



3. OPTIMIZACIJA PRI UPRAVLJANJU OSKRBOVALNE VERIGE



V poglavju so predstavljena najpomembnejša vprašanja, povezana z upravljanjem zalog. Poseben poudarek je na analizi logističnih podatkov, za katero se lahko uporabi preglednica. Tu boste našli:

- koncept optimizacije v logistiki,
- vloga skladišča v oskrbovalni verigi,
- določitev skladiščnega prostora,
- izbrane metode upravljanja zalog v oskrbovalni verigi,
- orodje Solver.

3.1. Uvod

Optimizacija logistike je proces iskanja najučinkovitejšega načina za organizacijo pretoka blaga, informacij in virov v celotni oskrbovalni verigi, od začetne do končne točke, ob hkratnem zagotavljanju visoke kakovosti in izpolnjevanju zahtev strank (Reszka, 2012). Cilj optimizacije v logistiki je izboljšati različne vidike dejavnosti, kot so (Antoniuk et al., 2021; Gupta et al., 2022):

- skrajšanje časa pretoka blaga,
- optimizacija stroškov transporta, skladiščenja in rokovanja,
- izboljšanje kakovosti logističnih storitev,
- večja prožnost in odzivnost na spremembe v povpraševanju,
- zmanjšanje ravni zalog ob hkratnem zagotavljanju neprekinjene oskrbe,
- boljše upravljanje skladiščnega prostora in transportnih sredstev,
- integracijo in avtomatizacijo logističnih procesov.

Modeli **logistične optimizacije** se uporabljajo v skladu z (Smyk, 2023): (1) oblikovanje distribucijskega omrežja (določitev lokacij distribucijskih centrov) - opisano v



poglavju Optimizacija logističnega omrežja, (2) oblikovanje transportnih sistemov (optimizacija transportnih nalog, minimizacija praznih voženj, določitev oskrbovalnih poti) - opisano v poglavju Optimizacija transporta, (3) upravljanje zalog (razporeditev zalog, ocenjevanje njihove velikosti, določanje časovnih razporedov naročil) - opisano v poglavju o analitiki v oskrbi in nabavi ter v nadaljevanju v podpoglavju Izbrane metode upravljanja zalog v oskrbovalni verigi, (4) načrtovanje in upravljanje skladiščnih dejavnosti (maksimiranje učinkovitosti skladiščnega prostora) - opisano v podpoglavju Določanje skladiščnega prostora.

V okviru optimizacijskih modelov obstaja veliko metod optimizacije, pri čemer glavna klasifikacija teh metod temelji na vrsti optimizacijske naloge, ki jo je treba rešiti. V skladu z (Jayarathna et al., 2021; Kusiak et al., 2021) lahko razlikujemo naslednje metode optimizacije:

- vrsta problema, ki se rešuje: metode linearnega programiranja, nelinearne metode optimizacije,
- omejitve: metode optimizacije brez omejitev, metode optimizacije z omejitvami,
- razsežnost problema (število optimizacijskih spremenljivk): univariatne metode, multivariatne metode (več optimizacijskih spremenljivk),
- merila za optimizacijo: metode z enim merilom; metode z več merili (več meril za optimizacijo).

V logistiki se pogosto upošteva število meril, optimizacijske naloge pa se oblikujejo kot enokriterijske ali večkriterijske. V praksi se običajno rešujejo enokriterijske optimizacijske naloge, predvsem zaradi preprostosti modelov in enostavne uporabe. Naloge optimizacije z več merili zahtevajo zapletene modele, kar pogosto privede do situacij, ko lahko optimalna rešitev v skladu z enim merilom negativno vpliva na rezultat, usklajen s ciljem drugega merila. Posledično je pri večkriterijskih rešitvah treba oblikovati kompromis med različnimi ciljnimi funkcijami, kar otežuje določitev nedvoumno najboljših optimalnih rešitev (Smyk, 2023). Zato je pri iskanju delnih meril in ciljev za optimizacijo logističnih nalog pomembno zagotoviti, da so (Silva et al., 2005):

- popolno (vpliva na določen problem odločanja),
- ni redundanten,
- minimizirati (s ciljem zmanjšati velikost problema odločanja),



- operativni (merljivi),
- razlikovanje rešitev (kar omogoča določitev najboljše - optimalne rešitve).

Pri poslovnih dejavnostih je ključnega pomena, da je merilo optimizacije jasno opredeljeno, model optimizacije pa mora ustrezati temeljni naravi analiziranega problema (Smyk, 2023). To merilo se imenuje ciljna funkcija in se izbere v okviru sprejete odločitve ali v začetni fazi logističnega načrtovanja. Ta funkcija služi kot merilo za oceno kakovosti rešitve, pri čemer je optimalna rešitev dosežena, ko funkcija zajame ekstrem (minimum ali maksimum) (Gupta et al., 2022).

3.2. Vloga skladišča v oskrbovalni verigi

V sodobnem logističnem sistemu se vsaka manipulacija z materialom temeljito preveri že v fazi načrtovanja. Tudi manjše spremembe blaga na kratkih razdaljah, ki se običajno zgodijo znotraj stavbe ali med objektom in transportnim posrednikom, začenjajo igrati zelo pomembno vlogo. Skladišče je namenjeno skladiščenju materialnih dobrin na določenem prostoru skladiščne stavbe, v skladu z uveljavljeno tehnologijo, opremljeno z ustreznimi napravami in tehničnimi sredstvi, ki ga upravlja in oskrbuje ekipa ljudi, opremljenih s potrebnimi znanji (Miszewski, 2019.). Najboljša možna razporeditev blaga na določenem prostoru omogoča popolnejšo izrabo omejenih zmogljivosti objekta in zmanjšuje število manipulacij z določeno zalogo (Ghiani, 2004; Muller, 2002).

V okviru oskrbovalne verige ima skladišče izjemno pomembno vlogo, saj je ključno središče za usklajevanje in skladiščenje blaga, kar je bistveno za zagotavljanje nemotenega pretoka izdelkov od proizvajalcev do potrošnikov. Njegovo delovanje je temeljnega pomena za učinkovito upravljanje zalog, saj omogoča zmanjšanje tveganja pomanjkanja in presežkov ter tako ohranja ravnovesje med povpraševanjem in ponudbo. Poleg tega ima skladišče pomembno vlogo v procesu nadzora kakovosti, saj ponuja možnost preverjanja in priprave izdelkov za nadaljnjo distribucijo ter zagotavlja njihovo skladnost s standardi in pričakovanji kupcev. Uvedba sodobnih **sistemov za upravljanje skladišč (WMS)** prispeva k znatni optimizaciji logističnih procesov, kar posledično povečuje operativno učinkovitost in omogoča zmanjšanje operativnih stroškov. Ne nazadnje so skladišča izjemno pomembna pri prilagajanju oskrbovalne verige dinamično

