&OP است.

یکی دیگر از تمایزهای مهم بین برنامه‌زمانی اصلی^{۱۲} و S&OP این است که در حالی که S&OP معمولاً از نظر خانواده محصول برنامه‌ریزی می‌شود، برنامه اصلی، اغلب محصولات نهایی و قابل فروش را نشان می‌دهد. در نتیجه، برنامه اصلی بخش مهمی از فرآیند برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد، به طوری که معمولاً به عنوان "رابط" اصلی بین سیستم تولید و مشتریان خارجی عمل می‌کند.

در حالی که برخی از شرکت‌ها، به‌ویژه شرکت‌های کوچک یا شرکت‌هایی که در درجه اول یک سرویس خالص ارائه می‌کنند، یک برنامه زمانی اصلی ندارند، می‌توان گفت که هر شرکتی یک برنامه دارد. حتی اگر به صورت غیررسمی انجام شود، هر شرکتی باید روشی برای قول دادن به سفارشات مشتری و تبدیل نیازهای سفارش مشتری به برنامه تولید داشته باشد.

S&OP منابع مناسبی را در کل جمع بندی می‌کند، اما تنها از داده‌های پیش‌بینی کل به عنوان ورودی تقاضا استفاده می‌کند. در حالی که S&OP عملکرد بسیار مهمی در برنامه ریزی برای نیازهای منابع بلند مدت دارد، معمولاً هیچ ورودی از سفارشات واقعی مشتری وجود ندارد و برنامه ریزی معمولاً در سطح محصول نهایی انجام نمی‌شود. در نتیجه، نیاز به برنامه‌ریزی اضافی با جزئیات بیشتر اما برای افق زمانی کوتاه‌تر است که به شرکت اجازه می‌دهد:

- اطلاعات جمع‌آوری شده در S&OP را به اطلاعاتی که بیشتر برای محصولات قابل ساخت متمرکز است، تجزیه می‌کند.
- به عنوان طرحی عمل می‌کند که از سفارشات واقعی مشتری علاوه بر داده‌های پیش‌بینی استفاده می‌کند.
- به عنوان منبعی از اطلاعات برای توسعه ظرفیت‌ها و برنامه‌های منابع بسیار خاص تر عمل می‌کند.
- به عنوان یک ابزار مؤثر برای برنامه‌ریزی سطوح موجودی، به ویژه در سطح کالاهای نهایی عمل می‌کند.

۴.۱. محاسبه اندازه انباشه اقتصادی^{۱۳} تولیدی هر محصول

برای بدست آوردن سربرنامه تولید نیاز داریم تا اندازه انباشه اقتصادی هر کدام از محصولاتمان را بدست آوریم. با توجه به این که باید سیکل مشترک تولید را محاسبه کنیم، باید از فرمول زیر برای محاسبه زمان یک بار تولید از تمامی محصولات استفاده کنیم:

$$T^* = \sqrt{\frac{2 \sum_j A_j}{\sum_j H_j D_j \left(1 - \frac{D_j}{P_j}\right)}}$$

¹¹ Master Production Planning (MPS)

¹² Master Planning (MS)

¹³ Economical Lot Size

$$T_{min} = \frac{\sum_j S_j}{1 - \sum_j \frac{D_j}{P_j}}, \quad T = \max\{T_{min}, T^*\}$$

که پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

پارامترها

A_j	هزینه هر بار راه اندازی محصول j
H_j	مقدار هزینه نگهداری محصول j در هر سال
D_j	مقدار تقاضای محصول j در هر سال
P_j	نرخ تولید محصول j در سال
S_j	مدت زمان راه اندازی برای محصول j در سال

البته می‌توانیم برای این که T^* بدست آمده بر حسب ماه باشد، پارامترهای بالا را بر حسب ماه بنویسیم.

همچنین شرط امکان پذیری تولید این است که:

$$\sum_j \frac{D_j}{P_j} \leq 1$$

در گام بعد، هرکدام از پارامترها را بدست می‌آوریم.

