



3. OPTIMIZACIJA U UPRAVLJANJU OPSKRBNIM LANCEM

U poglavlju su prikazana najvažnija pitanja vezana uz upravljanje zalihama. Poseban naglasak stavljen je na analizu logističkih podataka, za što se može koristiti proračunska tablica. Ovdje ćete pronaći :



- koncept optimizacije u logistici,
- uloga skladišta u opskrbnom lancu,
- određivanje skladišnog prostora,
- odabrane metode upravljanja zalihama u opskrbnom lancu,
- alat Solver.

3.1. Uvod

Optimizacija u logistici je proces pronalaženja najučinkovitijeg načina organiziranja protoka robe, informacija i resursa kroz cijeli opskrbni lanac, od početne do konačne točke, uz minimiziranje operativnih troškova uz istovremeno osiguranje visoke kvalitete i ispunjavanje zahtjeva kupaca (Reszka, 2012). Cilj optimizacije u logistici je poboljšati različite aspekte aktivnosti, kao što su (Antoniuk i dr., 2021; Gupta i dr., 2022):

- smanjenje vremena protoka robe,
- optimizacija troškova transporta, skladištenja i rukovanja,
- poboljšanje kvalitete logističke usluge,
- povećana fleksibilnost i osjetljivost na promjene potražnje,
- smanjenje razine zaliha uz osiguranje kontinuiteta opskrbe,
- poboljšano upravljanje skladišnim prostorom i transportnim resursima,
- integracija i automatizacija logističkih procesa.



Modeli logističke optimizacije primjenjuju se u odnosu na (Smyk, 2023): (1) dizajn distribucijske mreže (određivanje lokacija distribucijskih centara) – opisano u poglavlju Optimizacija logističke mreže, (2) projektiranje transportnih sustava (optimizacija transportnih zadataka, minimiziranje praznih vožnji, određivanje ruta isporuke) – opisano u poglavlju Optimizacija transporta, (3) upravljanje zalihama (raspodjela zalihe, procjena njihove veličine, određivanje vremena slanja narudžbi) – opisano u poglavlju Analitika u opskrbi i nabavi i niže u pododjeljku Odabrane metode upravljanja zalihama u opskrbnom lancu, (4) projektiranje i upravljanje skladišnim aktivnostima (maksimiziranje učinkovitosti skladišnog prostora) – opisano u pododjeljku Određivanje skladišnog prostora.

U kontekstu optimizacijskih modela postoji mnogo optimizacijskih metoda gdje se glavna klasifikacija ovih metoda temelji na vrsti optimizacijskog zadatka koji treba riješiti. Sljedeće **metode optimizacije** mogu se razlikovati prema (Jayarathna i dr., 2021; Kusiak i dr., 2021):

- vrsta problema koji se rješava: metode linearnog programiranja, metode nelinearne optimizacije,
- ograničenja: metode neograničene optimizacije, metode ograničene optimizacije,
- dimenzija problema (broj optimizacijskih varijabli): univarijatne metode, multivarijatne metode (više optimizacijskih varijabli),
- kriteriji optimizacije: jednokriterijske metode; višekriterijske metode.

U logistici se često razmatra broj kriterija, a zadaci optimizacije se formuliraju kao jednokriterijski ili višekriterijski. U praksi se obično rješavaju zadaci jednokriterijske optimizacije, uglavnom zbog jednostavnosti modela i lakoće njihove primjene. Zadaci optimizacije s više kriterija zahtijevaju složene modele, što često dovodi do situacija u kojima optimalno rješenje prema jednom kriteriju može negativno utjecati na ishod koji je usklađen s ciljem drugog kriterija. Kao rezultat toga, višekriterijska rješenja zahtijevaju postizanje kompromisa između različitih ciljnih funkcija, komplicirajući određivanje nedvosmisleno najboljeg, optimalnog rješenja (Smyk, 2023). Stoga je u traženju parcijalnih kriterija i ciljeva za optimizaciju logističkih zadataka važno osigurati da oni budu (Silva i dr., 2005):



- potpuni (utječući na određeni problem odlučivanja),
- nesuvišni,
- minimizirani (s ciljem smanjenja veličine problema odlučivanja),
- operativni (mjerljivi),
- diferenciranje rješenja (omogućuje identifikaciju najboljeg – optimalnog rješenja).

U poslovnim aktivnostima ključno je da kriterij optimizacije bude jasno definiran, a model optimizacije treba odgovarati temeljnoj prirodi analiziranog problema (Smyk, 2023). Ovaj kriterij se naziva funkcija cilja i odabire se u kontekstu odluke koja se donosi ili u početnoj fazi logističkog planiranja. Ova funkcija služi kao mjera za ocjenu kvalitete rješenja, pri čemu se optimalno rješenje postiže kada funkcija poprimi ekstrem (minimum ili maksimum) (Gupta i dr., 2022).

3.2. Uloga skladišta u opskrbnom lancu

U modernom logističkom sustavu svaka manipulacija materijalom podliježe temeljitoj provjeri već u fazi projektiranja. Čak i manji prijenosi robe na kratkim udaljenostima, koji se obično događaju unutar zgrade ili između objekta i transportnog posrednika, počinju igrati vrlo važnu ulogu. Skladište je namijenjeno skladištenju materijalnih dobara u za to predviđenom prostoru skladišne zgrade, prema utvrđenoj tehnologiji, opremljeno odgovarajućim uređajima i tehničkim sredstvima, kojim upravlja i servisira tim ljudi opremljen potrebnim vještinama (Miszewski, 2019). Najbolji mogući smještaj robe u određenom prostoru omogućuje potpunije iskorištenje ograničenog kapaciteta objekta i smanjuje broj manipulacija određenom zalihom (Ghiani, 2004; Muller, 2002).

U kontekstu opskrbnog lanca, skladište ima izuzetno važnu ulogu, služeći kao ključno središte za koordinaciju i skladištenje robe, što je neophodno za nesmetan protok proizvoda od proizvođača do potrošača. Njegov rad je od temeljne važnosti za učinkovito upravljanje zalihama, omogućavajući minimiziranje rizika manjka i viškova, čime se održava ravnoteža između potražnje i ponude. Štoviše, skladište ima važnu ulogu u procesu kontrole kvalitete, nudeći mogućnost