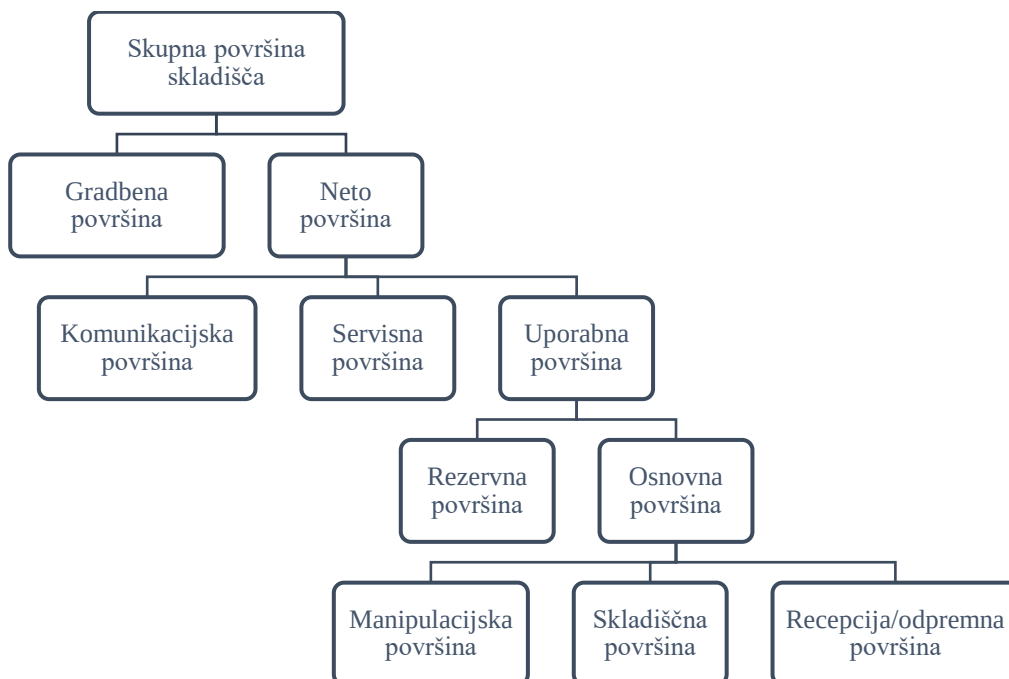


spreminjajočim se tržnim razmeram, saj organizacijam omogočajo hiter odziv na razvoj povpraševanja in spreminjajoče se preference potrošnikov, kar je ključno za ohranjanje konkurenčnosti na trgu (Gu et al., 2007; Ramaa et al., 2012)).

3.3. Določanje skladiščnega prostora

Osnovne zahteve pri skladiščenju vključujejo prejetje **zalogovnih** enot (SKU) od dobaviteljev, skladiščenje SKU, sprejetje naročil od strank, pobiranje SKU in njihovo sestavljanje za pošiljanje ter pošiljanje izpolnjenih naročil strankam. Načrtovanje in upravljanje skladišča, ki izpolnjuje te zahteve, vključuje veliko vprašanj. Sredstva, kot so prostor, delovna sila in oprema, je treba razporediti med različne funkcije skladišča, vsako funkcijo pa je treba skrbno izvajati, upravljati in usklajevati, da se izpolnijo systemske zahteve glede zmogljivosti, prepustnosti in storitev ob najmanjših stroških virov. Skladiščenje se ukvarja z organizacijo blaga v skladišču, da se doseže visoka izkoriščenost prostora in omogoči učinkovit transport materiala (Gu et al., 2007).

Funkcijo skladiščenja oblikujejo tri osnovne odločitve: koliko zaloge določene SKU je treba hraniti v skladišču; kako pogosto in ob katerem času je treba zalogo SKU dopolniti; in kje v skladišču je treba SKU hraniti, distribuirati in premikati med različnimi skladiščnimi območji. Prvi dve vprašanji vodita do vprašanj, povezanih z velikostjo serije, in težav, ki spadajo na tradicionalno področje kontrole zalog (Hariga in Jackson, 1996). Dve glavni merili za sprejetje odločitev o razporeditvi na območja skladiščenja sta učinkovitost skladiščenja, ki ustreza zmogljivosti skladiščenja, in učinkovitost dostopa, ki ustreza virom, porabljenim za prodajo in izpolnjevanje naročil (Gu et al., 2007).



Slika 3.1. Delitev skladiščnega prostora

Vir: (Dudziński in Kizyn, 2002)

Pri izračunu skladiščnega prostora je treba upoštevati njegove različne vrste (slika 3.1). V podjetju je uporabna površina razdeljena na območja, ki ustrezajo fazam skladiščnega procesa: sprejem, skladiščenje (kratkoročno in dolgoročno), sprejemanje naročil, odprema ter manipulacijski in pomožni prostor. Velikost in oblika skladišča sta odvisni od naslednjih spremenljivk:

- vrste, število in dimenzije delovnih mest, na katerih se izvajajo skladiščne dejavnosti na območju sprejema in odpreme,
- dimenzije in količine polj za shranjevanje na območju za shranjevanje,
- dimenzije in količine površin za odlaganje,
- parametre vrstic polic in število stolpcev v vrsticah,
- širino delovnega hodnika za izbrani viličar,
- širino komunikacijskih poti za opremo in osebje

Skupno površino skladišča S lahko izrazimo z naslednjo formulo



$$S = f_s + f(p) = f_s + f_w + f(d) + f_a$$

kjer:

f_s - območje shranjevanja,

f_p - pomožno območje,

f_w - območje, namenjeno za sprejem, sortiranje in odpremo materiala,

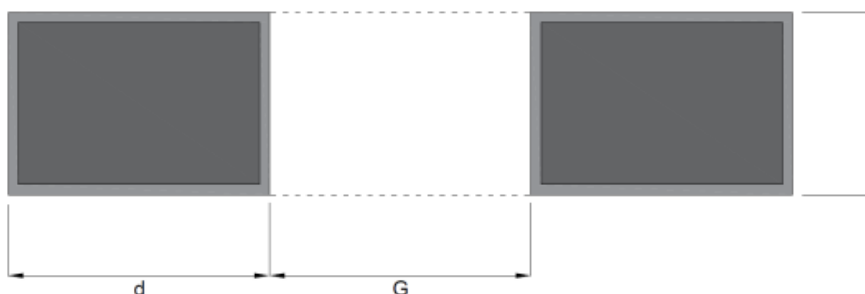
f_d - površina, ki jo zasedajo prehodi in dovozi,

f_a upravno in socialno področje.



Formula, uporabljena v Excelu:

**S = [skladiščni prostor] + [pomožni prostor] = [skladiščni prostor]
+ [prostor, namenjen sprejemu, sortiranju in odpremi materiala]
+ [prostor, ki ga zasedajo prehodi in dovozi] + [upravni in socialni
prostor]**



Slika 3.2. Skladiščni modul za skladiščenje v vrstah brez opreme s pravokotno razporeditvijo palet LU

Vir: lastna študija

Del skladiščnega prostora, ki vključuje vodoravno projekcijo najmanjšega ponovljivega dela dveh vrst ali blokov nakladalnih enot (NJ), skupaj s prostimi prostori za skladiščenje in manipulacijsko potjo med njimi, je skladiščni modul. S to velikostjo lahko ocenimo velikost skladiščnega območja. Skladiščni moduli za skladiščenje v vrstah brez opreme so lahko razporejeni na dva načina (sliki 3.2 in 3.3)



Slika 3.3. Skladiščni modul za skladiščenje v vrstah brez opreme z vzporedno razporeditvijo paletnih GVŽ

Vir: lastna študija

Površina skladiščnega modula za skladiščenje v vrstah brez opreme se izračuna s formulo:

$$M = (2 \times d + G) \times l$$

kjer:

d - širina območja odlaganja [m],

G - širina manipulacijske poti [m],

l - dolžina skladiščnega polja [m].

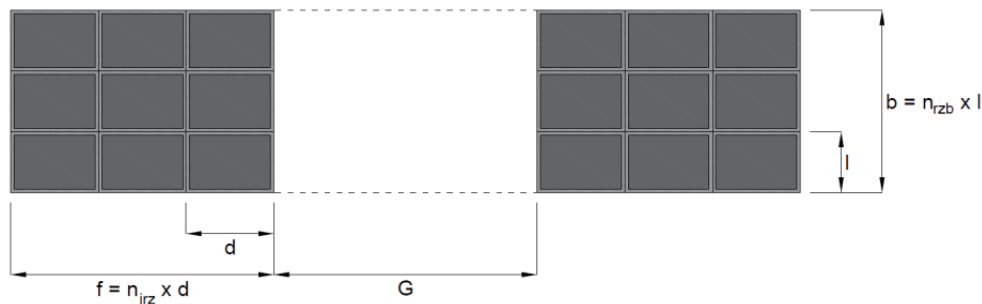
Zmogljivost modula je enaka 2 paletnim tovarnim enotam za enonivojsko skladiščenje in $2 \times n$ paletnim tovarnim enotam za skladiščenje v nizu, če je skladiščenje na n nivojih.