از پارامتر تقاضا شروع می‌کنیم؛ با توجه به این که مقدار تقاضای هر ماه را برای شش دوره آینده پیشبینی کرده‌ایم، مقدار D_j ماهانه هر محصول را از طریق میانگین گرفتن از مقدار پیشبینی تقاضای کل شش ماه آینده و سپس ضرب آن در درصد فروش هر محصول بدست می‌آوریم:

$$\bar{D} = \frac{5027296 + 5545784 + 6064272 + 6582760 + 7101249 + 7619737}{6} = 6323516.33$$

$$D_1 = 6323516.33 \times 0.03 = 189705$$

$$D_2 = 6323516.33 \times 0.36 = 2276466$$

$$D_3 = 6323516.33 \times 0.15 = 948527$$

$$D_4 = 6323516.33 \times 0.27 = 1707349$$

$$D_5 = 6323516.33 \times 0.19 = 1201468$$

همچنین برای P ، ظرفیت تولید کارخانه در یک شیفت در یک ماه برابر با 2400000 کیلوگرم می‌باشد که با توجه به این که سه شیفت داریم، مقدار ظرفیت مجاز کارخانه برابر با $3 \times 2400000 = 7200000$ می‌شود. به همین دلیل در هر ماه:

$$P = 7,200,000$$

علاوه بر این، باید مقدار هزینه نگهداری را نیز در هر ماه برای هر محصول بدست آوریم:

$$H_1 = \frac{615600}{12} = 51300$$

$$H_2 = \frac{604800}{12} = 50400$$

$$H_3 = \frac{576000}{12} = 48000$$

$$H_4 = \frac{558000}{12} = 46500$$

$$H_5 = \frac{529000}{12} = 44100$$

و طبق اطلاعات مسئله، هزینه هر بار راه اندازی برابر است با:

$$A_1 = 53290440000, \quad A_2 = 52355520000, \quad A_3 = 49862400000,$$

$$A_4 = 48304200000, \quad A_5 = 45811080000$$

حال شرط امکان پذیری تولید را چک می کنیم:

$$\sum_{j=1}^5 \frac{D_j}{P_j} = \frac{189705 + 2276466 + 948527 + 1707349 + 1201468}{7200000} = 87.82\% \leq 1 \rightarrow \text{امکان پذیر است}$$

و مقدار سیکل مشترک برابر خواهد بود با:

$$T^* = \sqrt{\frac{2 \sum_j A_j}{\sum_j H_j D_j \left(1 - \frac{D_j}{P_j}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \times (53290440000 + \dots + 45811080000)}{51300 \times 189705 \left(1 - \frac{189705}{7200000}\right) + \dots + 44100 \times 1201468 \left(1 - \frac{1201468}{7200000}\right)}} = 1.4663 \text{ month}$$

که برابر است با $1.4663 \times 30 = 44$ روز.

و برای T_{min} با فرض این که مدت زمان راه اندازی تمامی ماشین ها برابر ۷ ساعت است داریم:

$$T_{min} = \frac{5 \times \frac{7}{26 \times 8}}{1 - 0.8782} = 1.38227 \rightarrow T = \max\{T_{min}, T^*\} = 1.4663$$

به این ترتیب مقدار انباشته اقتصادی هر محصول با فرمول $Q_j^* = D_j \times T^*$ بدست می آید.

$$Q_1^* = 189705 \times 1.4663 = 278,184$$

$$Q_2^* = 2276466 \times 1.4663 = 3,338,205$$

$$Q_3^* = 948527 \times 1.4663 = 1,390,919$$

$$Q_4^* = 1707349 \times 1.4663 = 2,503,654$$

$$Q_5^* = 1201468 \times 1.4663 = 1,761,830$$

تمامی اطلاعات به صورت خلاصه در جدول بعد آمده است:

جدول 15 - مقدار انباشته اقتصادی تولید هر محصول

	size 14	size 16	size 18	size 20	size 25
A	53,290,440,000	52,355,520,000	49,862,400,000	48,304,200,000	45,811,080,000
D (per month)	189,705	2,276,466	948,527	1,707,349	1,201,468
P (per month)	7,200,000	7,200,000	7,200,000	7,200,000	7,200,000
H (per month)	51,300	50,400	48,000	46,500	44,100
Lot Size	278,184	3,338,205	1,390,919	2,503,654	1,761,830

۴.۲. محاسبه جدول سربرنامه اصلی

حال که می‌دانیم میزان انباشته اقتصادی تولید هر محصول چقدر است، سربرنامه تولید را برای هر محصول بدست می‌آوریم.