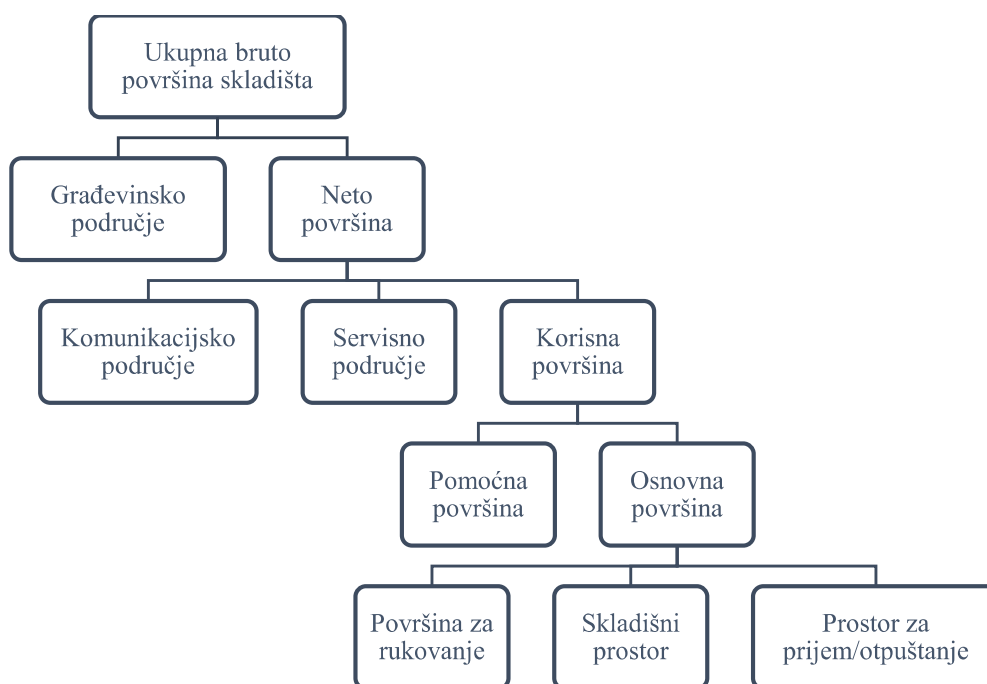


provjere i pripreme proizvoda za daljnju distribuciju, osiguravajući njihovu usklađenost sa standardima i očekivanjima kupaca. Uvođenje suvremenih **sustava upravljanja skladištem** (engl. *Warehouse Management System, WMS*) pridonosi značajnoj optimizaciji logističkih procesa, što zauzvrat povećava učinkovitost poslovanja i omogućava smanjenje operativnih troškova. Konačno, skladišta su iznimno važna u prilagodbi opskrbnog lanca tržišnim uvjetima koji se dinamički mijenjaju, omogućujući organizacijama da brzo odgovore na evoluciju potražnje i promjenjive preferencije potrošača, što je ključno u održavanju tržišne konkurentnosti (Gu i dr., 2007; Ramaa i dr., 2012).

3.3. Određivanje skladišnog prostora

Osnovni zahtjevi u skladišnim operacijama uključuju primanje **jedinica za čuvanje zaliha** (engl. *Stock Keeping Unit, SKU*) od dobavljača, skladištenje SKU-ova, primanje narudžbi od kupaca, odabir SKU-ova i njihovo sastavljanje za otpremu te slanje dovršenih narudžbi kupcima. Projektiranje i rad skladišta koje ispunjava te zahtjeve uključuje mnoga pitanja. Resursi kao što su prostor, radna snaga i oprema moraju se rasporediti između različitih skladišnih funkcija, a svaka funkcija mora biti pažljivo implementirana, upravljana i koordinirana kako bi zadovoljila zahtjeve sustava u smislu kapaciteta, protoka i usluge uz minimalnu cijenu resursa. Skladištenje se bavi organizacijom robe u skladištu kako bi se postigla visoka iskoristivost prostora i omogućio učinkovit transport materijala (Gu i dr., 2007).

Funkciju skladištenja oblikuju tri osnovne odluke: koliko zaliha određenog SKU-a treba biti pohranjeno u skladištu; koliko često i u koje vrijeme treba nadopunjavati zalihe za SKU; i gdje se unutar skladišta SKU treba skladištiti, distribuirati i premještati između različitih skladišnih područja. Prva dva pitanja dovode do problema povezanih s veličinom serije i problema koji spadaju u tradicionalno područje kontrole zaliha (Hariga i Jackson, 1996). Dva glavna kriterija za donošenje odluka o raspodjeli skladišnih zona su učinkovitost skladištenja, koja odgovara skladišnom kapacitetu, i učinkovitost pristupa, koja odgovara resursima potrošenim prodajom i ispunjavanjem narudžbi (Gu i dr., 2007).



Slika 3. 1. Podjela skladišnog prostora

Izvor: (Dudziński i Kizyn, 2002).

Izračun skladišnog prostora zahtijeva razmatranje njegovih različitih vrsta (slika 3.1). U poduzeću je korisna površina podijeljena na zone koje odgovaraju fazama skladišnog procesa: prijem, skladištenje (kratkoročno i dugotrajno), komisioniranje, otprema, kao i manipulativni i pomoćni prostor. Veličina i oblik skladišta ovise o sljedećim varijablama:

- vrste, broj i dimenzije mjesta na kojima se obavljaju skladišni poslovi u prihvatnoj i otpremnoj zoni,
- dimenzije i količine skladišnih polja u skladišnom prostoru,
- dimenzije i količine površina za odlaganje,
- parametri redova polica i broj stupaca u redovima,
- širina radnog prolaza za odabrani viličar,
- širina komunikacijskih putova za opremu i osoblje.

Ukupna površina skladišta S može se izraziti formulom:

$$S = f_s + f_p = f_s + f_w + f_d + f_a$$



gdje:

f_s – skladišni prostor,

f_{str} – pomoćni prostor,

f_w – prostor namijenjen za prijem, sortiranje i otpremu materijala,

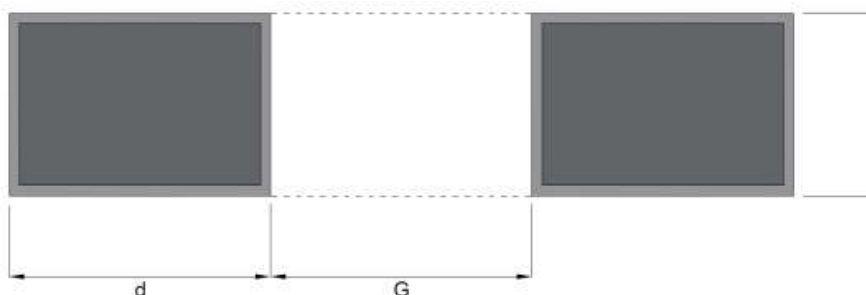
f_d – površina koju zauzimaju prolazi i prilazi,

f_a – upravno i društveno područje.