Formula, uporabljena v Excelu:

$$M = (2 * [\text{širina odlagalnega polja}] + [\text{širina manipulacijske poti}]) * [\text{dolžina polja za shranjevanje}]$$

Skladiščni moduli za skladiščenje blokov brez opreme so lahko razporejeni, kot je prikazano na sliki 3.4.



Slika 3.4. Skladiščni modul za skladiščenje blokov brez opreme

Vir: lastna študija

Površina skladiščnega modula za skladiščenje blokov brez opreme se izračuna po formuli:

$$Mb = (2 \times f + G) \times b = (2 \times n_{LUz} \times d + G) \times n_{LUb} \times l$$

kjer:

f - širina bloka [m],

G - širina manipulacijske poti [m],

b - dolžina bloka [m],

n_{LUz} - število nakladalnih enot v vrsti bloka,

d - širina območja skladiščenja [m],

n_{LUb} - število vrstic v bloku,

l - dolžina polja za shranjevanje [m].

Zmogljivost modula je enaka $2 \times n_{LUz} \times n_{(LUb)}$ paletnih tovornih enot za enonivojsko skladiščenje in $2 \times n_{LUz} \times n_{LUb} \times n$ paletnih tovornih enot za skladiščenje v nizu, če je skladiščenje v n nivojih.



Formula, uporabljena v Excelu:

$$Mb = (2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina poti obdelave}]) \\ * [\text{dolžina bloka}]$$



Poleg tega je mogoče prostornino izračunati za module za skladiščenje, pri čemer se upošteva višina nakladalne enote ali če so nakladalne enote zložene na kup. **Prostornina skladiščnega modula** (zmogljivost modula) je odvisna od njegove površine (Mb) in višine, na kateri je bila oblikovana nakladalna enota (h). Prostornina modula se izračuna po formuli:

$$V_M = [(2 \times f + G) \times b] \times h$$

$$h = n_{rh} \times h_0 + h_p$$

kjer:

f - širina bloka [m],

G - širina manipulacijske poti [m],

b - dolžina bloka [m],

h - visoke paletirane tovarne enote [m],

n_{rh} - število slojev na paletizirano enoto tovara,

h_0 - višina skupne embalaže [m],

h_p - višina medija [m].

Prvi del formule je formula za površino modula, drugi del pa je višina oblikovane nakladalne enote.



Formula, uporabljena v Excelu:

$$V_M = \{(2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina poti obdelave}]) * [\text{dolžina bloka}]\} * [\text{visoke paletirane enote tovara}]$$

Prostornina skladiščnega modula (zmogljivost modula) je odvisna od njegove površine (Mb) in višine, do katere je bila oblikovana tovarna enota (H). Prostornina modula se izračuna po formuli:

$$V_M = [(2 \times f + G) \times b] \times H$$

$$H = n \times h = n \times (n_{rh} \times h_0 + h_p)$$

kjer:



f - širina bloka [m],
 G - širina manipulacijske poti [m],
 b - dolžina bloka [m],
 H - višina bloka [m],
 n - število zbranih enot,
 h - višina paletnih tovornih enot [m],
 n_{th} - število slojev na paletirano enoto tovora,
 h_0 - višina skupne embalaže [m],
 h_p - višina medija [m].



Formula, uporabljena v Excelu:

$$V_M = \{(2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina poti obdelave}]) * [\text{dolžina bloka}]\} * [\text{višina bloka}]$$

Izkoriščenost skladiščnega prostora se ocenjuje z razmerjem med uporabljeno površino in celotno razpoložljivo površino. V skladiščih, kjer se ne uporabljajo paletni regali, je najvišja vrednost tega kazalnika zagotovljena s skladiščenjem materiala v blokovski postavitvi, pri čemer so vrednosti izkoriščenosti prostora od 0,6 do 0,8. Za primerjavo, ta kazalnik za skladiščenje v vrstah znaša od 0,25 do 0,6. Prizadevanje za optimalno izkoriščenost prostora pri tej vrsti skladiščenja povzroča omejitve pri pogojih za zlaganje materialov in pomanjkanje dostopa do asortimenta, ki se nahaja na sredini blokov, ter je uporabno le za homogene asortimente, ne da bi zahtevalo dodatne finančne vložke za skladiščno opremo. V primerih, ko je edino merilo za ocenjevanje povečanje količine skladiščnega asortimenta, se kot dobra rešitev izkaže uporaba pretočnih paletnih regalov. Ti zagotavljajo visoko stopnjo izkoriščenosti zaradi omejitve števila transportnih poti, hkrati pa zahtevajo uporabo načela FIFO (First In, First Out). Največja izkoriščenost razpoložljivega skladiščnega prostora je mogoča zaradi uporabe metode skladiščenja v prostem prostoru, ki predpostavlja, da je mogoče asortiment postaviti v katero koli prosto regalno režo (Kisielewski in Talarek, 2020).



3.4. Izbrane metode upravljanja zalog v oskrbovalni verigi

Upravljanje zalog v oskrbovalni verigi je ključni element, ki zagotavlja tekoče poslovanje, zmanjšanje stroškov in zadovoljstvo strank. Obstaja veliko metod upravljanja zalog, od katerih je vsaka lahko primerna glede na posebnosti panoge, značilnosti izdelkov, dinamiko povpraševanja in druge operativne dejavnike (Cyplik in Hadaś, 2012)

Klasični koncept upravljanja zalog omogoča upravljanje zalog v distribucijskem omrežju, kjer se zaloge običajno nahajajo na različnih mestih. Reševanje težav z zalogami na več lokacijah se osredotoča predvsem na analizo velikosti varnostnih zalog (Masclé in Gosse, 2014). Varnostna zaloga je odvisna od spremenljivosti povpraševanja v ciklu dopolnjevanja zalog, izražene kot standardni odklon povpraševanja v tem obdobju, in varnostnega faktorja, odvisnega od sprejete ravni storitev. Če je za različna mesta skladiščenja zalog sprejeta enaka raven storitev, je raven varnostne zaloge odvisna od variabilnosti povpraševanja, ki se oskrbuje z določenega mesta. V formulah se predpostavlja, da je bila na vseh tržnih servisnih mestih sprejeta enaka raven storitev ($\omega_{MR1} = \omega_{MR2} = \omega_{MR3} = \dots = \omega_{MC}$) in da je na vseh tržnih servisnih mestih sprejet enak sistem dopolnjevanja zalog (Cyplik in Hadaś, 2012).

Varnostna zaloga je odvisna od spremenljivosti povpraševanja v ciklu dopolnjevanja zalog, izražene s standardnim odklonom povpraševanja v tem obdobju, in varnostnega faktorja, odvisnega od sprejete ravni storitev. Če je za različna mesta skladiščenja zalog sprejeta enaka raven storitev, je raven varnostne zaloge odvisna od variabilnosti povpraševanja, ki se izvaja na določenem mestu. Težava ni izračun skupnega povpraševanja v primeru več točk lokacije povpraševanja (skupno povpraševanje je vsota povprečnih povpraševanj na vsaki lokaciji). Za izračun standardnega odklona vsote povpraševanj je treba uporabiti zakon kvadratnega korena, ki predpostavlja, da je standardni odklon vsote povpraševanj enak kvadratnemu korenu vsote njihovih standardnih odklonov. V nadaljevanju so navedene formule, ki omogočajo te izračune. Dobljeni rezultati bodo pravilni ob predpostavki, da so na vseh tržnih servisnih mestih sprejete enake ravni storitev ($\omega_{L1} = \omega_{L2} = \omega_{L3} = \dots = \omega$) in enaki sistemi dopolnjevanja zalog (Cyplik in Hadaś, 2012)

Formula za izračun varnostne zaloge:



$$S_{(S)w} = X \sigma_{DT}$$

Formula za izračun standardnega odklona vsote zahtev:

$$\sigma_{(D1+D2+D3+...Dn)} = \sqrt{\sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2 + \sigma_{D3}^2 + \dots + \sigma_{Dn}^2}$$

kjer:

n - število lokalizacij,

D_n - individualna vrednost povpraševanja v n -ih lokalizacijah.