از فرضیات این بخش که در خود پروژه اصلی نیامده است می‌توانیم به سفارشات مشتری و حصار زمان تقاضا^{۱۴} و همچنین موجودی احتیاطی^{۱۵} اشاره کرد. حصار زمان تقاضا برای تمامی محصولات برابر با شش هفته در نظر گرفته شده است. همچنین برای سفارشات مشتری از تابع $f(t) = \frac{a}{t^{0.2}}$ استفاده می‌کنیم به طوری که پارامتر a برابر است با عدد رندومی بین ۰.۸ تا ۱.۲ ضربدر مقدار پیشبینی فروش در دوره اول. از آنجایی که مقادیر پیشبینی که بدست آورده بودیم به صورت ماهانه بود و در این بخش به تقاضای هفتگی نیاز داریم، مقدار تقاضا را در هر ماه تقسیم بر چهار می‌کنیم. و در نهایت موجودی احتیاطی برای هر محصول را ۵٪ میزان تقاضای میانگینش در ۶ ماه آتی در نظر می‌گیریم:

جدول 16 - مقادیر موجودی احتیاطی به ازای هر محصول

	size 14	size 16	size 18	size 20	size 25
D	189,705	2,276,466	948,527	1,707,349	1,201,468
SS	9,485	113,823	47,426	85,367	60,073

¹⁴ Demand Time Fence

¹⁵ Safety Stock

حال MS را برای هر یک از محصولات بدست می‌آوریم:

جدول 17 - سربرنامه اصلی برای میلگرد سایز ۱۴

Week	Demand Time Fence						Planning Time Fence																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Forecast	37,705	37,705	37,705	37,705	41,593.38	41,593.38	41,593.38	41,593.38	45,482	45,482	45,482	45,482	49,770.7	49,770.7	49,770.7	53,259.37	53,259.37	53,259.37	53,259.37	57,148.03	57,148.03	57,148.03	57,148.03	57,148.03
Demand	33,542	29,200	26,926	25,420	24,311	23,440	22,729	22,130	21,614	21,164	20,764	20,406	20,082	19,786	19,515	19,265	19,033	18,816	18,614	18,424	18,245	18,076	17,916	17,764
Projected Available Balance	244,642	215,442	188,516	163,096	138,785	115,345	73,751	32,158	264,860	219,378	173,896	128,414	79,043	29,672	258,486	209,115	155,856	102,596	49,337	274,261	217,113	159,965	102,817	45,669
ATP	70,486								154,368						182,941				187,758					
MPS	278,184								278,184						278,184				278,184					

جدول 18 - سربرنامه اصلی برای میلگرد سایز ۱۶

Week	Demand Time Fence						Planning Time Fence																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Forecast	452,457	452,457	452,457	452,457	499120.56	499120.56	499120.56	499120.56	545,784	545,784	545,784	545,784	592448.4	592448.4	592448.4	639112.41	639112.41	639112.41	685776.33	685776.33	685776.33	685776.33	685776.33	685776.33
Demand	402,507	350,402	323,109	305,043	291,729	281,283	272,743	265,555	259,373	253,965	249,169	244,871	240,982	237,437	234,183	231,179	228,393	225,797	223,369	221,089	218,942	216,914	214,995	213,172
Projected Available Balance	2,935,698	2,585,296	2,262,187	1,957,144	1,665,415	1,384,133	885,012	385,892	3,178,312	2,632,528	2,086,743	1,540,959	948,510	356,062	3,101,818	2,509,370	1,870,258	1,231,145	592,033	3,291,125	2,605,349	1,919,373	1,233,796	548,020
ATP	845,534							1,852,409							2,195,284					2,253,992				
MPS	3,338,205	-	-	-	-	-	-	3,338,205	-	-	-	-	-	-	3,338,205	-	-	-	3,338,205	-	-	-	-	-