Formula koja se koristi u Excelu:

$S = [\text{skladišni prostor}] + [\text{pomoćni prostor}] = [\text{skladišni prostor}] + [\text{prostor za prijem, sortiranje i otpremu materijala}] + [\text{prostor koji zauzimaju prolazi i prilazi}] + [\text{administrativni i društveni prostor}]$



Slika 3. 2. Skladišni modul za skladištenje u nizu bez opreme s okomitim rasporedom paletiziranih LU

Izvor: vlastita studija

Dio skladišnog prostora koji uključuje horizontalnu projekciju najmanjeg ponovljivog dijela dvaju redova ili blokova teretnih jedinica (engl. *Load Unit*, LU) zajedno s prostorima za rukovanje za skladištenje i manipulativnim putem između njih je skladišni modul. Usvajanje ove veličine omogućuje procjenu veličine skladišnog prostora. Skladišni moduli za skladištenje u nizu bez opreme mogu se postaviti na dva načina (sl. 3.2 i sl. 3.3).



Slika 3. 3. Skladišni modul za redno skladištenje bez opreme s paralelnim rasporedom paletiziranih LU

Izvor: vlastita studija

Površina skladišnog modula za skladištenje u nizu bez opreme izračunava se po formuli:

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

gdje:

d – širina odlagališta [m],

G – širina puta za rukovanje [m],

l – duljina skladišnog polja [m].

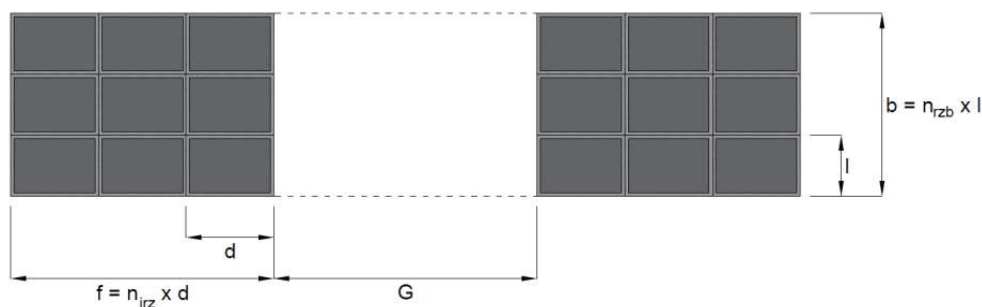
Kapacitet modula jednak je 2 paletizirane jedinice tereta za jednoetažno skladištenje i $2 \times n$ paletiziranih jedinica tereta za složeno skladištenje pri slaganju u n razina.



Formula koja se koristi u Excelu :

$$M = (2 * [\text{širina površine za odlaganje}] + [\text{širina puta za rukovanje}]) * [\text{duljina skladišnog polja}]$$

Skladišni moduli za blok skladištenje bez opreme mogu se rasporediti kao što je prikazano na slici 3.4.



Slika 3. 4. Skladišni modul za blok skladištenje bez opreme

Izvor: vlastita studija

Površina skladišnog modula za blok skladištenje bez opreme izračunava se po formuli:

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

gdje:

f – širina bloka [m],

G – širina puta rukovanja [m],

b – duljina bloka [m],

n_{LUz} – broj tovarnih jedinica u redu bloka,

d – širina skladišnog prostora [m],

n_{LUb} – broj redova u bloku,

l – duljina skladišnog polja [m].

Kapacitet modula jednak je $2 \times n_{LUz} \times n_{LUb}$ paletiziranih tovarnih jedinica za jednu razinu skladištenje i $2 \times n_{LUz} \times n_{LUb} \times n$ paletiziranih teretnih jedinica za naslagano skladištenje pri slaganju u n razina.



Formula koja se koristi u Excelu :

$$Mb = (2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina puta rukovanja}]) \\ * [\text{duljina bloka}]$$



Dodatno, volumen se može izračunati za module za pohranu – uzimajući u obzir visinu jedinice za utovar ili kada su jedinice za utovar složene. Volumen **skladišnog modula** (kapacitet modula) ovisi o njegovoj površini (Mb) i visini na kojoj je formirana tovarna jedinica (h). Volumen modula izračunava se prema formuli :

$$V_M = [(2xf + G)xb] xh$$

$$h = n_{rh} xh_o + h_{str}$$

gdje:

f – širina bloka [m],

G – širina puta rukovanja [m],

b – duljina bloka [m],

h – visoko paletizirano opterećenje jedinice [m],

n_{rh} – broj slojeva po jedinici paletiziranog tereta,

h_o – visina zbirne ambalaže [m],

h_p – visina medija [m].

Prvi dio formule je formula za površinu modula, a drugi dio je visina formirane jedinice opterećenja.



Formula koja se koristi u Excelu:

$$V_M = \{(2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina puta rukovanja}]) * [\text{duljina bloka}]\} * [\text{visoka paleta opterećenje jedinice}]$$

Volumen **skladišnog modula** (kapacitet modula) ovisi o njegovoj površini (Mb) i visini do koje je formirana jedinica tereta (H). Volumen modula izračunava se pomoću formule:

$$V_M = [(2xf + G)xb] x H$$

$$H = nxh = nx(n_{rh} xh_o + h_p)$$

gdje:

f – širina bloka [m],



G – širina puta rukovanja [m],
 b – duljina bloka [m],
 H – visina bloka [m],
 n – broj nagomilanih jedinica,
 h – visina jedinica paletiziranog tereta [m],
 n_{rh} – broj slojeva po jedinici paletiziranog tereta,
 h_o – visina zbirne ambalaže [m],
 h_p – visina medija [m].



Formula koja se koristi u Excelu:

$$V_M = \{(2 * [\text{širina bloka}] + [\text{širina puta rukovanja}]) * [\text{duljina bloka}]\} * [\text{visina bloka}]$$

Iskorištenost skladišnog prostora procjenjuje se omjerom iskorištene površine prema ukupnoj raspoloživoj površini. U skladištima u kojima se ne koriste paletni regali, postizanje najveće vrijednosti ovog pokazatelja osigurava se skladištenjem materijala u blok rasporedu, s vrijednostima iskorištenja prostora od 0,6 do 0,8. Za usporedbu, ovaj pokazatelj za raspored skladišta reda kreće se od 0,25 do 0,6. Težnja ka optimizaciji iskorištenosti prostora kod ovakvog tipa skladišta dovodi do ograničenja u uvjetima slaganja materijala i nedostupnosti asortimana koji se nalazi u sredini blokova, te je primjenjiv samo za homogene asortimane, bez dodatnih financijskih izdataka za opremanje skladišta. U slučajevima kada je jedini kriterij vrednovanja povećanje količine uskladištenog asortimana, dobrim rješenjem se pokazuje korištenje protočnih paletnih regala. Omogućuju visoku stopu iskorištenja zbog ograničenja broja transportnih putova, ali istovremeno zahtijevaju korištenje FIFO (engl. *First In, First Out*) principa. Maksimalna iskorištenost raspoloživog skladišnog prostora moguća je zahvaljujući korištenju metode skladištenja slobodnog prostora, koja pretpostavlja da se asortiman može smjestiti u bilo koji slobodni regalni prostor (Kisielewski i Talarek, 2020).