Skupno varnostno zalogo za povpraševanje, ki se obravnava npr. iz centralnega skladišča, lahko izračunamo kot:

$$\begin{aligned} S_{ST} &= S_{(S(D1+D2+D3+...+Dn))w} = X \sigma_{(D1+D2+D3+...Dn)} = \\ &= X \sqrt{\sigma_{P1}^2 + \sigma_{P2}^2 + \sigma_{P3}^2 + \dots + \sigma_{Pn}^2} = \\ &= \sqrt{\omega^2 \times \sigma_{P1}^2 + \omega^2 \times \sigma_{P2}^2 + \omega^2 \times \sigma_{P3}^2 + \dots + \omega^2 \times \sigma_{Pn}^2} = \\ &= \sqrt{S_{SL1}^2 + S_{SL2}^2 + S_{SL3}^2 + \dots + S_{SLn}^2} \end{aligned}$$

kjer:

S_{ST} - skupna varnostna zaloga,

S_{SLn} - varnostna zaloga na lokaciji n .

V posebnem primeru, če je varnostna zaloga v vseh točkah na lokaciji enaka (običajno zaradi enakega povpraševanja, ki ga zadovoljuje vsaka od teh točk) in je enaka S_{STn} , potem je centralizirana zaloga S_{STD} enaka:

$$S_{STD} = S_{STn} \times \sqrt{n}$$

kjer je n število točk lokacije zaloge.



Formula, uporabljena v Excelu:

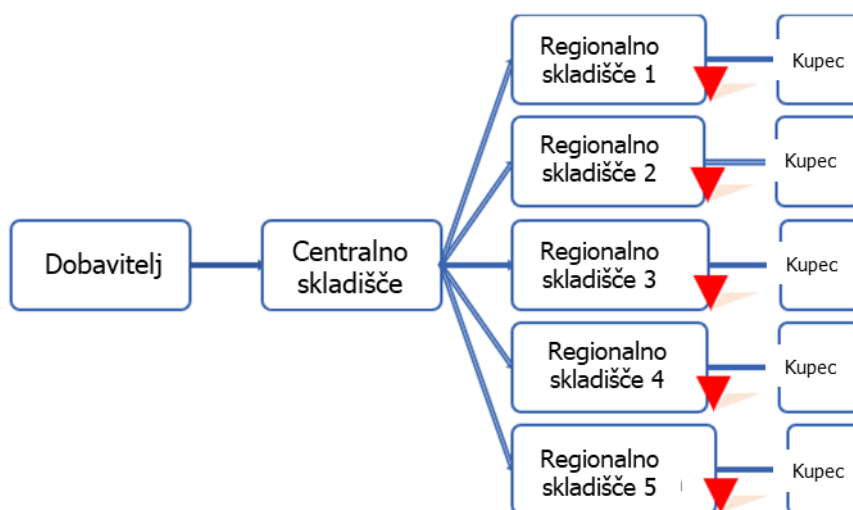
SST = [varnostni faktor] * [standardni odklon vsote povpraševanj v točkah D1-Dn v ciklu dopolnjevanja] = [varnostni faktor] * SQRT[(STDEV.P([obseg celic za D1])^2) + (STDEV.P([obseg celic za D2])^2) + ... + (STDEV.P([obseg celic za Dn])^2)]



Eno od vprašanj, ki jih je treba analizirati v okviru optimizacije oskrbovalne verige, je lokacija skladišč ob upoštevanju razmerja med pomembnimi parametri. Način lokacije skladišč lahko obravnavamo na dva načina: kot razpršeno ali centralizirano skladišče.

V primeru razpršene zaloge (slika 3.5) se stranke oskrbujejo neposredno iz zalog, ki so v regionalnih skladiščih (RS), kjer se vzdržujejo varnostne zaloge. Za namene izračuna so sprejete naslednje predpostavke (Krzyżaniak, 2006):

- povpraševanje je enakomerno porazdeljeno med n regionalnih skladišč,
- tedensko povpraševanje v vsakem od teh skladišč je mogoče opisati s porazdelitvijo s povprečnim povpraševanjem D_{RW} in standardnim odklonom σ_{DRW} ,
- nakupna cena pri dobavitelju je enaka P_i ,
- koeficient tedenskih stroškov vodenja zalog je u_i in je enak v vseh skladiščih,
- čas cikla dopolnjevanja v regionalnih skladiščih je enak za vsako skladišče in znaša T_1 (brez večjih odstopanj).



Slika 3.5. Ilustracija primera porazdeljenega popisa

Vir: (Krzyżaniak, 2006)



Ob upoštevanju predpostavk so skupni tedenski stroški vzdrževanja varnostnih zalog v omrežju enaki:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n HCSS_{RW}$$

Z enakomerno porazdelitvijo povpraševanja med vsa skladišča dobimo:

$$C_1 = n \times SS_{RW} \times P \times u_t = n \times \omega \times \sigma_{DRW} \times \sqrt{T_1} \times P \times u_t$$

kjer:

ω - varnostni faktor, ki je odvisen od izbrane ravni storitve in vrste porazdelitve, ki opisuje dano frekvenčno porazdelitev povpraševanja,

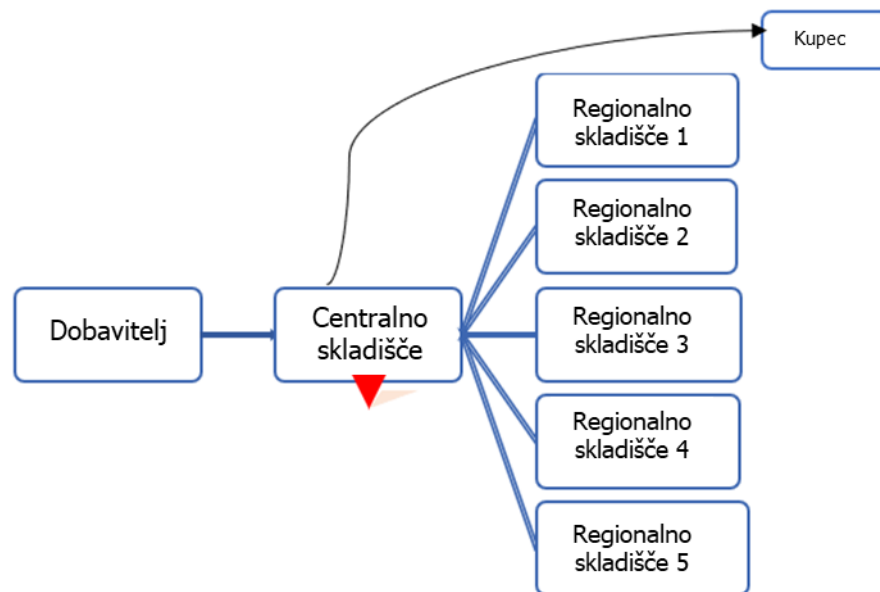
$SS_{(RW)}$ - varnostna zaloga v vsakem regionalnem skladišču.