جدول 19 - سربرنامه اصلی برای میلگرد سایز ۱۸

Week	Demand Time Fence						Planning Time Fence																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Forecast	188,524	188,524	188,524	188,524	207966.9	207966.9	207966.9	207966.9	227,410	227,410	227,410	227,410	248833.5	248833.5	248833.5	266296.8375	266296.8375	266296.8375	285740.1375	285740.1375	285740.1375	285740.1375	285740.1375	285740.1375
Demand	167,711	146,001	134,629	127,101	121,554	117,201	113,643	110,648	106,072	105,819	103,821	102,029	100,409	98,932	97,576	96,325	95,164	94,082	93,070	92,120	91,226	90,381	89,581	88,822
Projected Available Balance	1,223,208	1,077,207	942,578	815,477	693,923	576,722	368,755	160,788	1,324,297	1,096,887	869,477	642,067	395,213	148,360	1,292,425	1,045,572	779,275	512,978	246,681	1,371,303	1,085,563	799,823	514,083	228,343
ATP	352,431							771,837							914,702				938,789					
MPS	1,390,919	-	-	-	-	-	-	1,390,919	-	-	-	-	-	-	1,390,919	-	-	-	1,390,919	-	-	-	-	-

جدول 20 - سربرنامه اصلی برای میلگرد سایز ۲۰

Week	Demand Time Fence						Planning Time Fence																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Forecast	339,342	339,342	339,342	339,342	374340.42	374340.42	374340.42	374340.42	409,338	409,338	409,338	409,338	444336.3	444336.3	444336.3	444336.3	479334.3075	479334.3075	479334.3075	479334.3075	514332.2475	514332.2475	514332.2475	514332.2475
Demand	301,880	262,802	242,332	228,782	218,797	210,962	204,557	199,167	194,530	190,473	186,877	183,653	180,736	178,077	175,637	173,385	171,295	169,348	167,527	165,817	164,207	162,686	161,246	159,879
Projected Available Balance	2,201,774	1,938,972	1,696,641	1,467,858	1,249,062	1,038,309	663,739	289,419	2,383,735	1,974,796	1,565,058	1,155,720	711,383	267,047	2,326,345	1,882,028	1,402,694	923,360	444,025	2,468,345	1,954,013	1,439,681	925,348	411,016
ATP	634,376							1,389,307							1,646,603				1,689,820					
MPS	2,903,654	-	-	-	-	-	-	2,903,654	-	-	-	-	-	-	2,903,654	-	-	-	2,903,654	-	-	-	-	-

جدول 21 - سربرنامه اصلی برای میلگرد سایز ۲۵

Week	Demand Time Fence						Planning Time Fence																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Forecast	238,797	238,797	238,797	238,797	263424.74	263424.74	263424.74	263424.74	288,053	288,053	288,053	288,053	312681.1	312681.1	312681.1	312681.1	337309.3275	337309.3275	337309.3275	337309.3275	371433.2475	371433.2475	371433.2475	371433.2475
Demand	212,434	184,935	170,530	160,995	153,968	148,455	143,948	140,154	136,891	134,037	131,506	129,237	127,185	125,314	123,596	122,011	120,541	119,171	117,889	116,686	115,553	114,483	113,469	112,508
Projected Available Balance	1,549,397	1,364,462	1,193,933	1,032,938	878,970	730,515	467,090	203,666	1,677,444	1,389,391	1,101,338	813,285	500,604	187,923	1,637,073	1,324,392	987,082	649,773	312,464	1,736,985	1,222,653	708,321	193,988	1,441,487
ATP	446,413							977,661							1,158,623				1,189,133					1,649,323
MPS	1,761,831	-	-	-	-	-	-	1,761,831	-	-	-	-	-	-	1,761,831	-	-	-	1,761,831	-	-	-	-	-

توجه نمایید که مقادیری که در سطر MPS آمده است، مجموع تولید در هر سه شیفت می‌باشد.

۵. برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز^{۱۶}

برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، یک سیستم اطلاعاتی مبتنی بر رایانه است که الزامات محصول نهایی برنامه اصلی را به نیازهای مرحله‌ای برای زیرمحصولات و مواد خام ترجمه می‌کند و از تاریخ مقرر با استفاده از زمان تدارک^{۱۷} و اطلاعات دیگری برای تعیین زمان و مقدار سفارش، رو به عقب کار می‌کند.