3.4. Odabrane metode upravljanja zalihama u opskrbnom lancu

Upravljanje zalihama u opskrbnom lancu ključni je element koji osigurava operativnu fluidnost, smanjenje troškova i zadovoljstvo kupaca. Postoje mnoge metode upravljanja zalihama, od kojih svaka može biti prikladna ovisno o specifičnostima industrije, karakteristikama proizvoda, dinamici potražnje i drugim operativnim čimbenicima (Cyplik i Hadaś, 2012).

Klasični koncept upravljanja zalihama omogućuje upravljanje zalihama u distribucijskoj mreži, gdje se one obično nalaze na različitim mjestima. Rješavanje problema zaliha smještenih na više lokacija prvenstveno se fokusira na analizu veličine sigurnosnih zaliha (Mascle i Gosse, 2014). Sigurnosne zalihe ovise o varijabilnosti potražnje u ciklusu nadopunjavanja zaliha, izražene kao standardna devijacija potražnje u tom razdoblju i faktor sigurnosti ovisan o usvojenoj razini usluge. Ako se pretpostavi ista razina usluge za različite lokacije skladištenja inventara, tada razina sigurnosne zalihe ovisi o varijabilnosti potražnje koja se opslužuje s dane lokacije. U formulama se pretpostavlja da je na svim servisnim točkama tržišta usvojena ista razina usluge ($\omega_{MR1} = \omega_{MR2} = \omega_{MR3} = \dots = \omega_{MC}$) i isti sustav nadopunjavanja zaliha usvojeni su na svim servisnim mjestima na tržnici (Cyplik i Hadaś, 2012).

Sigurnosne zalihe ovise o varijabilnosti potražnje u ciklusu nadopunjavanja zaliha, izraženoj standardnom devijacijom potražnje u tom razdoblju, te faktoru sigurnosti ovisnom o usvojenoj razini usluge. Ako se pretpostavi ista razina usluge za različite lokacije skladištenja zaliha, razina sigurnosne zalihe ovisi o varijabilnosti potražnje koja se opslužuje s dane lokacije. Problem nije izračunavanje ukupne potražnje u slučaju više točaka lokacije potražnje (ukupna potražnja je zbroj prosječnih potražnja na svakoj lokaciji). Za izračun standardne devijacije zbroja zahtjeva treba koristiti zakon kvadratnog korijenja, koji pretpostavlja da je standardna devijacija zbroja zahtjeva jednaka kvadratnom korijenu zbroja njihovih standardnih odstupanja. Ispod su formule koje omogućuju ove izračune. Dobiveni rezultati bit će točni pod pretpostavkom da su ista razina usluge ($\omega_{L1} = \omega_{L2} = \omega_{L3} = \dots = \omega$) i isti sustav nadopunjavanja zaliha usvojeni u svim servisnim točkama na tržištu (Cyplik i Hadaś, 2012).



Formula za izračun sigurnosne zalihe:

$$S_S = \omega \times \sigma_{DT}$$

Formula za izračunavanje standardne devijacije zbroja zahtjeva:

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

gdje:

n – broj lokalizacije,

D_n – vrijednost individualne potražnje u n lokalizaciji.

Ukupna sigurnosna zaliha za potražnju kojom se rukuje npr. iz središnjeg skladišta može se izračunati kao:

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

gdje:

S_{ST} – ukupna sigurnosna zaliha,

S_{SLn} – sigurnosna zaliha na n lokaciji.

U posebnom slučaju, ako je sigurnosna zaliha na svim točkama na lokaciji ista (općenito kao rezultat iste potražnje koju opslužuje svaka od ovih točaka) i jednaka je S_{STn} , tada je centralizirana zaliha S_{STD} jednaka :

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

gdje je n broj točaka lokacije skladišta.



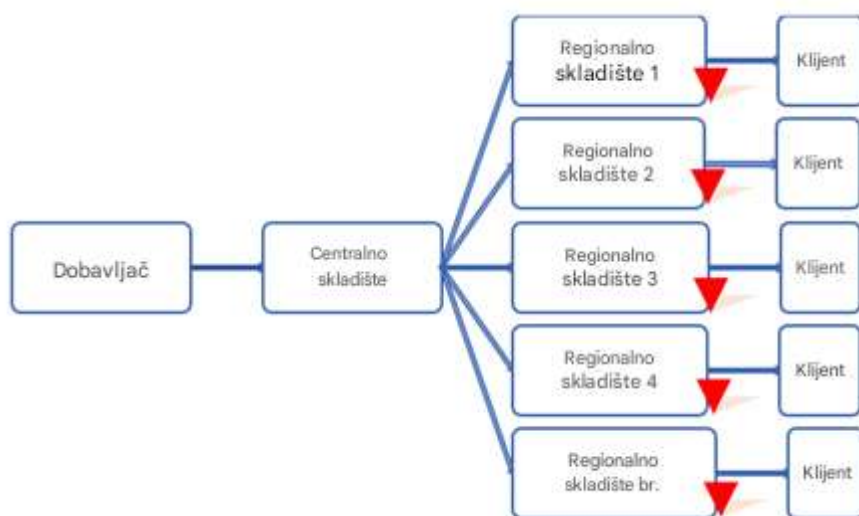
Formula koja se koristi u Excelu:

$$\text{SST} = [\text{faktor sigurnosti}] * [\text{standardna devijacija zbroja zahtjeva u točkama D1-Dn u ciklusu nadopune}] = [\text{faktor sigurnosti}] * \text{SQRT}[(\text{STDEV.P}([\text{raspon ćelija za D1}])^2) + (\text{STDEV.P}([\text{raspon ćelija za D2}])^2) + \dots + (\text{STDEV.P}([\text{raspon ćelija za Dn }])^2)]$$

Jedno od pitanja koje zahtijeva analizu u kontekstu optimizacije opskrbnog lanca je lokacija skladišta, uzimajući u obzir odnos između značajnih parametara. Način smještaja zaliha može se promatrati na dva načina – kao disperzirana zaliha ili centralizirana zaliha.

U slučaju disperziranih zaliha (slika 3.5), kupci se opslužuju izravno iz zaliha koje se nalaze u regionalnim skladištima (engl. Regional Warehouse, RW), gdje se održavaju sigurnosne zalihe. U svrhu izračuna, napravljene su sljedeće pretpostavke (Kżyżaniak, 2006):

- potražnja je ravnomjerno raspoređena na n regionalnih skladišta,
- tjedna potražnja u svakom od ovih skladišta može se opisati distribucijom s prosječnom potražnjom od D_{RW} i standardnom devijacijom σ_{DRW} ,
- nabavna cijena od dobavljača jednaka je P ,
- koeficijent tjednog knjigovodstvenog troška zaliha je u_t i isti je u svim skladištima,
- vrijeme ciklusa dopune u regionalnim skladištima je jednako za svako skladište i iznosi T_I (bez značajnijih odstupanja).