Ker je $\sigma_{DRW} = V \times D_{RW}$, kjer je V koeficient variacije $V = \frac{\sigma_D}{D}$, ima formula obliko:

$$C_1 = n \times \omega \times V \times D_{RW} \times \sqrt{T_1} \times P \times u_t$$

V splošnem modelu centralizirane zaloge (slika 3.6) se stranke oskrbujejo iz centralnega skladišča (CW) z neposrednimi dobavami, na primer s kurirskimi pošiljkami. Za namene izračuna so sprejete naslednje predpostavke (Krzyżaniak, 2006):

- tedensko povpraševanje v osrednjem skladišču je vsota povpraševanj na trgih, povezanih s posameznimi regionalnimi skladišči, in ga je mogoče opisati s porazdelitvijo s povprečjem $D_{CW} = n \cdot D_{(RW)}$ in standardnim odklonom $\sigma_{DCW} = \sigma_{DRW} \times \sqrt{n}$ (v skladu z zakonom kvadratnega korena),
- je koeficient tedenskih stroškov vodenja zalog u_t enak kot pri regionalnih skladiščih,
- čas cikla dopolnjevanja v centralnem skladišču je T_2 ,
- v primeru povpraševanja strank se izdelek pošlje neposredno stranki v obliki kurirske pošiljke s stroški na enoto c_{cs} , kar omogoča ohranitev podobnega časa izpolnitve naročila stranke kot v primeru storitve iz regionalnih skladišč.



Slika 3.6. Prikaz primera centraliziranega popisa

Vir: (Krzyżaniak, 2006)

Tedenski stroški vzdrževanja varnostne zaloge v centralnem skladišču so enaki:

$$C_{2(SS)} = SS_{CW} \times P \times u_t = \omega \times \sigma_{DCW} \times \sqrt{T_2} \times P \times u_t.$$

Ker, kot je $T_2 = \alpha \times T_1$:

$$C_{2(SS)} = \omega \times \sigma_{DCW} \times \sqrt{\alpha \times T_1} \times P \times u_t = \omega \times \sigma_{DRW} \times \sqrt{n \times \alpha \times T_1} \times P \times u_t$$

Ker se zgodi $\sigma_{DRW} = V \times D_{RW}$, kjer je V tako imenovani koeficient variacije $V = \frac{\sigma_P}{D}$, potem ima vzorec obliko:

$$C_{2(SS)} = \omega \times V \times D_{RW} \times \sqrt{n \times \alpha \times T_1} \times P \times u_t$$

Opozoriti je treba, da predpostavka $T_2 = \alpha \times T_1$ upošteva različne rešitve za organizacijo dostave v obeh primerih. Na primer, v primeru razpršenih zalog se lahko dobave v regionalna skladišča izvajajo v skladu s sistemom rednega pregleda in v centraliziranem sistemu, ki temelji na tako imenovani točki ponovnega naročila (informacijski ravni). Predvideva se lahko, da se to običajno zgodi $T_{(2)} < T_{(1)}$.



Skupni tedenski neposredni stroški kurirske službe za stranko so enaki:

$$C_{2(supplies)} = n \times D_{RW} \times c_{cs}$$

Postavljanje vprašanja: Kdaj se splača razpršiti zaloge, torej kdaj bo ceneje vzdrževati varnostne zaloge v n regionalnih skladiščih in iz njih oskrbovati lokalne kupce kot koncentrirati zaloge v osrednjem skladišču in izpolnjevati naročila kupcev z neposrednimi dobavami, je odgovor na vprašanje rešitev neenakosti:

$$C_1 < C_{2(ss)} + C_{2(oskrba)}$$

to je:

$$n \times \omega \times V \times D_{RW} \times \sqrt{T_1} \times P \times u_t < \omega \times V \times D_{RW} \times \sqrt{n \times \alpha \times T_1} \times P \times u_t + n \times D_{RW} \times C_{cs}$$

Po pretvorbah dobimo::

$$V < \frac{n \times c_{cs}}{\omega \times \sqrt{T_1} \times P \times u_t \times (n - \sqrt{n \times \alpha})}$$

Iz te oblike dobimo odvisnosti, katerih izpolnitev zagotavlja izpolnitev neenakosti $C_1 < C_{2(ss)} + C_{2(supplies)}$ in postavljenega pogoja:

$$V < \frac{\left[\frac{c_{cs}}{P \times u_t} \right]}{\omega \times \sqrt{T_1} \times \left[1 - \sqrt{\frac{\alpha}{n}} \right]}$$

ali

$$\omega < \frac{\left[\frac{c_{cs}}{P \times u_t} \right]}{V \times \sqrt{T_1} \times \left[1 - \sqrt{\frac{\alpha}{n}} \right]}$$

Vendar je naslednje razmerje najbolj informativno, saj združuje vse stroškovne elemente v izrazu na levi strani neenakosti, na desni strani pa parametre, povezane z izvajanjem in zahtevano ravno storitev:

$$\left[\frac{c_{cs}}{P \times u_t} \right] > V \times \omega \times \sqrt{T_1} \times \left[1 - \sqrt{\frac{\alpha}{n}} \right]$$



Prednosti klasičnega koncepta upravljanja zalog so naslednje:

- preprostost in jasnost - enostavno jih je razumeti in izvajati,
- Pomoč pri zmanjševanju skupnih stroškov upravljanja zalog z uravnoteženjem stroškov naročanja in skladiščenja zalog s ciljem doseganja ekonomične količine naročila;
- jasni in opredeljeni procesi odločanja, ki pomagajo upravljati naročila in zaloge na podlagi izračunov in vnaprej določenih pravil.

Slabosti klasičnega koncepta upravljanja zalog so naslednje:

- potrebo po predpostavki o stalnem in predvidljivem povpraševanju, ki ne ustreza vedno dinamičnim in spremenljivim razmeram na trgu.
- ne upošteva spremenljivosti povpraševanja in tveganja v oskrbovalni verigi (npr. zamude pri dobavi, spremembe na trgu),
- pomanjkanje prožnosti pri odzivanju na hitre spremembe na trgu ali v oskrbovalni verigi, saj temeljijo na fiksni parametri in ne predvidevajo dinamičnega prilagajanja novim razmeram.

Klasični koncept upravljanja zalog ima svoje mesto v teoriji in praksi operativnega upravljanja, vendar ga v sodobnem, hitro spreminjajočem se poslovnem svetu pogosto dopolnjujejo naprednejše in prožnejše metode ter analitična orodja.

Načrtovanje distribucijskih potreb (**DRP**) usklajuje povpraševanje s stopnjami zalog na različnih lokacijah. Je ena od metod za optimizacijo upravljanja dobave končnih izdelkov v distribucijsko omrežje in se uporablja za načrtovanje ravni in lokacije skladiščenja zalog v celotni oskrbovalni verigi. Namen uporabe metode načrtovanja distribucijskega povpraševanja je zmanjšati zaloge v distribucijski mreži (Nugroho, 2019). Na ravni prodajnih mest se zaradi tveganja nihanja povpraševanja za vsak izdelek na vsakem od njih oblikuje varnostna zalog, ki se izračuna z uporabo formul iz klasične teorije upravljanja zalog (Magdalena in Suli, 2019).

Načrtovanje povpraševanja se začne na najnižji ravni (npr. na prodajnem mestu na drobno) in konča na najvišji ravni (npr. v tovarniškem skladišču). Potrebe na nižji ravni so vhodni podatki za naslednjo raven. Potrebe z najvišje ravni se lahko uporabijo kot vhodni



podatki za delo na proizvodnem načrtu (Fertsch, 2006). Potrebe iz distribucijskih centrov se uporabijo za izdelavo razporeda potreb po zalogah in se posredujejo v proizvodnjo. Po primerjavi s prejšnjimi napovedmi se izdelajo načrt proizvodnje, potrebe po materialu in distribucija z razporedom dostave v posamezne distribucijske centre (Ngatilah et al., 2020). Zahvaljujoč DRP se določi raven storitev za člene oskrbovalne verige, ki imajo neposreden stik s kupcem (velikost serije, razpoložljivost zalog, dobavni roki) (Fechner, 2007).