از این رو، الزامات برای اقلام نهایی، نیازمندی‌هایی را برای اجزای سطح پایین‌تر ایجاد می‌کند که بر اساس دوره‌های برنامه‌ریزی (به عنوان مثال، هفته‌ها) تجزیه می‌شوند، به طوری که می‌توان سفارش، ساخت، و مونتاژ را برای تکمیل به موقع اقلام نهایی برنامه‌ریزی کرد در حالی که سطح موجودی نسبتاً کم حفظ می‌شود.

¹⁶ Material Requierment Planning (MRP)

¹⁷ Lead Time

۵.۱. برنامه ریزی مواد مورد نیاز بر اساس پارامترهای برنامه اصلی

در این بخش باید جدول MRP را برای هر یک از محصولاتمان بدست آوریم و بعد از آن مقدار شمش تجمیعی مورد نیاز را محاسبه نماییم. توجه شود که نسبت شمش به میلگرد یک به یک است، یعنی حدودا از یک کیلوگرم شمش، یک کیلوگرم میلگرد بدست می‌آید. در نهایت در نظر داشته باشید که برای محصول نهایی، زمان تدارک برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین به میزان عدد رندوم بین ۰.۲ تا ۰.۵ ضریب مقدار انباشته، مقدار موجوی اولیه برای هر محصول در نظر گرفته شده‌است.

با توجه به این موضوع و این که لیدتایم MRP را ۸ هفته در نظر گرفته‌ایم، جداول MRP را برای محصولات نهایی تشکیل می‌دهیم:

جدول 22- MRP برای میلگرد سایز ۱۴

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		278,184	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.									
POH	74,331	74,331	74,331	74,331	74,331	74,331	74,331	74,331	74,331
Net Req.		203,853							
Planned Order Rec.		278,184							

جدول 23- MRP برای میلگرد سایز ۱۶

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		3,338,205	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.									
POH	891,975	891,975	891,975	891,975	891,975	891,975	891,975	891,975	891,975
Net Req.		2,446,230							
Planned Order Rec.		3,338,205							

جدول 24 - MRP برای میلگرد سایز ۱۸

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		1,390,919	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.									
POH	371,656	371,656	371,656	371,656	371,656	371,656	371,656	371,656	371,656
Net Req.		1,019,263							
Planned Order Rec.		1,390,919							

جدول 25 - MRP برای میلگرد سایز ۲۰

[illegible]

Net Req.		1,834,672							
Planned Order Rec.		2,503,654							

جدول 26 - MRP برای میلگرد سایز ۲۵

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		1,761,831	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.									
POH	470,765	470,765	470,765	470,765	470,765	470,765	470,765	470,765	470,765
Net Req.		1,291,066							
Planned Order Rec.		1,761,831							

در نهایت باید MRP را برای شمش‌ها بدست آوریم. چون سایز میلگرد تفاوتی در نوع شمش ندارد، پس کل مقادیر سطر آخر MRP ها را جمع می‌کنیم و جدول MRP شمش را با سطر نیاز ناخالص^{۱۸} برابر با این مقدار می‌نویسیم. همچنین شایان توجه است که مقدار زمان تدارک برابر با ۳ هفته و مقدار موجودی احتیاطی نیز 500,000 در نظر گرفته شده است. همچنین اندازه انباشته شمش‌ها نیز 1,000,000 می‌باشد. مقدار موجودی اولیه 5,000,000 کیلوگرمی نیز در انبار موجود بوده و برای بعضی هفته‌های آتی، سفارش تنظیم شده داریم. جدول MRP شمش فولاد را تحت شرایط ذکر شده می‌توانید در ادامه ببینید:

جدول 27 - MRP شمش فولاد

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		9,272,793	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.		6,000,000		4,000,000					
POH	5,000,000	1,727,207	1,727,207	5,727,207	5,727,207	5,727,207	5,727,207	5,727,207	5,727,207
Net Req.									
Planned Order Rec.									

که نشان از آن دارد که نیازی به سفارش در هفته‌های اولیه نداریم.