Slika 3. 5. Ilustracija slučaja distribuiranog zalihaa

Izvor: (Krzyżaniak, 2006).

S obzirom na pretpostavke, ukupni tjedni trošak održavanja sigurnosne zalihe u mreži jednak je:

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

Ravnomjernom raspodjelom potražnje po svim skladištima dobivamo:

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

gdje:

ω – faktor sigurnosti, ovisan o odabranoj razini usluge i vrsti distribucije koji opisuje zadanu frekvencijsku distribuciju potražnje,

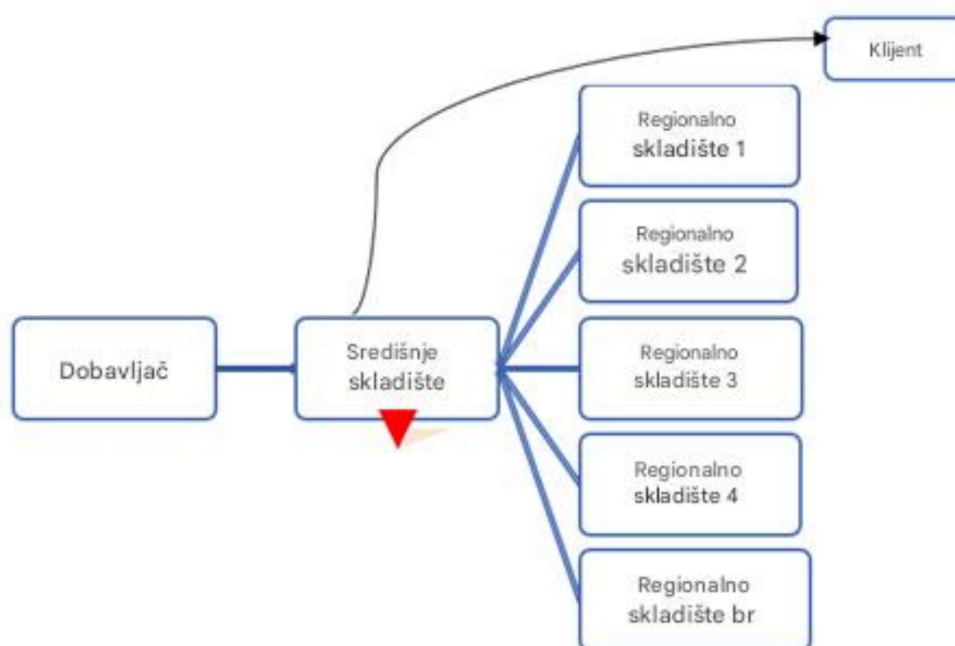
SS_{RW} – sigurnosne zalihe u svakom regionalnom skladištu.

Budući da je $\sigma_{DRW} = V \times D_{RW}$, gdje je V koeficijent varijacije $V = \frac{\sigma_D}{D}$, formula ima oblik:

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

U općem modelu za centraliziranu zalihu (Sl. 3.6), kupci se opslužuju iz središnjeg skladišta (engl. Central Warehouse, CW) izravnim isporukama, kao što su kurirske pošiljke. U svrhu izračuna, napravljene su sljedeće pretpostavke (Krzyżaniak, 2006):

- tjedna potražnja u središnjem skladištu zbroj je potražnje promatrane na tržištima povezanim s pojedinačnim regionalnim skladištima i može se opisati distribucijom s prosječnom $D_{CW} = n \cdot D_{RW}$ i standardnom devijacijom $\sigma_{DCW} = \sigma_{DRW} \times \sqrt{n}$ (prema zakonu kvadratnog korijena),
- koeficijent tjednog knjigovodstvenog troška zaliha u_t je isti kao za regionalna skladišta,
- vrijeme ciklusa dopune u centralnom skladištu je T_2 ,
- u slučaju zahtjeva kupaca, proizvod se isporučuje izravno kupcu u obliku kurirske pošiljke s jediničnim troškom c_{cs} , čime se održava slično vrijeme izvršenja narudžbe kupca kao i u slučaju usluge iz regionalnih skladišta.



Slika 3. 6. Ilustracija slučaja centraliziranog popisa

Izvor: (Krzyżaniak, 2006)



Tjedni trošak održavanja sigurnosne zalihe u središnjem skladištu jednak je:

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

Jer, kako je zamišljeno $T_2 = \alpha \times T_1$:

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

Budući da se događa $\sigma_{DRW} = V \times D_{RW}$, gdje je V takozvani koeficijent varijacije $V = \frac{\sigma_P}{D}$, tada uzorak ima oblik:

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

Vrijedno je napomenuti da pretpostavka $T_2 = \alpha \times T_1$ uzima u obzir različita rješenja za organiziranje dostava za oba slučaja. Na primjer, u slučaju distribuiranih zaliha, isporuke regionalnim skladištima mogu se provoditi prema sustavu periodičnog pregleda, te u centraliziranom sustavu koji se temelji na tzv. točki ponovnog naručivanja (informacijska razina). Može se pretpostaviti da će se to obično dogoditi $T_2 < T_1$.

Ukupni tjedni izravni kurirski troškovi za kupca jednaki su:

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

Postavljajući pitanje kada je isplativo disperzirati zalihe, odnosno kada će biti jeftinije održavati sigurnosne zalihe u n regionalnih skladišta i iz njih opsluživati lokalne kupce nego koncentrirati zalihe u centralno skladište i ispunjavati narudžbe kupaca izravnim isporukama, odgovor se svodi na rješavanje nejednakosti:

$$C_1 < C_{2(SS)} + C_{2(zalihe)}$$

da je :

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

Nakon transformacije dobivamo:

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



Iz ovog oblika dobivamo ovisnosti čije ispunjenje jamči ispunjenje nejednakosti $C_1 < C_{2(SS)} + C_{2(zalihe)}$ i nametnuti uvjet:

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

ili

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

No, najinformativniji je sljedeći odnos jer kombinira sve troškovne elemente u izrazu na lijevoj strani nejednakosti, a na desnoj strani parametre koji se odnose na implementaciju i traženu razinu usluge:

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

Snage klasičnog koncepta upravljanja zalihama su sljedeće:

- jednostavnost i jasnoća – lako ih je razumjeti i implementirati,
- pomoć u minimiziranju ukupnih troškova upravljanja zalihama balansiranjem troškova naručivanja i držanja zaliha, s ciljem ekonomske količine narudžbe,
- jasni i definirani procesi donošenja odluka koji pomažu upravljati narudžbama i zalihama na temelju izračuna i unaprijed definiranih pravila.