Sistem DRP omogoča ocenjevanje razporedov dobave za vsako enoto zaloge (SKU) na prodajna mesta. Za to je treba imeti naslednje informacije (Mukhsin & Sobirin, 2022):

- strukturo distribucijskega kanala, po katerem teče SKU,
- napovedovanje povpraševanja po posameznih kosih blaga na ravni prodajnega mesta,
- trenutna raven zaloge (zaloga na zalogi) za določeno SKU,
- ciljno raven varnostne zaloge,
- priporočeno količino za dopolnitev,
- čas dostave za obnovo



Algoritem DRP (Ngatilah et al., 2020):

1. Netting - predvidena zaloga na zalogi je zaloga na zalogi. Izračunamo jo lahko s spodnjo formulo:

$$\text{Predvideno na zalogi}_{(t)} = (\text{na zalogi}_{(t-1)} + \text{načrtovani prejem}_{(t)} + \text{Načrtovani prejem naročila}_{(t)} - \text{bruto potreba}_{(t)})$$

Neto zahtevo lahko izračunate s spodnjo formulo:

$$\text{Neto zahteva}_{(t)} = (\text{bruto zahteva}_{(t)} + \text{varnostna zaloga}) - (\text{načrtovani prejem}_{(t)} + \text{predvidena zaloga}_{(t-1)})$$

2. Lotiranje je postopek iskanja velikosti naročila ali proizvodne serije v vsaki omrežni distribuciji. Obstaja več metod lottinga. Lotting v DRP predstavlja načrt



prejema naročila (Porec). Načrtovani prejem naročila (Porec) je omrežna zahteva, ki je bila prilagojena glede na velikost lota naročila ali proizvodnje.

3. Izravnavo je količina naročila, ki jo je načrtovano naročiti v načrtovanem časovnem obdobju. Izravnavo v DRP predstavlja planska sprostitev naročila (Porel). Porel je Porec, ki je bil prilagojen glede na časovni potek naročila ali proizvodnje.

4. Eksplozija - skupne stroške zalog in distribucije je mogoče dobiti s spodnjo formulo:

$$\text{Skupni stroški zalog in distribucije} = \text{stroški naročanja} + \\ + \text{stroški skladiščenja} + \text{stroški dostave}$$

Model DRP je še posebej uporaben v velikih in kompleksnih organizacijah, kjer je upravljanje pretoka izdelkov skozi distribucijsko omrežje ključnega pomena za učinkovitost poslovanja in zadovoljstvo strank. Prednosti modela DRP so:

- izboljšano usklajevanje v dobavni verigi z boljšim pretokom informacij in blaga od proizvajalca do potrošnika, kar vodi k učinkovitejši distribuciji;
- večja natančnost napovedovanja, saj upošteva dejanske podatke o naročilih in ravni zalog v celotni verigi, kar pomaga optimizirati ravni zalog in zmanjšati stroške,
- izboljšano razpoložljivost izdelkov, saj zagotavlja, da so zaloge nameščene tam, kjer so najbolj potrebne, s čimer zmanjšuje tveganje pomanjkanja in izpadov proizvodnje.

Slabosti modela DRP so povezane z naslednjimi elementi.

- zapletenost izvajanja, zlasti v velikih organizacijah z obsežnimi dobavnimi verigami, ki zahteva natančno načrtovanje in usklajevanje,
- visoki začetni stroški, povezani z nakupom programske in strojne opreme ter usposabljanjem zaposlenih,



- odvisni od natančnosti in pravočasnosti vhodnih podatkov, lahko netočnosti v podatkih povzročijo napake pri napovedovanju in načrtovanju, kar lahko na koncu povzroči prevelike ali nezadostne zaloge.

Kljub svojim prednostim zahteva model DRP natančno izvajanje in stalno upravljanje, da učinkovito podpira operativne odločitve v dobavni verigi.

EOQ (Economic Order Quantity) je matematični model, ki se uporablja za določitev optimalne količine naročila, ki zmanjšuje skupne stroške, povezane z naročanjem in skladiščenjem zalog. Ta metoda je idealna za izdelke s stabilnim in predvidljivim povpraševanjem. Metoda temelji na naslednjih predpostavkah (Battani et al., 2015):

- mesečno ali letno povpraševanje po naročenem izdelku je znano in predvidljivo,
- izdelek je dostavljen zelo hitro po naročilu,
- stroški naročila na enoto so fiksni.

Za izračun ekonomske količine naročila se uporablja Wilsonova formula (Krzyżaniak, 2005; Muckstadt, 2010).

Formula za izračun EOQ:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \times D \times C_S}{C_K}}$$

kjer:

D - pričakovano povpraševanje v daljšem časovnem obdobju,

C_S - stroški skladiščenja - nakup ene serije, ne glede na njeno *velikost*

C_K - stroški vzdrževanja ene enote določenega izdelka na zalogi v določenem časovnem obdobju, ki so najpogostejše opredeljeni kot določen delež nakupne cene in zato:

$$C_K = \mu_o \times P$$

P - nakupna cena,

μ_o - odstotek stroškov vzdrževanja v nakupni ceni.



Formula, uporabljena v Excelu:

$$\text{EOQ} = \text{SQRT}((2 * [\text{pričakovano povpraševanje}] * [\text{strošek kopičenja zalog}]) / [\text{strošek vzdrževanja ene enote}])$$

Model EOQ je še posebej uporaben pri upravljanju zalog standardnih izdelkov s stabilnim povpraševanjem. Je analitično orodje, ki pomaga pri odločanju o količinah naročil, vendar zahteva natančne podatke o stroških in povpraševanju. Prednosti modela EOQ so:

- Minimiziranje skupnih stroškov - EOQ določa količino naročil, ki optimizira ravnovesje med stroški naročanja in skladiščenja, s ciljem minimizirati skupne stroške, povezane z zalogami,
- večja učinkovitost poslovanja - z določitvijo optimalnega urnika naročil model EOQ omogoča boljše načrtovanje in upravljanje virov, kar pomeni nemoteno poslovanje in manjšo verjetnost prekinitev proizvodnje zaradi pomanjkanja ali presežka zalog;
- EOQ zagotavlja jasne smernice o tem, kdaj in koliko je treba naročiti, kar pomaga pri standardizaciji postopkov nabave in lahko zmanjša potrebo po stalnem spremljanju in sprejemanju odločitev glede ravni zalog.

Vendar pa model EOQ zahteva sprejetje nekaterih predpostavk, ki so povezane z naslednjimi slabostmi.

- potreba po predpostavki o stalnem povpraševanju - EOQ predpostavlja, da je povpraševanje po izdelku vedno stalno in predvidljivo; v resnici je povpraševanje pogosto spremenljivo in nanj vplivajo sezonskost, tržni trendi, konkurenčni ukrepi in drugi zunanji dejavniki, zaradi česar je lahko natančna uporaba modela EOQ v dinamičnih tržnih pogojih zahtevna,
- potrebo po predpostavki o fiksnih stroških naročanja in skladiščenja - v praksi se ti stroški lahko spreminjajo glede na številne dejavnike, kot so spremembe



cen materiala, transportni stroški, najemnine skladišč, spremembe stopenj dela ali inflacija,

- pomanjkanje prožnosti pri odzivanju na spremembe - model EOQ ustvarja fiksno število naročil za določeno obdobje in ne predvideva samodejnega prilagajanja hitro spreminjajočim se tržnim ali operativnim pogojem; to pomeni, da je treba naročila EOQ ročno pregledovati in prilagajati, da bi se izognili čezmernemu kopičenju zalog ali tveganju izpadov zalog, kar je lahko dolgotrajno in zapleteno.

Zaradi teh omejitev številna podjetja uporabljajo model EOQ kot izhodišče ali predhodno vodilo, medtem ko svoje strategije upravljanja zalog prilagajajo dinamiki trga in posebnostim poslovanja.