۵.۲. تحلیل حساسیت بر روی جداول برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز

در این بخش روی جداول MRP بخش قبل که بدست آوردیم می‌خواهیم تحلیل حساسیت انجام دهیم. توجه شود که اگر روی جداول محصول نهایی بخوایم تحلیل حساسیت کنیم، تنها می‌توانیم میزان موجودی اولیه را تغییر دهیم که در این صورت مقدار سفارشات برنامه‌ریزی شده^{۱۹} تغییری نمی‌کند و تنها مقدار موجودی در هفته‌های آتی تغییر می‌کند و برابر با مقدار موجودی اولیه خواهد بود. به همین دلیل از این تغییرات (به دلیل وضوح) خودداری شده است.

¹⁸ Gross Requirement

¹⁹ Planned Order Receipts

در عوض بر روی جدول زیر محصول شمش فولاد تغییراتی اعمال خواهیم کرد. در این جدول می‌توانیم مقدار موجودی اولیه و سفارشات از پیش تعیین شده^{۲۰} را تغییر دهیم.

۵.۲.۱. تغییر موجودی اولیه

اگر مقدار موجودی اولیه به 4,000,000 کیلوگرم کاهش پیدا کند، جدول به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		9,272,793	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.		6,000,000		4,000,000					
POH	4,000,000	727,207	727,207	4,727,207	4,727,207	4,727,207	4,727,207	4,727,207	4,727,207
Net Req.		272,793							
Planned Order Rec.									

که مشکلی در تامین نیاز به وجود نمی‌آید و باز هم نیازی به سفارش نیست، این در حالی است که اگر مقدار موجودی اولیه به 3,000,000 کیلوگرم کاهش پیدا کند، جدول محصول نهایی به صورت زیر تغییر می‌کند:

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		9,272,793	272,793	272,793	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.		6,000,000		4,000,000					
POH	3,000,000	-	-	3,727,207	3,727,207	3,727,207	3,727,207	3,727,207	3,727,207
Net Req.		272,793	272,793	-	-	-	-	-	-
Planned Order Rec.									

که در این حالت، به میزان 272,793 کیلوگرم تقاضای پاسخ داده نشده در هفته اول پیش می‌آید و چون نمی‌توانیم سفارش دهیم (چرا که زمان آماده‌سازی سه هفته است) مجبور می‌شویم دو راه حل پیش بگیریم:

- مشتریان را راضی کنیم که مقداری از سفارشات خود را دیرتر تحویل بگیرند، چرا که اگر شمش کم شود، محصولات نهایی نیز به موقع حاضر نخواهند شد، در این صورت سفارشات دو هفته دیرتر حاضر می‌شود.
- حالت دیگر این است که مقدار نیازی که نمی‌توانیم تامین کنیم را از یک تامین‌کننده‌ی دیگر تهیه کنیم.

۵.۲.۲. تغییر سفارشات از پیش تعیین شده

اگر سفارش هفته سوم لغو شود، تغییری در جدول رخ نمی‌دهد چرا که مقدار موجودی به کافی داریم:

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		9,272,793	-	-	-	-	-	-	-
Scheduled Rec.		6,000,000							
POH	5,000,000	1,727,207	1,727,207	1,727,207	1,727,207	1,727,207	1,727,207	1,727,207	1,727,207
Net Req.									
Planned Order Rec.									

اگر سفارش هفته اول لغو شود، مشکل زیر به وجود می‌آید:

²⁰ Scheduled Receipts

Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Gross Req.		9,272,793	4,272,793	4,272,793	272,793				
Scheduled Rec.				4,000,000					
POH	5,000,000	-	-	-	727,207	727,207	727,207	727,207	727,207
Net Req.		4,272,793	4,272,793	272,793	272,793				
Planned Order Rec.		1,000,000							

در این حالت به میزان 4,272,793 کیلوگرم شمش کم خواهیم داشت و سفارشات میلگردمان به تعویف خواهد افتاد، و این مشکل تا هفته چهارم ادامه پیدا خواهد کرد تا نهایتاً با سفارشی که در هفته اول برنامه‌ریزی کردیم، مشکل حل شود. برای این که سفارشاتمان پس‌افت شود، باید با مشتریان صحبت کنیم تا راضی شوند میلگردها را دیرتر تحویل بگیرند. راه دیگر این است که کلاً به میزان ذکر شده، از تامین‌کننده دیگر تامین کنیم.