Slabosti klasičnog koncepta upravljanja zalihama uključuju:

- potreba za pretpostavkom stalne i predvidljive potražnje, koja ne odgovara uvijek dinamičnoj i promjenjivoj tržišnoj stvarnosti.
- ne uzimajući u obzir varijabilnost potražnje i rizik u opskrbnom lancu (npr. kašnjenja isporuke, tržišne promjene),
- nedostatak fleksibilnosti u odgovoru na brze promjene na tržištu ili opskrbnom lancu, budući da se temelje na fiksnim parametrima i ne predviđaju dinamičku prilagodbu novim uvjetima.



Klasični koncept upravljanja zalihama ima svoje mjesto u teoriji i praksi operativnog menadžmenta, no u suvremenom poslovnom svijetu koji se brzo mijenja često se nadopunjuje naprednijim i fleksibilnijim metodama i analitičkim alatima.

DRP (Planiranje distribucijskih potreba, engl. *Distribution Requirements Planning*) – koordinira potražnju s razinama zaliha na različitim lokacijama. To je jedna od metoda optimiziranja upravljanja isporukama finalnih proizvoda u distribucijsku mrežu i koristi se za planiranje razine i lokacije skladištenja zaliha kroz opskrbni lanac. Svrha korištenja metode planiranja distribucijske potražnje je smanjenje zaliha u distribucijskoj mreži (Nugroho, 2019). Na razini prodajnih mjesta, zbog rizika od fluktuacije potražnje, za svaki proizvod u svakom od njih kreira se sigurnosna zaliha, izračunata pomoću formula iz klasične teorije upravljanja zalihama (Magdalena i Suli, 2019).

Planiranje potražnje počinje na najnižoj razini (npr. na maloprodajnom mjestu) i završava na najvišoj razini (npr. u tvorničkom skladištu). Potrebe na nižoj razini su ulazni podaci za sljedeću razinu. Potražnja s najviše razine može se koristiti kao ulazni podatak za rad na rasporedu proizvodnje (Fertsch, 2006). Potražnja iz distribucijskih centara koristi se za izradu rasporeda potražnje zaliha i prosljeđuje se u proizvodnju. Nakon usporedbe s prethodnim predviđanjima, razvija se proizvodni plan, materijalni zahtjevi i distribucija s rasporedom isporuke pojedinačnim distribucijskim centrima (Ngatilah i dr., 2020). Zahvaljujući DRP-u, određuje se razina usluge za karike opskrbnog lanca koje imaju izravan kontakt s kupcem (veličina serije, dostupnost zaliha, rokovi isporuke) (Fechner, 2007).

DRP sustav omogućuje procjenu rasporeda isporuke za svaku jedinicu zaliha (SKU) do prodajnih mjesta i pri tome zahtijeva posjedovanje sljedećih informacija (Mukhsin i Sobirin, 2022):

- struktura distribucijskog kanala kroz koji teče SKU,
- predviđanje potražnje za pojedinačnim SKU-ovima na razini prodajnog mjesta,
- trenutačnu razinu zaliha (zalihe u ruci) danog SKU-a,
- ciljna razina sigurnosnih zaliha,
- iznos preporučenog nadopunjavanja,
- vrijeme dostave za nadopunjavanje.



DRP algoritam (Ngatilah i dr, 2020):

1. Netiranje – projicirana on-hand zaliha (zaliha u ruci). Može se izračunati pomoću donje formule:

$$\text{Projecirano u blagajni}_{(t)} = (\text{u ruci}_{(t-1)} + \text{Planirani primitak}_{(t)} + \text{Planirani primitak narudžbe}_{(t)} - \text{Bruto potreba}_{(t)})$$

Neto zahtjev može se izračunati pomoću formule ispod:

$$\text{Neto potrebe}_{(t)} = (\text{Bruto potrebe}_{(t)} + \text{Sigurnosne zalihe}) - (\text{Planirani primitak}_{(t)} + \text{Projecirana blagajna}_{(t-1)})$$

2. Lotiranje je postupak za pronalaženje veličine narudžbe ili proizvodne serije u svakoj mrežnoj distribuciji. Postoji nekoliko metoda lotiranja. Lotiranje u DRP-u prikazano planiranim primitkom narudžbe (engl. *Plan Order Receipt* - Porec). Planirani primitak narudžbe (Porec) je neto potreba koja je prilagođena prema veličini narudžbe ili proizvodnji.

3. Kompenzacija je količina narudžbe koja se planira naručiti u planiranom vremenskom razdoblju. Kompenzacija u DRP-u predstavljen planiranim izdavanjem narudžbe (engl. *Plan Order Release*, Porel). Porel je Porec koji je prilagođen u skladu s nalogom za vrijeme dostave ili proizvodnji.

4. Eksplozija – ukupni trošak zaliha i distribucije može se dobiti koristeći donju formulu:

$$\text{Ukupni trošak zaliha i distribucije} = \text{trošak naručivanja} + \text{trošak držanja zaliha} + \text{trošak isporuke}$$

DRP model posebno je koristan u velikim, složenim organizacijama gdje je upravljanje protokom proizvoda kroz distribucijsku mrežu ključno za operativnu učinkovitost i zadovoljstvo kupaca. Snage DRP modela uključuju:

- poboljšana koordinacija u opskrbnom lancu kroz bolji protok informacija i robe od proizvođača do potrošača, što dovodi do učinkovitije distribucije,



- povećana točnost predviđanja, budući da uzima u obzir stvarne podatke o narudžbi i razine zaliha u cijelom lancu, što pomaže optimizirati razine zaliha i smanjiti troškove,
- poboljšana dostupnost proizvoda osiguravanjem da su zalihe smještene tamo gdje su najpotrebnije, čime se smanjuje rizik od nestašica i prekida proizvodnje.

Slabosti DRP modela povezane su sa sljedećim elementima:

- složenost implementacije, posebno u velikim organizacijama s razgranatim opskrbnim lancima, što zahtijeva precizno planiranje i koordinaciju,
- visoki početni troškovi vezani uz kupnju softvera, hardvera i obuku zaposlenika,
- ovisnost o točnosti i pravodobnosti ulaznih podataka, netočnosti u podacima mogu dovesti do pogrešaka u predviđanju i planiranju, što u konačnici može uzrokovati prekomjerne ili nedovoljne zalihe.

Unatoč svojim prednostima, DRP model zahtijeva precizno izvršenje i kontinuirano upravljanje kako bi se učinkovito poduprle operativne odluke unutar opskrbnog lanca.