3.5. Uporaba orodja Solver pri reševanju problemov optimizacije

Solver je dodatek za Microsoft Excel, ki se uporablja za napredno analizo in reševanje problemov optimizacije. Uporabnikom omogoča opredelitev več spremenljivk za odločanje, omejitev in ciljev, nato pa uporabi različne matematične metode za iskanje optimalnih rešitev (glejte poglavje Uvod v analizo preglednic). Posebej uporaben je v situacijah, ki zahtevajo zapletene izračune, kot so načrtovanje logističnih poti, razporejanje virov ali optimizacija proračuna (Bomba in Kwiecień, 2012; Mason, 2013).

Solver se uporablja za reševanje enokriterijskih optimizacijskih nalog, pri katerih število odločitvenih spremenljivk ne presega 200. Za njegovo uporabo je treba ustvariti matematični model v delovnem prostoru preglednice. Optimizacijski model je sestavljen iz treh elementov (Baj-Rogowska, 2013; Mason, 2012):

- Ciljne celice (ciljna funkcija) - to so celice v modelu preglednice, ki jih je treba ob uporabi programa Solver minimizirati, maksimizirati ali nastaviti na določeno vrednost realnega števila,
- spremenljive celice (odločitvene spremenljivke) - to so celice, ki vsebujejo iskane vrednosti, ki jih dodatek Solver iterativno spreminja in nadomešča v ciljni funkciji, dokler ni najdena optimalna rešitev,



- omejitvene celice (lahko se uporabljajo za vrednost ciljne celice in spremenljive celice) - uvedeni omejitveni pogoji v obliki formul v celicah preglednice, kjer mora biti vrednost znotraj določenih meja ali dosežati ciljne vrednosti.

Solver v Excelu uporablja različne metode optimizacije za iskanje najboljših rešitev za določene probleme. Vsaka metoda ima svoje posebne načine uporabe in je izbrana glede na naravo problema optimizacije. Solver uporabniku omogoča, da izbere ustrezno metodo glede na značilnosti problema, ki ga je treba rešiti. Glavne metode vključujejo (Baj-Rogowska, 2013; Delgado-Aguilar et al., 2018):

- Simpleksna metoda (Simplex LP) - to je najpogosteje uporabljena metoda za reševanje problemov linearnega programiranja (LP); učinkovita je v primerih, ko so ciljna funkcija in vse omejitve linearne,
- Metoda GRG (Generalised Reduced Gradient) - je napredna metoda, ki se uporablja za reševanje nelinearnih problemov; uporabna je zlasti, kadar so ciljna funkcija ali omejitve nelinearne, vendar še vedno zvezne in diferencirane,
- Evolucijska metoda - uporablja se za reševanje globalnih problemov optimizacije, zlasti kadar je ciljna funkcija kompleksna, nelinearna in diskontinuitetna; evolucijska metoda uporablja tehnike, podobne genetskim algoritmom, in raziskuje različne možne rešitve, da bi našla najboljšo,
- Celoštevilске omejitve - Solver je mogoče uporabiti za reševanje problemov, pri katerih morajo nekatere ali vse odločitvene spremenljivke imeti celoštevilске vrednosti; to je uporabno v primerih, ko rešitve zahtevajo diskretne vrednosti, na primer število enot, ki jih je treba proizvesti, ali število zaposlenih, ki jih je treba zaposliti.

Rešitev pri optimizaciji oskrbovalne verige je dragocena, kadar je treba optimizirati zapletene probleme, kot so minimiziranje stroškov transporta, optimizacija načrtovanja dobavne poti ali upravljanje zalog. Še posebej je uporaben v situacijah, ki zahtevajo analizo več spremenljivk in omejitev, kjer so tradicionalne metode morda nezadostne ali preveč dolgotrajne.



3.6. Optimizacija uporabe skladiščnega prostora - primer uporabe orodja Solver

Vsebina naloge

Podjetje Alfa ima skladišče s skupno površino 10.000 m², v katerem je treba skladiščiti tri vrste izdelkov. A, B in C. Vsak od teh izdelkov ima drugačne zahteve glede skladiščnega prostora, ima svoje posebne varnostne zaloge in ustvarja različen dobiček na enoto izdelka:

- izdelek A: zahteva 14 m² na enoto, varnostna zaloge je 40 kosov, ustvarja dobiček 30 EUR,
- Izdelek B: zahteva 12 m² na enoto, varnostna zaloge je 60 kosov, ustvarja dobiček 32 evrov,
- Izdelek C: zahteva 18 m² na enoto, varnostna zaloge je 90 kosov, ustvarja dobiček 23 evrov.

Izdelki A, B in C so namenjeni na trge X, Y in Z. Skupno povpraševanje po vseh izdelkih na trgih je:

- trg X: 220 kosov,
- trg Y: 230 kosov,
- trg X: 332 kosov.

Koliko enot vsakega izdelka je treba uskladiščiti v skladišču, da se poveča skupni dobiček od uporabljenega skladiščnega prostora, ne da bi presegli skupni razpoložljivi skladiščni prostor, ob predpostavki, da Alfa zadovolji vse povpraševanje?

Rešitev:

Ciljna funkcija: maksimiranje skupnega dobička od izdelkov.

Omejitev: velikost skladiščnega prostora, skladiščni prostor za enoto izdelka, obseg povpraševanja na trgu.



- [1] priprava podatkovnega lista,
- [2] opredelitev spremenljivk odločanja,
- [3] izračun pomožnih spremenljivk,
- [4] določitev ciljne funkcije,
- [5] konfiguriranje programa Solver,
- [6] navedba metode optimizacije,
- [7] zaženite Solver,
- [8] vrednotenje dobljene rešitve.



Primer v Excelu:

- [1] Pripravite in dopolnite tabelo z vhodnimi podatki iz naloge: varnostna zaloga za vsak izdelek, skladiščni prostor na enoto, dobiček na enoto, povpraševanje na vsakem trgu, skupni skladiščni prostor

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual
		X	Y	Z			
Product	A				40	14	30
	B				60	12	32
	C				90	18	23
		220	230	332			
						Total warehouse area	10000

- [2] Opredelite spremenljivke odločanja - število izdelkov vsake vrste na zalogi

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual
		X	Y	Z			
Product	A				40	14	30
	B				60	12	32
	C				90	18	23
		220	230	332			
						Total warehouse area	10000



[3] Izračun pomožnih spremenljivk

- **Število enot na zalogi:** = SUM([območje celic za vsak trg in posamezen izdelek])
- **Zasedena skladiščna površina:** = [površina enote skladišča] * [število enot na zalogi]
- **Dobiček za x enot:** = [število enot na zalogi] * [enotni dobiček]
- **Uresničeno povpraševanje:** = SUM([razpon celic za vsak trg])
- **Vsota skladiščnega prostora:** = SUM([Zasedeni skladiščni prostor])

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual	Number of units in a warehouse	Occupied warehouse space	Profit for x units
		X	Y	Z						
Product	A				40	14	30	0	0	0
	B				60	12	32	0	0	0
	C				90	18	23	0	0	0
		220	230	332				Total warehouse space	0	
Realized demand		0	0	0						
						Total warehouse area				
						10000				

[4] Določite ciljno funkcijo - maksimiranje dobička od prodaje izdelka Ciljna funkcija: =SUM([Dobiček za x enot])

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual	Number of units in a warehouse	Occupied warehouse space	Profit for x units
		X	Y	Z						
Product	A				40	14	30	0	0	0
	B				60	12	32	0	0	0
	C				90	18	23	0	0	0
		220	230	332				Total warehouse space	0	
Realized demand		0	0	0						
						Total warehouse area				
						10000				
								Objective function - maximum profit:	0	

[5] Konfiguracija solver-ja

Ciljno celico nastavite s ciljno funkcijo in maksimirajte ciljno funkcijo



Set Objective:

To: ☒ Max ☐ Min ☐ Value Of:

Navedite celice, katerih vrednosti je treba nastaviti: število izdelkov vsake vrste na zalogi.