۶. برنامه‌ریزی ظرفیت^{۲۱}

تقریباً تمام برنامه‌ریزی‌هایی که تا این لحظه مورد بحث قرار گرفته است، بر تولید محصولات از عملیات‌های مختلف متمرکز بوده است. برای برخی از این روش‌ها مثل برنامه‌ریزی مواد اولیه، این موضوع که اگر برنامه‌ریزی مناسبی داشته باشیم حتماً تولید به مقدار مناسب رخ می‌دهد، پیش‌فرض در نظر گرفته شده است.

اگر برنامه‌ریزی‌های اضافی به موازات توسعه برنامه‌های خاص انجام شده باشد، احتمالاً این بیانیه درست است. برنامه‌ریزی درست و اساسی این است که اطمینان حاصل شود که مقادیر مناسبی از ظرفیت مناسب برای اجرای برنامه‌های تولید به درستی در دسترس است.

در نظر داشته باشید که چندین سطح از برنامه‌ریزی برای تولید وجود دارد (به عنوان مثال، برنامه‌ریزی کسب‌وکار، برنامه‌ریزی فروش و عملیات، برنامه‌ریزی اصلی، برنامه‌ریزی مواد اولیه) که در هر کدام به سطوح مختلفی از جزئیات در مواد و زمان نگاه می‌شود، برنامه‌ریزی ظرفیت نیز همین‌طور است.

در این بخش با توجه به عملیات‌های مختلفی که برای تبدیل شمش به میلگرد در توضیح پروژه آمده است، سعی شده است با استفاده از روش Capacity Bills، برنامه‌ریزی ظرفیت انجام شود و امکان یا عدم امکان تولید سنجیده شود.

برای تبدیل شمش به میلگرد، سه عملیات در توضیحات آمده است که در ابتدا شمش از کوره عبور می‌کند، سپس مرحله رافینگ روی آن انجام می‌شود و در آخر استنت‌ها میلگرد را به سائز مد نظر تبدیل می‌کنند. این بخش‌های کاری به صورت زیر تعریف شده‌اند:

جدول 28 - تعریف بخش‌های کاری

بخش کاری	اختصار
Stant	100
roughing	200
furnace	300

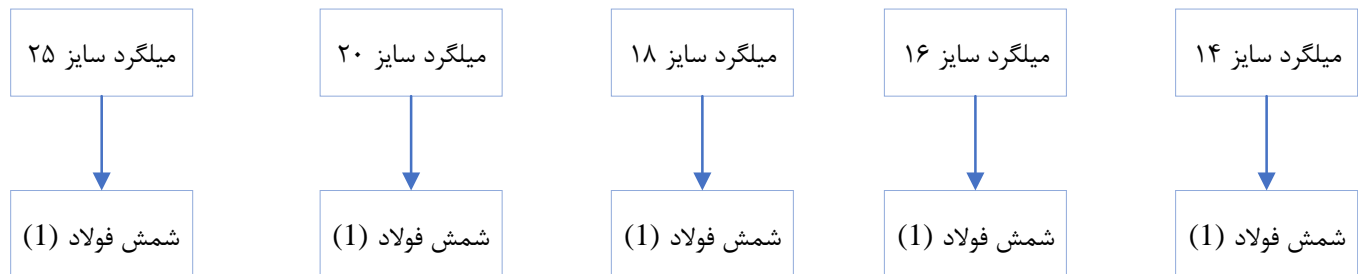
²¹ Capacity Planning

همچنین محصولات و زیر محصولات نیز به صورت زیر تعریف شده است:

جدول 29 - تعریف محصولات و زیر محصولات

نام محصول	اختصار
میلگرد سایز ۱۴	A14
میلگرد سایز ۱۶	A16
میلگرد سایز ۱۸	A18
میلگرد سایز ۲۰	A20
میلگرد سایز ۲۵	A25
شمش	B

و درخت محصولات نیز به شکل زیر است:



به جدول اطلاعات مسیر^{۲۲} زیر توجه کنید:

جدول 30 - اطلاعات مسیر تولید میلگرد

Product/Part	Lot Size	Work Center	Operation	Setup Hours	SU hrs per unit	Run time per unit	Total run time
A14	278,184	100	1 of 1	10	0.00003595	0.00002167	0.00005761
A16	3,338,205	100	1 of 1	9	0.00000270	0.00002167	0.00002436
A18	1,390,919	100	1 of 1	8	0.00000575	0.00002167	0.00002742
A20	2,503,654	100	1 of 1	7	0.00000280	0.00002167	0.00002446
A25	1,761,830	100	1 of 1	6	0.00000341	0.00002167	0.00002507
B	1,000,000	200	1 of 2	20	0.00002000	0.00004333	0.00006333
B	1,000,000	300	2 of 2	24	0.00002400	0.00002167	0.00004567

ساعت راه اندازی میلگردها با توجه به تعداد استنتها داده شده است که هرچقدر سایز میلگرد کمتر شود، تعداد استنتها بیشتر می شود و ساعت راه اندازی بیشتر می شود. همچنین در بخش برنامه ریزی فروش و عملیات فرض کرده بودیم که در یک ماه با ۳

²² Routing Information

شیفت کار، 7,200,000 کیلوگرم می‌توانیم تولید داشته باشیم. به عبارتی هر کیلوگرم میلگرد می‌تواند در $\frac{26 \times 7 \times 3}{7,200,000}$ 0.0000758 ساعت تولید شود. با توجه به این نکته و این که برای تولید یک کیلوگرم محصول نهایی، باید ۳ عملیات انجام شود، این مقدار 0.0000758 را باید بین این سه بخش تقسیم کنیم، به طوری که به عملیات ۳۰۰ و ۱۰۰، یک چهارم این مدت زمان و به عملیات ۲۰۰ نصف آن می‌رسد.

با توجه به درخت محصولات، مقدار ساعت استاندارد تولید هر محصول به شکل زیر خواهد بود:

جدول 31 - ساعت استاندارد تولید محصولات در هر ایستگاه کاری

Work Center	Product A14	Product A16	Product A18	Product A20	Product A25
100	0.00005491	0.00002165	0.00002471	0.00002175	0.00002236
200	0.00005792	0.00005792	0.00005792	0.00005792	0.00005792
300	0.00004296	0.00004296	0.00004296	0.00004296	0.00004296

و جدول تولیدات برنامه اصلی نیز به صورت زیر است:

جدول 32 - جدول تولیدات برنامه اصلی

Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Product A14	278,184	-	-	-	-	-	-	-	278,184	-	-	-	-	-	278,184	-	-	-	-	278,184	-	-	-	-	-
Product A16	3,338,205	-	-	-	-	-	-	-	3,338,205	-	-	-	-	-	3,338,205	-	-	-	-	3,338,205	-	-	-	-	-
Product A18	1,390,919	-	-	-	-	-	-	-	1,390,919	-	-	-	-	-	1,390,919	-	-	-	-	1,390,919	-	-	-	-	-
Product A20	2,503,654	-	-	-	-	-	-	-	2,503,654	-	-	-	-	-	2,503,654	-	-	-	-	2,503,654	-	-	-	-	-
Product A25	1,761,831	-	-	-	-	-	-	-	1,761,831	-	-	-	-	-	1,761,831	-	-	-	-	1,761,831	-	-	-	-	1,761,831

بدین شکل، نیازمندی ظرفیت هر بخش کاری به صورت زیر خواهد بود:

جدول 33 - نیازمندی ظرفیت هر بخش کاری در ۲۴ هفته آتی

Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Work Center 100	216	0	0	0	0	0	0	0	216	0	0	0	0	0	216	0	0	0	0	216	0	0	0	39
Work Center 200	537	0	0	0	0	0	0	0	537	0	0	0	0	0	537	0	0	0	0	537	0	0	0	102
Work Center 300	398	0	0	0	0	0	0	0	398	0	0	0	0	0	398	0	0	0	0	398	0	0	0	76

که همانطور که پیداست، با توجه به این که در هفته $126 = 3 \times 7 \times 6$ ساعت مفید کاری داریم، جوابگوی مقدار ظرفیت مورد نیاز نیست و چون که از ۳ شیفت کاری استفاده می‌کنیم، چاره‌ای جز برون‌سپاری مقادیر بیش از ۱۲۶ ساعت را نداریم.