EOQ (Ekonomična količina narudžbe, engl. *Economic Order Quantity*) je matematički model koji se koristi za određivanje optimalne količine narudžbe koja minimizira ukupne troškove povezane s naručivanjem i držanjem zaliha. Ova je metoda idealna za proizvode sa stabilnom i predvidljivom potražnjom. Metoda donosi sljedeće pretpostavke (Battani i dr., 2015):

- mjesečna ili godišnja potražnja za naručenim proizvodom je poznata i predvidljiva,
- proizvod se isporučuje vrlo brzo nakon narudžbe,
- trošak narudžbe jedinice je fiksni.

Wilsonova formula koristi se za izračun ekonomske količine narudžbe (Krzyżaniak, 2005; Muckstadt, 2010).



Formula za izračun EOQ:

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

gdje:

D – očekivana potražnja u dužem vremenskom razdoblju,

C_s – trošak naručivanja – kupnja jedne serije, neovisno o njezinoj veličini,

C_K – trošak držanja jedne jedinice određenog proizvoda na zalihama tijekom određenog vremenskog razdoblja, najčešće definiran kao određeni dio nabavne cijene, pa stoga:

$$C_K = \mu_o \times P$$

P – nabavna cijena,

μ_o – postotak troška održavanja u nabavnoj cijeni.



Formula koja se koristi u Excelu:

$$EOQ = SQRT((2 * [očekivana potražnja] * [trošak naručivanja]) / [trošak čuvanja jedne jedinice])$$

EOQ model posebno je koristan u upravljanju zalihama za standardne proizvode sa stabilnom potražnjom. To je analitički alat koji pomaže u donošenju odluka o količinama narudžbi, ali zahtijeva točne podatke o troškovima i potražnji. Snage EOQ modela su:

- minimiziranje ukupnih troškova – EOQ identificira količinu narudžbe koja optimizira ravnotežu između troškova narudžbe i troškova skladištenja, s ciljem minimiziranja ukupnih troškova povezanih sa zalihama,
- povećana operativna učinkovitost – uspostavljanjem optimalnog rasporeda narudžbi, EOQ model omogućuje bolje planiranje i upravljanje resursima, što se prevodi u glađe operacije i manju vjerojatnost prekida proizvodnje uzrokovanih nedostatkom ili viškom zaliha,



- pojednostavljenje procesa donošenja odluka u upravljanju zalihama – EOQ daje jasne smjernice o tome kada i koliko naručiti, što pomaže u standardizaciji procesa nabave i može smanjiti potrebu za kontinuiranim praćenjem i donošenjem odluka u vezi s razinama zaliha.

Međutim, EOQ model zahtijeva usvajanje određenih pretpostavki koje su povezane sa sljedećim nedostacima:

- pretpostavka potrebe za stalnom potražnjom – EOQ pretpostavlja da je potražnja za proizvodom konstantna i predvidljiva u svakom trenutku; u stvarnosti, potražnja je često promjenjiva i pod utjecajem sezonalnosti, tržišnih trendova, konkurentskih radnji i drugih vanjskih čimbenika, koji točnu primjenu EOQ modela mogu učiniti izazovnom u dinamičnim tržišnim uvjetima,
- potreba za pretpostavkom fiksnih troškova naručivanja i držanja – u praksi ti troškovi mogu varirati na temelju mnogih čimbenika, kao što su promjene u cijenama materijala, troškovi transporta, cijene najma skladišta, promjene stope rada ili inflacija,
- nedostatak fleksibilnosti u odgovoru na promjene – EOQ model generira fiksni broj narudžbi za određeno razdoblje i ne predviđa automatske prilagodbe tržišnim ili operativnim uvjetima koji se brzo mijenjaju; to znači da je potrebno ručno pregledati i prilagoditi EOQ narudžbe kako bi se izbjeglo prekomjerno nakupljanje zaliha ili rizik od zaliha, što može biti dugotrajno i komplicirano.

S obzirom na ta ograničenja, mnoge tvrtke koriste EOQ model kao početnu točku ili preliminaru smjernicu, dok prilagođavaju svoje strategije upravljanja zalihama kako bi se prilagodile dinamici tržišta i operativnim specifičnostima.

3.5. Korištenje alata Solver u rješavanju optimizacijskih problema

Solver je dodatak za Microsoft Excel koji se koristi za naprednu analizu i rješavanje optimizacijskih problema. Korisnicima omogućuje definiranje višestrukih varijabli odlučivanja,



ograničenja i ciljeva, a zatim koristi različite matematičke metode za pronalaženje optimalnih rješenja (vidi poglavlje Uvod u analizu proračunskih tablica). Posebno je koristan u situacijama koje zahtijevaju složene proračune, kao što je planiranje logističkog puta, raspodjela resursa ili optimizacija proračuna (Bomba i Kwiecień, 2012; Mason, 2013).

Solver se koristi za rješavanje jednokriterijskih zadataka optimizacije gdje broj varijabli odluke ne prelazi 200. Njegova primjena zahtijeva izradu matematičkog modela unutar radnog prostora proračunske tablice. Optimizacijski model sastoji se od tri elementa (Baj-Rogowska, 2013; Mason, 2012):

- ciljne ćelije (ciljna funkcija) – to su ćelije u modelu proračunske tablice koje, kada se primijeni Solver, trebaju minimizirati, maksimizirati ili postaviti na određenu vrijednost realnog broja,
- varijabilne ćelije (varijable odluke) – to su ćelije koje sadrže tražene vrijednosti, koje se dodatkom Solver iterativno mijenjaju i supstituiraju u funkciju cilja dok se ne pronađe optimalno rješenje,
- ćelije ograničenja (mogu se primijeniti na vrijednost ćelije cilja i ćelija varijable) – uvedeni uvjeti ograničenja u obliku formula unutar ćelija proračunske tablice, gdje vrijednost mora biti unutar zadanih granica ili doseći ciljane vrijednosti.

Solver u Excelu koristi različite metode optimizacije kako bi pronašao najbolja rješenja za definirane probleme. Svaka metoda ima svoje specifične primjene i odabire se na temelju prirode problema optimizacije. Solver omogućuje korisniku odabir odgovarajuće metode ovisno o karakteristikama problema koji se rješava. Glavne metode uključuju (Baj-Rogowska, 2013; Delgado-Aguilar i dr., 2018):

- Simpleksna metoda (Simplex LP) – ovo je najčešće korištena metoda za rješavanje problema linearnog programiranja (LP); učinkovit je u situacijama gdje su funkcija cilja i sva ograničenja linearna,
- GRG metoda (Generalizirani smanjeni gradijent) – to je napredna metoda koja se koristi za rješavanje nelinearnih problema; osobito je korisna kada su ciljane funkcija ili ograničenja nelinearni, ali još uvijek kontinuirani i diferencijabilni,



- Evolucijska metoda – koristi se za rješavanje problema globalne optimizacije, posebno kada je ciljna funkcija složena, nelinearna i diskontinuirana; evolucijska metoda koristi tehnike slične genetskim algoritmima, istražujući različita moguća rješenja kako bi pronašla najbolje,
- Cjelobrojna ograničenja– Solver se može koristiti za rješavanje problema u kojima neke ili sve varijable odluke moraju imati cjelobrojne vrijednosti; ovo je korisno u situacijama kada rješenja zahtijevaju diskretne vrijednosti, kao što je broj jedinica za proizvodnju ili broj zaposlenika za zapošljavanje.