By Changing Variable Cells:

Dodajte omejitve:

- zasedena skladiščna površina = največja skladiščna površina

Cell Reference: =

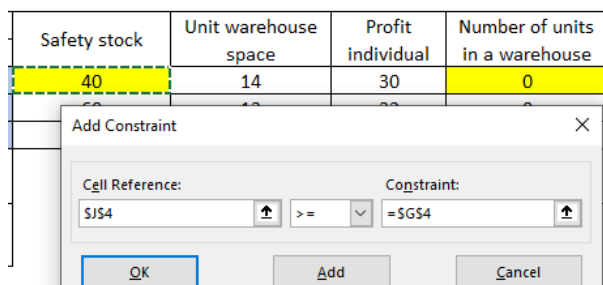
- realizirano povpraševanje na trgu X <= povpraševanje na trgu X

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individu
		X	Y	Z			
Product	A	0	0	0	40	14	30
	B	0	0	0	60	12	22
	C	0	0	0	80	10	18
		220	220	220			
Realized demand		0	0	0			

Add Constraint

Cell Reference: <=

- realizirano povpraševanje na trgu Y <= povpraševanje na trgu Y
- realizirano povpraševanje na trgu Z <= povpraševanje na trgu Z
- število enot izdelka A na zalogi >= varnostna zaloga za izdelek A



- število enot izdelka B na zalogi $\geq$ varnostna zaloga za izdelek B
- število enot izdelka C na zalogi $\geq$ varnostna zaloga za izdelek C

[6] Navedite metodo optimizacije - npr. LP Simplex



[7] Zaženite Solver - pritisnite gumb Solve

[8] Ocenite prejeto rešitev

		Market			Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual	Number of units in a warehouse	Occupied warehouse space	Profit for x units
		X	Y	Z						
Product	A	0	0	40	40	14	30	40	560	1200
	B	220	140	292	60	12	32	652	7820	20853
	C	0	90	0	90	18	23	90	1620	2070
		220	230	332					Total warehouse space	10000
Realized demand		220	230	332						

Total warehouse area	10000
----------------------	-------

Objective function - maximum profit:	24123
--------------------------------------	-------

Vprašanja

1. Kako lahko dodatek Solver v programu Microsoft Excel podpira procese odločanja v podjetju?
2. Kako izbira ustrezne metode optimizacije vpliva na rezultate analize?



VIRI

Antoniuk, I., Svitek, R., Krajčovič, M., & Furmannová, B. (2021). Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0. *Transportation Research Procedia*, 55, 503-509.

Baj-Rogowska, A. (2013). Planowanie tras z wykorzystaniem narzędzia Solver, jako zadanie logistyczne w małej firmie. *Optymalizacja systemów i procesów logistycznych*, 169-178.

Battini, D., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2014). A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications. *International Journal of Production Economics*, 149, 145-153.

Bomba, I., & Kwiecień, K. (2012). Zastosowanie dodatku SOLVER aplikacji MS Excel w projektowaniu jednostki paletowej. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 19.

Cyplik, P., & Hadaś, Ł. (2012). Zarządzanie zapasami w łańcuchu dostaw. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

Delgado-Aguilar, M., Valverde-Som, L., & Cuadros-Rodríguez, L. (2018). Solver, an Excel application to solve the difficulty in applying different univariate linear regression methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 178, 39-46.

Dudziński, Z., & Kizyn, M. (2002). *Vademecum gospodarki magazynowej*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr.

Fechner, I. (2007). *Zarządzanie łańcuchem dostaw*. Poznań: Wyższa Szkoła Logistyki.

Fertsch, M. (ed.). (2006). *Słownik terminologii logistycznej*. Poznań: Instytut Logistyki i Magazynowania.

Ghiani, G. (2004). *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European journal of operational research*, 177(1), 1-21.



- Gupta, P., Mehlawat, M. K., Aggarwal, U., & Khan, A. Z. (2022). An optimization model for a sustainable and socially beneficial four-stage supply chain. *Information Sciences*, 594, 371-399.
- Hariga, M.A., & Jackson, P.L. (1996). The warehouse scheduling problem: Formulation and algorithms. *IIE Transactions* 28, 115-127.
- Jayarathna, C. P., Agdas, D., Dawes, L., & Yigitcanlar, T. (2021). Multi-objective optimization for sustainable supply chain and logistics: A review. *Sustainability*, 13(24), 13617.
- Kisielewski, P., & Talarek, P. (2020). Optymalizacja procesu magazynowania wysokoskładowego. (ed.) Sosnowski Z. *Symulacje komputerowe w badaniach i rozwoju*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok. DOI: 10.24427/978-83-66391-28-4_11
- Krzyżaniak, S. (2005). *Podstawy zarządzania zapasami w przykładach* (Wydanie III). Poznań: Instytut Logistyki i Magazynowania.
- Krzyżaniak, S. (2006). Lokalizacja zapasów w sieci dystrybucji. *LogForum*, 2(1), 2.
- Kusiak, J., Danielewska-Tulecka, A., & Oprocha, P. (2021). *Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Magdalena, R., & Suli, T. (2019). Forecasting Methods and Implementation of DRP (Distribution Requirement Planning) Methods in Determining the Master Production Schedule. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528(1).
- Masclé, C., & Gosse, J. (2014). Inventory management maximization based on sales forecast: case study. *Production Planning & Control*, 25(12), 1039-1057.
- Mason, A. J. (2012). OpenSolver-an open source add-in to solve linear and integer programmes in Excel. In *Operations Research Proceedings 2011: Selected Papers of the International Conference on Operations Research (OR 2011)*, August 30-September 2, 2011, Zurich, Switzerland (401-406). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mason, A.J. (2013). SolverStudio: A new tool for better optimisation and simulation modelling in Excel. *INFORMS Transactions on Education*, 14(1), 45-52.



- Miszewski, P. (2019). Rola nowoczesnych rozwiązań technologicznych w optymalizacji pracy współczesnego magazynu. *Journal of TransLogistics*, 5(1), 175-182.
- Muckstadt, J.A., Sapra, A., Muckstadt, J.A., & Sapra, A. (2010). EOQ model. *Principles of Inventory Management: When You Are down to Four, Order More*, 17-45.
- Mukhsin, M., & Sobirin, M.T. (2022). Scheduling Process Analysis Distribution of Product Using the Distribution Requirement Planning (DRP) Method. *AFEBI Management and Business Review*, 7(2), 78-89.
- Muller, M. (2019). *Essentials of inventory management*. HarperCollins Leadership.
- Ngatilah, Y., Rahmawati, N., Pujiastuti, C., Porwati, I., & Hutagalung, A.Y. (2020). Inventory control system using distribution requirement planning (drp)(case study: Food company). In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1569, No. 3, p. 032005). IOP Publishing.
- Nugroho, M., Ellianto, M.S.D., & Nurcahyo, Y.E. (2019). Planning and Implementation Company Resource Planning Module Distribution Management Using the Methods of Distribution Requirement Planning in MSMES UD Adhi Teknik. *International Review of Management and Marketing*, 9(6), 179.
- Ramaa, A., Subramanya, K.N., & Rangaswamy, T.M. (2012). Impact of warehouse management system in a supply chain. *International Journal of Computer Applications*, 54(1).
- Reszka, L. (2012). Koniunkcja logistyki i optymalizacji. *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Zarządzanie*, 39, 109-118.
- Silva, C.A., Sousa, J. M. C., Runkler, T., & Palm, R. (2005). Soft computing optimization methods applied to logistic processes. *International Journal of Approximate Reasoning*, 40(3), 280-301.
- Smyk, S. (2023). Optymalizacja jako wyzwanie dla menedżerów ds. logistyki. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*.