Solver u optimizaciji opskrbnog lanca doprinosi kada postoji potreba za optimizacijom složenih problema, kao što je minimiziranje troškova transporta, optimiziranje planiranja rute isporuke ili upravljanje zalihama. Posebno je koristan u situacijama koje zahtijevaju analizu višestrukih varijabli i ograničenja, gdje tradicionalne metode mogu biti nedostatne ili oduzimati previše vremena.

3.6. Optimiziranje korištenja skladišnog prostora – primjer korištenja alata Solver

Sadržaj zadatka

Tvrtka Alfa ima skladište ukupne površine 10.000 m², koje mora primiti tri vrste proizvoda: A, B i C. Svaki od ovih proizvoda ima različite zahtjeve za skladišnim prostorom, ima svoju specifičnu sigurnosnu zaliha i generira različitu dobit po jedinici proizvoda:

- proizvod A: zahtijeva 14 m² po jedinici, sigurnosna zaliha je 40 kom., stvara profit od 30 eura,
- proizvod B: zahtijeva 12 m² po jedinici, sigurnosna zaliha je 60 kom., stvara profit od 32 eura,
- proizvod C: zahtijeva 18 m² po jedinici, sigurnosna zaliha je 90 kom., stvara profit od 23 eura.



Proizvodi A, B i C idu na tržišta X, Y i Z. Ukupna potražnja za svim proizvodima na tržištima je:

- tržište X: 220 kom.,
- tržište Y: 230 kom.,
- tržište X: 332 kom.

Koliko jedinica svakog proizvoda treba držati u skladištu da bi se maksimizirao ukupni profit od korištenog skladišnog prostora bez prekoračenja ukupnog raspoloživog skladišnog prostora, pod pretpostavkom da Alfa zadovoljava svu potražnju?

Riješenje:

Ciljna funkcija: maksimiziranje ukupne dobiti od proizvoda.

Ograničenje: veličina skladišnog prostora, skladišni prostor za jedinicu proizvoda, obujam tržišne potražnje.



- [1] priprema podatkovnog lista,
- [2] definiranje varijabli odlučivanja,
- [3] izračun pomoćnih varijabli,
- [4] određivanje funkcije cilja,
- [5] konfiguriranje Solvera,
- [6] indikacija metode optimizacije,
- [7] pokrenite Solver,
- [8] ocjena dobivenog rješenja.



Primjer u Excelu:

- [1] Pripremiti i popuniti tablicu s ulaznim podacima iz zadatka: sigurnosna zaliha za svaki proizvod, jedinični skladišni prostor, jedinična dobit, potražnja na svakom tržištu, ukupni skladišni 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] Definirajte varijable odluke – broj proizvoda svake vrste na skladištu

		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] Izračunajte pomoćne varijable

- **Broj jedinica na skladištu: = SUM([raspon ćelija za svako tržište i pojedinačni proizvod])**
- **Zauzet skladišni prostor: = [Jedinica površine Skladište] * [Broj jedinica na skladištu]**
- **Dobit za x jedinica: = [Broj jedinica na skladištu] * [Jedinična dobit]**
- **Ostvarena potražnja: = SUM([raspon ćelija za svako tržište])**
- **Zbroj skladišnog prostora: = SUM([Zauzet skladišni 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] Odredite ciljnu funkciju - maksimiziranje dobiti od prodaje proizvoda

Ciljna funkcija: **=SUM([Dobit za x jedinica])**

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

[5] Konfigurirajte Solver

Postavite cilj – ćelija s funkcijom cilja i maksimizacijom funkcije cilja

Set Objective:

To: ☒ Max ☐ Min ☐ Value Of:

Označite ćelije čije vrijednosti želite postaviti – broj proizvoda svake vrste na skladištu

By Changing Variable Cells:

Dodajte ograničenja:

- zauzeti skladišni prostor = maksimalni skladišni prostor

Cell Reference: Constraint:

- ostvarena potražnja na tržištu X <= potražnja na tržištu X



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

Add Constraint

Cell Reference: Constraint:

OK Add Cancel

- ostvarena potražnja na tržištu Y $\leq$ potražnja na tržištu Y
- ostvarena potražnja na tržištu Z $\leq$ potražnja na tržištu Z
- broj jedinica proizvoda A na zalihi $\geq$ sigurnosna zaliha za proizvod A

Safety stock	Unit warehouse space	Profit individual	Number of units in a warehouse
40	14	30	0

Add Constraint

Cell Reference: Constraint:

OK Add Cancel

- broj jedinica proizvoda B na zalihi $\geq$ sigurnosna zaliha za proizvod B
- broj jedinica proizvoda C na zalihi $\geq$ sigurnosna zaliha za proizvod C

[6] Navedite metodu optimizacije – npr. LP Simplex

Select a Solving Method:

[7] Pokreni Solver – pritisnite gumb Rješavanje

[8] Procijenite rješenje koje ste dobili



		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
--------------------------------------	-------

PITANJA POGLAVLJA

1. Kako dodatak Solver u Microsoft Excelu može podržati procese donošenja odluka u poduzeću?
2. Kako odabir odgovarajuće metode optimizacije utječe na rezultate analize?

LITERATURA

Antoniuk, I., Svitek, R., Krajčovič, M., i 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., i Sgarbossa, F. (2014). A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications. *International Journal of Production Economics*, 149, 145-153.

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

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

Delgado-Aguilar, M., Valverde-Som, L., i 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., i 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 i Sons Ltd.
- Gu, J., Goetschalckx, M., i 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., i 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., i Jackson, P.L. (1996). The warehouse scheduling problem: Formulation and algorithms. IIE Transactions 28, 115-127.
- Jayarathna, C. P., Agdas, D., Dawes, L., i Yigitcanlar, T. (2021). Multi-objective optimization for sustainable supply chain and logistics: A review. Sustainability, 13(24), 13617.
- Kisielewski, P., i 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., i Oprocha, P. (2021). Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Magdalena, R., i 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., i Gosse, J. (2014). Inventory management maximization based on sales forecast: case study. *Production Planning i 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., i Sapra, A. (2010). EOQ model. *Principles of Inventory Management: When You Are down to Four, Order More*, 17-45.

Mukhsin, M., i 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., 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., Elianto, M.S.D., i Nurcahyo, Y.E. (2019). Planning and Implementation Enterprise 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., i 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., i 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*.